

# マルチ走査によるウェーブレット変換符号化に関する一検討

後藤 富朗<sup>†a)</sup> 早原 悦朗<sup>†</sup>

A Study on Wavelet Transform Coding Based on Multi-Scanning

Tomio GOTO<sup>†a)</sup> and Etsuro HAYAHARA<sup>†</sup>

あらまし 本論文では、画像圧縮においてウェーブレット変換基底に高次のフィルタを用いた場合に問題となる変換処理の削減を目的としてウェーブレット変換におけるフィルタ処理の走査方向に着目し、走査方向と復元画像の関係について論じている。提案した走査方法を適用したウェーブレット変換は、従来のウェーブレット変換に特別な処理を加えることなく構成できるため、従来の手法に比べ、高速処理が容易に実現可能である。また、従来形ではウェーブレット変換基底に低次のものを用いると低周波数成分の量子化により復元画像にブロック状の雑音が混入してしまう。それに対し提案した手法では、そのような雑音の混入を低減させることができることを実際の画像を用いた計算機シミュレーションによって確認し、提案手法の有効性を検証している。

キーワード 画像圧縮、ウェーブレット変換、符号化、走査

## 1. ま え が き

画像圧縮において圧縮率や画像の再現性の観点から DCT (離散コサイン変換) 符号化は、JPEG や MPEG 等の国際標準規格に採用され、広く用いられている。DCT 符号化では画像を任意のブロックサイズに分割し、各ブロックごとに DCT を行い、ブロック全体にある情報を低周波数成分に集約し、変換係数を量子化することで圧縮率を増加させている。しかし、圧縮率を増加させるにつれ、低周波数成分の量子化により各ブロックごとの相関がなくなるためブロックひずみが生じる [1]。また、高周波数成分の量子化によりエッジ部分がぼやけたり、モスキート雑音が混入してしまうことが知られている。そこでこれらの雑音の混入を低減できる符号化方式としてウェーブレット変換符号化が注目されている [2]。

ウェーブレット変換では、用いる基底により入出力特性を変化させることができる。提案された当初は、比較的低次のフィルタを基底に用いていたが、近年では基底に高次のフィルタが用いられてきている [3]。低次のフィルタを基底に用いることの利点の一つは、

フィルタリングにかかる処理時間を少なくすることができる点である。しかし、低次特に 2 タップのフィルタを用いると各画素を重複することなくフィルタリングするため、圧縮率を上げるにつれ低域成分の量子化雑音により復号画像にブロック状のひずみが生じてしまう。これに対し、高次のフィルタを基底に用いることは各画素を重複してフィルタリングすることとなり、ブロックひずみを低減させることができる。しかし、フィルタリングでの処理時間が増大してしまう。

そこで本論文では、ウェーブレット変換符号化に 2 タップのハール基底を用いた場合に生じるブロック状のひずみを抑える手法として斜め走査及びマルチ走査を提案し、シミュレーションによりその動作の確認を行う。従来法と斜め走査及びマルチ走査を適用したウェーブレット変換符号化の復号画像を視覚的に比較することにより、提案した斜め走査が斜め方向のエッジに対して主観的に良好な画像を生成することを示す。また、提案したマルチ走査が水平・垂直及び斜め方向のエッジに対して主観的に良好な画像を生成することを示す。更に、得られた結果から提案した斜め走査及びマルチ走査の有用性について検討を行う。

本論文では、まず 2. で従来のウェーブレット変換で用いられる走査方法及び提案走査方法について述べる。次に 3. でそれぞれの走査方法を用いたときの計算機シミュレーションによる評価を行う。最後に 4. で

<sup>†</sup> 名古屋工業大学工学部, 名古屋市  
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: goto@elcom.nitech.ac.jp

むすびとする。

## 2. ウェーブレット変換符号化器の構成

### 2.1 走査方法

#### 2.1.1 従来走査

一般にウェーブレット変換は、図 1 に示すように 2 分割フィルタバンクを用いて構成され、まず各画素を水平方向に走査し、低域フィルタ及び高域フィルタによって帯域分割を行い、各帯域の信号をデシメーションする。次に水平方向に帯域分割された信号を垂直方向に走査し、再び低域フィルタ及び高域フィルタによって帯域分割し、その出力信号をデシメーションする。これにより原画像は、四つの帯域 (LL, LH, HL, HH) に分割され、水平・垂直方向の低域成分 (LL) に対して以上のような処理を階層的に行うことでウェーブレット変換係数を得ることができる。従来の走査方法では、各画素を水平及び垂直方向に走査するため重複して走査することになる。

#### 2.1.2 斜め走査

本研究で提案した斜め走査の概念図を図 2 に、斜め走査を適用したウェーブレット変換符号化のブロック図を図 3 に示す。

提案した斜め走査は、図 2 に示すように斜線部分の各画素を実線のように水平方向に、白色部分の各画素を破線のように垂直方向にそれぞれ走査し、図 3 に示すように水平処理及び垂直処理を行うことでウェーブレット変換係数 B1～B7 を得る。従来の走査方法では、水平及び垂直方向へ各画素を走査するため画素を重複して走査するのに対し、提案した走査方法では、図 2 のように画素を斜めに走査するため

画素を重複することなく走査することができ、従来の走査方法に比べてフィルタリングでの処理ステップが半分となる。

#### 2.1.3 低域信号の重複

図 3 のような斜め走査を用いた構成のウェーブレット変換によって出力される変換係数を図 4 (a) に、従来の走査方法を用いた構成のウェーブレット変換によって出力される変換係数を図 4 (b) に示す。

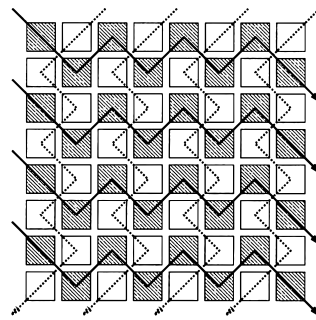


図 2 斜め走査の概念図

Fig. 2 Concept of slant scanning.

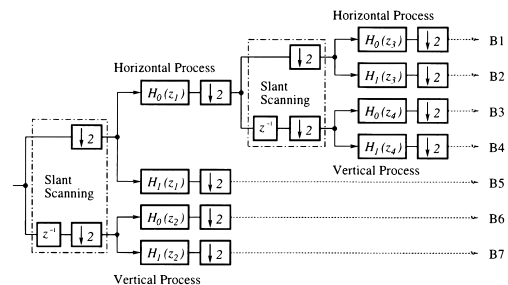


図 3 斜め走査を適用したウェーブレット変換の構成

Fig. 3 Structure of wavelet transform applied slant scanning.

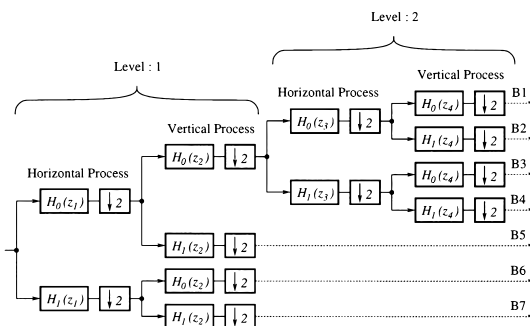
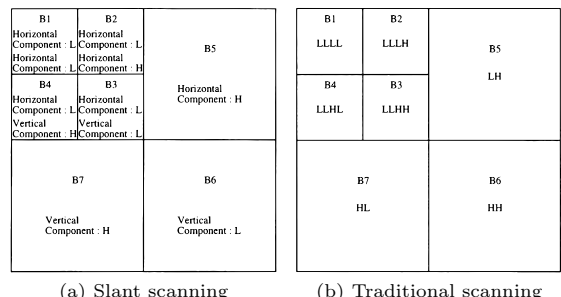


図 1 従来のウェーブレット変換

Fig. 1 Traditional wavelet transform.



(a) Slant scanning

(b) Traditional scanning

図 4 ウェーブレット変換係数の構成

Fig. 4 Structure of the wavelet transform coefficient.

図 4 (a) における B6 成分は図 3 より原画像を垂直方向に走査し低域フィルタを通して得られた信号である。また、水平方向に走査し低域フィルタを通した後に、垂直方向に走査し低域フィルタを通した信号が B3 成分、水平方向に走査し低域フィルタを通した信号が B1 成分である。よって、図 4 (a) において原画像から低域フィルタのみを通して出力される信号は、B1, B3, B6 成分である。それに対し従来の走査方法の場合、図 4 (b) における低域成分は、図 1 より B1 成分のみである。つまり、斜め走査を用いて符号化した出力信号には、従来の走査によって符号化した出力信号より多くの低域成分が含まれ、圧縮率が低下するという問題が生じる。しかし、これらの低域成分は隣接した画素から出力されるため強い相関がある。そこで、図 2 に示す走査方法の中で、実線のように走査した画素の低域成分と破線のように走査した画素の低域成分との差分をとることでこの問題を解決できる。低域成分の差分を考慮したウェーブレット変換符号化のブロック図を図 5 に示す。図 5 のように低域成分の差分を考慮し、加減乗除をそれぞれ 1 ステップとすると処理ステップ総数は、従来の走査方法に比べ約 0.6 倍となる。

また復号画像を考えると、画像を斜め方向に走査しているため斜め方向のエッジに対しては再現性が良くなるが水平及び垂直方向のエッジに対する再現性は悪くなると考えられる。そこで、この問題を解決するためにマルチ走査を提案する。

#### 2.1.4 マルチ走査

本研究で提案したマルチ走査の概念図を図 6 に示す。マルチ走査では、まず図 6 (a) のように原画像に対して 1 画素ごとスキップした画素を領域 A ~ D にグループ分けする。ここで、領域 A ~ D のうち従来の走査と斜め走査との組合せは複数考えられるが、もし A・B あるいは A・C に対して従来の走査を行ったとすると、A・B の組合せでは 1 画素ごとに水平方向に走査することに相当し、A・C の組合せでは 1 画素ごとに垂直方向に走査することと同等である。つまり水平あるいは垂直方向に対する画像の再現性のみが増すことになる。そこで図 6 (b) のように領域 A・D に対しては従来の走査を適用し、領域 B・C に対しては斜め走査を適用する。同様に、領域 B・C においても 1 画素ごとに右下あるいは右上方向に走査しないように同図 (b) 中では、領域 B の水平 (あるいは垂直) 走査と領域 C の水平 (あるいは垂直) 走査の方向を変えている。

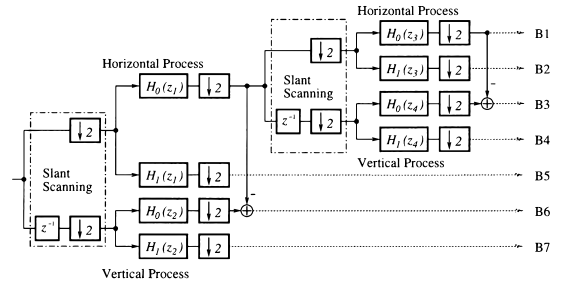


図 5 低域信号の差分を考慮したウェーブレット変換の構成

Fig.5 Structure of wavelet transform considered subtraction of low frequency components.

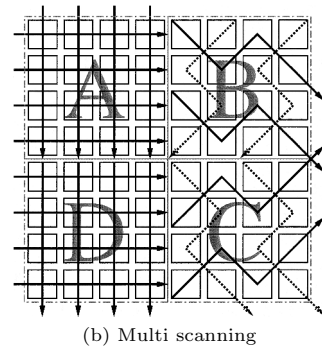
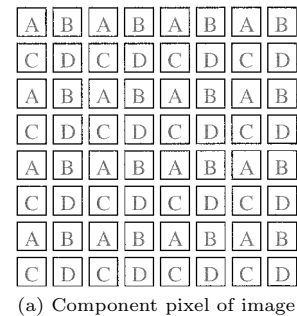


図 6 マルチ走査の概念図

Fig.6 Concept of multi scanning.

このように走査することにより、従来の走査と斜め走査の特徴をあわせもつこととなり、水平・垂直・斜め方向のエッジに対する再現性も向上し、復号画像の画質が良好なものになると考えられる。

また、マルチ走査においても斜め走査同様、低域信号の重複が考えられるが、図 7 に示すように低域成分の差分により解決できる。処理ステップ総数は、低域成分の差分を考慮すると従来の走査方法に比べ約 0.84 倍となる。

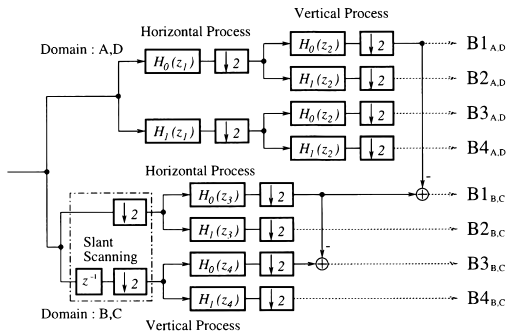


図 7 低域信号の差分を考慮したマルチ走査の構成  
Fig. 7 Structure of multi scanning considered subtraction of low frequency components.

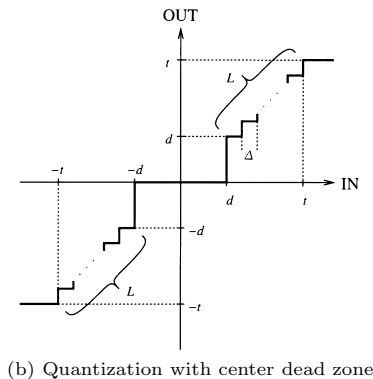
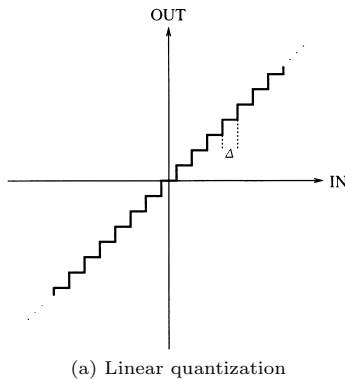


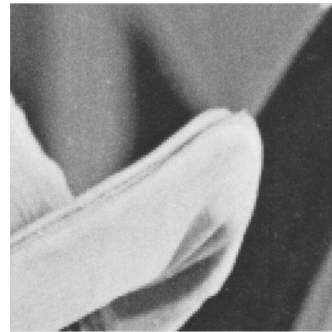
図 8 量 子 化  
Fig. 8 Structure of quantizer.

## 2.2 量 子 化 器

斜め走査及びマルチ走査が復号画像の画質に及ぼす影響を調べるためウェーブレット変換係数を帯域成分ごとに量子化する．一般に自然画像の低域成分の振幅値は一樣に分布しており，高域成分にはエッジ信号のほかに画像ノイズと呼ばれる雑音が混入している



(a) Lena



(b) Magnified image

図 9 原 画 像  
Fig. 9 Original image.

ことが知られている．そこで，低域成分に対しては，図 8 (a) の線形量子化を用いて，高域成分に対しては同図 (b) の中間ステップ量子化 [4] を用いて量子化を行う．

## 3. シミュレーション

本研究で提案した斜め走査及びマルチ走査の有効性を示すために，提案走査を適用したウェーブレット変換符号化器及び復号化器を設計し，復号画像の画質に及ぼす影響について評価を行う．実験画像として，ここでは縦・横  $512 \times 512$  ピクセル，256 階調，グレイスケールの“Lena”画像を用いてウェーブレット変換を 2 階層行った場合について示す．

また，本研究でフィルタバンクに用いた低域フィルタ及び高域フィルタの伝達関数を式 (1) に示す．

$$\begin{cases} H_0(z) = \frac{1+z^{-1}}{\sqrt{2}} \\ H_1(z) = \frac{1-z^{-1}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (1)$$

これらの式はハール基底と呼ばれ，直線位相特性

を有する．これらのフィルタの利得は 3 dB であるため、フィルタの出力信号の振幅値は、入力信号に対して  $\sqrt{2}$  倍となる．また、シミュレーションにおいて用いた図 8 に示す量子化器の各係数は、文献 [4] のものを用いている．ただし、斜め走査及びマルチ走査における斜め走査を適用している部分（図 7 中の領域 B 及び C）においては、フィルタを通過する回数が従来走査のものとは異なるためフィルタによる利得分だけ量子化係数を調整している．

### 3.1 ウェーブレット変換係数の分布

ウェーブレット変換に用いているフィルタの利得によってそれぞれの走査方法において出力されるウェーブレット変換係数の最大値は異なるため、各走査方法において量子化係数を変えており、ウェーブレット変換係数に対する量子化が効率良く行うことができているかを確認する必要がある．

そこで、各走査方法におけるウェーブレット変換係数の量子化後の係数分布の比較を行った．図 10 に各走査方法における低域成分のウェーブレット変換係数の分布を示す．ここで、図 10 の横軸は、量子化後の係数であり、走査方法によってフィルタ処理を行う回数が異なり、変換係数の理論上の最大値が異なるため、それぞれの走査方法での変換係数の理論上の最大値で規格化を行っている．また縦軸は、各成分の出現確率である．図 10 より各走査方法の低域成分は、ほぼ同じような分布を示しており、これにより各走査方法での量子化係数が妥当な値であることが確認できる．

### 3.2 復号画像の画質評価

従来の走査方法を適用した場合の復号画像を図 11 (a) に、斜め走査を適用した場合の復号画像を同図 (b) に、

マルチ走査を適用した場合の復号画像を同図 (c) に示す．図 11 における平均ビットレートは、約 1.5 bit/pixel である．図 11 より、従来の走査に比べ斜め走査及びマルチ走査による復元画像の PSNR が若干劣っている理由として、斜め走査やマルチ走査では低域成分間の差分を行っており、この差分による冗長性の削除が従来法に比べ完全ではないためと考えられる．

また、走査方法のエッジへの影響を調べるため、それぞれの復号画像においてエッジを多く含む部分の拡大図を図 12 (a) ~ (c) に示す．ただし、ここでは各走査方法が画像の細部に与える影響を見るため、復元画像の拡大には零次ホールド法を用いている．

図 11 (a) ~ (c) より画像の滑らかな部分（低域信号部分）に対してはどの走査方法においても同じような結果が得られていることがわかる．次にエッジ付近については、図 12 (a) の従来走査では、水平・垂直方向のエッジに対する再現性が良くなっている．

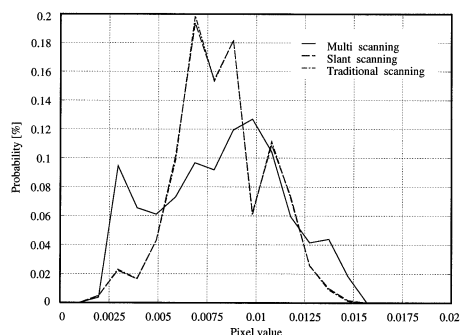


図 10 変換係数の分布

Fig. 10 Distribution of wavelet coefficients.

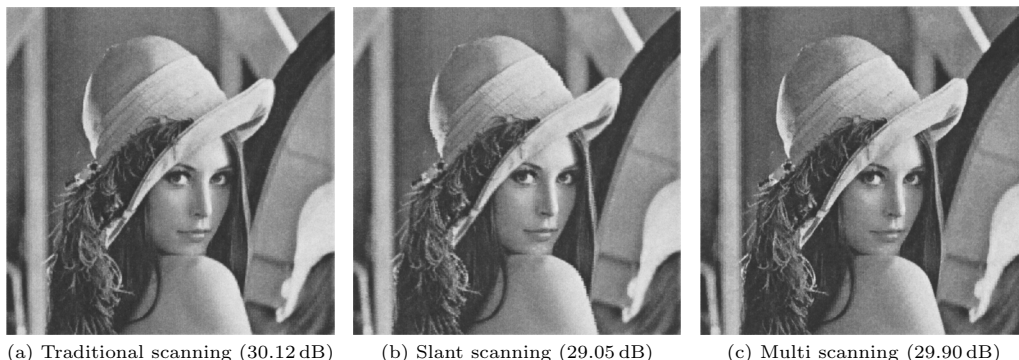


図 11 復号画像

Fig. 11 Reconstruction image.

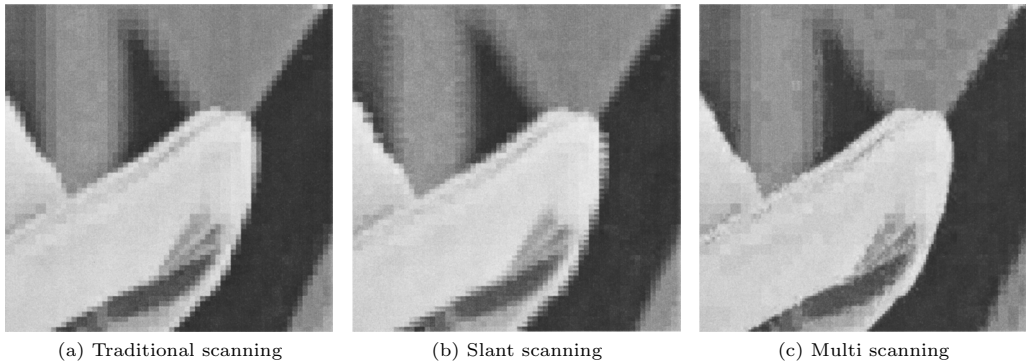


図 12 復号画像の拡大図  
Fig. 12 Magnification of reconstruction image.



図 13 復号画像  
Fig. 13 Reconstruction image.

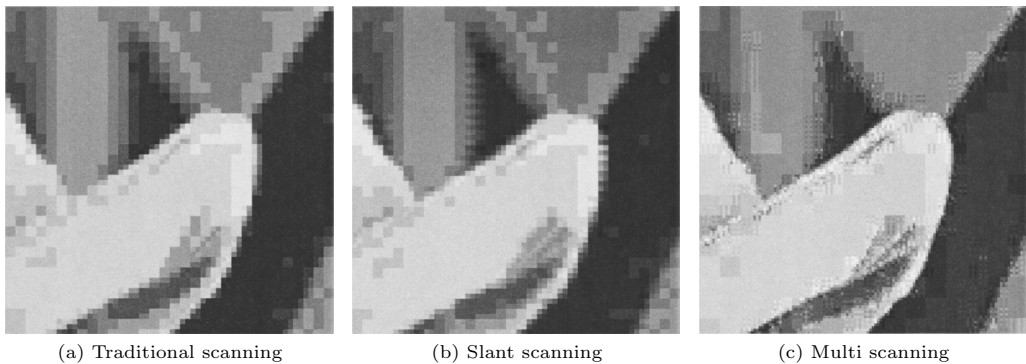


図 14 復号画像の拡大図  
Fig. 14 Magnification of reconstruction image.

それに対し同図 (b) の斜め走査では斜め方向のエッジに対する再現性は向上しているが、水平・垂直方向のエッジに対する再現性はあまり良くない。しかし、同図 (c) のマルチ走査では、水平・垂直・斜め方向の

エッジに対する再現性が他の走査方法に比べ、改善されていることが確認できる。つまり、従来走査及び斜め走査では、走査方向以外のエッジ付近に低域成分の量子化によるブロック状のひずみが生じているのに対

し、マルチ走査ではこのブロック状のひずみが低減されている。

次に、圧縮率を上げた場合においても提案した走査方法の有効性を示すため、圧縮率を上げ、同様の実験を行った。各走査方法における復号画像を図 13 に、拡大図を図 14 に示す。図 13 における平均ビットレートは、約 1.0 bit/pixel である。

図 13 より、先ほど同様滑らかな部分に対しては各走査方法ともほぼ同等の画質が得られていることが確認できる。また、図 14 より、エッジ成分は、マルチ走査を用いた復号画像が他の走査手法による復号画像より画質が優れていることが確認できる。

#### 4. む す び

本研究では画像の再現性及び復号画質改善の観点から各画素を重複することなく走査できる斜め走査によるフィルタバンク符号化を提案し、提案した斜め走査を適用したウェーブレット変換符号化器の設計を行った。ウェーブレット変換には 2 タップのハール基底を用いてフィルタバンクで構成した。斜め走査では、斜め方向のエッジに対する画像の再現性は良いが、水平及び垂直方向のエッジに対する画像の再現性が良くなかった。

そこで両者の特徴をあわせもつ手法としてマルチ走査を提案し、その動作の確認を行った。マルチ走査を適用したウェーブレット変換の復号画像は、水平・垂直及び斜め方向のエッジ成分を再現できることが確認できた。またエッジ付近によく見られるブロック状のひずみが低減されており、従来走査及び斜め走査に比べて視覚的に良好な画像が得られることが確認できた。

更に処理ステップ数は、斜め走査では従来の走査方法に比べ 0.6 倍となり、マルチ走査では 0.84 倍で処理できることが確認できた。

ところで本論文で提案した斜め走査及びマルチ走査は、ウェーブレット変換を行う際のフィルタリング処理における走査方向を変更することで実現できるため、近年提案されているウェーブレット変換による画像符号化方式 (Embedded Zerotree Wavelet: EZW) [5] ~ [7] においても適用可能である。その場合、図 7 において領域 A・D は従来走査を行っているため、EZW をそのまま適用可能であるのに対し、領域 B・C は、斜め走査を行っており、更に低域成分の差分を行っているため、EZW での親と子の関係が成り立たなくなる。しかし、領域 B・C の各画素は、領域 A・D の隣

接画素であるため、非常に強い相関があり、領域 A・D の低域成分を親、領域 B・C を子とみなし、EZW を構成することで EZW の効果が期待できる。

本論文では、フィルタバンクにハール基底を用いてウェーブレット変換を行っており、斜め走査によるウェーブレット変換係数は、図 4 に示すように各階層での帯域の縦・横の大きさが等しく出力されるため問題とはならない。しかし、より高次の基底をフィルタバンクに用いた場合、各階層での帯域の縦・横の大きさが等しくならず、そのまま低域成分間の差分をとることができない。

そこで今後の課題としてマルチ走査の EZW への適用による符号化効率の改善及びフィルタバンクに用いるフィルタの高次化等があげられる。

#### 文 献

- [1] J. Luo, C.W. Chen, K.J. Parker, and T.S. Huang, "Artifact reduction in low bit rate DCT-based image compression," IEEE Trans. Image Processing, vol.5, no.9, pp.1363-1368, Sept. 1996.
- [2] A.S. Lewis and G. Knowles, "Image compression using the 2-D wavelet transform," IEEE Trans. Image Processing, vol.1, no.2, pp.244-250, April 1992.
- [3] T.D. Tran and T.Q. Nguyen, "A progressive transmission image coder using linear phase uniform filterbanks as block transforms," IEEE Trans. Image Processing, vol.8, no.11, pp.1493-1507, Nov. 1999.
- [4] H. Gharavi and A. Tabatabai, "Sub-band coding of monochrome and color images," IEEE Trans. Circuits & Syst., vol.35, no.2, pp.207-214, Feb. 1988.
- [5] J.M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," IEEE Trans. Signal Processing, vol.41, no.12, pp.3445-3462, Dec. 1993.
- [6] C.D. Creusere, "A new method of robust image compression based on the embedded zerotree wavelet algorithm," IEEE Trans. Image Processing, vol.6, no.10, pp.1436-1442, Feb. 1997.
- [7] M. Ohta and S. Nogaki, "Hybrid picture coding with wavelet transform and overlapped motion compensated interframe prediction coding," IEEE Trans. Signal Processing, vol.41, no.12, pp.3416-3424, Dec. 1993.

(平成 13 年 1 月 16 日受付, 5 月 15 日再受付)



後藤 富朗 （正員）

平 9 名工大・工・電気情報卒．平 11 同  
大大学院博士前期課程了．平 12 同大電気  
情報・助手．デジタル信号処理，画像圧  
縮などの研究に従事．



早原 悦朗 （正員）

昭 37 名工大・工・電気卒．昭 42 東工大  
大学院博士課程了．工博．以来，名工大勤  
務．電子回路，信号処理の研究に従事．現  
在，同大電気情報・教授．IEEE 会員．