

[チュートリアル招待講演] 多次元フィルタバンクの設計と その映像信号処理応用

村松 正吾[†]

†新潟大学 工学部 電気電子工学科
〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町 8050
E-mail: †shogo@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 多次元信号処理の基礎とその画像・映像信号処理応用について、筆者がこれまでに携わってきた研究を中心に解説を行う。多次元信号の標本化とスペクトラムの周期性の関係にはじまり、多次元非分離処理の必要性について解説する。また、多次元マルチレート信号処理の簡単な導入を行い、一般的な非分離処理の表現や標本化格子変換のスペクトラムへの影響について述べる。多次元フィルタバンクの設計に関する話題として、可逆デインタレース処理とその Motion-JPEG2000 応用、非分離直交ウェーブレット変換と再構成歪みの空間相関、非分離サブサンプリング時空間フィルタリングの可能性について概説する。

キーワード 多次元フーリエ解析, 標本化格子変換, デインタレース, フィルタバンク, ウェーブレット変換

[Tutorial] Design of Multidimensional Filter Banks and Its Application to Video Signal Processing

Shogo MURAMATSU[†]

† Dept. of Electrical and Electronic Eng., Faculty of Eng., Niigata University
8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181, Japan
E-mail: †shogo@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract Basics of multidimensional (M-D) signal processing and its applications to image and video signal processing are dealt with, focusing on some author's previous works. Discussions start with a brief review of the relation between M-D sampling and spectrum periodicity, and then proceed to the significance of M-D non-separable processing. M-D multirate signal processing is also introduced and then expressions generalized for the non-separable processing are given. As well, the influence of sampling lattice alteration to frequency characteristics is summarized. As topics on M-D filter bank design, invertible deinterlacing and its application to Motion-JPEG2000, non-separable orthogonal wavelets and its relation to spatial correlation of distortion, and possibilities of non-separable sub-sampling spatio-temporal filtering are overviewed.

Key words M-D Fourier analysis, Sampling lattice alteration, Deinterlacing, Filter banks, Wavelet transforms

1. ま え が き

画像や映像は、2つ以上の変数をもつ多次元信号と考えられる。これら多次元信号を取り扱う信号処理技術の一部は、1次元信号処理の単なる拡張によって与えられることもある。応用によっては、例えばフィルタリングや周波数解析、変換処理など、各変数に対して独立に1次元信号処理を施す分離処理で十分な効果が得られることも少なくない。演算コストやメモリ容量/アクセスを削減する目的で選択されることもある[1-4]。

一方で、画像や映像の処理においては、1次元信号では存在しない多次元特有の問題もある。その代表例が標本化とエリア

シングの関係である。画像や映像を取得する際、明確な帯域制限は施されない。光学系によりアレイセンサ上に結ばれた像はそのままだ信号として取り込まれ、周波数スペクトラムは複雑なサポート形状をもち得る。結果として、よりよい性能のシステムを実現するためには、非分離処理の導入が不可欠となる。与えられた画像や映像に依存するエッジ検出や動きの検出/推定が行われるのは、適切な処理を選択するために周波数スペクトラムのサポート形状を推定していることに他ならない[5-9]。

また、多次元においては、同じ標本化密度を与える標本化パターンが無数に存在する。このことは同じ間引き率を与えるダウンサンプリングや同じ補間率を与えるアップサンプリングが

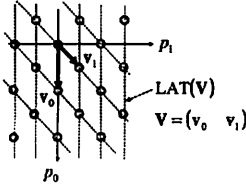


図1 多次元信号の標本化点 ($D=2$ の例)

複数存在することを意味する..

1次元の場合、直交性、直線位相特性、重複性を同時に満たす2分割フィルタバンクは存在しない[10]。同じことは分離型2×2分割フィルタバンクにもいえる。一方、非分離型2×2分割フィルタバンクは、先の3つの性質を同時に満足できる。

以上のように、非分離処理は画像や映像を取り扱う際に大変重要であり、更なる発展の可能性を秘めている。本稿では、チュートリアルとして多次元信号処理の表現を整理し、多次元フーリエ解析や多次元標本化など基礎的事項について概説する。また、筆者らの研究を中心に、多次元特有の問題を取り扱った多次元フィルタバンク設計に関する話題に触れる。

2. 多次元信号処理の基礎

本章では、多次元信号のベクトル表記を導入し、多次元の標本化、フーリエ解析、 Z 変換、畳み込み演算について概説する。

2.1 多次元信号の表現

まず、 D 次元の信号について変数のベクトル表記を導入する。以下、 R は実数、 Z は整数、 R^D は D 次元実数ベクトル、 Z^D は D 次元整数ベクトルの集合とする。

D 個の連続変数 p_d 、ならびに離散変数 n_d をもつ D 次元信号は、 D 次元ベクトルを変数として、それぞれ

$$x(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in R^D \quad (1)$$

$$x[\mathbf{n}], \mathbf{n} \in Z^D \quad (2)$$

と表現できる。静止画像の輝度成分のみの場合、 $x(\mathbf{p}), \mathbf{p} \in R^2$ 、もしくは $x[\mathbf{n}], \mathbf{n} \in Z^2$ と表現できる。動画の場合は時間方向を強調して、 $x(\mathbf{p}_t^T), \mathbf{p} \in R^2, t \in R$ 、もしくは、 $x[\mathbf{k}_t^T], \mathbf{n} \in Z^2, k \in Z$ と表記することもある。

2.2 多次元標本化

D 次元連続信号 $x(\mathbf{p})$ の標本化は、 $D \times D$ 非特異行列 $\mathbf{V}$ によって、

$$x[\mathbf{n}] = x(\mathbf{V}\mathbf{n}) \quad (3)$$

と表現できる。 $\mathbf{V}$ は標本化行列と呼ばれる。標本点の集合（標本化格子）は、図1に示すように、行列 $\mathbf{V}$ の列ベクトル群 $\{\mathbf{v}_d\}$ で生成される並行超平面体（2次元では平行四辺形）を標本空間に敷き詰めてできる頂点の集合となる。標本化格子は、

$$\text{LAT}(\mathbf{V}) = \{\mathbf{V}\mathbf{n} \in R^D | \mathbf{n} \in Z^D\} \quad (4)$$

と表現できる。可分離標本化 $x[n_0, n_1] = x(n_0 p_0, n_1 p_1)$ の場合、標本化行列は $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} p_0 & 0 \\ 0 & p_1 \end{pmatrix}$ のように対角行列となる。な

お、同じ格子を与える標本化行列は一意ではない。行列式の絶対値が‘1’となる(ユニモジュラ)整数行列を $\mathbf{E}$ をとすると、 $\mathbf{V}' = \mathbf{E}\mathbf{V}$ もまた $\mathbf{V}$ と同じ標本化格子を与える。

2.3 周期信号

多次元周期信号は、連続、離散の場合それぞれ、

$$x[\mathbf{n}] = x[\mathbf{n} - \mathbf{N}\ell], \mathbf{n}, \ell \in Z^D \quad (5)$$

$$x(\mathbf{p}) = x(\mathbf{p} - \mathbf{U}\ell), \mathbf{p} \in R^D, \ell \in Z^D \quad (6)$$

という条件を満たす。ここで、 $\mathbf{N}$ は $D \times D$ 非特異整数行列、 $\mathbf{U}$ は $D \times D$ 非特異実数行列であり、共に周期行列と呼ばれる。

周期行列が対角である場合、周期性の条件は各軸独立に成立する。例えば、2次元連続信号において、 $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_0 & 0 \\ 0 & U_1 \end{pmatrix}$ と与えられると、 $x(\mathbf{p}_d) = x(\mathbf{p}_d - \frac{U_0}{U_1} \ell_d)$ 、 $p_d \in R, \ell_d \in Z$ が成立する。なお、同じ周期を与える行列は一意には決まらない。

2.4 多次元フーリエ解析

信号の周波数特性やシステムの周波数応答を解析することは多次元においても重要である。以下では、多次元のフーリエ変換、離散空間フーリエ変換の定義を示そう。

2.4.1 フーリエ変換 (FT)

変数が連続かつ非周期（孤立）である多次元信号 $x(\mathbf{p})$ のフーリエ解析法として、多次元のフーリエ変換 (FT: Fourier Transform) とその逆変換の定義を以下に示す。

$$X(j\Omega) = \int_{\mathbf{p} \in R^D} x(\mathbf{p}) e^{-j\Omega^T \mathbf{p}} d\mathbf{p}, \Omega \in R^D \quad (7)$$

$$x(\mathbf{p}) = \frac{1}{(2\pi)^D} \int_{\Omega \in R^D} X(j\Omega) e^{j\Omega^T \mathbf{p}} d\Omega, \mathbf{p} \in R^D \quad (8)$$

式(7)(8)の積分は、変数 $\mathbf{p}$ 或いは Ω の各要素を積分変数とする重積分である。 $X(j\Omega)$ もまた連続かつ非周期となる。

2.4.2 離散空間フーリエ変換 (DSFT)

変数が離散かつ非周期（孤立）である信号 $x[\mathbf{n}]$ のフーリエ解析法である離散空間フーリエ変換 (DSFT: Discrete Space FT) とその逆変換の定義を以下に示す。

$$X(e^{j\omega^T}) = \sum_{\mathbf{n} \in Z^D} x[\mathbf{n}] e^{-j\omega^T \mathbf{n}}, \omega \in R^D \quad (9)$$

$$x[\mathbf{n}] = \frac{1}{(2\pi)^D} \int_{\omega \in [0, 2\pi)^D} X(e^{j\omega^T}) e^{j\omega^T \mathbf{n}} d\omega, \mathbf{n} \in Z^D \quad (10)$$

ただし、 $[0, 2\pi)^D = \{\omega \in R^D | 0 \leq \omega_d < 2\pi, d = 0, 1, \dots, D-1\}$ である。式(10)の積分もまた変数 ω の各要素を積分変数とする重積分である。 $X(e^{j\omega^T})$ は連続かつ周期信号となる。

2.5 多次元 Z 変換の定義

多次元信号処理においても Z 変換が定義され、システムの解析や実現に大変有用である。多次元の Z 変換は、

$$X(\mathbf{z}) = \sum_{\mathbf{n} \in Z^D} x[\mathbf{n}] \mathbf{z}^{-\mathbf{n}}, \mathbf{z} \in C^D \quad (11)$$

と定義される。ただし、 C^D は D 次元複素ベクトルの集合である。ベクトル $\mathbf{z}$ のベクトル $\mathbf{m}$ 乗は、

$$\mathbf{z}^m = z_0^{m_0} z_1^{m_1} \dots z_{D-1}^{m_{D-1}} \quad (12)$$

と要素毎のべき乗の積を意味する。

式(11)に $\mathbf{z} = e^{j\omega^T}$ を代入すると、 $X(\mathbf{z})|_{\mathbf{z}=e^{j\omega^T}} = X(e^{j\omega^T})$ のように式(9)のDSFTが与えられる。

2.6 畳み込み演算

D 次元インパルス信号は、

$$\delta[\mathbf{n}] = \begin{cases} 1, & \mathbf{n} = \mathbf{0} \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (13)$$

と定義される。ただし、 $\mathbf{n} \in Z^D$ であり、 $\mathbf{0}$ は全ての要素が0となる D 次元ベクトルとする。多次元の線形シフト不変システム $T\{\cdot\}$ は、そのインパルス応答 $h[\mathbf{n}] = T\{\delta[\mathbf{n}]\}$ により、入出力関係を畳み込み演算によって表現できる。 D 次元線形シフト不変システムの入出力関係は、

$$y[\mathbf{n}] = \sum_{\mathbf{k} \in Z^D} h[\mathbf{k}] x[\mathbf{n} - \mathbf{k}], \quad \mathbf{n} \in Z^D \quad (14)$$

と表現される。

3. 標本化定理の再確認

1次元信号の標本化間隔 T による標本化は、周期 $1/T$ (角波数では $2\pi/T$) でのスペクトラムの周期化を意味する。標本化格子 $\text{LAT}(\mathbf{V})$ による標本化もまた、周波数領域におけるスペクトラムの周期化を意味する。本章では、この多次元標本化とスペクトラムの関係について概説する。

3.1 多次元標本化とスペクトラム

多次元標本化の周波数領域での影響を確認するために、多次元標本列を連続信号として表現し、フーリエ変換を行なう。まず、準備として任意の連続関数 $\phi(\mathbf{p})$ を

$$\int_{\mathbf{p} \in R^D} \delta(\mathbf{t}) \phi(\mathbf{p}) d\mathbf{p} = \phi(\mathbf{0}) \quad (15)$$

のように $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ のときの値 $\phi(\mathbf{0})$ と関連付ける関数 $\delta(\mathbf{p})$ (多次元連続 δ 関数) を導入する。

すると、連続信号 $x(\mathbf{p})$ の標本化行列 $\mathbf{V}$ による標本化は

$$x_{\mathbf{V}}(\mathbf{p}) = x(\mathbf{p}) \cdot \left\{ \sum_{\mathbf{n} \in Z^D} \delta(\mathbf{p} - \mathbf{V}\mathbf{n}) \right\} \quad (16)$$

と表現される。標本化後の信号 $x_{\mathbf{V}}(\mathbf{p})$ もまた連続変数で表現される。この信号のフーリエ変換 $X_{\mathbf{U}}(j\Omega)$ は、

$$X_{\mathbf{U}}(j\Omega) = \frac{1}{|\det \mathbf{V}|} \sum_{\mathbf{k} \in Z^D} X(j(\Omega - \mathbf{U}\mathbf{k})) \quad (17)$$

となる。ここで、 $|\det \mathbf{V}|$ は $\mathbf{V}$ の行列式の絶対値である。標本化行列 $\mathbf{V}$ の列ベクトルが生成する平行超平面体 (平行四辺形) の体積 (面積) であり、その逆数は標本化密度 (1次元場合、 $1/T$) に相当する。また、 $X(j\Omega)$ は、元の連続信号 $x(\mathbf{p})$ のフーリエ変換である。注目すべき点は、 $X_{\mathbf{U}}(j\Omega)$ が、周期 $\mathbf{U}$ の周期信号となる点である。この周期行列 $\mathbf{U}$ は、標本化行列 $\mathbf{V}$ より、

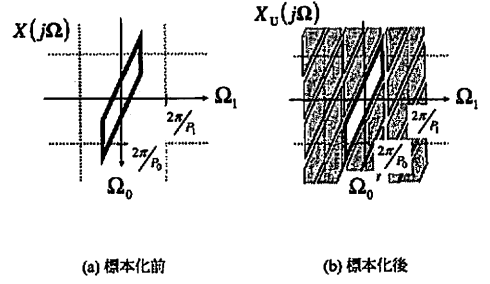


図2 多次元標本化の寛容性

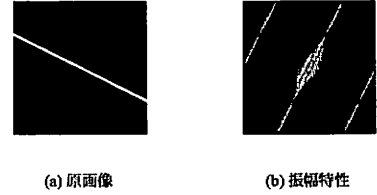


図3 エッジを含む画像のスペクトラム ($|\Omega_d| \leq \pi/P_d$ の範囲を表示)

$$\mathbf{U} = 2\pi \mathbf{V}^{-T} \quad (18)$$

と与えられる。

標本化後の信号のフーリエ変換とDSFTの間には $X(e^{j\omega^T}) = X_{\mathbf{U}}(j\Omega)|_{\Omega=\mathbf{U}\omega/2\pi}$ という密接な関係がある。DSFTの変数 ω は、周期 $\mathbf{U}$ を $2\pi\mathbf{I}$ に正規化した角周波数と見なせる。

3.2 多次元標本化の寛容性

多次元では、1次元の標本化定理を各軸独立に拡張して議論することができない。以下、多次元フィルタを設計するうえで非常に重要な事実を例示している。

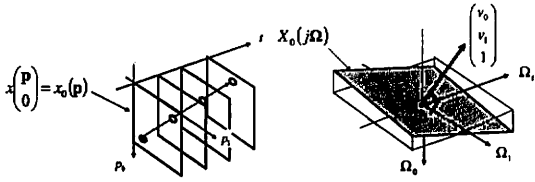
図2(a)の周波数サポート領域をもつ2次元連続信号 $X(j\Omega)$ を可分離標本化行列 $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} P_0 & 0 \\ 0 & P_1 \end{pmatrix}$ で標本化することを考える。スペクトラムの周期は、式(18)より、 $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 2\pi/P_0 & 0 \\ 0 & 2\pi/P_1 \end{pmatrix}$ となる。図2(b)にこの標本化後の信号の周波数スペクトラムのサポート領域を示す。

1次元の標本化の考え方を各軸独立に適用すれば、 Ω_0 の軸についてはエリアシング回避の条件を満たしていない。すなわち、元の信号が π/P_0 を超えた周波数成分を含んでいる。にもかかわらず、図2(b)ではエリアシングを全く起こさことなく周期化されている。すなわち、基本スペクトラムを取り出せるフィルタが存在すれば、元の連続信号を完全に復元できる。図2(b)に示すような状況が起こり得る具体的な例として、図3にエッジを含む画像とその周波数振幅特性を示す。

3.3 大域的定速移動モデル

映像における動きもまた、図2(b)のような状況を引き起こす。簡単な映像モデルを導入し、このことを以下で解説する。

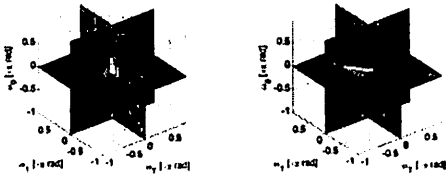
図4(a)に示すように、時刻 $t=0$ におけるフレーム画像を $x_0(\mathbf{p})$ とし、このフレーム全体が一定の速度 $\mathbf{v} = (v_0, v_1)^T$ で移動するモデル



(a) 大域的定速移動モデル

(b) 速度ベクトルとスペクトラム

図4 大域的定速移動モデルのスペクトラム



(a) 静止状態

(b) 動いている状態

図5 大域的定速移動モデルのスペクトラムの例

$$x \begin{pmatrix} p \\ t \end{pmatrix} = x_0(p - vt), \quad p \in R^2, t \in R \quad (19)$$

を仮定する。これを大域的定速移動モデルとよぶ。

$x_0(p)$ のフーリエ変換を $X_0(j\Omega)$ とすると、 $x \begin{pmatrix} p \\ t \end{pmatrix}$ のフーリエ変換 $X \begin{pmatrix} j\Omega \\ t \end{pmatrix}$ は

$$X \begin{pmatrix} j\Omega \\ t \end{pmatrix} = X_0(j\Omega) \cdot 2\pi\delta(\Omega^T v + \Omega_t) \quad (20)$$

のように導出される。このことは、 $(n_0 \ n_1 \ n_2) \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ 1 \end{pmatrix} = 0$ より、 $X_0(j\Omega)$ の周波数スペクトラムが図4(b)に示すようにベクトル $(v_0, v_1, 1)^T$ と直交する平面のみに存在することを意味する。

図5(a)に静止状態、図5(b)に動いている状態の周波数スペクトラムを示す。画像が動くときとスペクトラムが斜めに傾くことが確認できる。

4. 多次元マルチレート信号処理

本章では、多次元の根本化格子変換や多次元フィルタバンクに欠かせない多次元ダウンサンブラと多次元アップサンブラについて概説する。

4.1 多次元ダウンサンブラ

多次元のダウンサンプリングは、間引き率を行列 M として与えることで、

$$y[m] = x[Mm] \quad (21)$$

のように表現できる。行列 M を間引き行列と呼ぶ。

多次元ダウンサンプリングは可分離処理で十分な場合が多い。しかしながら、プログレッシブ映像とインタレース映像の間の

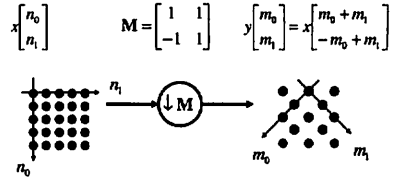


図6 2次元の非分離ダウンサンブラ

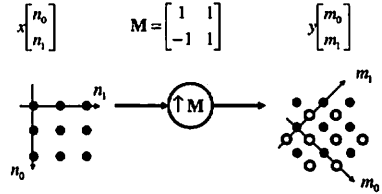


図7 2次元の非分離アップサンブラ

変換など、非分離処理が必要となる重要な応用も少なくない。式(21)において非対角の間引き行列 M を選ぶと、非分離ダウンサンプリングとなる。図6にその一例を示す。

連続信号 $x(p)$ を根本化行列 V で根本化し、離散信号 $x[n]$ を得たとする。 $y[m] = x[Mm] = x(VMm)$ より、 $y[m]$ は $x(p)$ を根本化行列 $V' = VM$ で根本化したものと見なせる。一般的には、間引き行列 M として任意の非特異整数行列を選択できる。また、間引き率は $M = |\det M|$ と与えられる。1次元の場合と同様、多次元ダウンサンプリングにおいてもスペクトラムの折り返し(エイリアシング)が問題となる[1]。

$x[n]$ と $y[m]$ は、 Z 領域において、

$$Y(z) = \frac{1}{|\det M|} \sum_{k \in \mathcal{N}(M^T)} X(e^{-j2\pi k^T M^{-1}} z^{M^{-1}}) \quad (22)$$

という関係をもつ。ここで、 $\mathcal{N}(M^T)$ は M^T の各列ベクトルで生成される平行超平面体内の整数ベクトル集合である。式(22)に $z = e^{j\omega^T}$ を代入するとDSFTの入出力関係

$$Y(e^{j\omega^T}) = \frac{1}{|\det M|} \sum_{k \in \mathcal{N}(M^T)} X(e^{j(\omega - 2\pi k)^T M^{-1}}) \quad (23)$$

が導かれる。 $k = 0$ 以外の変調成分はダウンサンプリングによって生じるエイリアシング成分である。

4.2 多次元アップサンブラ

補間行列 M を用いると多次元アップサンプリングの入出力関係は、

$$y[m] = \begin{cases} x[M^{-1}m], & m \in \text{LAT}(M) \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (24)$$

と表現される。 M が対角であれば可分離処理となる。非対角ならば非分離処理となる。図7に非分離処理の例を示す。

$x[n]$ が連続信号 $x(p)$ を根本化行列 V で根本化したものとする。 $y[m]$ は $x(p)$ を根本化行列 $V' = VM^{-1}$ で根本化し、 $y[m] = 0, m \notin \text{LAT}(M)$ と置き換えたものと見なせる。補間行列 M には、任意の非特異行列を選択することができる。ま

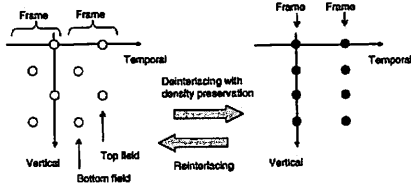


図8 可逆デインタレース処理とその逆変換の概略図(垂直時間平面)

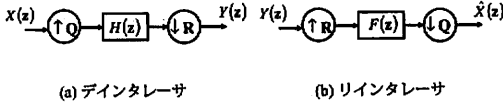


図9 デインタレースとリインタレースの基本構成

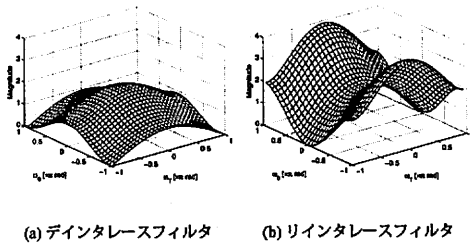


図10 デインタレース/リインタレースフィルタの設計例 ($\theta = 1/2$)

た, 補間率は $M = |\det \mathbf{M}|$ と与えられる. 1次元の場合と同様, 多次元のアップサンプリングも周波数領域においてイメージングを生ずる [1].

Z 変換の定義と式 (24) より, 補間行列 $\mathbf{M}$ をもつアップサンブラの入出力関係は,

$$\mathbf{Y}(\mathbf{z}) = \mathbf{X}(\mathbf{z}^{\mathbf{M}}) \quad (25)$$

と与えられる. 式 (25) に $\mathbf{z} = e^{j\omega^T}$ を代入すると DSFT の入出力関係が

$$Y(e^{j\omega^T}) = X(e^{j\omega^T \mathbf{M}}) \quad (26)$$

と導かれる.

5. 多次元フィルタバンクの設計と応用

本章では, 多次元信号処理の画像・映像信号処理への応用として, 筆者らの研究を中心に解説を行う. 多次元フィルタバンクの設計に関する話題として, 可逆デインタレース処理, 非分離直交ウェーブレット変換, 非分離サブサンプリング時空間フィルタリングの可能性について概説する [11–23].

5.1 可逆デインタレースと Motion-JPEG2000

非分離標本化格子変換を活用する応用例として可逆デインタレース処理を紹介する [13].

可逆デインタレース処理の概略を図8に示す. 非分離標本化されたインタレース映像(左側の格子)を可分離標本化されたプログレッシブ映像(右側の格子)に変換する技術であるが,

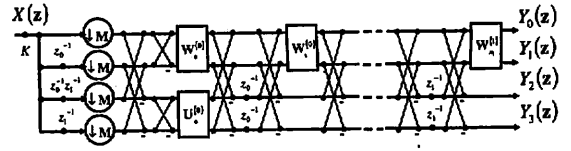


図11 2×2 分割 LPPUFB のラティス構成(分析器). ただし, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$. K はスケーリング係数. $\mathbf{U}_0^{[\theta]}$, $\mathbf{W}_{n,d}^{[d]}$ は正規直交行列.

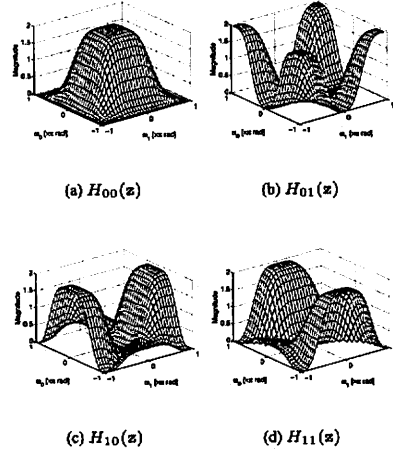


図12 2×2 分割 LPPUFB の振幅応答の例 (12 × 12 タップ)

テレビ受像機などで行われる補間処理とは問題設定が異なる. 第一に標本化密度を保存する. 第二に逆システム(リインタレース)の存在を保証する. すなわち“可逆”である.

基本構成を図9(a)に示す. $\mathbf{Q}$ は, 非分離格子を分離格子へと補間する補間行列, $\mathbf{R}$ は, 標本化密度を保存するための可分離間引き行列である. $|\det \mathbf{Q}| = |\det \mathbf{R}| = 2$ が成立する. 1次元の場合, 密度を保存するレート変換は, 線形シフト不変システムに帰着する. したがって, これは多次元特有の問題である.

文献 [13] では, 2分割フィルタバンクの設計問題に帰着させて $H(\mathbf{z})$, $F(\mathbf{z})$ の設計法を与えている. 以下に一例を示す.

$$H(\mathbf{z}) = 1 + \theta z_T^{-1} + \frac{1-\theta}{2}(z_0^{+1} + z_0^{-1}) \quad (27)$$

$$F(\mathbf{z}) = \frac{1}{\theta} z_T^{-1} \left\{ 1 + \theta z_T^{-1} - \frac{1-\theta}{2}(z_0^{+1} + z_0^{-1}) \right\} \quad (28)$$

式 (27)(28) では, θ を設計パラメータとして, 垂直 ($\theta \sim 0$), 垂直時間 ($\theta = 1/2$), 時間 ($\theta = 1$) と補間方向を連続的に制御可能である. 図10に $\theta = 1/2$ のときのそれぞれの振幅応答を示す. これらのフィルタはリフティング実装, 更にはリフティング DWT へ組み込むことが可能である. 筆者らは, インタレース映像に対する Motion-JPEG2000 の前処理として, この可逆デインタレース処理の適用を提案している [11, 12, 14–18].

5.2 2次元直交 DWT と歪みの空間相関

非分離フィルタを活用する応用例として, 多次元直線位相直交フィルタバンク (LPPUFB) を紹介する.

JPEG2000 で利用される 2次元 DWT は, 1次元 2分割フィ

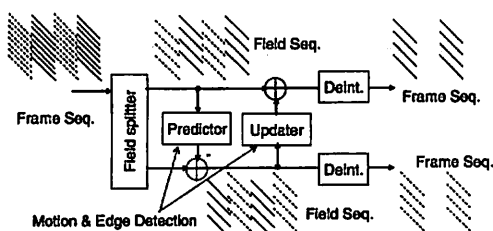


図13 動き・エッジ検出型時空間フィルタリングの構成

ルタバンクの分離処理によって実現される [24]。ただし、1次元2分割フィルタバンクは、重複性、直線位相特性、直交性を同時に満たすことはできない [10]。この制約は、2次元2×2分割分離型フィルタバンクにも引き継がれる。

一方、非分離フィルタを導入することで先の三つの性質を同時に満たす2×2分割LPPUFBが実現可能となる。図11にその設計や実現に利用できるLPPUFBのラティス構成を示す [19]。行列 $U_0^{(0)}$ や $W_{n,d}^{(d)}$ は正規直交行列で、これらに制約を与え、制御することで様々なフィルタを設計できる。図12に12×12タップ、2次のバニッシングモーメントを有する分析フィルタバンクの設計例を示す [20, 21]。このLPPUFBを用いて低域サブバンドを繰返し2×2分割することで2次元対称直交DWTが得られる。筆者らは低ビットレート符号化映像の震動の揺らぎの問題が、再構成画像における歪みの空間相関にあると考え、変換の直交性との関係について検討している。

5.3 動き・エッジ検出型時空間フィルタリング

動きの情報と空間のエッジを活用する応用例として、動き・エッジ検出型時空間フィルタリングを紹介する [22, 23]。

図13に動き・エッジ検出型時空間フィルタリングの分析器の構成を示す。この技術は、スケーラブル映像符号化の要素技術である動き補償時間フィルタリング (MCTF) [4] のフレーム分割器を非分離関引きによるフィールド分割器 (Field Splitter) に置き換え、可逆デインターレース (Deint.) を挿入したものともみなせる。MCTFの予測ステップ (Predictor) と更新ステップ (Updater) では動き補償 (MC) 技術が利用されるが、この演算コストが問題となる。筆者らは、フィールド分割処理の導入により、各ステップでの空間情報の利用を可能とした。動き推定を動き検出と空間的なエッジ検出に置き換え、演算コストの削減を検討している [22, 23]。

6. ま と め

多次元信号処理の基礎とその画像・映像信号処理応用について、筆者らがこれまでに携わってきた研究を中心に解説を行った。分離処理では困難、或いは不可能であった機能や性能が、非分離フィルタや非分離構造化を導入することにより克服、或いは新たな枠組みを与えることがあることを示した。動き・エッジ適応フィルタを活用した映像処理、非分離格子の分散映像符号化への応用など更なる発展に期待する。

文 献

[1] 村松正吾, MATLABによる画像・映像信号処理, CQ出版社, 2007.

[2] D.E. Dudgeon, and R.M. Mersereau, Multidimensional Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1983.

[3] Y. Wan, J. Ostermann, and Y.Q. Zhang, Video Processing and Communications, Prentice Hall, 2001.

[4] J.W. Woods, Multidimensional Signal, Image and Video Processing and Coding, Academic Press, 2006.

[5] G.D. Haan, and E.B. Bellers, "Deinterlacing -- an overview," Proc. of IEEE, vol.86, no.9, pp.1839-1857, Sep. 1998.

[6] B.K. Gunturk, J. Glotzbach, Y. Altunbasak, R.W. Schafer, and R.M. Mersereau, "Demosaicking: Color filter array interpolation," IEEE Signal Proc. Magazine, vol.44, Jan. 2005.

[7] E.L. Pennec, and S. Mallat, "Sparse geometric image representations with bandelets," IEEE Trans. Image Proc., vol.14, no.4, pp.423-438, Apr. 2005.

[8] V. Velisavljević, B. Beferull-Lozano, M. Vetterli, and P.L. Dragotti, "Directionlets: anisotropic multidirectional representation with separable filtering," IEEE Trans. Image Proc., vol.15, no.7, pp.1916-1933, July 2006.

[9] T.T. Nguyen, and S. Orantara, "A class of multiresolution directional filter banks," IEEE Trans. Signal Proc., vol.55, no.3, pp.949-961, Mar. 2007.

[10] P.P. Vaidyanathan, Multirate Systems and Filter Banks, Prentice Hall, 1993.

[11] T. Soyama, T. Ishida, S. Muramatsu, T. Kuge, and H. Kikuchi, "Lifting architecture of invertible deinterlacing," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.4, pp.779-786, Apr. 2003.

[12] T. Ishida, T. Soyama, S. Muramatsu, H. Kikuchi, and T. Kuge, "A lifting implementation of variable-coefficient invertible deinterlacer with embedded motion detector," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.8, pp.1942-1948, Aug. 2003.

[13] S. Muramatsu, T. Ishida, and H. Kikuchi, "Invertible deinterlacing with sampling-density preservation: Theory and design," IEEE Trans. Signal Proc., vol.51, no.9, pp.2343-2356, Sep. 2003.

[14] 石田拓磨, 村松正吾, 菊池久和, 久下哲郎, "可変係数型可逆デインターレース処理," 信学誌 (A), vol.J87-A, no.2, pp.336-341, 2004/2.

[15] J. Uchita, T. Ishida, S. Muramatsu, H. Kikuchi, and T. Kuge, "A parameter decimation technique for variable-coefficient invertible deinterlacing," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.6, pp.1363-1370, June 2004.

[16] T. Ishida, S. Muramatsu, and H. Kikuchi, "Lossless compression of Motion JPEG2000 integrated with invertible deinterlacing," 映像学誌, vol.59, no.7, pp.1011-1019, July 2005.

[17] T. Ishida, S. Muramatsu, and H. Kikuchi, "Motion-JPEG2000 codec compensated for interlaced scanning videos," IEEE Trans. Image Proc., vol.14, no.12, pp.2179-2191, Dec. 2005.

[18] J. Uchita, S. Muramatsu, T. Ishida, and H. Kikuchi, "Parameter embedding in Motion-JPEG2000 through ROI for variable-coefficient invertible deinterlacing," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E89-D, no.11, pp.2794-2801, Nov. 2006.

[19] S. Muramatsu, A. Yamada, and H. Kiya, "A design method of multi-dimensional linear-phase paraunitary filter banks with a lattice structure," IEEE Trans. Signal Proc., vol.47, no.3, pp.690-700, Mar. 1999.

[20] 安達充幸, 比企豊, 村松正吾, 菊池久和, "映像符号化のための直線位相直交非分離ウェーブレット変換と歪みの相関," 第20回回路とシステム経井沢ワークショップ, pp.161-166, 2007/4.

[21] 安達充幸, 比企豊, 村松正吾, 菊池久和, "映像符号化におけるDWTの直交性と歪みの相関," 情報学 AVM 研報, 2007/7, 発表予定.

[22] 比企豊, 村松正吾, 菊池久和, "映像符号化のためのエッジ検出型予測処理を用いた時空間フィルタリングの検討," 信学技報 SIP2007-7, IE2007-7, pp.37-41, 2007/4.

[23] 比企豊, 村松正吾, 菊池久和, "映像符号化のための動き・エッジ検出型予測処理を用いた時空間フィルタリングの検討," 情報学 AVM 研報, 2007/4, 発表予定.

[24] D.S. Taubman, and M.W. Marcellin, "JPEG2000, image compression fundamentals, standards and practice," Kluwer Academic Publishers, 2002.