

# 画像のブロック符号化における 適応形雑音除去フィルタの特性

井澤裕司\*

## The characteristics of adaptive noise filters for block image coding

Yuuji IZAWA

One of the basic problems of block image coding is the "blocking effect" generated at low bit rates. This paper presents the characteristics of adaptive noise filters which reduce the blocking effect preserving transmitted spatial frequency components.

### 1. まえがき

画像の効率的な伝送や蓄積を実現する符号化方式として、離散コサイン変換(DCT)を用いたブロック符号化がある<sup>1)2)3)4)</sup>。この方式は、サンプリングした画像をブロックに分割し、一種の空間周波数に相当する係数に変換する手法である<sup>1)2)3)</sup>。ブロック符号化は比較的優れた符号化効率を示すが、高い圧縮率でいわゆる"ブロックひずみ"と称する固有の雑音を発生させ易い。一種の規則性を有するこの雑音は、一般のランダム雑音に比べ知覚されやすく、画質劣化の最大の要因となっている。このため、受信(復号)側に後処理フィルタを設け、再生画像のひずみ成分を除去する試みが行われている<sup>5)6)7)8)</sup>。

しかし、従来の手法では伝送(圧縮)された周波数成分が必ずしも表示されるとは限らず、空間解像度が犠牲となる場合があった。このため筆者らは、DCTの変換係数と空間周波数の関係を解析し、解像度を保存しながら、ブロックひずみを選択的に除去するフィルタの構成法について検討を重ねてきた<sup>9)10)11)</sup>。本稿では、それらの方式の概要と、フィルタ処理のパラメータを最適化した場合の画質改善効果を中心に報告する。

### 2. DCTと空間周波数

はじめに伝送されるDCT係数と、これに対応する空間周波数の関係について整理する。

---

\* 情報工学科 講師

## 2.1 DCTの定義

原画像を  $[D]$  , 変換係数を  $[C]$  とすると, DCTの変換と逆変換は次のように表される.

$$[C] = [T] \cdot [D] \cdot {}^t [T] \quad (1)$$

$$[D] = {}^t [T] \cdot [C] \cdot [T] \quad (2)$$

$[C]$ ,  $[D]$ ,  $[T]$  は,  $n$  行  $n$  列 ( $n \times n$ ) のマトリクスであり, 変換行列  $[T]$  の要素  $T_{ij}$  ( $i$  行  $j$  列) は次のようになる. (ただし  $i, j = 1, 2, \dots, n$ )

$$T_{ij} = \sqrt{\frac{2}{n}} \cdot K_i \cdot \cos[(i-1)(j-\frac{1}{2})\pi/n] \quad (3)$$

$$i=1 \text{ のとき } K_i = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad i \neq 1 \text{ のとき } K_i = 1$$

ここで  $[T]^{-1} = {}^t [T]$  が成立し, 実ユニタリ行列となる.

## 2.2 空間周波数スペクトル

2次元信号  $[G]$  を2次元DFTすると, 空間周波数スペクトル  $[C^*]$  が得られる.

$$[C^*] = [W] \cdot [G] \cdot {}^t [W] \quad (4)$$

$[G]$ ,  $[C^*]$ ,  $[W]$  は  $N \times N$  のマトリクスであり,  $[W]$  の要素  $W_{ij}$  ( $i$  行  $j$  列) は次式で表される. (ただし  $i, j = 1, 2, \dots, N$   $j^2 = -1$ )

$$W_{ij} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \exp[j 2\pi (i-1)(j-\frac{1}{2})/N] \quad (5)$$

ここで,  $[W]^{-1} = {}^t [\bar{W}]$  ( $\bar{W}$ :  $W$  の共役複素行列) が成立し, ユニタリ行列となる (別定義もある). このとき, 逆変換は次のようになる.

$$[G] = [W]^{-1} \cdot [C^*] \cdot \{{}^t [W]\}^{-1} = {}^t [\bar{W}] \cdot [C^*] \cdot [\bar{W}] \quad (6)$$

空間周波数スペクトル  $[C^*]$  の要素  $C_{ij}^*$  ( $i$  行  $j$  列) は, 水平方向 ( $j-1$ ) 次, 垂直方向 ( $i-1$ ) 次の周波数成分である<sup>3)</sup>. ここで,  $[W]$  の実部を  $[F]$ , 虚部を  $[S]$  とおくと, 式 (4) は次のようになる.

$$[C^*] = [F] \cdot [G] \cdot {}^t [F] - [S] \cdot [G] \cdot {}^t [S] + j \{ [F] \cdot [G] \cdot {}^t [S] + [S] \cdot [G] \cdot {}^t [F] \} \quad (7)$$

DFTの定義域をDCTの倍 ( $N = 2n$ ) に設定し,  $[F]$  の低次の ( $n \times n$ ) 項と  $[T]$  を比較する. ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) として次式が成立する.

$$T_{ij} = 2 \cdot K_i \cdot F_{ij} \quad (8)$$

すなわち、基底のノルムについて相違はあるが、本質的に同じ基底で構成されている。

一般に量子化されたDCTの係数は、Fig.1に示すように空間周波数の低い方から高い方へと伝送される。DCT係数の絶対値は、高次ほど小さくなる傾向がある。したがって、量子化後の直流から最高次の非零の係数までが、伝送された有効な係数と考えられる。次に、これらの係数に対応する空間周波数成分を保存するフィルタについて検討する。

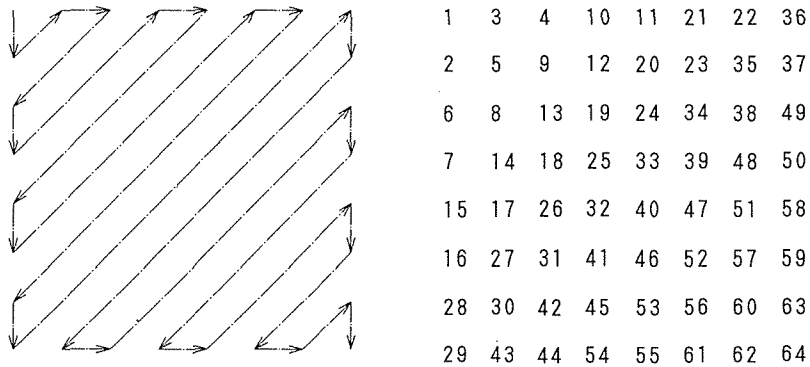


Fig.1 Zigzag scan of DCT coefficients  $C_{ij}$  ( $n=8$ )

### 3. 適応フィルタの構成法

本章では、適応フィルタの具体的構成法について述べる。

#### 3.1 フィルタ構成法

##### 3.1.1 手順

各ブロックに対する基本的な手順を以下に示す。

- (1) 2次元ウィンドウを用いて、ブロックを包含する画像を切り出す。
- (2) 伝送されたDCT係数から表示すべき空間周波数を求め、この帯域を保存するフィルタを適用する。
- (3) (2)の結果をブロック毎に加算して、処理画像とする。

なお、この方式はフィルタ・バンクの一手法である Weighted overlap-add method<sup>12)13)14)</sup>を2次元に拡張したものである。すなわち、2次元の Analysis window を用いてブロックを包含する画像を切り出し、伝送された周波数帯域を保存するフィルタを適用した後、処理結果を加算して表示画像とする手法である。ここで、(1)は Analysis window、(3)は Synthesis

window (rectangular) に対応する. これらのフィルタ構成を Fig.2 に示す.

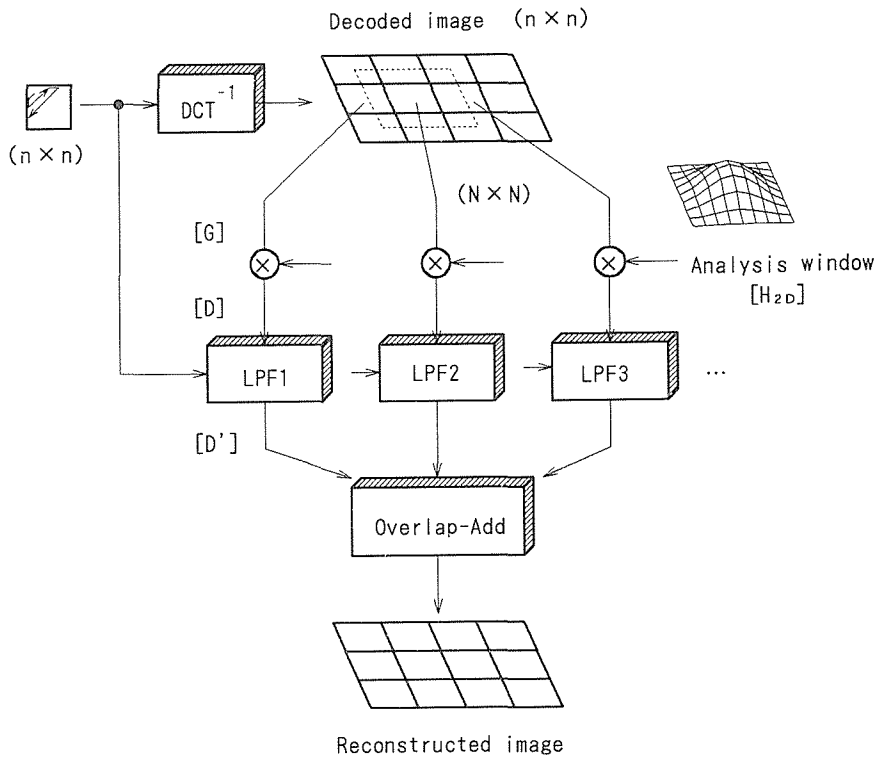


Fig.2 Structure of the adaptive noise filter

### 3.1.2 2次元ウィンドウ関数

画像を切り出す2次元ウィンドウは,以下の性質をもつ.

(1) 滑らかな形状をもち,ブロック中央における値は1,両端で0となる.

(2) 本関数をブロック毎に加算したとき,各画素の値がすべて1となる.

(1)は次に行う帯域制限のための,(2)は帯域制限しない場合に,原画がそのまま再生されるための条件である.以上の条件をもつ関数として,2次元に拡張したHanningのウィンドウがある.  $(i, j = 1, 2, \dots, N)$

$$H_{2D}(i, j) = \frac{1}{4} \cdot [1 + \cos\{2\pi(i - \frac{N+1}{2})/N\}] \cdot [1 + \cos\{2\pi(j - \frac{N+1}{2})/N\}] \quad (9)$$

Fig.3 に示すように、このウィンドウはブロックに対し縦横 2 倍の大きさとなる。(ただし  $N = 16$  の例である.)

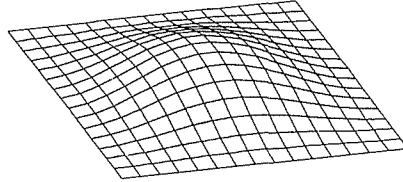


Fig.3 2-dimensional Hanning window ( $N = 16$ )

ここで、 $N \times N$  画素からなる原画  $[G]$  と、ウィンドウを用いて切り出した画像  $[D]$  について、次式が成立する。

$$[D] = [H_{1D}] \cdot [G] \cdot [H_{1D}] \quad (10)$$

$$[H_{1D}] = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_N \end{pmatrix} \quad (11)$$

ただし、( $i = 1, 2, \dots, N$ ) として

$$a_i = \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos\{2 \pi (i - \frac{N+1}{2})/N\}] \quad (12)$$

### 3.2 適応フィルタ処理

帯域制限を行うフィルタ処理には、次の 2 つの手法が考えられる。

(a) 切り出した画像を D C T し、変換係数領域で帯域制限した後、逆 D C T を行う。

(b) 伝送帯域を通過域とする 2 次元フィルタのインパルス応答を求め、切り出した画像との線状畳み込みにより計算する。

一般には (a) と (b) の処理結果は等しくない。しかし、ウィンドウを用いた場合、画像の端の影響が抑えられるため、その差は小さい<sup>14)</sup>。また (b) の畳み込みの手法では、急峻な特性を実現する場合のカーネルのサイズが大きくなり、演算量が増加するという欠点がある。このため、本検討では D C T による (a) の手法を使用した。

### 3.3 DCTによる帯域制限

DCTを用いた帯域制限の手順を以下に示す。

- (1) ウィンドウにより切り出した画像  $[D]$  をDCTし、係数  $[C]$  を求める。
  - (2)  $[C]$  の各係数に対し、通過域と阻止域を設定して、 $[C']$  とする。
  - (3) (2) の結果を逆DCTして処理画像  $[D']$  とする。
- なお、(1),(3) に対する処理は次式で表わされる。

$$[C] = [T] \cdot [D] \cdot {}^t [T] \quad (13)$$

$$[D'] = {}^t [T] \cdot [C'] \cdot [T] \quad (14)$$

ここで、 $[C']$  は  $[C]$  を帯域制限したマトリクスである。

次に、(2) の通過域と阻止域について Fig.4 を用いて補足する。この場合、伝送されたDCTの最高次数に対し、水平・垂直ともに2倍し、さらに2係数分拡張した3角形の領域を通過域とし、それ以外を阻止域に設定する ( $n \times n$  のDCTと、 $2n \times 2n$  のDCTの間で、絶対的な空間周波数に対する補正 [1 : 2] が必要となる。)

通過域の2係数分のシフトは、次の関係より明らかである。

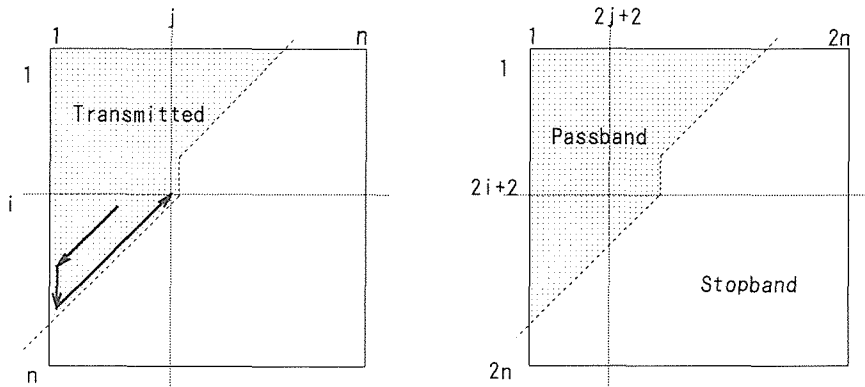
$${}^t c = {}^t g \cdot [H_{1D}] \cdot {}^t [T] = \frac{1}{2} \cdot {}^t g \cdot {}^t [T] - \frac{1}{4} \cdot {}^t g \cdot {}^t [T^+] - \frac{1}{4} \cdot {}^t g \cdot {}^t [T^-] \quad (15)$$

ただし ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ) として

$$T_{ij} = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot K_i \cdot \cos[(i-1)(j-\frac{1}{2}) \pi / N]$$

$$T_{ij}^+ = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot K_i \cdot \cos[(i+1)(j-\frac{1}{2}) \pi / N]$$

$$T_{ij}^- = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot K_i \cdot \cos[(i-3)(j-\frac{1}{2}) \pi / N]$$



(a) Transmitted DCT coefficients

(b) Passband and stopband

Fig.4 Passband specification for DCT method

### 3.4 近似手法

DCTを用いた帯域制限を、水平・垂直の分離形で近似することにより、演算量を低減する手法について述べる。

Fig.4(b) に示した三角領域を通過域とし、それ以外の部分を阻止域とする処理を、水平及び垂直の分離形で表わすことはできない。しかし、ある程度の誤差を許容すれば、近似することができる。

水平及び垂直の帯域制限を行うマトリクスを  $[R]$  として、次式が成立する。

$$[C'] = [R] \cdot [C] \cdot [R] \quad (16)$$

$$[R] = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & r_N \end{pmatrix} \quad (17)$$

1次元の通過域と阻止域の間を線形補間した場合の要素  $r_k (k = 1, 2, \dots, N)$  を次に示す。ただし, Fig.4(a) のように  $i, j$  を伝送されたDCT係数の最高次数とする。

$$r_k = \begin{cases} 1 & (1 < v) \\ v & (0 \leq v \leq 1) \\ 0 & (v < 0) \end{cases} \quad (18)$$

$$v = 1 - \alpha [k - \beta (i + j) - \gamma] \quad (19)$$

なお、3つのパラメータ  $(\alpha, \beta, \gamma)$  は、標準的な画像を用いて処理画像のSN比が最大となるよう設定した。

このとき、次式が成立する。

$$[D'] = {}^t [T] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [H_{1D}] \cdot [G] \cdot [H_{1D}] \cdot {}^t [T] \cdot [R] \cdot [T] = \{ {}^t [T] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [H_{1D}] \} \cdot [G] \cdot \{ {}^t [T] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [H_{1D}] \} \quad (20)$$

ここで、 $\{ \}$  の値をあらかじめ求めておくことにより、演算量の低減と高速化を図ることができる。Fig.5 に  $N = 16, i = j = 6$  における近似の程度を示す。なお、ウィンドウの両端における値を0とすることにより、帯域制限に用いる画素数を減らすことができる。すなわち、次式で  $a'_1 = a'_N = 0$  となるウィンドウを用いる。

$$a'_i = \frac{1}{2} - p \cdot \cos \left\{ 2 \pi \left( i - \frac{N+1}{2} \right) / N \right\} \quad (21)$$

ただし,  $p = [2 \cdot \cos\{\pi \frac{N-1}{N}\}]^{-1}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )

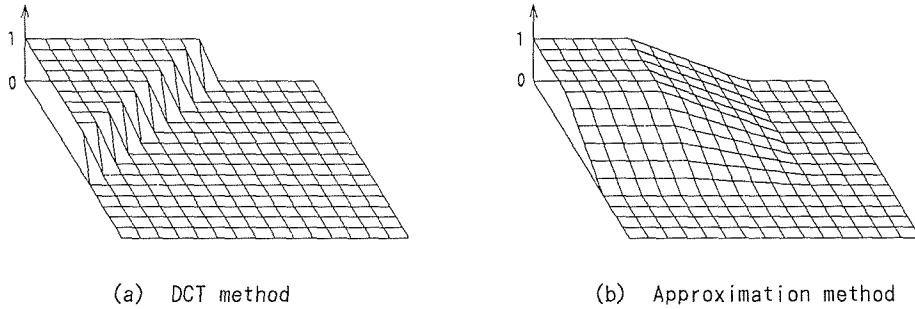


Fig.5 Approximation of passband specification ( $N = 16$ )

## 4. シミュレーションによる評価

### 4.1 画質評価

適応フィルタの画質を標準画像 (SIDBA, Girl 及び Couple) を用いて評価した. 解像度は縦横  $256 \times 256$  画素, 8 bit (256 階調) である. なお, ブロックひずみを含む原画 (処理前) は, ステップサイズを 64 とする線形量子化により生成した. シミュレーション結果を図 6 に示す. (a) は原画 (処理前), (b) は DCT による帯域制限, (c) は近似手法の処理画像である. いずれもひずみ成分が大幅に低減されており, 解像度的にも十分な画質が得られている. また (b) と (c) の比較から明らかなように, 近似による解像度の低下はほとんど認められない.

### 4.2 パワースペクトル

処理前後の差分信号 [Fig.6 の (a) と (b), (c) の差] の 2 次元パワースペクトルを Fig.7 に示す. これらは, 中央付近の  $64 \times 64$  画素について, Hanning のウィンドウをかけて求めた. Fig.7(a), (b) における 8 係数周期の成分がブロックひずみである. DCT の手法では, 画像成分の漏れ込みは小さく, ひずみ成分が選択的に除去されていることがわかる. なお, 参考までに一定の特性のフィルタ (水平・垂直とも  $1/4, 1/2, 1/4$  のインパルス応答) を用いた結果を (c) に示す. 画像成分のスペクトルの一部がそのまま現れており, 解像度の低下につながっている.





(a) Before processing

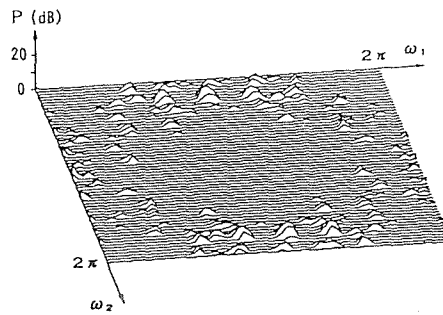


(b) DCT method

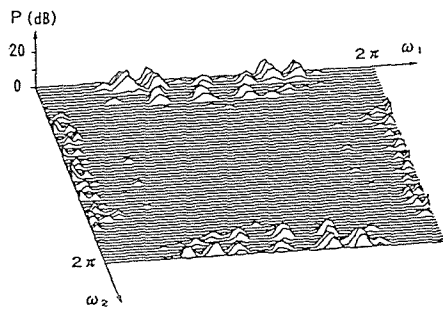


(c) Approximation method

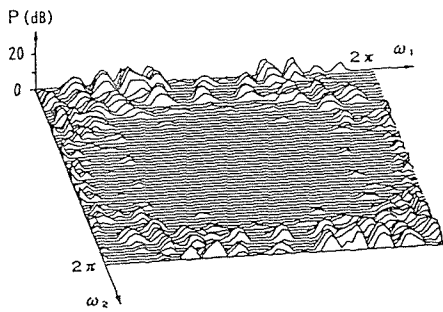
Fig.6 Picture quality (SIDBA Girl, 0.46 bit/pel)



(a) DCT method



(b) Approximation method



(c) Conventional low pass filter (Reference)

Fig.7 Power spectrum of picture frame difference

### 4.3 S N比

最も高いS N比が得られた近似手法の結果を Fig.8 に示す. 処理前の画像に比べ 0.4~1.2 dB 程度向上しており, レートが低いほど改善の効果が大きい. なお, 式 (19) に示したパラ

メータの最適値として、 $\alpha = 1.6$ ,  $\beta = 2.1$ ,  $\gamma = 2.1$  が得られたが、これらの係数感度は低く、実用的にも十分な結果となっている。

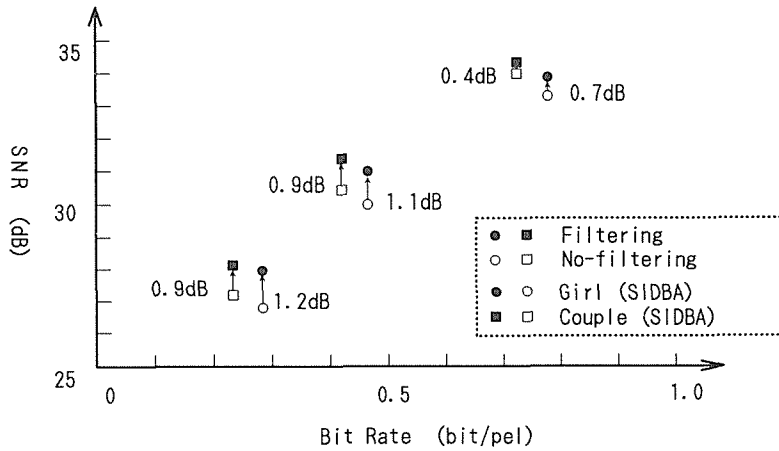


Fig.8 Improvement of SN ratio for approximation method

#### 4.4 演算量の比較

1画素あたりの乗算数を整理すると、Table.1 ようになる。近似手法では、従来の 1/3 以下に低減されている。

Table.1 Comparison of computational complexities

手法	乗算数 (画素当り)	数値例 (n=8)
DCT	$32n + 2$	258
近似手法	$\frac{16(n-1)^3}{n^2}$	85.75

### 5. 結論

DCT係数と空間周波数スペクトルの関係に基づき、伝送された周波数成分を保存する適応形雑音除去フィルタの特性を評価した。画像を切り出す Analysis window に 2次元 Hanning 関数を用い、DCTによる帯域制限の演算量を 1/3 以下に低減する近似手法について検討した。標準画像を用いて画質と 2次元パワースペクトルを比較し、ブロックひずみを効率的に除去できることを確認した。本手法による SN比の改善は、0.4~1.2 dB である。本検討では静止画を対象としたが、今後の課題として、動画（フレーム間符号化）への適用が挙げられる。

## 参考文献

- 1) N.Ahmed,T.Natarajan,K.R.Rao,"Discrete cosine transform",IEEE Trans. Comput., C-23, pp.90-93,(Jan.1974)
- 2) J.Makhoul:"A fast cosine transform in one and two dimensions",IEEE Trans. Acoust.,Speech & Signal Process.,ASSP-28,pp.27-34,(Feb.1980)
- 3) 井澤裕司, 滝沢正明:"離散コサイン変換(DCT)に関する一考察",信学論(B), J71-B,pp.1194-1195 (昭63-10) .
- 4) 相澤清晴, 原島博, 宮川洋:"画像信号の適応的離散コサイン変換ベクトル量子化",信学論(B).J69-B,pp.228-236 (昭61-03) .
- 5) 大木淳一, 中野吉孝, 望月孝志, 矢野光治:"低ビットレート動画像符号化用動き適応型後処理フィルター",信学秋全大 D-49 (昭63)
- 6) 松崎一博, 伊藤敦, 村上篤道:"ブロック単位の適応処理を用いた雑音除去フィルター",信学春全大 D-119 (昭63)
- 7) 松本修一, 斉藤雅弘:"符号化雑音除去用ポストフィルターの検討",信学秋全大 D-48 (昭63)
- 8) H.Malvar, D.Staelin, et al: "Reduction of blocking effects in image coding with a lapped orthogonal transform",IEEE Proc. of ICCASSP'88,pp.781-784, (Apr. 1988)
- 9) 井澤裕司, 渡辺浩巳, 滝沢正明:"画像符号化における帯域保存ブロック歪除去フィルター",Picture Coding Symp. Japan, 89, 4-4 (1989)
- 10) 井澤裕司:"画像のブロック符号化における帯域保存ポストフィルター",信学論(B-1).J73-B-I,pp.707-715 (1991)
- 11) Y.Izawa:"A study on a spatial frequency preserving post-filter for block image coding", Picture Coding Symp. 91, 6-3-1, pp.179-180 (Sep.1991)
- 12) J.B.Allen: "Short-time spectral analysis,synthesis and modification by discrete Fourier transform",IEEE Trans.Acoust.,Speech & Signal Process., ASSP-25,pp.235-238,(June 1977)
- 13) J.B.Allen, L.R.Rabiner: "A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis", Proc.IEEE, vol.65,pp.1558-1564,(Nov.1977)
- 14) R.E.Crochiere: "A weighted overlap-add method of short-time Fourier analysis/synthesis",IEEE Trans.Acoust.,Speech & Signal Process.,ASSP-28, pp.99-102,(Feb.1980)