

フォトリフラクティブ結晶を用いた ウェーブレット変換システム

中川 清・峯本 工

ウェーブレット変換(WT)は、人工地震を用いた石油資源探査において、観測された信号から不連続点を求めるために、1980年代はじめに考案された信号処理手法である。WTでは、フーリエ変換(FT)における三角関数の代りに、時間的/空間的に局所化された関数の平行移動と相似変換結果を用いることで、信号の周波数情報だけでなく、時刻/空間情報も得られる。このため、FTの欠点を補う手法として注目され、信号解析や画像処理への導入が検討されている¹⁾。ここでは、WTによる画像処理を、フォトリフラクティブ(PR)結晶を用いたWT光学システムにより実現した手法について述べる。

1. ウェーブレット変換と光学

2次元画像信号 $s(x, y)$ のWTは、基本ウェーブレット関数 $h(x, y)$ を用いて、四次元の関数 $W(a_x, a_y, b_x, b_y)$ で、

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = (a_x a_y)^{-1/2} \iint s(x, y) h^* \left(\frac{x - b_x}{a_x}, \frac{y - b_y}{a_y} \right) dx dy \quad (1)$$

と定義される²⁾。ここで*は、複素共役を表す。この式は $s(x, y)$ と $h(x, y)$ のコンボリューション積分であり、WTが光学的手法により実行可能であることを推測させる。式(1)は、関数 $s(x, y)$, $h(x, y)$ のFT像 $S(\mu, \nu)$, $H(\mu, \nu)$ を用いて、

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = (a_x a_y)^{1/2} \iint S(\mu, \nu) H^*(a_x \mu, a_y \nu) \cdot \exp[-i2\pi(b_x \mu + b_y \nu)] d\mu d\nu \quad (2)$$

と変形できる。つまり、信号のFT像とウェーブレット関数の拡大/縮小変換結果のFT像間の積のFTで、WTは得られる。複素関数の積のFTは、2つの関数を表す波面の積をホログラム(干渉縞)として記録媒体にいったん記録し、その再生像をFTすることで実行できる。画像信号のFTは1個のレンズで、画像の拡大/

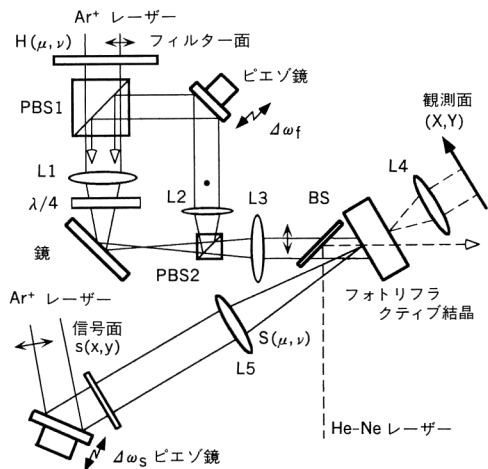


図1 光学的ウェーブレット変換システム、BS：ビームスプリッター、PBS1, 2：偏光ビームスプリッター、L1~L5：レンズ。

縮小変換は、2個のレンズの組合せで実行できる³⁾。ホログラム記録媒体としては現像処理を必要とせず、高い空間分解能を示すPR結晶が利用できる。

2. ウェーブレット変換光学システムの構成原理

PR結晶を用いたWT光学システムを図1に示す⁴⁾。ここでは応答時間が短い $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) 単結晶を用いている。Ar+レーザーから出た光線を2本に分け、一方は $s(x, y)$ 、他方は $H^*(\mu, \nu)$ を記録した空間光変調素子を透過させる。レーザーの偏光は紙面上で振動する。 $s(x, y)$ はレンズL5でFTされ、 $S(\mu, \nu)$ としてPR結晶を照射する。 $H^*(\mu, \nu)$ を含む光線は、偏光ビームスプリッター1(PBS1)とレンズL1(焦点距離 f_1) を通過後、1/4波長板によって円偏光となる。紙面に平行な偏光光線はPBS2を透過し、L3(焦点距離 f_3) を介してPR結晶を照射する。つまり $H(\mu, \nu)$ がL1, L3で結像され、PR結晶に照射される。PBS2を反射した紙面に垂直な偏光光線は、レンズL2(焦点距離 f_2) とビエゾ鏡、そしてPBS1によりL1まで導かれる。この偏光光線はL1とL2により拡大/縮小変換を受けて再びL1

Optical system for wavelets transformation (1996年1月16日受理)
Kiyoshi NAKAGAWA, Takumi MINEMOTO 神戸大学工学部情報知能工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

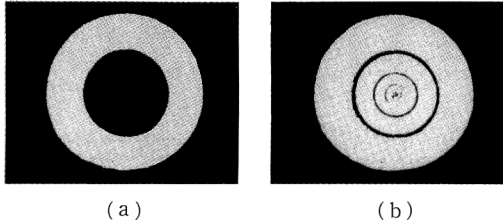


図2 (a)基本ウェーブレット関数 $H^*(\mu, \nu)$ の強度分布, (b)ウェーブレット関数列 $\sum H^*(a^m \mu, a^m \nu)$ の強度分布.

に達する。伝播された変換画像は、両レンズの焦点距離比 $a(=f_2/f_1)$ を用いて、 $H^*(a\mu, a\nu)$ で表される。この画像信号を含む光線は、再び $1/4$ 波長板によって円偏光となり、PBS2 で分離され、 $H^*(a\mu, a\nu)$ も L3 を介して PR を照射する。結果的には $H^*(a^m \mu, a^m \nu)$ (m : 整数) が同時に PR 結晶に照射されることになる。実験で用いられた $H^*(\mu, \nu)$ の強度分布を図2(a)に、PR 結晶に照射された $\sum H^*(a^m \mu, a^m \nu)$ の強度分布を図2(b)に示す。ここで、帰還光学系内のピエゾ鏡を振動させると、反射光にシフト周波数 $\Delta\omega_r$ を与えることができる。このとき、それぞれの $H^*(a^m \mu, a^m \nu)$ は、異なる周波数シフト $m\Delta\omega_r$ を受ける。信号光 S の光路にもピエゾ鏡を導入し、 $\Delta\omega_s$ だけ周波数シフトを与えると、 $\Delta\omega_s = m\Delta\omega_r$ を満足する干渉縞 $H^*(a^m \mu, a^m \nu)S(\mu, \nu)$ のみが安定に発生し、結晶中に記録される。つまり、 $\Delta\omega_s$ により、ただひとつの H^*S が選択できる。記録された干渉結果 H^*S は、He-Ne レーザーにより読み出され、L4 (焦点距離 f_4) で FT され、観測面 (X, Y) に達する。観測面で得られる強度分布 $I_m(X, Y)$ と式(2)は、

$$a_x = a_y = (f_2/f_1)^m \quad (3a)$$

$$b_x = X/(\lambda f_4), \quad b_y = Y/(\lambda f_4) \quad (3b)$$

の関係で関連づけられる。

用いられた入力信号画像 $s(x, y)$ を図3(a)に、 $m=0$ と 1 の場合に観測面で得られた WT 強度分布 $I_m(X, Y)$ を図3(b), (c)に示す。(b)では画像の高周波部分が、(c)では低周波部分までもが明るく表示されている。このような一連の周波数フィルタリングの結果が、WT

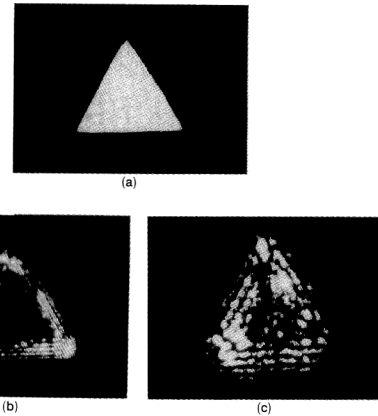


図3 (a)入力信号画像 $s(x, y)$ の強度分布, (b) $I_0(X, Y)$ の出力強度分布, (c) $I_1(X, Y)$ の出力強度分布.

の結果となる。

このシステムは、 $\Delta\omega_s$ により、異なった $a_{x,y}$ に対応した WT 結果を、選択的に、画像信号として、実時間で出力できる。帰還光学系の光路長に比べて光源のコヒーレンス長が有限な長さをもつ場合や、光学系の分解能が低い場合には、実現できる m の値が制限される。しかし、シングルモード発振レーザーを光源とし、高い空間分解能を示す光学系を導入すれば、このシステムは十分実用に耐えると考えられ、パターン認識や画像圧縮における前処理等への応用が期待できる。

文 献

- 1) 山口昌哉, 森本 晃: “ウェーブレットとその応用 I/II”, 計測と制御, **31** (1992) 879-886, 1066-1074.
- 2) X. Yang, H. H. Szu, Y. Sheng and H. J. Caulfield: “Optical Haar wavelet transforms of binary images,” Opt. Eng., **31** (1992) 1846-1851.
- 3) A. E. T. Chiou and P. Yeh: “Scaling and rotation of optical images using a ring cavity,” Appl. Opt., **29** (1990) 1584-1586.
- 4) J. Joseph, T. Oura and T. Minemoto: “Optical implementation of wavelet transform by the use of dynamic holographic recording in a photorefractive material,” Appl. Opt., **34** (1995) 3997-4003.