

## マルチレートフィルタを用いたウェーブレット変換による 感性情報処理

～民族音楽と生理指標解析のための一手法～

江島 崇      高橋 隆一      吉田 典可

広島市立大学 情報科学部 情報工学科

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東3-4-1

eshima@icl.ce.hiroshima-cu.ac.jp,

ryuichi@ce.hiroshima-cu.ac.jp, yoshida@ce.hiroshima-cu.ac.jp

### あらまし

コンピュータを用いて人間の主観を扱おうとする感性情報処理と呼ばれる分野が確立されつつある。音楽を対象とする感性情報処理では音楽そのものの解析、さらには音楽鑑賞時の生理指標解析が問題にされる。音楽や生理指標は非定常的な信号である。ウェーブレット変換は時間的、周波数的に局在した関数を核とする積分変換であり、非定常的な信号解析に有利である。離散ウェーブレット変換のスケールには通常整数値2が用いられるが、マルチレートフィルタを用いることでスケールに任意の有理数を用いることができる。これにより平均律から外れた民族音楽の解析、音楽鑑賞時の生理指標解析のより詳細な解析が可能となる。筆者らは和音の解析、処理の高速化を試みた。

キーワード ウェーブレット変換、マルチレートフィルタ、民族音楽、感性情報処理、ハードウェアアルゴリズム

## Sensitivity Information Processing by Wavelet Transform with Multi-rate Filter

-An approach to the understanding music and psychological indices-

Takashi ESJIMA      Ryuichi TAKAHASHI      Noriyoshi YOSHIDA

Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

3-4-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima City, 731-3194 Japan

### abstract

Research activities on human feelings has being brisked. When we have an interest in music, this field, which is usually addressed as "Sensitivity Information Processing", deals with both the sound itself and psychological reactions(indices). Both of these signals are unsteady. Wavelet transform, for which we use so called wavelets on local supports as kernels, enables us to analyze these unsteady signals. By introducing appropriate multi-rate filter, any rational numbers can be used for the scaling parameter, which enable us to analyze sophisticated structures of sounds and psychological indices, including those of ethnic music. We have tried harmony analysis and high-speed implementation of the filter for it by using logic circuits.

**keywords** wavelet transform, multi-rate filter, ethnic music, sensitivity information processing, hardware algorithm

## 1 はじめに

物質的な豊かさから精神的な豊かさが求められる時代に入り、人間の主観を情報処理の研究対象として、人間と機械とのより良い関係を探ることを目的とした感性情報処理と呼ばれる研究領域が確立されつつある [1], [2]. 人間の感性 (感じ方) を扱う感性情報処理は、従来コンピュータが不得意とする分野だと考えられてきた。しかし、コンピュータを用いて感性情報を扱うことが望まれている [3]. 感性情報処理の1つの研究対象として音楽があげられる。演奏や採譜などを行なう手法についてはすでに多くの研究が行なわれてきた [4], [5], [6]. 感性情報は非定常的な信号である。非定常的な信号を解析するためのひとつの手段としてウェーブレット変換がある。上野山らは非定常的なドラム音の解析を行なった [7]. 筆者らは高速な処理を実現するために、離散ウェーブレット変換にデータ駆動型マシン技術を用いることを試みた [8].

本稿では処理の対象として楽曲そのものとその鑑賞によって引き起こされる生理指標変化の2つを扱う。楽曲も生理指標も非定常的な信号である。ウェーブレット変換のスケールは通常2が用いられる。しかし、十二平均律において音譜の比は  $1.059 (= 2^{1/12})$  倍であり、特に民族音楽は五線譜にのらず西洋の音楽よりもゆらぎや豊富な倍音を多く含んでいる [9]. そのため平均律から外れた和音の解析を必要とする。音楽鑑賞時の陶酔と興奮は心拍の変化に現れる [10]. 陶酔や興奮による心拍データの変動も2の冪乗でない比の周波数に現れるため、2つの周波数の同時解析が望まれる。

筆者らはマルチレートフィルタ [11] を用いることでスケールに任意の有理数を用い得ることに注目した。2節ではウェーブレット変換について概説する。3節ではマルチレート信号処理について概説する。4節ではマルチレートウェーブレット変換について説明する。5節ではマルチレートウェーブレット変換の感性情報処理への適用について述べる。具体的に、オクターブ抽出、和音の抽出、生理指標の解析手法を示す。6節ではハードウェアで実現することによる高速化の試みについて述べる。

## 2 ウェーブレット変換

### 2.1 ウェーブレット

ウェーブレット変換では時間的にも周波数的にも局在したウェーブレット関数を積分変換の核とする。(1)式にトゥー・スケール関係を示す:

$$\phi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} p_k \phi(2x - k) \quad (1)$$

与えられた数列  $\{p_k\}$  に対して、(1)式を満たす関数  $\phi(x)$  はスケーリング関数と呼ばれる。スケーリング関数を用いることでマザー・ウェーブレットが次式で定義される:

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} q_k \phi(2x - k) \quad (2)$$

関数  $f(x)$  のマザー・ウェーブレット  $\psi(x)$  によるウェーブレット変換は次式で定義される:

$$(W_\psi f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (3)$$

ウェーブレット変換  $(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})$  を  $d_k^{(j)}$  と書き、離散化を行うことによって(3)式から次の離散ウェーブレット変換が導かれる:

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (4)$$

### 2.2 多重解像度解析

スケーリング関数  $\phi$  が与えられると、それぞれのレベル  $j \in \mathbb{Z}$  について  $\{\phi(2^j - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$  の張る空間  $V_j$  が決まる。任意の関数  $f_j \in V_j$  は次式で表される:

$$f_j(x) = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^j x - k) \quad (5)$$

上位レベルの関数  $f_{j+1}$  と下位の関数  $f_j$  との差分関数  $g_j$  は次式で与えられる:

$$g_j(x) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_H(2^j x - k) \quad (6)$$

信号の分解においては、次の分解アルゴリズムが使用される:

$$c_k^{(j-1)} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} a_{l-2k} c_l^{(j)} \quad (7)$$

$$d_k^{(j-1)} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} b_{l-2k} c_l^{(j)} \quad (8)$$

ウェーブレット変換によって得られる信号  $f$  は階層構造を有する:

$$f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x) \quad (9)$$

これを再帰的に繰り返すことによって、 $f_j$  は次式のように与えられる:

$$f_j(x) = g_{j-1}(x) + \dots + g_{j-n}(x) + f_{j-n}(x) \quad (10)$$

以下では  $j$  をレベルと呼ぶ。レベル  $j$  の関数  $f_j$  のレベルを 1 下げると解像度は半分になる。 $\{f_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$  が解像度の階層構造をもつことを多重解像度解析という。

### 3 マルチレート信号処理

#### 3.1 インタポレータ

インタポレータとはアナログ信号  $x_a(t)$  を周期  $T$  でサンプルした信号  $x(mT)$  のサンプリング周波数を  $L$  倍に増加させるシステムである。ここに  $m$  は整数、 $L$  は自然数である。以下ではサンプリング周波数を  $F_s$  で表す。

信号  $x(mT)$  と新しいサンプリング間隔  $T' = T/L$  でサンプリングして得られる信号  $y(mT')$  は次式で表される:

$$y(mT') = x_a(mT/L) \quad (11)$$

アップサンプリングされた信号はフィルタによりイメージング成分を除去する。

#### 3.2 デシメータ

デシメータとはアナログ信号  $x_a(t)$  を周期  $T$  でサンプリングした離散信号  $x(nT)$  のサンプリング周波数を  $1/M$  倍に減少させるシステムである。ここに  $n$  は整数、 $M$  は自然数である。

$x_a(t)$  を新しい周期  $T' = MT$  でサンプリングした信号を  $y(nT')$  とすると、 $x(nT)$  との関係は次式で表される:

$$y(nT') = x(nMT) \quad (12)$$

エイリアジングを回避するため、信号はダウンサンプリングされる前にフィルタにより帯域制限される。

#### 3.3 マルチレートフィルタ

$L$  倍のインタポレータと  $1/M$  倍のデシメータを用いることで  $L/M$  倍のマルチレートフィルタを構成できる (図 1)。インタポレータとデシメータを組み合わせることにより、それ

ぞれのフィルタ  $H_I(z), H_D(z)$  は次のようにまとめることができる:

$$H(z) = H_I(z)H_D(z) \quad (13)$$

ここで  $L < M$  の場合は (13) 式の関係になるが、 $L > M$  の場合エイリアジングは生じないため  $H(z) = H_I(z)$  となる。

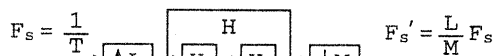


図 1: マルチレートフィルタのブロック図

### 4 マルチレートウェーブレット変換

ここではマルチレートフィルタを用いて離散ウェーブレット変換のスケールを変える手法について詳述する。

2 スケール・ウェーブレット変換は周波数帯域  $0 \leq \omega \leq \pi$  を 2 分割する低域フィルタ  $F_L(z)$  と高域フィルタ  $F_H(z)$  を構成する (図 2)。離散信号  $f_j(x)$  は高周波成分  $g_{j-1}(x)$  と低周波成分  $f_{j-1}(x)$  に分割される。

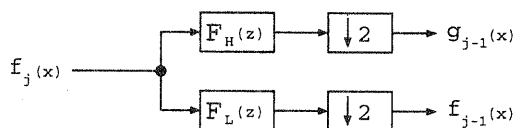


図 2: 離散ウェーブレット変換

マルチレートフィルタを用いることにより、スケールに有理数  $v$  をもつ  $v$  スケール・ウェーブレット変換を実現できる (図 3)。ウェーブレット変換によって求められた  $f_{-1}(x)$  を降を分解する際、2 分の 1 の間引きと  $L$  倍の補間は一つにまとめることができる (図 4)。それにより  $v$  スケール・ウェーブレット変換は図 5 のように構成される。

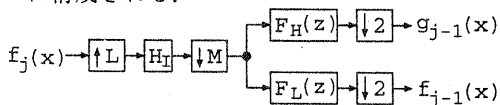


図 3:  $v$  スケール・ウェーブレット変換

$f_{-1}$  以下を分割する際、分解アルゴリズムの (7) 式を次のように書き換えて 2 分の 1 に間引かれていない数列  $c_k^{(j-1)}$  を求めることができる:

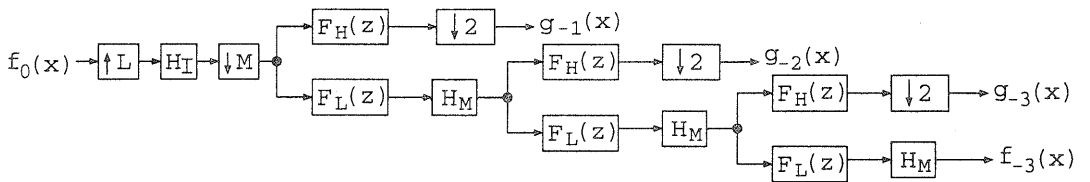


図 5:  $v$  スケール・ウェーブレット変換の実現

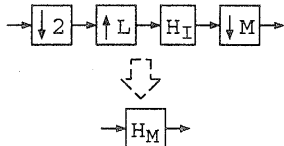


図 4: フィルタの置き換え

$$c_k^{(j-1)} = \sum_l a_{l-k} c_l^{(j)} \quad (14)$$

図 4 の置き換えにより  $L < M$  となるが、ウェーブレット変換後の  $f(x)$  はサンプリング周波数の  $1/4$  倍を越える周波数帯域にエネルギーはもたないためエイリアジングは生じない。  $L$ ,  $M$  の関係は  $\frac{1}{2} \leq L/M < 1$  とならなければならない。

$v = \frac{L}{M}$  は変換前のサンプリング周波数  $F_a$  と変換後のサンプリング周波数  $F_b$  の比になり、次式で表される:

$$v = \frac{L}{M} = \frac{F_b}{F_a} \quad (15)$$

これにより有理数  $v$  に対して (15) 式の関係を満たす  $L, M$  を選ぶことによって離散ウェーブレット変換の周波数軸におけるスケールを任意に変えることができる。

周波数が  $|\Omega| \leq F_s \frac{1}{2}$  に帯域制限された信号  $f(x)$  を考える。  $f(x)$  を  $F_s$  [Hz] でサンプリングされた信号とすると、サンプリング定理より  $F_s/2$  [Hz] までの信号を表せる。 2スケール、 $v$  スケールそれぞれのウェーブレット変換によってレベル -3 まで分解した結果を図 6 に示す。 $v$  スケール・ウェーブレット変換は 2 スケール・ウェーブレット変換よりも各レベルが表す周波数帯域が狭くなることわかる。

## 5 感性情報処理への適用

### 5.1 処理の実現

離散ウェーブレット変換にマルチレートフィルタを組み込んだ処理系を C 言語でプログラ

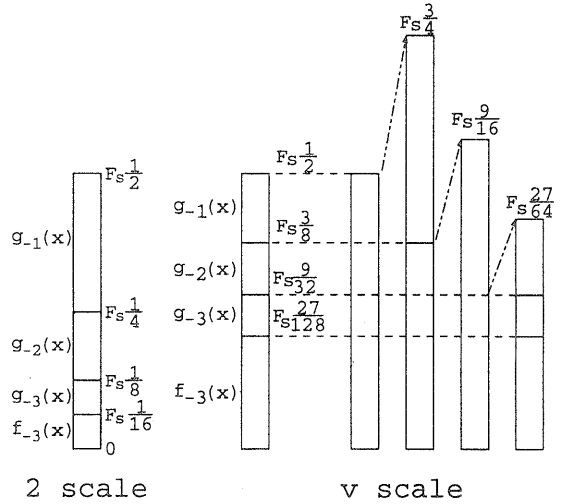


図 6: 2,  $v$  スケール・ウェーブレット変換

ミングし、SPARC Station 上に実装した。プログラムサイズはウェーブデータの型変換が 245 行、ウェーブレット変換が 609 行、結果を表示するものが 812 行程度であった。マザー・ウェーブレットには 4 階の B スプライン関数を用いた。補間の手段としては直線補間を用いた。

### 5.2 オクターブ抽出

$x$  軸に沿って長さ  $l$  の弦を引っ張って放した時の運動において、 $x$  軸に直交する弦の変位は時間と共に変動するため  $u(x, t)$  と表される。張力を  $T$ 、弦の断片の質量を  $\rho \Delta x$  とすると、次の波動方程式が得られる:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

この式から、時刻  $t = 0$  に弦上の  $x = a$  の場所を高さ  $A$  まで引き上げて、弦を静かに放した場合、振幅として次式が得られる:

$$B_n = \frac{2Al^2}{\pi^2 a(l-a)n^2} \sin\left(\frac{n\pi}{l} a\right) \quad (17)$$

この式から振幅は  $n^2$  に比例して減衰することがわかる。

ピアノ音における振幅の減衰を調べるために、 $c1C(261.63\text{Hz})$  の整数倍を選んだ。

44.1KHzでサンプリングを行なった場合、2スケール・ウェーブレット変換では分解の中心となる周波数がCに合わない。2スケール・ウェーブレット変換により11.025Hzの信号を表すことのできる  $g(x)$  までを求めた後、マルチレートフィルタにより  $f(x)$  のサンプリング周波数を837/1103倍することで中心となる周波数をCに合わせることができ。

ピアノの  $c1C(261.63\text{Hz})$  を  $v$  スケール・ウェーブレット変換により解析した結果を図7に示す。基本振動数となる261.63Hzがもっとも長い時間持続し、周波数が高くなるほど早く収束していることがわかる。

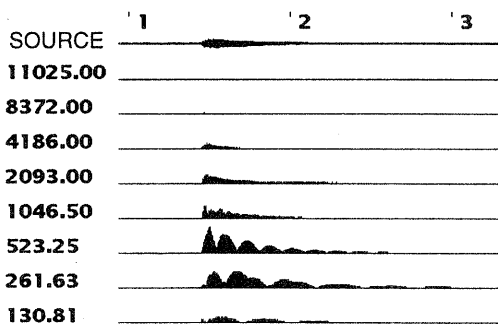


図7: 振幅の減衰

### 5.3 十二平均率音階の和音抽出

和音を調べるためにハ長調のV度を選んだ。サンプリング周波数を44.1KHzとした場合、2スケール・ウェーブレット変換により686.06Hzを表すことのできる  $g(x)$  まで求めた後、 $f(x)$  から抽出したい音より高い周波数成分を除去し、その後抽出したい周波数成分のみを取り出す。図8に  $c1H(493.88\text{Hz})$  から  $cA(220.00\text{Hz})$  までを抽出するブロック図を示す。

図9に結果を示す。  $cH(246.94\text{Hz})$ ,  $c1D(293.66\text{Hz})$ ,  $c1G(392.00\text{Hz})$  が抽出されていることがわかる。  $c1G$  は音の立ち上がりと同時に抽出されているが、  $c1D$  は立ち上がりより遅れた時間から抽出され、  $c1G$  は立ち上がりから1秒以上遅れて抽出されている。

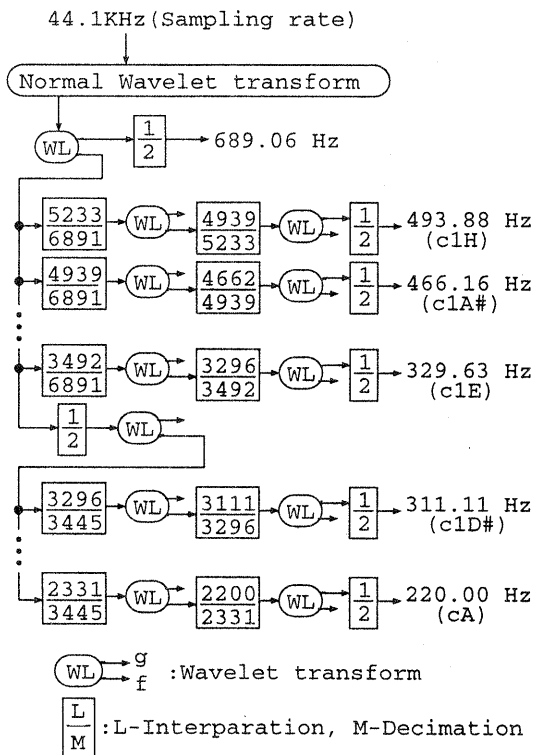


図8: 十二平均率での楽音抽出

### 5.4 生理指標解析

音楽鑑賞時の心拍データの場合は0.2-0.3Hz, 0.08-0.1Hz, 0.05Hz以下の成分にそれぞれ呼吸性、血圧性、体温性という三つの要因による変動が認められる。副交感神経による陶醉は呼吸性の変動に対応し、交感神経による興奮は血圧性の変動に対応すると考えられている[10]。従来の方法[12]では呼吸性の変動と血圧性の変動を同時に解析することは困難だった。

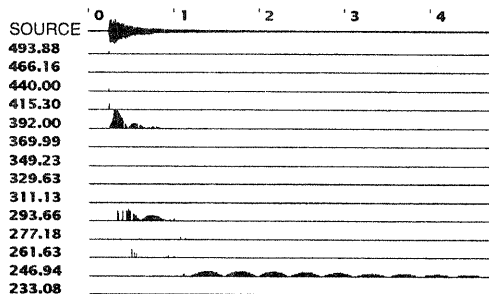


図9: V度のカデンツ解析

抽出したい周波数を 0.25Hz, 0.09Hz とすることで、呼吸性の変動と血圧性の変動を同時に解析できる。

## 6 ハードウェアによる実現

高速処理が期待されるため、ハードウェアによって実現した場合の程度の規模になるかについて Verilog-HDL で記述して評価を行なった。マルチレートフィルタは3段のパイプラインで構成した(図10)。記述量は866行程度であった。各モジュールの回路規模を表1に示す。合成において、テクノロジーは xc4000e を仮定した。最長パスは Stage3 の 198nsec. であった。198nsec. のうち Divider の最長パスは 184nsec. であった。

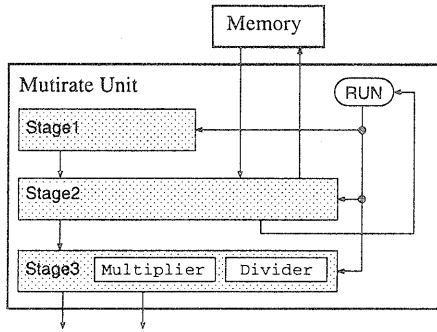


図 10: マルチレートフィルタのブロック図

表 1: マルチレートフィルタの回路規模

	最大クロック 周波数 (MHz)	最長パス (nsec.)	セル数
Stage1	100.000	10	176
Stage2	34.483	29	856
Multiplier	90.909	11	647
Divider	5.435	184	1329
Stage3	5.051	198	2340
Multirate Unit	5.128	195	3323

## 7 まとめ

ウェーブレット変換の処理過程にマルチレートフィルタを用いることにより、楽音からオクターブ抽出と和音抽出、音楽鑑賞時の心拍データにおける呼吸性変動と血圧性変動の同時解析手法を示した。ハードウェアで実現した場合の規模のおよその評価を示した。和音/信

号抽出での低周波数帯域における時間の遅れを改善することが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 笠原 裕: "感性のあるコンピュータ", コンピュータローラ No.37, pp. 82-87 コロナ社 (1992).
- [2] 方寄晴弘: "コンピュータミュージック" コンピュータローラ No.37, pp. 88-93 コロナ社 (1992).
- [3] 井口征士: "感性情報処理" 信学誌 Vol.80, No. 10, pp. 1007-1012 (1997).
- [4] 高見啓史, 片寄晴弘, 井口征士: "ピアノ演奏における演奏情報の抽出", 信学論 (D-II) Vol.J72-D-II, No.6, pp. 917-926 (1989).
- [5] 片寄晴弘, 井口征士: "知的採譜システム", 人工知能学会誌 vol.5, No.1, pp. 59-66 (1990).
- [6] Kronland-Martinet, R., and A. Grossmann.: "Application of time-frequency and time-scale methods(wavelet transforms)to the analysis, synthesis and transformation of natural sounds.", In G. De Poli, A.Piccialli, and C.Roads, eds. Representations of Musical Signals. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press. pp.45-85 (1991).
- [7] 上野山 努, 櫻村雅章, 小沢慎治: "ドラム音の音色における感性情報と工学的パラメータとの対応付け", 日本音響学会誌, 49 巻 10 号, pp. 671-681(1993).
- [8] 江島 崇, 菊地賀子, 高橋隆一, 吉田典可: ウェーブレット変換のためのスケーラブルなデータ駆動型マシンの一構成法, 第 56 回情処全大 2N-3 (1998).
- [9] 大橋 力, 河合徳枝, 仁科エミ: "音楽と音の非定常性", ゆらぎの科学 1 武者利光編, 森北出版, pp. 117-154 (1991).
- [10] Iwanaga M., Tsukamoto M.: "Effects of Excitatory and Sedative Music on Subjective and Physiological Relaxation," Perceptual and Motor Skills, 85, pp. 287-296, (1997).
- [11] Vaidyanathan, P.P.: Multirate Digital Filters, Filter Banks, Polyphase Networks, and Applications: A Tutorial, Proc. IEEE, vol. 78, no.1, pp.56-93, (1990).
- [12] 森安紀之, 岩永 誠, 高橋隆一, 吉田典可: ウェーブレット変換を用いた心拍データの解析～音楽鑑賞によるリラクゼーションを求めて～, 情処研報, MUS 25-4, pp.21-27 (1998).