

웨이브릿 정합 필터의 설계와 광상관기 구조에서의 상관특성에 관한 연구

正會員 金 周 榮* 正會員 金 石 熙*

A Study on the Wavelet Matched Filter Design and Correlation Properties in the Optical Correlator

Joo Young Kim*, Seok Hee Jeon* *Regular Members*

*본 연구는 '93년도 인천대학교 교내연구비 지원을 받아 수행된 결과임.

요 약

본 연구에서는 시간-주파수 해석에 매우 효과적인 웨이브릿 변환을 광학적 패턴인식에 적용하기 위하여 웨이브릿 정합 필터를 설계하고 웨이브릿 함수의 팽창계수 변화에 따른 광상관 특성을 구하였으며, 기존의 공간 정합 필터 및 POF의 상관 특성과 비교하였다.

웨이브릿 정합 필터가 가장 좋은 식별력을 갖기 위해서는 사용된 입력 패턴의 형태와 웨이브릿 함수의 팽창 계수에 의존하게 됨을 알 수 있었다. 또한, 웨이브릿 변환의 특징인 2차원 영상의 가장자리 강조 효과를 보였다.

웨이브릿 정합 필터는 웨이브릿 함수가 대역통과의 특성을 갖기 때문에 기존의 정합 필터나 POF 보다 유사 패턴을 더 잘 식별할 수 있으며, 크기가 다른 패턴에 대해서는 POF 보다 매우 민감한 상관특성을 가짐을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we design wavelet matched filters using Wavelet Transform available in the field of time-frequency analysis, for the optical pattern recognition, and study optical correlation properties according to variations of the dilation factor of wavelet functions, which were compared with conventional matched filter and POF.

We have found that the wavelet matched filters depend upon the shapes of used input patterns and dilation factors of the wavelet function in order to have the best discriminability. Also, we show the edge enhanced effects of 2-D image, which is one of the properties of the wavelet transform.

It has been found that the wavelet matched filter can discriminate better than the conventional matched filter and POF owing to their bandpass properties, and found that the proposed wavelet matched filters have more sensitive correlation response than POF.

*인천대학교 공과대학 전자공학과
Dept. of Electronic Eng., Univ. of Incheon

論文番號 : 93236

接受日字 : 1993年 12月 13日

I. 서 론

최근에 음성 및 영상 신호처리 분야에서 짧은 세그먼트를 갖는 과도 신호(transient signal)를 해석하기 위해 웨이브릿 변환(Wavelet Transform)을 이용함으로써 그 효용성을 극대화 시켜나가고 있다. 웨이브릿 변환은 신호를 시간과 주파수 영역에서 동시에 국한시켜(localize) 처리하는 방법으로서 짧은 과도 신호의 시간 종속 주파수 분석에 푸리에 변환 보다 매우 효과적인 수학적 도구로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이러한 웨이브릿 변환은 음성 코딩 분야뿐만 아니라 영상 압축 및 복원을 위한 영상 신호 처리 분야와 시간-주파수 해석을 위한 신호 처리 분야 등에 걸쳐 다양하게 활용되기 시작하였다. 그러나 2차원 웨이브릿 변환의 실시간 처리는 대용량의 계산 능력을 갖춘 컴퓨터가 필요하며 긴 계산 시간을 요구하게 된다.

한편, 광학적 방법의 신호 처리는 1964년 A. Vander Lugt가 광학 필름과 간섭계를 이용하여 공간 정합 필터(Spatial Matched Filter)를 구현함으로써 입력 신호와의 상관관계를 광학적으로 얻어내는 광상관기(Optical Correlator)구조를 그 기본 골격으로 하고 있으며⁽²⁾, 다양한 형태의 공간 정합 필터 설계 알고리즘이 개발되고 있다. 최근에는 입력 및 필터 신호의 실시간 처리가 가능하도록 공간 광 변조기(SLM: Spatial Light Modulator)를 사용함으로써 광 신호 처리의 효용성을 극대화시켜 나가고 있으며 2차원 웨이브릿 변환을 실시간으로 처리하기 위한 광학적 구현 방법도 다양하게 시도되고 있다.⁽³⁻⁴⁾

따라서 본 연구에서는 광학적인 패턴인식을 위해서 웨이브릿 정합 필터(WMF: Wavelet Matched Filter)를 설계하여 기존의 광 상관계의 주파수 평면에서 필터로 사용 가능함을 보였으며, 웨이브릿 함수별 특성과 입력 패턴의 형태 및 웨이브릿의 팽창 정도에 따른 웨이브릿 정합 필터와의 광 상관 특성을 컴퓨터 모의 실험을 통해 분석해 보고자 한다.

II. 웨이브릿 변환 이론

현재까지 발표된 웨이브릿 함수의 종류는 6가지 정도이나⁽⁴⁾ 광학적으로 구현이 용이한 두 종류의 웨이브릿 함수가 광패턴인식을 위한 함수로 널리 사용되고 있다. 그 중 첫번째는 식(1)과 같은 Mexican-hat 웨이브릿 함수이다. 이 함수는 Gabor에 의해 처음 소

개 되었으며, 라플라시안 연산자로 잘 알려져 있다. 또한 이것은 Gauss 함수의 2계 도함수이며, zero-crossing 다해상도 가장자리 검출에 폭넓게 이용되고 있다. Mexican-hat 웨이브릿의 푸리에 변환은 다음의 식(2)와 같다.

$$h(t) = (1 - |t|^2)\exp\left(-\frac{|t|^2}{2}\right) \quad (1)$$

$$H(f) = 4\pi^2 f^2 \exp(-2\pi f^2) \quad (2)$$

두번째는 식(3)과 같이 표현되는 Haar 웨이브릿 함수로서 그림 1(b)에서와 같이 계단 함수의 특징을 갖는다. 이 함수는 이산적인 팽창(dilation) 및 병진(translation) 계수와 직교한다. 또한 Haar 웨이브릿의 푸리에 변환은 식(4)와 같이 표현된다.

$$h(t) = \text{rect}\left[2\left(t - \frac{1}{4}\right)\right] - \text{rect}\left[2\left(t - \frac{3}{4}\right)\right] \quad (3)$$

$$H(f) = 2i \exp(-\pi f) \frac{1 - \cos \pi f}{\pi f} \quad (4)$$

Haar 웨이브릿 함수는 비정칙(irregularity) 특성 때문에 이것의 스펙트럼 진폭 $|H(f)|$ 는 $1/f$ 만큼 천천히 0으로 수렴한다.

위의 두 함수가 웨이브릿 함수로서 만족되어야 할 조건은 먼저 그림 1(a), (b)에서 보여주는 것처럼 반드시 진동(oscillation)해야 하고, 양(positive)과 음(negative)의 방향에서 빠르게 진폭이 0으로 감쇄해야 한다. 또한 이러한 함수의 적분 값은 0이 되어야 하며, 0의 주파수 성분을 가질 수 없는 대역 통과 특성을 갖는다. 따라서 푸리에 변환과는 달리 무한한 주파수 성분을 가질 수 없게 된다.⁽⁵⁾

엄밀히 말하면 실수 복소수가 될 수 있는 $L^2(\mathbf{R})$ Hilbert 공간의 함수 h 가 식(5)와 같은 조건을 만족하여야 한다.⁽⁵⁾

$$C_h = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|H(f)|^2}{|f|} df < \infty \quad (5)$$

여기서 $H(f)$ 는 함수 h 의 푸리에 변환이다. 따라서 이러한 조건을 만족하는 웨이브릿 함수는 유한한 에너지를 가지며, 함수는 유한한 에너지를 가지며, 함수의 독립변수 범위에 걸쳐 제곱 적분(square integrable)이 가능해야 함을 내포하고 있다.

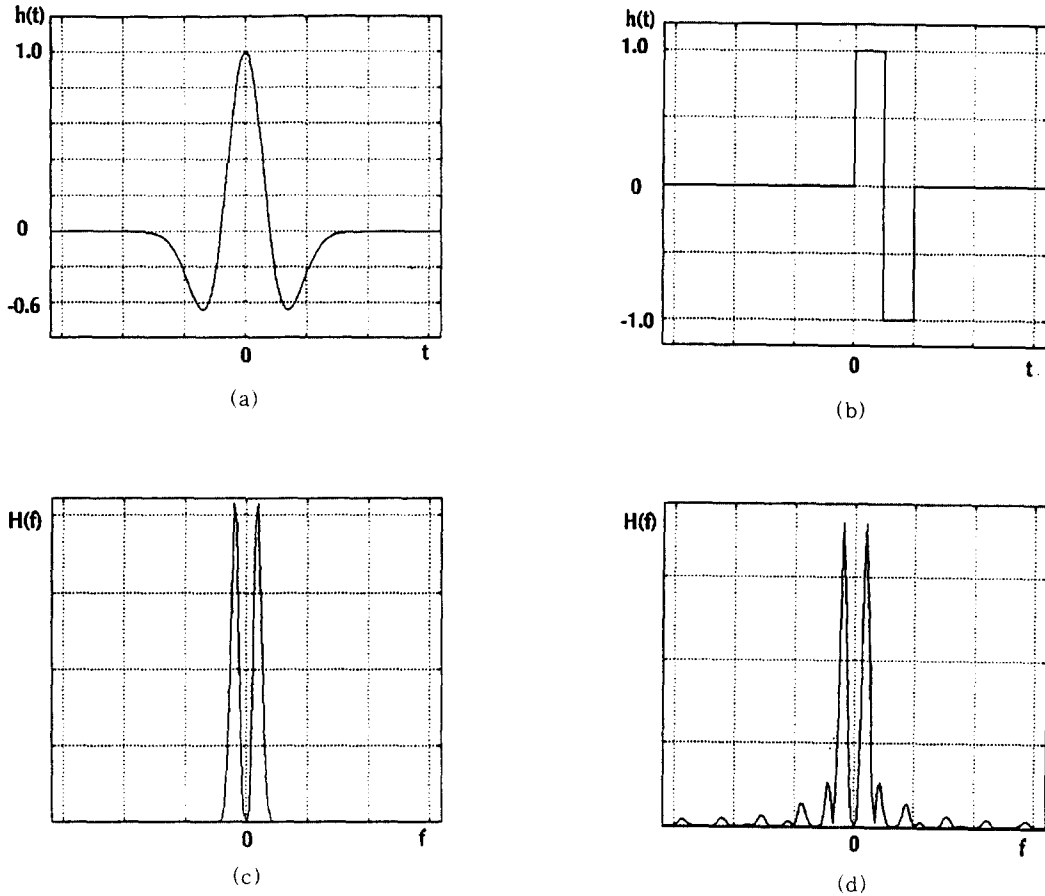


그림 1. (a) Mexican-hat 웨이브릿 (b) Haar 웨이브릿
 (c) Mexican-hat 웨이브릿의 푸리에 변환
 (d) Haar 웨이브릿의 푸리에 변환

Fig 1. (a) Mexican-hat wavelet (b) Haar's wavelet
 (c) Fourier transform of the Mexican-hat
 (d) Fourier transform of the Haar's

1. 1차원 웨이브릿 변환

웨이브릿 변환은 푸리에 변환의 기저 함수가 $\cos(2\pi ft)$, $\sin(2\pi ft)$ 또는 $\exp(j2\pi ft)$ 이듯이 웨이브릿 함수의 팽창(dilation)과 병진(translation)에 의해 발생된 기저 함수들로부터 완성된다. 웨이브릿 함수의 팽창과 천이는 식(6)의 아핀 연산(affine operation) 과정을 거쳐서

$$t \rightarrow t' = \frac{t-b}{a} \quad (6)$$

식(7)와 같은 딸 웨이브릿 함수(daughter wavelet functions)들을 생성시킨다.

$$h_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} h\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

여기서 a 는 팽창계수이고, b 는 병진계수이다.

이러한 기저 함수들과 신호 $s(t)$ 의 웨이브릿 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} W_s(a, b) &= \int h_{a,b}^*(t) s(t) dt \\ &= \frac{1}{a^{1/2}} \int h^*\left(\frac{t-b}{a}\right) s(t) dt \quad (8) \\ &= \langle h_{a,b}^*(t) | s(t) \rangle \end{aligned}$$

여기서, $W_s(a, b)$ 는 웨이브릿 변환에 의한 계수 값이고 L^2 놈(norm)의 Hilbert 공간에서의 내적(Inner Product)으로 정의되며, $\langle | \rangle$ 는 내적 연산자(Inner Product Operator)이다.⁽⁶⁾

딸 웨이브릿 함수는 주파수 공간에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} H_{a,b}(f) &= \int \exp(-j2\pi ft) h_{a,b}(t) dt \\ &= a^{1/2} \exp(-j2\pi fb) H(af) \quad (9) \end{aligned}$$

특히, 식(9)는 팽창 및 병진에 의한 딸 웨이브릿 함수의 푸리에 변환 계수들로서 2차원 광상관기내에서 웨이브릿 필터 뱅크를 구성할 수 있다.⁽³⁾

식(8)에서 웨이브릿 변환 계수들은 팽창된 $h^*(t/a)$ 와 $s(t)$ 사이의 상관관계임을 쉽게 알 수 있으며, 주파수 공간에서는 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} W_s(a, b) &= a^{1/2} \int H^*(af) \exp(j2\pi fb) S(f) df \\ &= \langle H_{a,b} | S \rangle \quad (10) \end{aligned}$$

식(10)은 광상관기 구조에서 Vander Lugt의 공간 정합 필터 방식의 상관관계와 아주 유사함을 보여주고 있다.

3. 2차원 웨이브릿 변환

1차원 웨이브릿 변환을 2차원으로 확장하면 다음의 식(11)와 같은 형태를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} W(a_x, a_y, b_x, b_y) &= \int \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y) h_{a_x, a_y, b_x, b_y}^*(x, y) dx dy \\ &= \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \int \int_{-\infty}^{\infty} s(x, y) h^*\left(\frac{x-b_x}{a_x}, \frac{y-b_y}{a_y}\right) dx dy \quad (11) \end{aligned}$$

여기서 a_x, a_y 는 x 및 y 방향에서의 팽창 계수이고, b_x, b_y 는 x 및 y 방향에서의 병진 계수이다. 이것은 공간 영역(space domain)에서의 웨이브릿 변환을 표현한 것이고 주파수 영역에서의 웨이브릿 변환은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W(a_x, a_y, b_x, b_y) &= \iint S(f_x, f_y) H_{a_x, a_y, b_x, b_y}^*(f_x, f_y) df_x df_y \\ &= \sqrt{a_x a_y} \iint S(f_x, f_y) H^*(a_x, f_x, a_y, f_y) \\ &\quad \exp[j2\pi(f_x b_x + f_y b_y)] df_x df_y \quad (12) \\ &= \langle H_{a_x, a_y, b_x, b_y} | S \rangle \end{aligned}$$

여기서 $S(f_x, f_y)$ 는 신호 $s(x, y)$ 의 푸리에 변환이며, $H_{a_x, a_y, b_x, b_y}(f_x, f_y)$ 역시 웨이브릿 함수 $h_{a_x, a_y, b_x, b_y}(x, y)$ 의 푸리에 변환을 나타낸다. 식(12)의 역 푸리에 변환 과정에서 2차원 입력 신호의 가장자리 강조 효과(edge enhanced effect)를 얻을 수 있다.

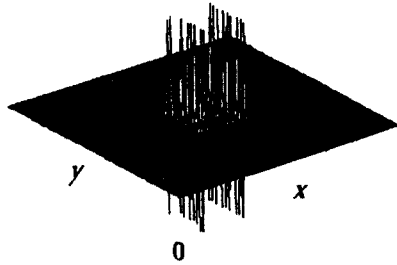
그리고 광상관기의 고유한 성질인 천이 불변 특성으로 인하여 광학적 패턴인식을 위한 웨이브릿 변환 과정에서 병진 계수 b_x, b_y 는 모두 0으로 놓아도 무방하다.

III. 웨이브릿 정합 필터

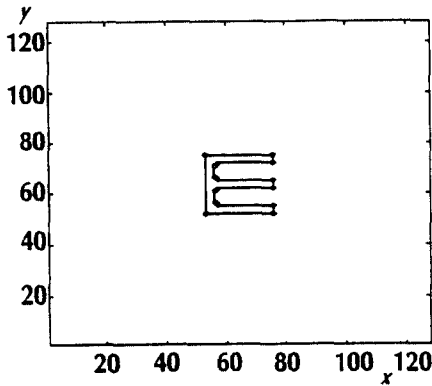
앞서 언급한바 있는 웨이브릿 변환에 의한 2차원 영상의 가장자리 강조효과는 웨이브릿 정합필터를 설계하는데 있어 가장 중요한 웨이브릿 변환 특징중 하나이다. 이것은 주파수 공간상에서 입력 신호와 웨이브릿 함수간의 내적으로 표현될 수 있는 웨이브릿 변환 계수의 역 푸리에 변환을 통해 관측할 수 있다. 이러한 웨이브릿 변환에 의한 가장자리 강조 효과의 예를 그림 2에서 보여주고 있다.

2차원 영상의 웨이브릿 변환 계수는 가장자리가 강조된 패턴이며, 웨이브릿 변환 계수 사이의 상관관계에 의한 패턴인식은 훌륭한 식별력을 제공할 것으로 예상된다.

웨이브릿 정합 필터는 기존의 Vander Lugt의 공간 정합 필터 이론을 기본으로 하고 있으며, 4f 광상관기에 훌륭하게 적용될 수 있다. 즉, 웨이브릿 정합 필터의 신호 검출은 기존의 공간 정합 필터가 푸리에 변환 계수들간의 상관관계를 고려하는 반면 웨이브릿 변환 계수들간의 상관관계를 통하여 수행된다.



(a) 팽창계수 $a_x = a_y = 1/6$ 일때의 3차원 표현
 (a) Mesh plot dialtion parameter $a_x = a_y = 1/6$



(b) 팽창계수 $a_x = a_y = 1/9$ 일때의 2차원 표현
 (b) Contour plot for dilation parameter $a_x = a_y = 1/9$

그림 2. Mexican-hat 웨이브릿에 의한 영문 대문자 E의 가장자리 강조효과.

Fig 2. Edge enhanced effect of English capital letter E by Mexican-hat wavelet.

그러나 웨이브릿 정합 필터가 좋은 식별력을 갖기 위해서는 웨이브릿 함수의 팽창계수를 어떻게 선정하느냐에 달려 있으며, 이것은 패턴의 크기 및 모양에 따라 달라질 것이다.

웨이브릿 정합 필터의 개념은 패턴의 중요한 특징을 강조하는 웨이브릿 변환을 이용하여, 패턴 인식을 위한 웨이브릿 변환 계수들 간의 상관관계를 얻고자 하는 것이다. 따라서 입력 신호 $s(x, y)$ 의 웨이브릿 변환 계수를 $W_s(a_x, a_y, b_x, b_y)$ 라 하고, 필터로 사용된 신호 $f(x, y)$ 의 웨이브릿 변환 계수를 $W_f(a_x, a_y, b_x, b_y)$ 라 하면, 식(12)에 따라 W_s 와 W_f 사이의 상관

관계는 푸리에 평면에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int \int_{-\infty}^{\infty} W_s(a_x, a_y, x', y') W_f^*(a_x, a_y, x'-x, y'-y) dx' dy' = (a_x a_y) \int \int_{-\infty}^{\infty} S(f_x, f_y) H^*(a_x f_x, a_y f_y) F^*(f_x, f_y) H^*(a_x f_x, a_y f_y) \quad (13)$$

$$\times \exp[j2\pi(xf_x + yf_y)] df_x df_y$$

여기서 $S(f_x, f_y)$ 는 신호 $s(x, y)$ 의 푸리에 변환이고 $F(f_x, f_y)$ 는 신호 $f(x, y)$ 의 푸리에 변환이다. 따라서 W_f 는 기존의 공간 정합 필터(spatial matched filter)와 비슷한 개념의 필터이다. 그러나 이러한 접근 방법은 2단의 광상관기를 직렬로 구성해야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 2단의 광상관기는 광학 시스템을 매우 복잡하게 할 뿐만 아니라 광효율을 낮게 할 것이다.

한편, 식(13)의 피적분항을 잘 살펴보면 $F(f_x, f_y) |H(a_x f_x, a_y f_y)|^2$ 의 항을 따로 생각할 수 있으며, 이것을 웨이브릿 정합 필터라 한다.¹⁸⁾ 따라서 웨이브릿 정합 필터는 기존의 정합 필터 $F(f_x, f_y)$ 와 웨이브릿 변환 필터의 제곱계수 $|H(a_x f_x, a_y f_y)|^2$ 와의 곱이다. 이러한 웨이브릿 정합 필터는 광상관기 2단으로 구성해야 하는 단점을 피할 수 있으며, 기존의 Vander Lugt의 광상관기와 동일한 구성으로 웨이브릿 정합 필터를 통한 여러 새로운 상관특성을 조사할 수 있을 것이다. 다음의 그림은 광상관기의 개략도를 보여주고 있다.

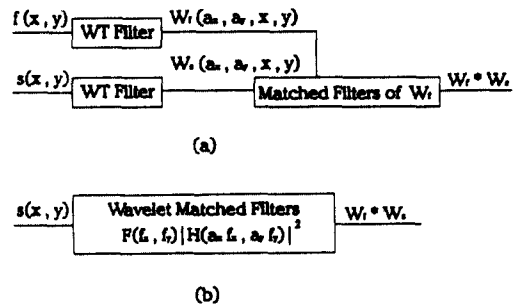


그림 3. 웨이브릿 정합 필터에 의한 광상관기를 (a) 2단으로 구성할 경우와 (b) 1단으로 구성할 경우의 구성도.

Fig 3. Schemes to construct optical correlators (a) with 2-step and (b) with 1-step for wavelet matched filter.

그리고 웨이브릿 정합 필터는 다음의 그림 4와 같은 광상관기에서 필터 평면에 위치하게 될 것이다.

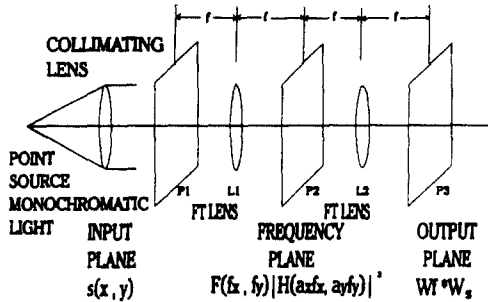


그림 4. 웨이브릿 정합필터를 포함한 4-f 광상관기
Fig 4. 4-f optical correlator including the wavelet matched filter

웨이브릿 정합 필터는 기존의 정합 필터와 마찬가지로 천이 불변(shift-invariant)의 특성을 갖는다. 즉, $s(x, y) = f(x, y)$ 일때 $W_j(a_x, a_y, b_x, b_y)$ 의 자기 상관 첨두값(autocorrelation peak)은 신호 $s(x, y)$ 의 위치에 나타날 것이다.

그리고 웨이브릿 정합 필터를 POF같은 고역통과 필터와 비교하면, 주파수 공간에서 웨이브릿의 국소화(localization)특성 때문에 대역통과의 특성을 갖는 정합 필터이다.

IV. 컴퓨터 모의 실험 및 결과 고찰

1984년 Joseph L. Horner와 Peter D. Gianino는 기존의 정합 필터의 진폭을 1로 정규화 시킨 POF(Phase-Only Filter)를 발표하였다.⁽⁷⁾ 이것은 기존의 정합 필터와 비교했을 때 식별 특성이 매우 뛰어나는 뿐만 아니라 첨예한 첨두 상관 특성을 가지며 광효율이 좋은 필터로 인정되었다. 하지만 유사패턴의 경우 기존의 정합 필터 보다는 우수하지만 그 식별 능력에는 여전히 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 그러한 경우의 식별 능력을 향상시키고자 컴퓨터 모의 실험을 통해 기존의 정합 필터, POF 및 웨이브릿 정합 필터를 웨이브릿 함수의 팽창계수에 따라 비교 분석하였다.

웨이브릿 정합 필터를 설계하기 위해서 사용된 웨

이브릿 함수는 Mexican-hat 웨이브릿 함수와 변형된 Mexican-hat 웨이브릿 함수 그리고 Haar 웨이브릿 함수를 사용하였다. 이들 모함수는 각각 식(14), (15), (16)로 표현할 수 있다.

① Mexican-hat 웨이브릿 함수

$$h(x, y) = (1 - |x|^2)(1 - |y|^2)\exp(-|x|^2/2 - |y|^2/2) \quad (14)$$

② 변형된 Mexican-hat 웨이브릿 함수

$$h(x, y) = (1 - x^2 - y^2)\exp(-x^2 - y^2) \quad (15)$$

③ Haar 웨이브릿 함수

$$h(x, y) = \text{rect}(x - \frac{1}{2}, y - \frac{1}{2}) + \text{rect}(x + \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}) - \text{rect}(x + \frac{1}{2}, y - \frac{1}{2}) - \text{rect}(x - \frac{1}{2}, y + \frac{1}{2}) \quad (16)$$



(a) 입력 A
(a) Input pattern A



(b) 입력 B
(b) Input pattern B



(c) 입력 C
(c) Input pattern C

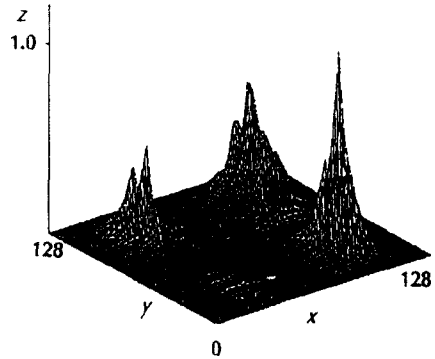
그림 5. 컴퓨터 모의 실험에 사용된 입력 패턴들.

Fig 5. Used input patterns in computer simulation.

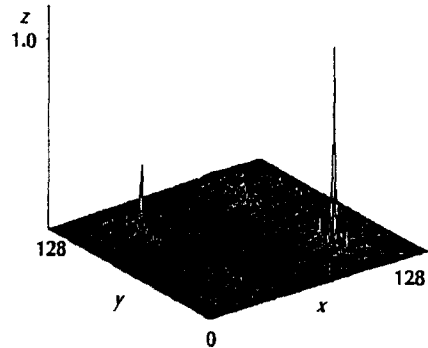
2차원 Mexican-hat 웨이브릿 함수는 1차원 함수의 곱(product)으로 표현 되었으며 변형된 Mexican-hat 웨이브릿 함수는 x - y 평면에서 원형의 형태를 갖는다. 그러나 이 두 함수를 1차원으로 표현할 때는 모두 동일한 함수로서 표현되어진다.

입력 패턴은 그림 5와 같은 3종류를 사용하였으며, 입력 A와 입력 B는 128×128 , 입력 C는 128×256 의 크기를 갖도록 하였다. 입력 A와 입력 B는 컴퓨터로 발생시킨 패턴이고 입력 C는 두 사람의 오른손 엄지손가락 지문을 영상 처리용 하드웨어인 ITEX™ PCplus를 이용하여 256 Gray Level로 획득한 영상 패턴이다. 그리고 상관 출력을 얻기 위해 컴퓨터로 다시 처리하였다.

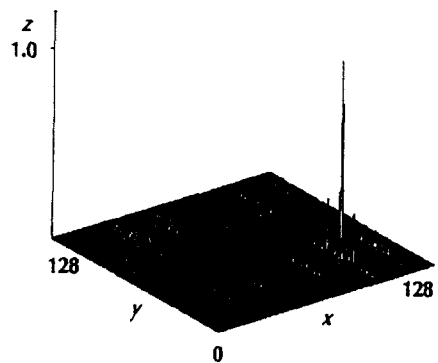
그림 5(a)에서 입력 A는 문자의 형태가 동일하지만 그 크기를 달리하였다. 크기가 작은 것부터 12×12 , 24×24 , 32×32 이고, 이러한 여러 크기의 동일 영상을 갖는 패턴에 대한 상관 출력 결과는 그림 6에서 기존의 정합 필터, POF 그리고 웨이브릿 성함 필터의 순서로 보여주고 있다. 상관 결과는 C언어와 MATLAB으로 처리하였으며 최대값을 1로 정규화하여 3차원 메쉬형으로 표현하는 함수를 그대로 적용하였다. 이때 필터로 사용된 패턴은 그림 5(a)의 우측 하단의 영문 대문자 E이며, 문자의 크기는 24×24 이다. 또한 좌측 상단의 영문 대문자 P는 다른 크기를 갖는 패턴과 다른 모양을 갖는 패턴의 상관관계를 비교하기 위한 것이다. 여기서 기존의 정합 필터는 기준 패턴보다 클 경우 상관 첨두치가 기준 패턴의 상관 첨두치의 0.617 배이고, 작은 경우는 0.041 배였으며, 영문 대문자 P의 경우는 0.469 배로 나타났다. 그리고 POF에서는 영문 대문자 E의 경우 크기가 32×32 인 문자는 0.157 배로 상관 첨두치가 기존의 정합 필터 보다 상당히 낮아지며 12×12 의 크기를 갖는 문자는 0.038 배로 기존의 정합 필터 보다 약간 낮아짐을 볼 수 있다. 또 영문 대문자 P의 경우는 상관 첨두치가 0.349 배로 약간 낮아졌다. 웨이브릿 정합 필터는 팽창계수는 1/7 일 때 각각 0.042와 0.039 배로서 문자 E의 크기가 기준 패턴보다 클 경우는 상관 첨두치가 더욱 낮아지나 작을 경우에는 오히려 POF 보다 1/1000 만큼 증가함을 알 수 있다. 하지만 영문 대문자 P의 경우는 팽창계수가 1 일때를 제외하면 기존의 정합 필터나 POF 보다 매우 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 웨이브릿 정합 필터는 기존의 정합 필터나 POF 보다 패턴의 크기에 더욱 민감한 반응을



(a) 기존의 정합필터
(a) Conventional matched filter



(b) 위상 정합필터
(b) POF

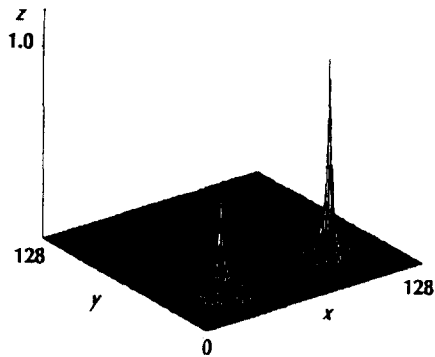


(c) 웨이브릿 정합필터($a_x = a_y = 1/7$)
(c) Wavelet matched filter($a_x = a_y = 1/7$)

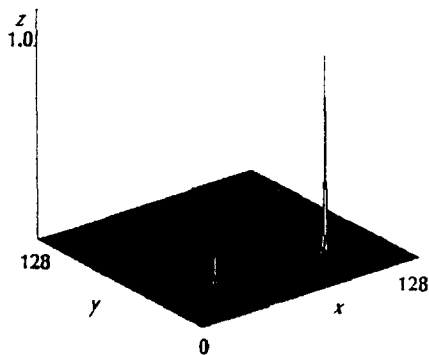
그림 6. 입력 A에 대한 상관 결과들
Fig 6. Correlation results for the input pattern A.

나타내고 있다. 그리고 다른 크기를 갖는 패턴들은 다른 모양을 갖는 패턴에 비해 POF의 경우 상관 점 두치가 0.349배이나 웨이브릿 정합 필터의 팽창계수가 1/5 일때 0.047배로 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 웨이브릿 정합 필터는 패턴의 모양이나 크기에 상관 없이 필터에 기록된 패턴만을 식별해내는 특성을 알 수 있다.

입력 B는 그림 5(b)에서와 같이 우리글의 '안'과 '한'으로 구성되어 있다. 그림 7(a), (b)는 입력 B의 기존의 정합 필터 및 POF의 상관 출력을 나타내고 있으며, 기존의 정합 필터는 상호 상관이 자기 상관의 0.5793배를, POF는 0.4배를 나타내고 있다. 다음



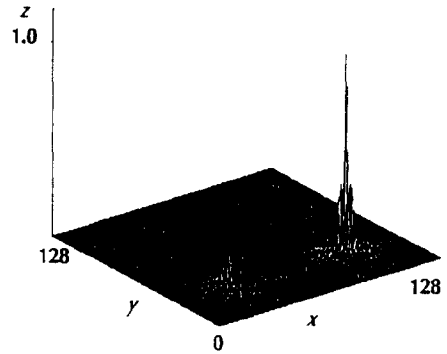
(a) 기존의 정합필터
(a) Conventional matched filter



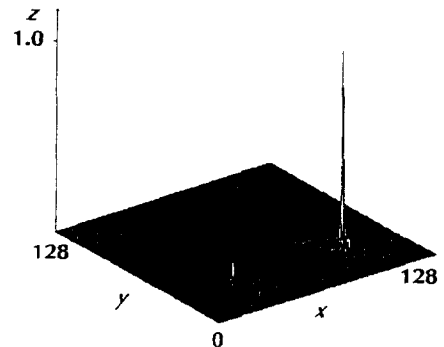
(b) 위상 정합필터
(b) POF

그림 7. 입력 B에 대한 기존의 정합필터와 POF의 상관결과들

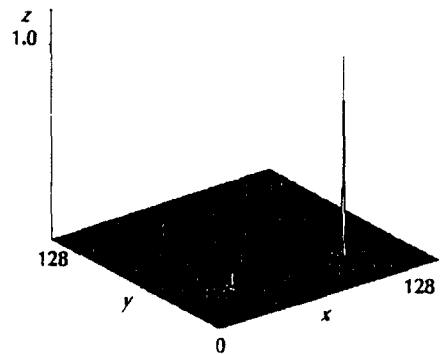
Fig 7. Correlation results of conventional matched filter and POF for the input pattern B.



(a) Mexican-hat 웨이브릿($a_x = a_y = 1/3$)
(a) Mexican-hat wavelet ($a_x = a_y = 1/3$)



(b) 변형된 Mexican-hat 웨이브릿($a_x = a_y = 1/4$)
(b) Modified Mexican-hat wavelet ($a_x = a_y = 1/4$)



Haar 웨이브릿($a = 2 \times 2$)
Haar's wavelet ($a = 2 \times 2$)

그림 8. 입력 B에 대한 웨이브릿 정합필터의 가장 좋은 식별력을 나타낼때의 상관 결과들

Fig 8. Correlation results of wavelet matched filters for input pattern B when appeared good discriminability.

의 그림 8은 웨이브릿 정합 필터의 상관 출력 결과를 보여주고 있다. 그리고 본 연구에서는 유사한 형태를 갖는 패턴의 식별 능력을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{식별력} = \frac{\text{상호상관의 최대 첨두값(cross correlation peak value)}}{\text{자기상관의 최대 첨두값(auto correlation peak value)}}$$

또한 그림 11은 웨이브릿 정합 필터의 식별력을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 웨이브릿 함수의 종류에 따라 식별력의 차이가 각각 다를 수 있으며, Mexican-hat의 경우 팽창계수가 1/3일때 0.1858, 변형된 Mexican-hat은 팽창계수가 1/4일 때 0.2941,

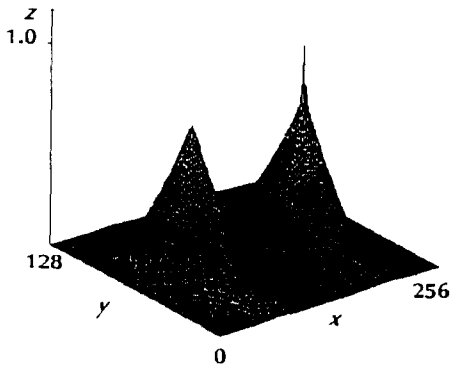
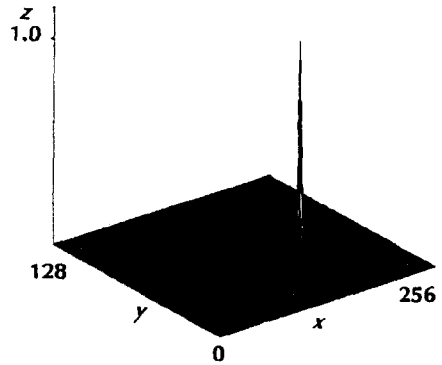
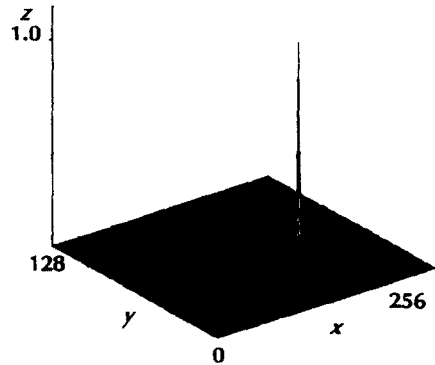


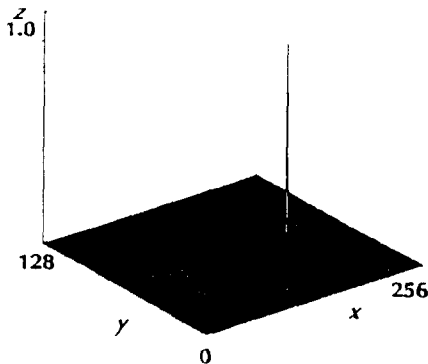
그림 9. 입력 C에 대한 기존의 정합필터와 POF의 상관결과들
Fig 9. Correlation results of conventional matched filter and POF for the input pattern C.



(a) Mexican-hat 웨이브릿 ($a_x = a_y = 1/6$)
(a) Mexican-hat wavelet ($a_x = a_y = 1/6$)



(b) 변형된 Mexican-hat 웨이브릿 ($a_x = a_y = 1/4$)
(b) Modified Mexican-hat wavelet ($a_x = a_y = 1/4$)



(c) Haar 웨이브릿 ($a = 2 \times 2$)
(c) Haar's wavelet ($a = 2 \times 2$)

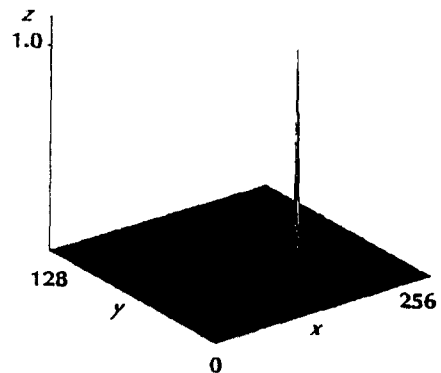
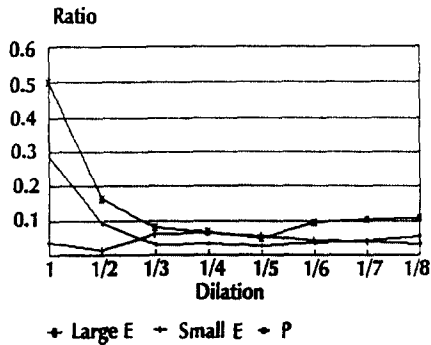
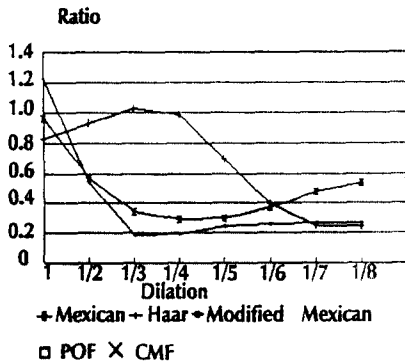


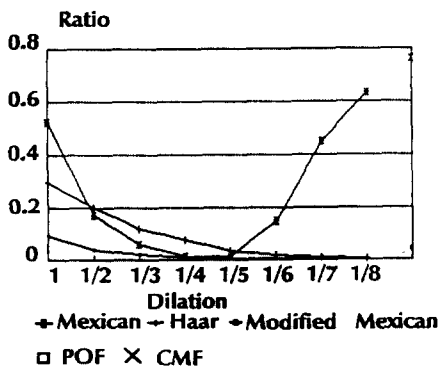
그림 10. 입력 C에 대한 웨이브릿 정합필터의 가장 좋은 식별력을 나타낼때의 상관결과들
Fig 10. Correlation results of wavelet matched filters for input pattern C when appeared good discriminability.



(a) 입력 A
(a) Input pattern A



(b) 입력 B
(b) Input pattern B



(c) 입력 C
(c) Input pattern C

그림 11. 입력 및 웨이블릿 함수의 종류별 식별력 비교.
Fig 11. Comparison of discriminability for kinds of input patterns and wavelet functions.

Harr는 팽창계수가 2×2 , 4×4 에서 똑같이 0.25의 식별력을 나타내고 있다. 이것은 기존의 정합 필터나 POF 보다 향상된 식별 능력을 갖고 있음을 알 수 있다. 특히 Haar 웨이블릿 함수의 팽창 계수를 행렬로 표현한 이유는 Haar 함수 자체가 계단의 형태를 가지므로 2차원으로 표현할 때는 행렬로 팽창의 정도를 표현할 수 밖에 없기 때문이다.

입력 C는 지문 인식의 가능성을 보기 위하여 택한 예로서, 이 경우도 다음의 그림 9, 그림 10에서 입력 B의 경우와 같이 비교하였다. 이때 그림 9에서 기존의 정합 필터는 두 종류의 지문을 거의 구별하지 못하지만 POF는 기존의 정합 필터 보다 매우 향상된 식별력을 갖고 있다. 또한 웨이블릿 정합 필터에서는 POF 보다 다소 향상된 식별력을 보여주고 있다.

본 모의실험을 통해 입력 B의 경우에는 Mexican-hat 웨이블릿 함수가 가장 뛰어난 식별력을 갖고 있음을 확인하였으며, 입력 C의 경우는 Haar 웨이블릿 함수가 가장 뛰어났다. 하지만 3종류의 웨이블릿 함수 모두 기존의 정합 필터나 POF 보다 다소 향상된 식별력을 갖추고 있음을 확인하였다. 그리고 식별력 비교를 통해 웨이블릿 함수의 팽창계수는 필터의 성능을 평가하는 중요한 파라미터임을 알 수 있으며, 이는 패턴의 크기 및 모양에도 관계가 있다. 하지만 패턴의 형태에 따른 최적의 팽창계수 선택 방법에 대해 앞으로는 계속 연구가 되어야 할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 음성 신호 처리 및 영상 신호 처리에서 활발하게 연구가 진행중인 웨이블릿 변환을 광학적 패턴인식에 응용하기 위해 Vander Lugt의 광상판기에 적용가능한 기존의 정합 필터 방식을 넘어 웨이블릿 정합 필터라는 새로운 방식의 광패턴인식 방법을 제안하였다. 웨이블릿 정합 필터는 웨이블릿 함수의 대역 통과 특성을 이용하여 유사한 모양을 갖는 패턴들을 효과적으로 구별할 수 있는 필터이다. 하지만 최적의 식별력을 갖는 필터를 설계하기 위해서는 웨이블릿 함수의 팽창계수를 어떻게 선정하느냐에 달려 있음을 알 수 있었다. 또한 패턴의 크기에는 매우 민감한 반응을 나타내며, 기존의 정합 필터나 POF 보다 오히려 패턴의 크기가 거의 동일한 것만을 인식하는 특성을 갖게 됨을 알게 되었다.

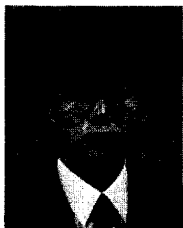
패턴의 형상에 따른 웨이블릿 함수의 선택에 있어 입력 B의 경우는 Mexican-hat 웨이블릿 함수가 가

장 뛰어난 효과를 나타내며, 지문 패턴인 입력 C는 Haar 웨이브릿 함수가 뛰어난 식별력을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Haar 웨이브릿 함수는 웨이브릿 정합 필터를 설계 하는데 있어 기존의 정합 필터나 POF 보다 모두 그 성능이 좋게 나타났으며, 앞으로 Haar 함수의 폭 넓은 이용이 기대된다. 또한 공간 광 변조기에도 적용 하기가 수월하리라 생각되며, 실시간 처리에 대한 문제가 해결된다면 광학적 패턴인식에 뛰어난 성능을 발휘하리라 예상된다. 그리고 변형된 Mexicanhat 웨이브릿 함수는 POF 보다는 다소 우수하지만 다른 웨이브릿 함수 보다는 성능이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이 함수를 사용한 목적은 지문의 형상이 곡선의 형태를 갖고 있으므로 지문 인식에 다른 함수 보다 더 훌륭한 식별력을 갖고 있으리라 예상했지만 결과는 그렇지 못하였다. 또한 본 연구에서는 수행되지 못했지만 광효율(light efficiency)에 대한 고려를 해 보아야 할 것이다. 예상하는 바로는 웨이브릿 함수가 대역 통과 신호이므로 웨이브릿 정합 필터의 광효율은 POF 보다는 떨어지리라 예상된다.

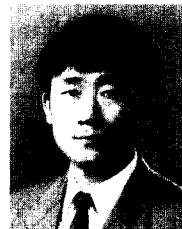
참 고 문 헌

1. I. Dauchies, "The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 31, pp. 961-1005, 1990.
2. A. Vander Lugt, "Signal Detection by Complex Spatial Filtering," IEEE Trans. Inf. Theory, IT-10, pp. 139-145, 1964.
3. H. Szu, Y. Sheng and J. Chen, "Wavelet Transform as a Bank of the Matched Filters," Appl. Opt., vol. 31, pp. 3267-3276, 1992.
4. Y. Sheng, D. Roberge, H. Szu, "Optical Wavelet Transform," Opt. Eng., vol. 31, No. 9, pp. 1840-1845, 1992.
5. R. K. Young, *Wavelet Theory And Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, pp. 19-23, 1993.
6. R. L. Liboff, *Introductory Quantum Mechanics*, Addison Wesley, pp. 93-99, 1980.
6. J. L. Horner and P. D. Gianino, "Phase-Only Matched Filtering," Appl. Opt. 23, pp. 812-816, 1984.
8. Y. Sheng, D. Roberge, H. Szu and T. Lu, "Optical Wavelet Matched Filters for Shift-invariant Pattern Recognition," Opt. Lett. vol. 18, pp. 299-301, 1993.
9. X. Yang, H. Szu, Y. Sheng, H. J. Caulfield, "Optical Haar Wavelet Transforms of Binary Images," Opt. Eng. vol. 31, No. 9, pp. 1864-1851, 1992.
10. Y. Sheng, T. Lu and D. Roberge, "Optical N⁴ Implementation of a Two-dimensional Wavelet Transform," Opt. Eng. 31, pp. 1859-1864, 1992.
11. 김주영, 전석희, "Wavelet 정합 필터의 광상관 특성에 관한 연구," 한국통신학회 '93 하계종합학술발표회 논문집, pp. 671-674, 1993. 7.
12. 김주영, 전석희, "광패턴 인식을 위한 WMF 설계 및 특성 연구," JCEANF '93 논문집, pp. 113-117, 1993. 10.
13. B. V. K. Vijaya Kumar and L. Hassebrook, "Performance Measures for Correlation Filters," Appl. Opt. vol. 29, No. 20, pp. 2997-3006, 1990.



金 周 榮(Joo Young Kim) 준회원
1965년 7월 1일생
1987년 3월 ~ 1991년 2월 : 인천대학교 물리학과 졸업(이학사)
1992년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 전자공학과 재학 중

※주관심분야 : 광신호처리, 홀로그래피 응용 등



全 石 熙(Seok Hee Jeon) 정회원
1960년 8월 16일생
1977년 3월 ~ 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
1981년 3월 ~ 1983년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1983년 2월 ~ 1990년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
1986년 3월 ~ 1991년 8월 : 동양공업전문대학 전자통신과 조교수
1991년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 조교수

※주관심분야 : 광신호처리, 광통신, 광전자공학 등