

変換符号化された画像に対する任意の有理数倍率の解像度変換法

准 員 村松 正吾[†] 正 員 貴家 仁志[†]

Resolution Conversion Method with Arbitrary Rational Values
for Transform-Coded Images

Shogo MURAMATSU[†], Associate Member and Hitoshi KIYA[†], Member

あらまし デジタル画像データの通信や蓄積の分野において、直交変換に基づく拡大・縮小処理が、その容易さと有効性から、画像の解像度変換への応用に期待されている。この解像度変換法は、もし順変換と逆変換の行列サイズを任意に選択可能ならば、その変換倍率を任意の有理数に選ぶことができる。しかしながら、国際規格等によって、符号化の際の変換サイズは決まっており、復号側において、変換倍率を任意に選ぶことが不可能となる。例えば変換サイズが N の場合、変換倍率は $1/N$ の整数倍に制限されてしまう。そこで本論文では、符号化の際の変換サイズが固定の場合においても、任意の有理数倍率の解像度変換を可能にする方法について提案する。提案法の基本原理は、従来法と間引き処理を組み合わせた構成であり、より一般的な形として位置づけることができる。また、フィルタバンクとマルチレートシステムに基づく考察により、提案法の効果的な構成を示す。この結果、任意の有理数倍率の変換においても、従来法と同程度の演算量で実行可能となる。また、DCT と LOT を使用したシミュレーションを行い、提案法の有効性を示し、DCT のもつ問題点を指摘する。

キーワード 画像信号処理, 解像度変換, 直交変換, フィルタバンク, マルチレートシステム

1. ま え が き

近年、デジタル通信の普及に伴い、画像データ通信の環境が整いつつある。特に、B-ISDN における ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網を利用した通信は、動画の伝送に大変な期待が寄せられている。また、CD-ROM など、大容量の蓄積メディアに対する期待も大きい⁽¹⁾。しかし、画像データの通信の際には伝送路を、また、蓄積の際には記録媒体を効率良く使用することが望まれる。このような背景の中で、直交変換に基づく変換符号化方式が有効な高能率符号化方式として発展してきた⁽²⁾。特に、DCT (Discrete Cosine Transform) は有効な符号化方式として知られ、各種の国際標準に採用されている^{(3),(4)}。

一方、端末として使用する受像機の表示機能(画素数)が、すべて等しいとは限らず、各受像機間の互換性を保つことが重要となる。また最近では、ウィンドウシステム上で、各ユーザが好みの解像度、あるいは好みサイズの画像を要求する場面も少なくない。このような状況から、各受像機での解像度、すなわち画素

数の変換技術が必要となる。変換符号化方式は、このような状況にも対応し得る符号化方式である。

解像度変換は本来、受像機側で復号化し、原画像に戻してから、零挿入、フィルタ処理、間引き処理を行わなければならない。しかし、この場合、原画像に戻すための処理と解像度変換処理が、独立に実行され、演算量が多くなるのと同時に、処理途中にバッファメモリが必要となる。そこで、送像機側において変換符号化方式を用い、受像機側において逆直交変換と同時に解像度変換を実行する方法が、盛んに研究されている⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾。

この直交変換に基づく解像度変換法は、もし符号化の際の直交変換の変換サイズと、復号化の際の逆変換サイズが自由に選択できれば、任意の有理数倍率で変換が可能である。しかしながら、実際は、符号化の際に変換サイズが固定されてしまうので、復号側における解像度の変換倍率が、制限を受けてしまう。例えば、JPEG (Joint Photographic Expert Group) や MPEG (Motion Picture Image Coding Experts Group) では変換符号化の際に 8 点 DCT を採用している。この場合、変換倍率が $1/8$ の整数倍に制限され、任意の有理数倍率の解像度変換を実行できない。この制約が、互換性を制限し、応用上重要な課題となっている。

[†] 東京都立大学工学部電子情報工学科, 八王子市
Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University,
Hachioji-shi, 192-03 Japan

そこで、本論文では、変換サイズが固定の場合においても、任意の有理数倍率の解像度変換を実行できるように、従来法を拡張し、更にその効果的な演算法を示す。まず、2. では、直交変換の原理とそれに基づく従来の解像度変換法について説明する。また、3. 以降の理論展開のために、直交変換をフィルタバンクによる処理として表現する^{(11),(12)}。3. では、従来の解像度変換法のもつ制限を除去するための構成を提案する。4. では、3. で提案する基本構成のもつ演算の冗長性を排除し、実際の効果的な構成を示す。また、LOT (Lapped Orthogonal Transform)⁽¹³⁾ を含む長い基底をもつ一般的な直交変換に対して、本提案法を更に拡張する。5. では、シミュレーション結果を示し、本提案法の有効性を示す。

2. 変換領域での解像度変換法

準備として、従来の直交変換に基づく解像度変換の原理について述べる。ここで述べる変換法は、変換サイズ N と逆変換サイズ M が自由に選択できる限り、任意の有理数倍率の解像度変換が可能となる。しかし、 N が固定の場合には、変換倍率が $1/N$ の整数倍に制限される。

本章では、DCT の使用を想定し、変換行列を正方行列と仮定する。

2.1 直交変換に基づくブロック処理

準備として、1次元データ数列に対する直交変換に基づいたブロック処理の基本的な手順とその画像処理に対する有用性について簡単に説明する。

まず、長く連続する一次元の原入力データ数列 $x(i)$ があると仮定する。ブロック処理では、この原入力データ数列 $x(i)$ を式(1)のように短いブロックに区切る。

$$\begin{aligned} x_n(b) &= x(bN+n) \\ 0 \leq n < N, \quad b &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

但し、 $x_n(b)$ はブロックデータ数列を表しており、 b と N は、それぞれブロック番号とブロック点数を示している。

次に、その N 点ブロックデータ数列に対して、次式に従い直交変換を行う。

$$\mathbf{x}_b = [x_0(b), x_1(b), \dots, x_{N-1}(b)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_b = \mathbf{A}^T \mathbf{x}_b \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{x}_b と \mathbf{X}_b はそれぞれ b 番目ブロックの時間領域と変換領域の N 次元ベクトルを意味し、 \mathbf{A} は $N \times N$ の直交行列を示す。また、上付きの添字 T は行列の

転置を意味する。

次に、必要に応じて、得られた係数ベクトル \mathbf{X}_b に対して、符号化、復号化等の処理を施す。その後、次式のように行列 \mathbf{A} の転置行列 \mathbf{A}^T を用いて、その処理された係数ベクトルの逆変換を行い、もとの領域のベクトルを復元する。

$$\mathbf{x}_b = \mathbf{A}^T \mathbf{X}_b \quad (4)$$

但し、量子化誤差等の誤差はないものと仮定した。以後、特に明記しない限り、この仮定のもとで議論を進める。

ところで、2次元分離処理の直交変換とその逆変換は、それぞれ次のように表現できる。

$$\mathbf{U} = \mathbf{A} \mathbf{u} \mathbf{A}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{U} \mathbf{A} \quad (6)$$

但し、 \mathbf{u} は $N \times N$ の2次元データを示し、 \mathbf{U} はその変換係数を示す。これらの式は、画像データに対する2次元分離処理が、その画像データの垂直方向と水平方向に対して別々に1次元処理を行うことによって実現できること意味しており、1次元処理から2次元分離処理への拡張が容易であることを示している。よって、これ以降の議論は、1次元のみで展開する。

2.2 拡大・縮小処理

ここでは、直交変換に基づいて、ある有理数倍 M/N に画素数を拡大または縮小する処理の原理について述べる。

ここで示す縮小処理は、結果として低解像度の縮小画像を得ることができると重要なため重要である。一方、拡大処理は、解像度変換の目的に使用されることは少ないが、後の議論のために縮小処理と共に、その原理についても説明をする。

2.2.1 縮小処理

ここでは、入力数列 $x(i)$ を M/N 倍に縮小し、出力数列 $y(l)$ を得る方法について述べる。図1(a)に直交変換に基づく縮小処理の構成を示す。

まず、式(3)により得られたベクトル \mathbf{X}_b の要素から、式(7)のように低次変換係数を残し、新たに M 次元ベクトル \mathbf{Y}_b を作る。

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_b &= [Y_0(b), Y_1(b), \dots, Y_{M-1}(b)]^T \\ &= [X_0(b), X_1(b), \dots, X_{M-1}(b)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

但し、 $X_k(b)$ と $Y_k(b)$ は、それぞれベクトル \mathbf{X}_b と \mathbf{Y}_b の要素とする。また、 $X_k(b)$ は、 $k=0$ から、周波数の低い順に並んでいると仮定する。以後、明記しない限り、この仮定のもとで議論を進める。

次に、 $M \times M$ の逆変換行列 \mathbf{S}^T (例えば DCT に対し

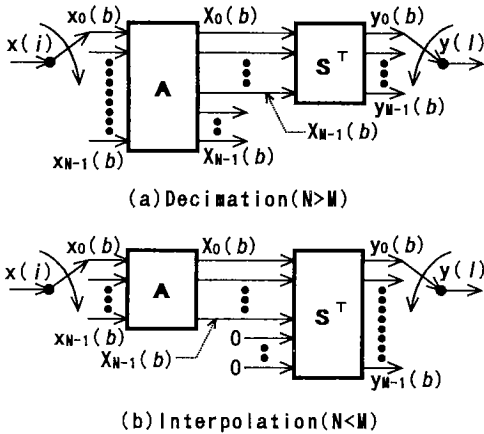


図1 直交変換に基づく拡大・縮小処理
Fig.1 Decimation and interpolation based on orthogonal transforms.

ては、IDCT 行列)を用いて、ベクトル Y_b の逆変換を式(8)により行う。

$$y_b = \alpha S^T Y_b \quad (8)$$

ここで、 y_b は時間領域の M 次元ベクトルであり、 α は利得調整(輝度訂正)係数を示す⁽¹⁴⁾。また、後の議論のために、式(8)を要素式により表現すると、

$$y_m(b) = \alpha \sum_{k=0}^{M-1} Y_k(b) s_{k,m}, \quad 0 \leq m < M \quad (9)$$

となる。ここで、 $y_m(b)$ は b 番目ブロックの時間領域における m 番目 ($m=0, 1, \dots, M-1$) のサンプルを、 $s_{k,m}$ は行列 S の k 行 m 列目の要素を示す。ここで、最終出力数列 $y(l)$ と $y_m(b)$ は次の関係にある。

$$y(bM+m) = y_m(b), \quad 0 \leq m < M \quad (10)$$

2.2.2 拡大処理

ここでは、入力数列 $x(i)$ を M/N 倍に拡大し、出力数列 $y(l)$ を得る方法について述べる。図1(b)に直交変換に基づく拡大処理の構成を示す。

まず、式(11)のように式(3)より得られたベクトル X_b の要素に、高次変換係数として零値を挿入し、新しい M 次元ベクトル Y_b をつくる。

$$Y_b = [Y_0(b), Y_1(b), \dots, Y_{M-1}(b)]^T \\ = [X_0(b), X_1(b), \dots, X_{N-1}(b), 0, \dots, 0]^T \quad (11)$$

次に、 $M \times M$ の逆変換行列 S^T を用いて、ベクトル Y_b の逆変換を式(8)により行う。以下、縮小処理の場合と同様である。

ここでの議論からわかるように、従来の直交変換に基づく拡大・縮小処理は、符号化の際の変換サイズ、すなわち順変換行列の基底の数 N が固定されると、変

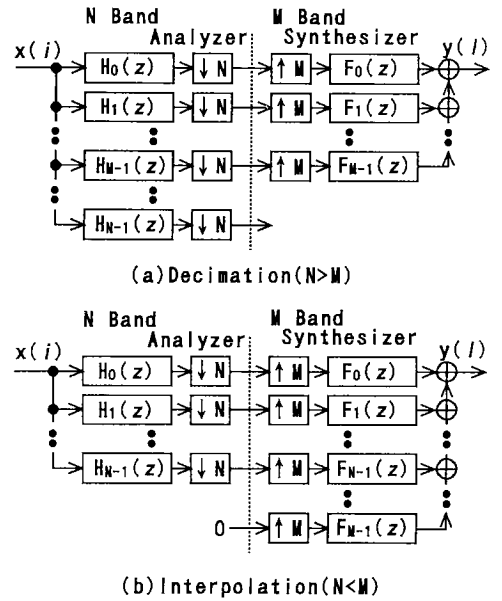


図2 M/N 変換フィルタバンク
Fig.2 M/N Conversion filter banks.

換倍率の分母の値が決定されてしまう。

2.3 フィルタバンクに基づく直交変換表現

$N \times N$ 行列に限らず、より一般的な $N \times L$ 行列を用いた直交変換とその逆変換は、各フィルタのタップ数が L で、分割数が N の最大間引き完全再構成フィルタバンクによる処理として解釈できる^{(11),(12)}。従って、直交変換に基づく M/N 倍の拡大・縮小処理は、 N 分割アナライザと M 分割シンセサイザの組合せとして解釈できる。ここは、3. 以後の議論のために、図1の構成を図2のように表現し直す。

図2(a)(b)に示されるアナライザの各フィルタ $H_k(z)$ と、シンセサイザの各フィルタ $F_k(z)$ の伝達関数は、順変換行列 A と逆変換行列 S の要素を用いて次式により与えられる^{(11),(12)}。

$$H_k(z) = \sum_{n=0}^{L_a-1} h_k(n) z^{-n}, \quad 0 \leq k < N \quad (12)$$

$$F_k(z) = \sum_{m=0}^{L_s-1} f_k(m) z^{-m}, \quad 0 \leq k < M \quad (13)$$

但し、

$$h_k(n) = a_{k, L_a-1-n} \quad (14)$$

$$f_k(m) = \alpha \cdot s_{k,m} \quad (15)$$

であり、 $a_{k,n}$ は、行列 A の k 行 n 列目の要素を示す。一般性を失わないために順変換行列と逆変換行列の基底ベクトルの長さをそれぞれ L_a と L_s と表している

が、今は正方行列を仮定しているので、 $L_a=N, L_s=M$ とみなせる。

2.4 変換領域でのフィルタ処理

図1に示した処理では、逆変換の際に変換係数の選択、あるいは変換係数として零値を追加した。これは、変換領域と周波数領域の擬似的な関係によるものである。

変換領域において、高次の変換係数をゼロとすることは、擬似的な低域通過フィルタ処理に相当する。この方法は、効果的に実行可能であると同時に、十分な画像を得られることが知られている^{(3),(5),(8)}。

3. 変換倍率の制限除去

2.で述べた従来の変換法は、変換サイズ N が固定の場合、変換倍率が $1/N$ の整数倍に制限されてしまう欠点をもっている。そこで、本論文では、この変換倍率の制限を除去するための構成を提案する。

但し、本節では、提案法の基本原理についてのみ説明し、実際に行う効果的な構成は、4.において示す。

3.1 提案法の基本構成

今、任意の有理数倍率 u/d の解像度変換を考える。但し、 u および d は、任意の正整数とする。図3に提案する変換法の基本原理に基づく構成を示す。これは、従来の拡大・縮小処理に、ダウンサンプラを組み合わせた構成となっている。

変換倍率を u/d と選んだ場合、図3における逆変換サイズ M 、外部ダウンサンプラの間引き率 D 、および変換サイズ N は次式のような関係をもつように選択する必要がある。

$$\frac{u}{d} = \frac{M}{ND} \tag{16}$$

ここで、復号側において任意に選べる変数 M と D が、分母分子両方に含まれていることに注意してほしい。従来法が $D=1$ の場合に相当し、また M と D の適当

な選択は、任意の有理数倍率の解像度変換を可能とすることがわかる。

式(16)より、変換倍率 u/d が決まれば、与えられた変換サイズ N のもとで、 M と D の比を次式より求めることができる。

$$\frac{M}{D} = \frac{Nu}{d} \tag{17}$$

ここで、 M と D の選択には自由度が存在するが、DCTの場合は、 Nu と d を約分し、 M が最小になるような値を選ぶことが望ましい。

3.2 変換係数の選択

ここでは、図3に示す提案法の外部ダウンサンプラによって起こるエリアシングを回避する方法について説明する。間引き処理によるエリアシングの回避は、その間引き率に応じた低域通過フィルタを設けねばならない。そこで、2.4において述べた、変換領域でのフィルタ処理をここで応用する。

まず、画像を縮小する場合 ($u < d$) には、変換領域でのフィルタ処理を行う必要がある。今、変換サイズが N で変換倍率が u/d であるから、逆変換の際に使用する変換係数の数は $\lfloor N \times (u/d) \rfloor$ でなければならない。但し、 $\lfloor \cdot \rfloor$ は、小数点以下切り捨て整数化を意味する。

次に画像を拡大する場合 ($u \geq d$) には、変換係数を捨てる必要はない、なぜならば、 $\lfloor N \times (u/d) \rfloor \geq N$ であるためである。

従って、逆変換の際に使用する変換係数の個数 K は、式(17)に注意すれば、次式のように選ばれる。

$$K = \begin{cases} \lfloor \frac{M}{D} \rfloor, & u < d \\ N, & u \geq d \end{cases} \tag{18}$$

これ以降の議論では、逆変換の際に使用する M 次元ベクトル Y_b を、次のように K 次元ベクトルとして新たに定義し直して展開する。

$$Y_b = [Y_0(b), Y_1(b), \dots, Y_{K-1}(b)]^T \\ = [X_0(b), X_1(b), \dots, X_{K-1}(b)]^T \tag{19}$$

4. 提案法の効果的構成

図3の構成では、一度、逆変換により、中間画像として拡大あるいは縮小画像を得た後で、その中間画像に対して間引き処理を行う。しかし、中間画像は最終画像に比べて大きいので、この処理では途中に余分なバッファメモリが必要となり、かつ、逆変換の際に冗長な演算を含んでしまう。すなわち、直交変換に基づ

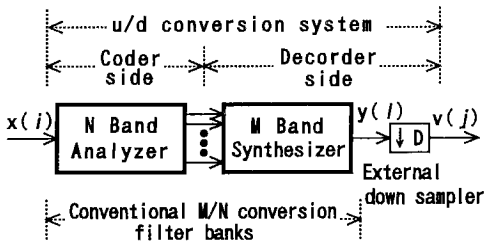


図3 提案法の基本構成
Fig. 3 Basis structure of proposed method.

く解像度変換の特徴を生かすことができない。これは特に、画像などの多次元処理の場合ほど顕著になってしまう。

そこで本章では、中間画像を介さず、より小さなサイズの逆変換によって、直接、最終画像を得る方法を述べる。その結果、任意の有理数倍率の解像度変換の実行と同時に、演算の冗長性を改善することができる。

また、フィルタバンクに基づく表現をブロック処理の表現に直し、最終的には、それを行列演算に帰着させる。

4.1 時変な FIR 構成の応用

まず、図3の復号側のみの構成は図4(a)のように表現できる。また、そのある k 番目チャンネルのみを抜き出したのが図4(b)である。図4(b)は、有理数 M/D 倍のサンプリングレート変換器の構成とみなせる。従って、本提案法の演算の冗長性の改善は、このサンプリングレート変換器の効果的な実現問題に帰着できる。

今、図4(b)に示すフィルタ $F_k(z)$ のタップ数 L_s を分割数 M の整数倍 $L_s = GM$ であるとしよう。このとき、各チャンネルの変換係数 $Y_k(b)$ と出力数列 $w_k(j)$ の間には次の関係が成り立つ⁽¹⁵⁾。

$$w_k(j) = \sum_{g=0}^{G-1} f_k \left(gM + jD - \left\lfloor \frac{jD}{M} \right\rfloor M \right) Y_k \left(\left\lfloor \frac{jD}{M} \right\rfloor - g \right) \quad (20)$$

上式は、タップ数 $L_s = M$ の場合 ($G=1$)、式(21)のようになる。

$$w_k(j) = f_k \left(jD - \left\lfloor \frac{jD}{M} \right\rfloor M \right) Y_k \left(\left\lfloor \frac{jD}{M} \right\rfloor \right) \quad (21)$$

また、各チャンネルの出力数列 $w_k(j)$ と最終出力数列 $v(j)$ は次式の関係をもつ。

$$v(j) = \sum_{k=0}^{K-1} w_k(j) \quad (22)$$

但し、変換領域でのフィルタ処理を考慮して、有効なチャンネル番号を式(19)より、0 から $K-1$ までとした。

ここで、 $L_s = M$ の場合、式(21)と式(22)より、図4(a)の構成を、図5のような構成に置き換えることができる。図5では、最終出力 $v(j)$ と同じレートで乗算が行われ、かつその入力 $Y_k(\lfloor jD/M \rfloor)$ は零値を含まない。従って、図5は図4(a)の構成がもつ冗長な演算をすべて排除された構成となっている。

次に、この処理をブロック処理に置き換える。その理由は、図5の表現に対応する逆変換行列を得るためである。その結果、与えられたブロックごとの符号デ

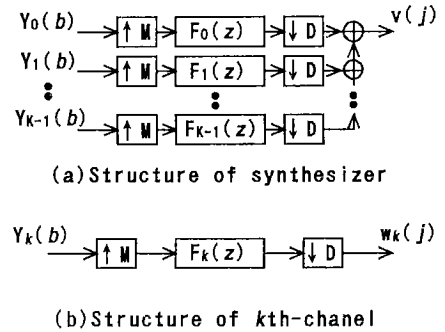


図4 提案法の等価表現
Fig. 4 Structure equivalent of proposed method.

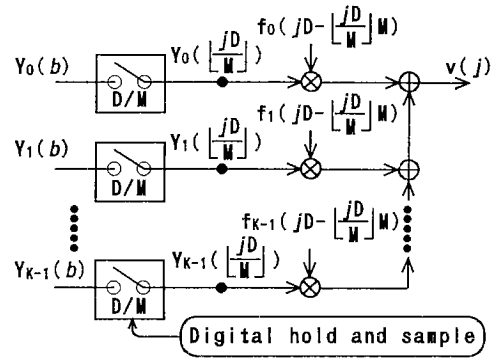


図5 シンセサイザの時変 FIR 構成
Fig. 5 FIR structures with time-varying coefficients of synthesizer.

ータに対し、効率的に逆変換を実現できる。

4.2 ブロック処理表現

シンセサイザ、すなわち逆変換処理への入力は、ブロックデータである。そこで、ここでは図5の構成をブロックデータに対する処理表現に置き換える。

今、式(21)において、

$$b = \left\lfloor \frac{jD}{M} \right\rfloor \quad (23)$$

とおくと、この b は、図5において入力データ $Y_k(b)$ に付記したブロック番号 b に直接対応する。以下では、最終出力 $v(j)$ に対する時間変数 j をブロック番号 b による表現に置き換えることを検討する。

まず、ブロック番号をある値 b に保持する j の範囲は、式(23)より、

$$\left\lfloor \frac{bM-1}{D} \right\rfloor + 1 \leq j < \left\lfloor \frac{(b+1)M-1}{D} \right\rfloor + 1 \quad (24)$$

と表現できる。よって、 j は次式のように初期値と変数

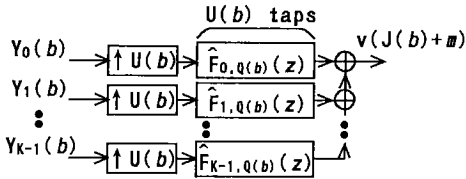


図 6 b 番目ブロック処理時のシンセサイザの構成
Fig. 6 Structure of synthesizer under conversion of b th-block.

m に分離することが可能である。

$$j = \left(\left\lfloor \frac{bM-1}{D} \right\rfloor + 1 \right) + m, \quad 0 \leq m < U(b) \quad (25)$$

但し、 $U(b)$ は b 番目ブロック処理時における j の変化量、すなわち出力点数を表している。ここで、式(24)より、

$$U(b) = \left\lfloor \frac{(b+1)M-1}{D} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{bM-1}{D} \right\rfloor \quad (26)$$

と表現できる。また、式(23)と式(25)より、式(21)は、次式のように置き換えることができる。

$$\begin{aligned} w_k(J(b)+m) &= f_k(D-1 - ((bM-1))_D + mD) Y_k(b) \\ &= \hat{f}_{kq(b)}(m) Y_k(b), \quad 0 \leq m < U(b) \end{aligned} \quad (27)$$

但し、

$$J(b) = \left\lfloor \frac{bM-1}{D} \right\rfloor + 1 \quad (28)$$

$$Q(b) = D - 1 - ((bM-1))_D \quad (29)$$

$$\hat{f}_{kq}(m) = f_k(q+mD) \quad (30)$$

とおく。ここで、 $((bM-1))_D$ は $(bM-1)$ を D で割ったときの剰余である。故に、式(22)に式(27)を代入すると、

$$v(J(b)+m) = \sum_{k=0}^{K-1} \hat{f}_{kq(b)}(m) Y_k(b) \quad 0 \leq m < U(b) \quad (31)$$

となる。よって、図5の構成は、図6のように表現し直すことが可能である。但し、

$$\hat{F}_{kq(b)}(z) = \sum_{m=0}^{U(b)-1} \hat{f}_{kq(b)}(m) z^{-m} \quad (32)$$

である。

図6において、 $J(b)$ は、 $b-1$ 番目ブロックまでの総出力点数を表しており、 $U(b)$ は、 b 番目ブロックの出力点数を表している。また、 $Q(b)$ は、 b 番目ブロック処理時の時変フィルタ $\hat{F}_{kq}(z)$ の状態 q を決定する。ここで、 $J(b)$ 、 $U(b)$ 、 $Q(b)$ はすべてブロック番号 b の関数であることに注意してほしい。また、 $Q(b)$ は、 M と D が互いに素である場合には、 D を周期とする周期関

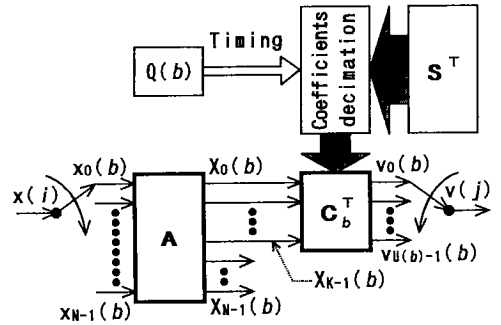


図 7 提案法の変換行列による構成
Fig. 7 Structure of proposed method with transform matrices.

数になる。もし、互いに素ではない場合には、 D を M と D の最大公約数で割った値を周期とする周期関数になる。

4.3 行列演算による表現

図6に、ブロックデータに対する冗長な演算を排除したシンセサイザの構成を示した。ここでは、この構成と図2のシンセサイザの構成を比較することで、図6の処理に相当する行列演算表現を導く。

今、式(31)に、式(15)と式(30)を代入すると、

$$v_m(b) = \alpha \sum_{k=0}^{K-1} Y_k(b) c_{k,m}(b), \quad 0 \leq m < U(b) \quad (33)$$

を得る。但し、

$$v_m(b) = v(J(b)+m), \quad 0 \leq m < U(b) \quad (34)$$

$$c_{k,m}(b) = s_{k,q(b)+mD} \quad (35)$$

とする。従って、式(33)を式(9)と対比でき、式(8)に相当する式、

$$v_b = \alpha C_b^T Y_b \quad (36)$$

を得ることができる。ここで、 v_b は時間領域の $U(b)$ 次元ベクトルであり、 C_b は、 S の要素を間引いた $c_{k,m}(b)$ を k 行 m 列目の要素としてもつ $K \times U(b)$ 行列である。また、図6の構成は、式(36)より、図7のような等価表現ができる。

行列 C_b^T は、ブロックごとにそのサイズと行列成分が変化する。実用上は、図7のようにもとの変換行列 S^T を用意しておき、式(33)に従い必要な係数だけを選択して演算を行えばよい。

4.4 長い基底をもつ直交行列への拡張

これまで直交行列として DCT のような正方行列に限定して議論を進めてきた。本節では、上述の結果を LOT や ELT (Extended Lapped Transform)⁽¹⁶⁾ のように基底の長い直交行列に対して、提案法の拡張を行

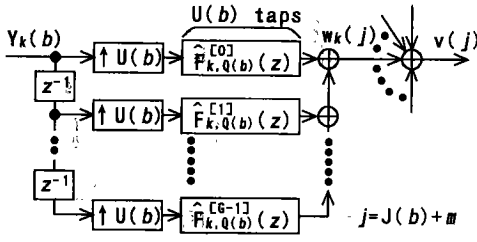


図 8 k 番目チャネルの効果的な一般構成
Fig. 8 General structure of k th-channel with efficient computation.

う。これは、式(12)と式(13)において、 $L_a > N, L_s > M$ とおく場合に相当する。

今、基本構成における逆変換行列 S^T の基底の長さが分割数 M の整数 G 倍であると仮定する。このとき、効果的な構成を求めるためには、式(21)の代わりに式(20)を用い、4.2と同様の議論を繰り返せばよい。従って、まず式(20)から、式(27)に相当する式、

$$w_k(J(b) + m) = \sum_{g=0}^{G-1} \hat{f}_{kq(b)}(g, m) Y(b-g) \quad 0 \leq m < U(b) \quad (37)$$

を導く。但し、

$$\hat{f}_{kq}(g, m) = f_k(gM + q + mD) \quad (38)$$

$$\hat{F}_{kq}^{[g]}(z) = \sum_{m=0}^{U(b)-1} \hat{f}_{kq(b)}(g, m) z^{-m} \quad (39)$$

と置く。次に、式(22)に式(37)を代入すると、

$$v(J(b) + m) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{g=0}^{G-1} \hat{f}_{kq(b)}(g, m) Y_k(b-g) \quad 0 \leq m < U(b) \quad (40)$$

を得る。よって、ある k チャネルの構成は図8のように表現することができる。これは図6のある k チャネルの構成を拡張した形となっている。

また、式(40)より、式(33)のように、行列演算に直接対応する式、

$$v_m(b) = \alpha \sum_{g=0}^{G-1} \sum_{k=0}^{K-1} Y_k(b-g) s_{k, gM+q(b)+mD} \quad 0 \leq m < U(b) \quad (41)$$

を得ることができる。この $v_m(b)$ と最終出力数列 $v(j)$ は、先と同様に式(34)の関係にある。

4.5 基本構成と効果的構成の比較

ここでは、提案法の基本構成と、その演算の冗長性とメモリの問題を改善した効果的構成との比較を行う。

4.5.1 乗算回数

まず、複号側における乗算回数の比較を行う。基本

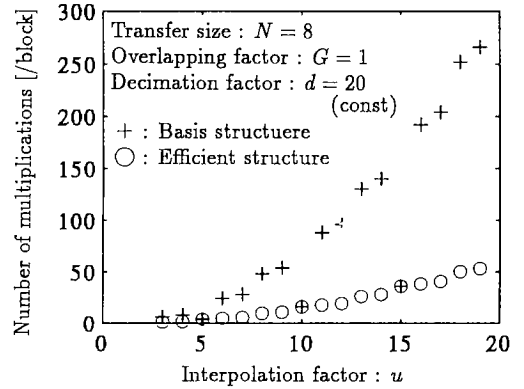


図 9 演算量の比較
Fig. 9 Comparison of number of multiplications.

構成の逆変換行列のサイズは、基底の長さ $G \cdot M$ と分割数 M より、 $G \cdot M \times M$ である。従って、行列演算の際の乗算回数はその行列のサイズによって決まると考えれば、ブロックごとの乗算回数は $G \cdot M^2$ となる。但し、変換領域でのフィルタ処理を考慮すると、分割数 M は使用する変換係数の個数 K と置き換えてよい。従って、基本構成のブロックごとの乗算回数は、 $G \cdot M \cdot K$ 回となる。

一方、効果的構成の b 番目ブロック処理時における逆変換の乗算回数は、図8より、フィルタ $\hat{F}_{kq}^{[g]}(z)$ のタップ数 $U(b)$ とオーバーラップさせるブロックの数 G と有効なチャネル数 K との積 $G \cdot U(b) \cdot K$ 回となる。これを次式のようにブロックごとの平均をとると、

$$\lim_{B \rightarrow \infty} \frac{G \cdot \{U(0) + U(1) + \dots + U(B-1)\} \cdot K}{B} = \frac{G \cdot M \cdot K}{D} \quad (42)$$

となる。但し、 B は処理するブロックの総数とする。この式から、効果的構成の平均乗算回数は、基本構成の $1/D$ 倍に低減化されることがわかる。

図9に基本構成と効果的構成によるブロックごとの平均乗算回数の比較のグラフを1次元の場合について示す。但し、変換行列はDCTのような正方行列で順変換サイズ $N=8$ を仮定する。また、変換倍率 u/d の分子 u と分母 d は選択の自由度が大きいので $d=20$ を固定して u のみを変数として比較する。

図9から、基本構成よりも効果的構成の方が乗算回数が少ないか、あるいは等しいことがわかる。乗算回数が等しい場合というのは、変換倍率が $1/N=1/8$ の整数倍のときであり、外部ダウンサンプラの間引き率

D が 1, すなわち, 従来の縮小・拡大処理に相当する場合である。このことから, 従来法では, 不可能であった倍率による解像度変換を提案法の効果的構成は, 従来法と同程度の乗算回数で実行可能であることがわかる。

4.5.2 メモリ

図 3 に示す基本構成では, シンセサイザ処理, すなわち逆変換処理によって中間画像を得た後, それに対して間引き処理を行うので, 最終出力を得るまでの間に, 中間画像のためのバッファメモリが必要となる。これは, 逆変換サイズ M の大きさによっては問題となる。しかし, 図 7 に示す効果的構成では, 変換係数から最終画像を直接得ることができる。また, 基底の長い場合, すなわち, 図 8 の構成を各チャンネルにもつような効果的構成においても最終画像を直接得ることができる。このことは, 提案法を多次元処理へ拡張する際に重要なことである。

5. 提案法の検討

ここでは, 提案法による画像の解像度変換のシミュレーション結果を示し, その検討を行う。

5.1 シミュレーション結果

図 10 に原画像を示す。そして, 正方形行列である DCT と長方形行列である LOT を用いた提案法のシミュレーション結果を図 11 に示す。この結果は, 例として変換サイズ N を 8 と固定し, 9/10 倍の解像度 (画素数) 変換を行ったものである。同図から, 目的の解像度変換が達成されていることがわかる。他の変換倍率においても, 実際に目的の解像度変換が実行できることを確認している。

5.2 変換行列の比較

ここでは, 変換行列の違う二つのシミュレーション結果の画質を比較検討することによって, 本提案法において画質に影響する要因を明確にする。

まず, 図 11 の画質に着目すると, LOT の場合に比べ, DCT の場合には原画像に見られないひずみが確認できる。特に, 縦の明るい筋が女性の両ひざのあたりに現れていることがわかる。このことをより明確に示すために, 図 12 に変換画像の左ひざのひずみ部分の拡大図を与える。また, 我々は, このひずみがちょうど高周波成分が存在するブロックの境界部分で起こっていることを確認している。

このひずみの原因は, 短い基底の直交変換を用いた拡大処理による。有理数倍率ではない従来の拡大処理

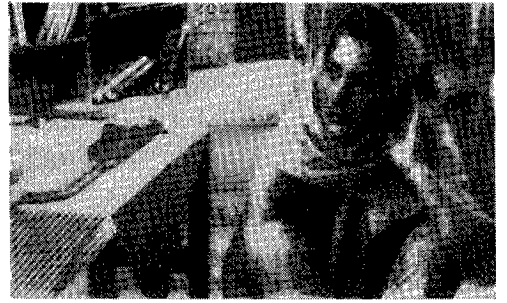


図 10 原画像

Fig. 10 Original image consisting of 640×400 pixels encoded with 8 bits/pixel.



(a) DCT ($G=1$)



(b) LOT ($G=2$)

図 11 変換画像

Fig. 11 Covered images consisting of 576×360 pixels encoded with 8 bits/pixel.

$N=8, u/d=9/10$

$M=36, D=5, K=7, \alpha^2=4.50$

(図 1(b)参照) においても, 既にこのひずみは指摘されている⁽¹⁰⁾. 本手法では直接拡大処理を行わない場合でも, 処理の途中で原理的に拡大処理を行っているので, やはり同様なひずみが発生する場合がある。図 13 に 9/10 倍の解像度変換の中間画像である 9/2 倍の結果を示す (原画像の女性の左ひざの 64×64 画素を拡大)。この例からも, 拡大処理で指摘されているようなひずみが DCT の場合においても発生することがわか

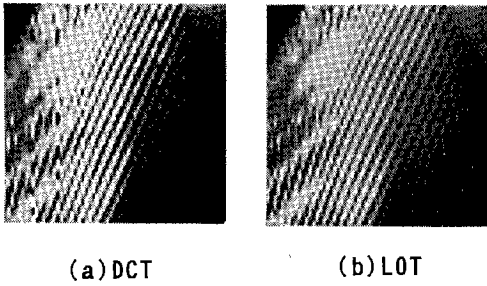


図 12 図 11 のひずみ部分
Fig. 12 Distorted parts of Fig. 11 consisting of 64×64 pixels.

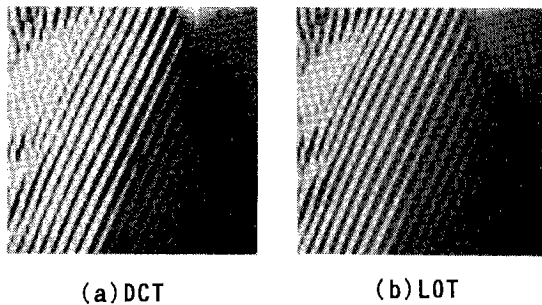


図 13 拡大処理によるひずみ
Fig. 13 Distortion by interpolation consisting of 288×288 pixels encoded with 8 bits/pixel.
 $N=8, u/d=9/2$
 $M=36, D=1, K=7, \alpha^2=4.50$

る。従って、本方法におけるひずみは、中間画像における拡大率が大きいほど、すなわち M/N の大きさが画質に影響を及ぼすと考えられる。

通常 DCT におけるブロックひずみは、変換係数に量子化処理を施した場合に問題となる。しかし、DCT による拡大処理では、量子化を行わない場合にも、ブロックひずみが発生する。これは、その処理が、完全に一つのブロックで完結し、隣接ブロックのサンプルとは全く無関係に、ブロック縁部を補間してしまうからである。このひずみは、DCT の基底の長さをもつ本質的な問題であるが、このひずみを軽減するような方法も最近研究されている⁽¹⁰⁾。

以上の議論とシミュレーション結果より、長い基底をもつ LOT の方が DCT よりも拡大処理によるブロックひずみに対して強く、本提案法による一般的な解像度変換に対しても、より適することが理解できる。

6. むすび

直交変換に基づく従来の解像度変換法では、順変換

点数が固定の場合に、解像度変換の倍率の自由度が減ってしまう欠点があった。そこで、本論文では、順変換点数固定時においても、任意の有理数倍率の解像度変換を可能にする方法について提案し、その効果的な構成を示した。この提案法の効果的な構成は、従来法において不可能であった倍率による解像度変換を、従来法と同程度の乗算回数で実行可能であり、中間画像のためのバッファメモリを必要とせず、更にはブロック処理が可能である。また、DCT と LOT を用いた提案法のシミュレーション結果を示した。そして、両者を比較することによって正方形列である DCT のもつ問題点を指摘した。

しかし、JPEG などで DCT は盛んに使用されており、デジタル画像データの DCT 符号化方式は重要な基本技術となっている。従って、今後は、DCT を本提案法で使用した場合の問題を検討する予定である。また、本論文で紹介した以外の変換行列、あるいはフィルタバンクを用いた場合の検討も行うつもりである。

文 献

- (1) 真鍋克利, 田中知明, 大塚作一: “ATM 網用可変レート映像符号化装置の試作とセル損耐性評価”, 信学論(B-I), **J76-B-I**, pp. 40-47 (1993-01).
- (2) Jain A. K.: “Fundamentals of Digital Image Processing”, pp. 132-188, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ (1989).
- (3) Rao K. R. and Yip P.: “Discrete Cosine Transform”, Academic Press Inc., San Diego (1990).
- (4) 大野隆夫, 小野文孝: “カラー静止画像符号化国際標準方式 (JPEG) の概説 (その 1)”, 画電学誌, **20**, 1, pp. 50-58 (1991-02).
- (5) Ngan K. N.: “Experiments on Two-dimensional Decimation in Time and Orthogonal Transform Domains”, Signal Processing, **11**, 3, pp. 249-263 (Oct. 1983).
- (6) 如澤裕尚, 渡辺 裕, 橋本秀夫: “フィールド内/フレーム間適応 LOT を用いた HDTV/TV コンパチブル符号化の構成と特性”, 信学論(B-I), **J75-B-I**, 5, pp. 343-352 (1991-05).
- (7) 富永英義, 川島正久, 沼田文彦: “M バンド拡張 QMF バンクを用いた動画像の帯域分割符号化”, 信学論(B-I), **J74-B-I**, 12, pp. 1065-1073 (1991-12).
- (8) 岩橋政宏, 大山公一: “DCT スケーリング・デコーダによる 2:1 解像度変換”, 信学技報, **IE92-90** (1992-12).
- (9) 村松正吾, 貴家仁志, 佐川雅彦: “直交変換に基づく効果的な画像の解像度変換法”, 信学技報, **DSP92-79**, (1993-01).
- (10) 外田修司, 西田好宏, 植田信夫, 川畑 優: “直交変換を用いた画像拡大におけるブロック歪みの削減”, 1993 信学秋季全大, D-187.
- (11) Woods J. W.: “Subband Coding of Images”, Kluwer

- Academic Publishers (1991).
- (12) 本間仁志, 八重光男: “サブバンド符号化に基づく変換符号化法の考察”, 信学技報, **DSP92-2** (1992-02).
- (13) Malver H. S.: “Lapped Transform for Efficient Transform/Subband Coding”, IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process., **38**, 6, pp. 969-978 (June 1990).
- (14) Muramatsu S. and Kiya H.: “Scale Factor of Resolution Conversion Based on Orthogonal Transforms”, IEICE Trans. Fundamentals., **E76-A**, 7, pp. 1150-1153 (July 1993).
- (15) Crochiere R. E. and Rabiner L. R.: “Multirate Digital Signal Processing”, pp. 88-91, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs NJ (1983).
- (16) Malver H. S.: “Extended Lapped Transforms: Properties, Applications, and Fast Algorithms”, IEEE Trans. Signal Process., **40**, 11, pp. 2703-2714 (Nov. 1992).

(平成5年3月30日受付, 9月20日再受付)



村松 正吾

平5都立大・電気卒。現在、同大学院修士課程在学中。直交変換に基づく画像の解像度変換の研究に従事。IEEE会員。



貴家 仁志

昭55長岡技科大・電気電子システム卒。昭57同大学院修士課程了。同年東京都立大・工・電気工学科助手。現在、同大電子情報工学科助教授。マルチレート信号処理、適応信号処理、多次元信号処理の研究に従事。著書「高速フーリエ変換とその応用」(共著)、「デジタル信号処理技術入門」など。画像電子学会, IEEE各会員。工博。