

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560394
研究課題名（和文） Mチャンネルフィルタバンクのリフティング実現と可逆非可逆統一符号化への応用
研究課題名（英文） Lifting Structure of M-channel Filter Banks and its Application to Lossy Lossless Coding
研究代表者 池原 雅章（IKEHARA MASAOKI） 慶應義塾大学・理工学部・教授 研究者番号：00212796

研究成果の概要：

本研究課題では、Mチャンネルフィルタバンクのブロックリフティング構造による実現法を示し、可逆非可逆統一符号化への応用を述べ、その有効性を示した。提案するM分割双直交フィルタバンクはブロックリフティング構造に基づく因数分解を行うことで各リフティングの丸め処理の統合が効率よく行える構造を持ち、その総数を減らすことが可能となる。ビットプレーン符号化により生成されたビットストリームはスケーラビリティを持ち、全てを伝送することでロスレスモードとして、また所望のビットレートで打ち切ることでロッシーモードとして利用できる。次世代のJPEG2000で採用されている離散ウェーブレット変換と比較し、提案した方法が優れていることをシミュレーションで示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信ネットワーク工学

キーワード：フィルタバンク、可逆非可逆画像符号化、リフティング構造

1. 研究開始当初の背景

画像の標準化として、JPEG2000が策定されてから数年が経過したが、その動画用の符号化を用いたデジタルシネマの符号化技術として用いられている以外は、残念ながら広く社会に広まっているとは言いがたい。JPEG2000はDCTに代わってウェーブレット変換に基づく新しい符号化技術として開発され、その性能はJPEGに比べ大幅に改善されている。

しかしJPEGとの互換性がないこと、JPEG圧縮が広く世の中に普及していること、JPEG2000のアルゴリズムは非常に重く、実時間処理には不向きであることなどの様々な理由でJPEGに代わる新しい技術として認知されているとは言いがたい。

情報損失を許容するロッシー画像符号化においては前述のようにJPEGに用いられるDCTやJPEG2000に用いられる9/7-DWTのよう

な2分割フィルタバンクによる周波数変換に基づいた符号化が用いられている。近年では、フィルタの重複により低ビットレートでの再構成画像のブロック歪みを抑制する重複直交変換 (LOT) や一般化重複直交変換 (GenLOT) などが提案され、9/7-DWT に比べ有効であることが示されている。一方、ロスレス画像符号化においては、非線形予測を用いた JPEG-LS や LOCO-I 等が提案され、実用化されている。また、非線形予測を用いない方法として最新の JPEG2000 ではロスレスモードとして5/3-DWTを用いた変換に基づくロスレス符号化が実装されている。この変換に基づくロスレス圧縮では、圧縮後にビットストリームを打ち切ることでロスレス画像を得ることも可能となる。このロスレス・ロッシェー符号化を実現するのが画像の整数変換を可能とするリフティング構造である。2分割DWTをリフティング構造を用いて因数分解し、各リフティングにおいて丸め処理を行うことで、整数変換を実現し、ロスレス画像符号化への適用が可能になる。また、変換された画像をビットプレーン符号化して得られるビットストリームは、ビットレートを決定し任意のビットストリーム長で打ち切ることでロッシェー符号化としても利用でき、高いスケラビリティ性を持つ。ただし、JPEG2000で用いられている5/3-DWTのロッシェー符号化としての符号化性能は高くなく、現にJPEG2000ではロッシェー符号化は9/7-DWT、ロスレス符号化は5/3-DWTと使い分けられているため、ロスレス・ロッシェー符号化として有用であるとはいえない。

近年、ロッシェー符号化においては、分割数2からMへの拡張が有効であることが示され、ロスレス符号化でも同様にM分割パラユニタリフィルタバンクのリフティング構造について様々な提案がなされている。幾つかの文献では双直交フィルタバンクのdegree-1構造のリフティング分解を実現しているが、一般的なM分割フィルタバンクを実現するには多くのリフティング処理を必要とする。リフティング構造を用いたロスレス画像符号化は、分割側の各リフティングで、実数係数による演算の後、丸め処理により少数値を整数値に丸める操作を行う。合成フィルタではリフティング係数の符号を反転させ、同様の丸め処理を行うことで整数変換での完全再構成を実現しているが、この際丸め処理により本来の実数係数変換での周波数特性に歪みが生じてしまう。すなわち各リフティングステップで丸め処理を繰り返すことで歪みが

蓄積し、周波数特性の劣化、ひいては圧縮率の低下の原因となる。つまり丸め処理の総数はできるだけ少ない方が望ましい。研究代表者らは既に同チャンネルに入るリフティングに関してはそのチャンネルから別のチャンネルへリフティングを行わない限り、統合が可能であることを示した。統合により符号化性能が改善されることを示しているが、提案されたフィルタバンクのリフティング因数分解は統合に適した構造とは言いがたく、よりリフティング統合に適した構造によるフィルタバンクの因数分解を行うことで符号化性能の改善が見込まれる。

2. 研究の目的

本研究課題では、このような背景の下に、Mチャンネルフィルタバンクの有効なリフティング構造への変換を示し、これを可逆符号化へ適用し、画像の可逆・非可逆統一符号化の新しい構造を示すことを目的とする。

フィルタバンクはポリフェーズ行列で記述され、完全再構成条件は、ポリフェーズ行列のFIR形逆行列の存在性に帰着される。ポリフェーズ行列は幾つかのビルディングブロックと遅延鎖で構成され、これをリフティング構造で実現するために、以下の2つのケースを考える。

(1)双直交フィルタバンクの場合:完全再構成条件はビルディングブロックが非特異であることであり、行列をLU分解することにより、容易にリフティング構造に変換できる。

(2)直交フィルタバンクの場合:完全再構成条件はビルディングブロックが直交行列となることであり、行列の変形によりリフティング構造に変換する。

これらの二つの場合について任意のMチャンネルフィルタバンクをリフティング構造に変換する一般的な手法を確立する。

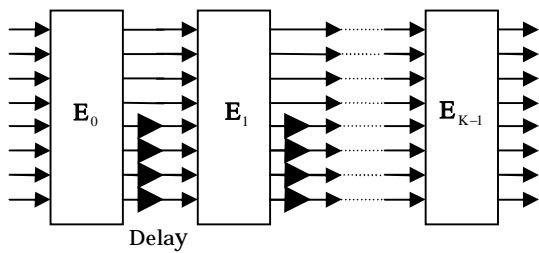
得られた構造を画像のロッシェー・ロスレス統一符号化に適用し、JPEG2000と比較し、本方法の有効性を示す。

3. 研究の方法

任意のMチャンネルフィルタバンクをリフティング構造に変換する統一的な手法を確立する。フィルタ長がMKのMチャンネルフィルタバンクのポリフェーズ行列は

$$E(z) = E_{K-1} \Lambda(z) E_{K-2} \Lambda(z) \cdots \Lambda(z) E_0$$

で定義される。ここで E_i は $M \times M$ のビルディングブロック、 $\Lambda(z)$ は $\text{diag}[1, \dots, 1, z^{-1}, \dots, z^{-1}]$ の $M \times M$ の対角行列であり、遅延鎖と呼ばれる。これをブロック線図で表すと下図のようになり、正方行列か



らなるビルディングブロックと遅延鎖の縦続接続から構成される。この逆変換は全てのブロックを逆順にし、各行列の逆行列を用いることにより、完全再構成を保ったまま逆変換が実現できる。問題はビルディングブロック E_i をリフティング構造で実現することである。ここで双直交と直交の場合を考える。

(1) 双直交の場合：完全再構成条件は $\det(E_i) \neq 0$ であり、この時LU分解を使って、 $E_i = L_i D_i U_i$

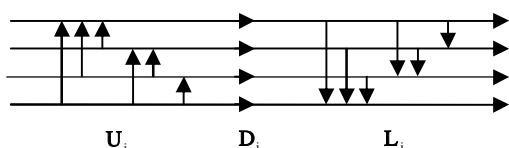
と分解できる。ここで L_i 、 D_i 、 U_i はそれぞれ下三角、対角、上三角行列である。ここで下三角 L_i に注目すると、

$$L_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_{2,1} & 1 & 0 & & \vdots \\ a_{3,1} & & \ddots & 0 & \\ \vdots & & & a_{M-1,M-2} & 1 & 0 \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \cdots & a_{M,M-1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ a_{2,1} & 1 & & & \\ 0 & 0 & \ddots & & \\ \vdots & & & 1 & \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ 0 & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \cdots & a_{M,M-1} & 1 \end{bmatrix}$$

と分解することができる。上三角行列も同様に分解できるから、対角行列も考慮すると、ビルディングブロック E_i は $M=4$ の場合、次図のように実現できる。

このように分割側に相当するポリフェーズ行列のビルディングブロックはリフティング構造で実現できる。問題は合成側であり、合成側のポリフェーズ行列は $R(z) = E^{-1}(z)$ で表され、ビルディングブロックも $E^{-1} = U_i^{-1} D_i^{-1} L_i^{-1}$ となる。ここで L_i^{-1} は下三角行列にはならず、リフティング構造での実現が不可能であるように思えるが、上式及び上図のように分解できるから、リフティングの順序を逆にし、加減算を逆に減加算にす



れば、合成側も簡単にリフティング構造で実現できる。

これを可逆符号化に適用する際には、各リフティングパスにおいて乗算結果を整数に丸めて加算すれば、整数 - 整数変換が可能となる。但し、対角成分の乗算は丸めることはできないから、可逆符号化の際には、 $E_i = L_i U_i$ と対角行列を削除して設計しなければならない。

(2) 直交の場合：直交フィルタバンクの完全再構成条件は、ポリフェーズ行列が $E(z)E^T(z^{-1}) = I$ を満たすことであり、ビルディングブロック E_i が直交行列となることである。そこで

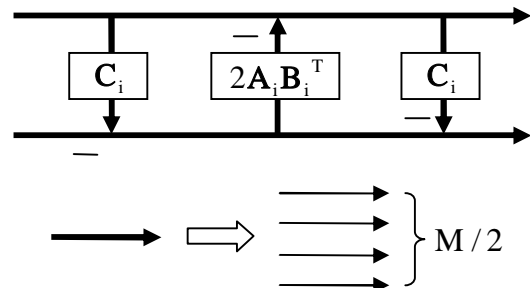
$$E_i = I - 2w_i w_i^T, \quad w = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix}$$

$$w_i^T w = I_{M/2}, \quad A_i^T A_i + B_i^T B_i = I$$

とする。この時、 E_i は直交行列になることに注意されたい。ここで A_i 、 B_i はサイズ $M/2$ の正方行列である。これを变形すると

$$E_i = \begin{bmatrix} I & 0 \\ C_i & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & -2A_i B_i^T \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ -C_i & I \end{bmatrix}$$

と表される。ここで $C_i = -B_i^{-T} A_i^T$ である。これをブロック線図で表すと、次図のようなリフティング構造で実現できる。



これは M 本のパスを遅延器を含む $M/2$ 本のパスと、含まない $M/2$ 本のパスに分離し、この間をリフティングアップ・ダウンすることを意味している。直交の場合、リフティングをまとめて加算後に丸めればいため、一つのビルディングブロックに対して、3つの丸めで実現できるという特徴を持っている。

本研究課題では、これらの2つの方法を詳細に検討し、任意の M チャンネルフィルタバンクをリフティング構造に変換する手法を確立することができた。

4. 研究成果

設計したフィルタバンク (LBBOFB) をロスレス画像符号化に適用する。各リフティングは可能な限り統合され丸め処理の総数を削減することが可能である。本課題では変換による符号化性能を公平に比較するため、全ての変換に対してビットプレーン符号化方式としてクワッドツリー符号化を適用した。ロスレス画像符号化においては画像の劣化が一切生じないため、画質による評価をすることができない。よってビットレート [bpp] (= 符号化後の総ビット数 [bit] / 総ピクセル数 [pixel]) によって圧縮効率を評価する。下の表は提案した LBBOFB と従来法との符号化効率の比較結果を示している。提案法の設計例である 8 分割 LBBOFB と従来法の 8 分割 LBPUFB は 2 段階に、比較法の 5/3-DWT は 6 段階にそれぞれ低周波領域のみを階層的に変換した。また画像端の拡張には、LBBOFB、LBPUFB に対して周期拡張法を、線形位相性を持つ 5/3-DWT に対しては対称拡張法を用いた。

この表より、提案法の LBBOFB が従来の同分割数、同フィルタ長の LBPUFB に比べ全てのテスト画像で優位性を示している。これは LBPUFB に比べパラユニタリ性による制限が無いため設計の自由度が高く、フィルタバンクの符号化利得が高いこと、またブロックリフティング分解を用いて設計したことにより、従来のリフティング構造に比べ、丸め処理の総数削減がより効果的であったことに起因していると考えられる。また、従来より高周波成分の少ない全体的に平坦な画像に対しては高い有効性が知られている 5/3-DWT と比較すると高周波成分の少ない Lena, Pepper などを含むいくつかの画像で符号化効率は多少劣るものの、Barbara のような高周波成分を多く含む画像に対しては非常に有効であることがわかる。

Image (512x512)	5/3-tap DWT	LBPUFB 8x24	LBBOFB 8x24
Barbara	4.869	4.819	4.764
Baboon	6.172	6.230	6.213
Boat	5.095	5.133	5.114
Elaine	5.114	5.056	5.050
Finger1	5.836	5.676	5.657
Finger2	5.598	5.426	5.388
Goldhill	5.010	5.135	5.109
Grass	6.055	6.051	6.041
Lena	4.493	4.678	4.657
Pepper	4.854	4.950	4.946

● ロッシー符号化

前述のとおり、提案法により信号を変換し、ビットプレーン符号化により生成されたビットストリームを復号側でビットレートを設定して打ち切ることによってロッシー符号化を行うことが可能となる。下表に同一ビットレートにおける 9/7-DWT との比較を示す。使用したテスト画像はロスレス符号化と同じものを用いた。ただし画質性能評価には PSNR を用いた。

表の結果からも本提案法の LBBOFB はロッシー画像符号化においても従来の LBPUFB に対し一部を除いて有効であることがわかる。また、9/7-DWT と比較しても、比較的平坦な画像を除いて有効であることを示している。さらにビットレートが 0.25 [bpp] における再構成画像 (Barbara) の一部を拡大したものを下図に示す。特に画面中の縞模様の部分に注目すると、9/7-DWT (従来法) では縞模様のような周波数の高い部分は符号化の際残らずにぼやけてしまうが、本論文(提案法)のフィルタバンクではその模様を保ったまま符号化できていることがわかる。



従来法



提案法
ロッキー符号化画像

Image (512 × 512)	bit rate [bpp]	9/7-tap DWT	LBPUFB 8 × 24	LBBOFB 8 × 24
Barbara	0.25	27.252	28.377	28.375
	0.50	30.486	31.985	32.030
	1.00	34.878	36.074	36.210
Baboon	0.25	22.816	22.770	22.789
	0.50	24.601	24.726	24.740
	1.00	27.614	27.709	27.754
Boat	0.25	28.457	28.415	28.400
	0.50	31.393	31.384	31.358
	1.00	34.510	34.653	34.733
Elaine	0.25	31.513	31.340	31.228
	0.50	32.938	33.291	33.322
	1.00	34.614	35.243	35.288
Finger1	0.25	23.510	23.786	23.794
	0.50	25.994	26.590	26.619
	1.00	29.074	30.210	30.260
Finger2	0.25	24.180	24.553	24.611
	0.50	27.525	27.617	27.710
	1.00	30.900	32.397	32.480
Goldhill	0.25	29.667	29.137	29.091
	0.50	31.532	31.668	31.637
	1.00	34.513	34.686	34.747
Grass	0.25	24.357	24.565	24.567
	0.50	26.090	26.461	26.469
	1.00	28.680	29.224	29.271
Lena	0.25	32.525	32.232	32.046
	0.50	35.524	35.393	35.231
	1.10	38.651	38.537	38.678
Pepper	0.25	31.941	31.675	31.299
	0.50	34.477	34.175	33.770
	1.00	36.094	35.907	35.918

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 岩村俊輔、田中雄一、池原雅章, ” M分割双直交フィルタバンクのプロックリフティング分解”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J91-A, no. 12 ,pp. 1181-1189,2008, 査読有
2. 京地清介、田中雄一、池原雅章, ” 二分割複素係数擬直交フィルタバンク”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J91-A, no. 4,pp. 458-467,2008, 査読有
3. Y. Tanaka, M. Ikehara, and T. Q. Nguyen, ” A lattice structure of biorthogonal linear-phase filter banks with higher order feasible building blocks”, IEEE Trans. Circuits Syst. I, Vol.55,pp. 2322-2331,2008, 査読有
4. T. Uto, T. Oka, M. Ikehara, ” M-channel Nonlinear Phase Filter Banks in Image Compression: Structure, Design and Signal Extension”, IEEE Trans. On Signal Processing, Vol.55, pp. 1339-1351,2007,査読有
5. S. Iwamura, Y. Tanaka, M.Ikehara, ” Design of M-channel Perfect Reconstruction Filter Banks with IIR-FIR Hybrid Building Blocks”, IEICE Trans, Fundamentals, Vol.E90-A,pp. 1636-1643,2007,査読有

[学会発表] (計 2 件)

1. M. Ikehara, ”Recent Topics in Image Coding”, Keynote Speech, ISPACS-2008, Feb. 10, 2009, Bangkok
2. S. Iwamura, Y. Tanaka, M.Ikehara, ”An Efficient Lifting Structure of Biorthogonal Filter Banks for Lossless Image Coding”, IEEE ICIP2007, Vol.6, 433-436,Sep,18,2007, San Antonio, TX

6 . 研究組織

(1)研究代表者

池原 雅章 (IKEHARA MASAOKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号 : 00212796

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし