

효과적인 영상 압축을 위한 웨이브렛 기저들의 응용에 관한 연구

A Study on Applications of Wavelet Bases for Efficient Image Compression

지인호**

Innho Jee**

Abstract

Image compression is now essential for applications such as transmission and storage in data bases. For video and digital image applications the use of long tap filters, while not providing any significant coding gain, may increase the hardware complexity. We use a wavelet transform in order to obtain a set of bi-orthogonal sub-classes of images; First, the design of short kernel symmetric analysis is presented in 1-dimensional case. Second, the original image is decomposed at different scales using a subband filter banks. Third, this paper is presented a technique for obtaining 2-dimensional bi-orthogonal filters using McClellan transform. It is shown that suggested wavelet bases is well used on wavelet transform for image compression. From performance comparison of bi-orthogonal filter, we actually use filters close to ortho-normal filters on application of wavelet bases to image analysis.

요 약

영상 압축은 데이터베이스에서 전송과 저장의 응용에 매우 중요한 분야이다. 비디오나 디지털 영상 응용에서 긴 탭의 필터를 사용하면 의미 있는 정도의 코딩이득은 얻지만 하드웨어의 복잡도를 증가시킨다. 우리는 한 쌍의 쌍직교 성질의 부분할의 영상을 얻기 위하여 웨이브렛 변환을 사용한다. 첫째, 짧고 주요한 대칭 분석의 구현을 1차원 경우에 제시하였다. 둘째, 원래의 영상이 부대역 필터뱅크를 사용하여 다른 스케일로 분해되었다. 셋째, 본 논문에서 McClellan 변환을 사용하여 2차원의 쌍직교 필터를 얻는 기법을 제시하였다. 제시하는 웨이브렛 기저들이 영상압축에 사용되는 웨이브렛 변환에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 쌍직교 필터들의 성능 비교표로부터 웨이브렛 기저의 영상에 대한 응용에서는 우리는 실제적으로 ortho-normal 필터에 근사한 필터를 사용한다.

Key words : Wavelet transform, bi-orthogonal bases, ortho-normal filters, kernel, McClellan transform

* Dept. of Computer and Information Communications Engineering, Hongik University

★Corresponding author

e-mail: ijee@hongik.ac.kr tel: 044-880-2596

※Acknowledgment:

This work was supported by 2015 Hongik University Research Fund.

Manuscript received Feb. 14, 2017; revised Mar. 6, 2017; accepted Mar.15, 2017.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

데이터 압축의 근본적인 목표는 인정할만한 영상의 질을 유지하면서 전송이나 저장을 위해 비트 속도를 감소시키는데 있다. 압축을 방해하는 용장도(redundancy)를 피하기 위해서 변환은 최소한 쌍직교(bi-orthogonal)가 되어야하고 CPU 시간을 절약하기 위해서도 그것에 따르는 알고리즘도 빨리 작동되어야 된다. 2차원의 웨이브렛 변환은 Meyer와 Lemarie[1]에 의하여 정의되고 Mallat[2]이 구현하였는데 위의 기술한 조건들을 만족한다. 디지털 영상에 대한 다해상도 분석은 2차원 이산 웨이브렛 변환(discrete wavelet transformation)의 수행으로 가능하다. 이 변환은 2차원 디지털 영상 신호에 대하여 분리 가능(separable) 웨이브렛과 분리 가능 부표본화(subsampling) 격자(lattice) 방식을 채택하여 사용해왔다. 정방형 화소 격자는 2차원 디지털 영상의 분리 처리를 위해서 사용되는 대표적인 부표본화 격자이다. 분리가능 웨이브렛과 정방형 격자의 사용은 웨이브렛 필터의 설계와 계산 측면 둘 모두에서 유용하다. 그래서 현재 대부분의 영상 압축 알고리즘들에서는 이 방법을 사용하고 있다. 그러나 이런 분리 처리 방법은 모든 응용에서 효과적이지 않고 일부 응용들에서는 제한을 받는다. 그리고 2차원 이산 웨이브렛 변환을 통해서 생성되는 부대역 영상들(subband images)은 상호간의 독립성을 보장할 수 있는 이동 불변(shift invariance) 성질을 만족하지 못하다. 따라서 어느 특정 부대역 영상들에 대하여서만 디지털 영상처리 기술이 적용된다면, 완전 복원(perfect reconstruction)의 영향을 주게 되어 2차원 이산 웨이브렛 역 변환을 통해 생성되는 복원 영상의 품질을 보장하기가 어렵다. II 장에서는 영상을 위한 대칭의 짧은 kernel 필터를 디자인 하는 것이 기술된다. III 장에서는 본 논문에서 사용되는 웨이브렛 변환들이 기술된다. 첫째, 우리는 1차원의 웨이브렛 변환을 기술한다. 둘째, 우리는 1차원 경우의 특징과 구성에 관하여 보다 더 자세히 제시한다.

II. 영상을 위한 대칭의 짧은 kernel 필터의 구현

Estban[3]이 Quadrature Mirror Filter(QMF) 개념을 제안하였다. 그것은 채널과 양자화 잡음이 없을 때 겹침이 없어 출력에서 입력신호의 거의 완전 복원을 허용한다. 1차원 QMF의 필터링의 다차원 경우의 이론적인 확장은 Vetterli[4]에 의해 시도되었다. 기존의 QMF 접근방법의 단점은 크기왜곡이 긴 탭 필터를 사용하여 매우 작게 됨에도 불구하고 정확한 복원이 되지 않는다. 비디오와 디지털 영상 응용에서 긴 탭 필터의 사용의 의미 있는 코딩 이익을 제공하여 주는 대신 하드웨어의 복잡도를 증가시킨다. 본 논문에서는 분석과 합성 필터뱅크가 완전 복원 대칭의 작은 kernel 필터를 사용하여 구현되었다. 2채널 분석과 합성 필터뱅크 시스템은 그림1에 나타내었다.

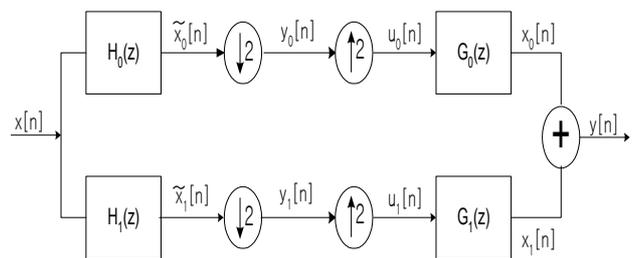


Fig. 1. Exact reconstruction filter banks in 1-D
그림 1. 1차원의 정확한 복원의 필터 뱅크

$$Y(z) = \frac{1}{2} [G_0(z)H_0(z) + G_1(z)H_1(z)]X(z) + \frac{1}{2} [G_0(z)H_0(-z) + G_1(z)H_1(-z)]X(-z) \tag{1}$$

만약 우리가 합성 필터를 다음과 같이 선택하면 왜곡이 제거된다.

$$G_0(z) = H_1(-z), \quad G_1(z) = -H_0(-z) \tag{2}$$

이 합성 필터를 위해서 완전 복원의 입력 신호는 다음 조건을 요구한다.

$$\Delta(z) = P(z) - P(-z) = 2z^{-m} \tag{3}$$

$$\text{여기서, } P(z) = H_0(z)H_1(-z) \quad (4)$$

product 필터라고 부르고, m 은 분석과 합성 필터뱅크와 관련된 지연이다.

이 연구에서는 대칭의 짧은 탭 필터들의 구현이 기술된다. 구현의 절차는 Vetterli[4]가 제안한 product 필터 $P(z)$ 를 선형위상 성분으로 인수분해 하는 것이다. 첫째, 식(4)로부터 $H_0(z)$ 와 $H_1(-z)$ 을 선택하면 식(3)은 $P(z)$ 의 계수들의 제한조건으로 기술될 수 있다. 그래서 식(3)을 만족하는 기수의 계수들을 가진 product 필터가 된다. 디자인 방법은 다음 조건을 만족하는 half-band product 필터인 $P(z)$ 을 선택하는 것이다.

$$P(z) = a_0 + a_2z^{-2} + \dots + a_{2p-2}z^{-2p-1} + a_{2p-2}z^{-2+2} + \dots + a_0z^{-4p+2} \quad (5)$$

그리고 제로의 위치에서 일렬의 제한조건에 기반한 계수들을 최적화하는 것이다. $4p-1$ 길이의 $P(z)$ 는 최적화되는 p 개의 계수들이 존재하고 그 결과 $2p$ 길이의 두 개의 필터를 얻을 수 있다. 우리가 부여할 수 있는 제약조건은 정수 계승의 계수를 지닌 필터를 선정하는 것이다.

$p=2$ 경우 ;

이 경우 $P(z)$ 형은 다음과 같다.

$$P(z) = a_0 + a_2z^{-2} + z^{-3} + a_2z^{-4} + a_0z^{-6} \quad (6)$$

한 개의 자유도가 $z=-1$ 에 2개의 제로를 부과하여 억제될 수 있다. $P(z)$ 는 다음과 같이 인수분해 된다.

$$P(z) = (1+z^{-1})(1+z^{-1})(a_0 - 2a_0z^{-1}) + (\frac{1}{2} + 2a_0)z^{-2} - 2a_0z^{-3} + a_0z^{-4} \quad (7)$$

유용한 필터는 a_0 가 구간 $[-\frac{1}{8}, 0]$ 에서 존재함을

알 수 있다. 만약 우리가 $a_0 = -\frac{1}{16}$ 선정하면 -1 에서 추가적인 두 개의 제로를 얻어서 $P(z), H_0(z), H_1(z)$ 는 다음과 같이 된다.

$$P(z) = \frac{1}{16}(1+z^{-1})^3(-1+3z^{-1}+3z^{-2}-z^{-3}) \quad (8)$$

$$H_0(z) = \frac{1}{8}(-1+2z^{-1}+6z^{-2}+2z^{-3}-z^{-4}) \quad (9)$$

$$H_1(z) = \frac{1}{2}(1+2z^{-1}+z^{-2}) \quad (10)$$

쌍직교(Bi-orthogonal) 제한조건:

식(1)의 완전복원의 조건을 만족하는 쌍직교 필터[5]는 다음과 같다.

$$\sum_n h_0(n)g_0(n+2k) = \delta_{k,0} \quad (11)$$

$$h_1(n) = (-1)^n g_0(-n+1), g_1(n) = (-1)^n h_0(-n+1) \quad (12)$$

[5]에 주어진 대칭의 필터, h, g 는 다음의 여현 다항식이 다음의 조건을 만족한다.

$$H_0(\omega)G_0(\omega) + H_0(\omega + \pi)G_0(\omega + \pi) = 1 \quad (13)$$

그래서,

$$H_0(\omega)G_0(\omega) = \cos(\frac{\omega}{2})^{2l} [\sum_{p=0}^{l-1} \binom{l-1+p}{p} \sin(\frac{\omega}{2})^{2p} + \sin(\frac{\omega}{2})^{2l} R(\omega)] \quad (14)$$

여기서, $R(\omega)$ 은 $\cos(\omega)$ 의 홀수 다항식이 된다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 양자화 효과를 고려하지 않은 복원신호의 SNR (Signal to Noise Ratio)을 계산하였다. 본 논문에서는 1차원 경우의 $AR(1)$ 가우시안[6] 입력으로 20,000 표본치를 사용하였다. $AR(1)$ 신호는 상관계수 $\rho = 0.95$ 로 사용하고 다음의 관계식으로부터 만들어진다.

$$x(n) = \rho x(n-1) + w(n) \quad (15)$$

여기서, $w(n)$ 은 평균이 영이고 $IMSL$ 부프로그램인 $GGNML$ 으로부터 만들어진 가우시안 순열이다.

1차원 경우 : SNR = 318.6 decibel

2차원 경우는 그림 2와 같이 필터뱅크를 구현하였다. Quincunx 표본화 행렬[5]는 다음과 같이 정의된다.

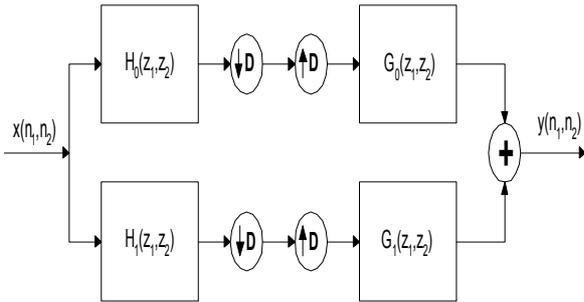


Fig. 2. Exact reconstruction filter banks in 2-D
 그림 2. 2차원에서 정확한 복원 필터 뱅크

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

McClellan 알고리즘[7]이 비분리와 비정형 필터에 사용되었다. 쌍직교 경우에 1차원 필터는 식(14)에 정의된 여현 다항식에 따라 다음의 변환을 적용하여 Quincunx 2차원 개념으로 확장된다.

$$z + z^{-1} \rightarrow \frac{1}{2}(z_1 + z_1^{-1} + z_2 + z_2^{-1})$$

이 변환은 1차원 필터의 모든 특징들이 2차원 필터에도 만족한다. Quincunx 경우는 2차원 비분리보다 다른 방향성을 잘 나타내어 주기 때문에 영상처리에서 관심이 많게 된다. 본 논문은 2차원 경우의 McClellan 변환을 적용하여 SNR을 계산하였다. 실험 영상은 크기가 256×256 이고 8비트 회색의 Lena 영상을 사용하였다.

2차원 경우 : SNR = ∞ decibel

III. 웨이브렛 기저의 영상에 대한 응용

1. 쌍직교 웨이브렛 기저(bases)

영상들은 에지를 제외하고는 대부분이 부드러워서 영상의 분석을 위한 정확한 재구성 부대역 코딩은 합당하게 부드러운 mother 웨이브렛과[8]

연관된 ortho-normal 기저와 관련되어 있다. 빠른 계산을 얻기 위해서 이 필터들은 길이가 짧고 대칭이 되어야한다. 그러나, ortho-normality 요구조건을 완화하고 쌍직교 기저를 사용하면 대칭의 필터를 얻는 것이 가능하다.

2. 이진(binomial) 필터들

참고문헌[5]에서 이 필터들은 \tilde{h} 가 이항의 계수와 같아서 “spline filters” 또는 “binomial filters”[2] 언급되는 데 다음과 같다.

$$H_0(\omega) = \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2l-\tilde{k}} e^{j\kappa\frac{\omega}{2}} \left[\sum_{p=0}^{l-1} \binom{l-1+p}{p} \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2p} \right] \quad (17)$$

한 예로 $l=3, \tilde{k}, \kappa=0$ 이면 다음과 같다.

$$H_0(\omega) = \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)^4 \left[\sum_{p=0}^2 \binom{2+p}{p} \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2p} \right]$$

$$H_0(\omega) = \frac{90}{128} + \frac{38}{64} \cos(\omega) - \frac{32}{128} \cos(2\omega) - \frac{6}{64} \cos(3\omega) + \frac{6}{128} \cos(4\omega)$$

$$H_0(\omega) = h_0(0) + 2 \sum_{n=1}^4 h(n) \cos(n\omega)$$

$$[h_0(0) = \frac{45}{64}, \pm h_0(1) = \frac{19}{64}, \pm h_0(2) = -\frac{1}{8},$$

$$\pm h_0(3) = -\frac{3}{64}, \pm h_0(4) = \frac{3}{128}]$$

또한, $G_0(\omega) = \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos\omega) = g_0(0) + 2\left(\frac{1}{4} \cos(\omega)\right)$

$$[g_0(n) = \frac{1}{4} \delta(n+1) + \frac{1}{2} \delta(n) + \frac{1}{4} \delta(n-1)]$$

모든 필터 계수들은 정수이고 2로 나누어지며 컴퓨터에서 빠른 계산이 가능하게 해준다. 본 논문의 모의실험에서는 양자화 효과를 고려하지 않은 복원 신호의 SNR을 계산하였다. 1차원에서는 AR(1) 신호로 모의실험을 하였고 2차원에서는 quincunx 표본화 행렬과 연관된 McClellan 변환을 적용한 Lena 영상으로 모의실험을 하였다.

1차원 경우 : SNR = 315.6 decibel

2차원 경우 : SNR = 316.6 decibel

3. 같은 길이에 유사한 Spline Variant 필터

우리는 거의 같은 길이의 선형위상의 분석과 합성 필터가 필요하다. 참고문헌[5]에서 $R=0$ 선택되고 식(14)의 오른쪽 대역이 인수분해 된다. 이 군의 가장 작은 예는 $l=4, k=4$ 에 해당되고 9 탭의 필터 h_0 와 7탭의 필터 g_0 을 제공해 준다.

$$H_0(\omega)G_0(\omega) = \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2l} \left[\sum_{p=0}^{l-1} \binom{l-1+p}{p} \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2p} \right],$$

$$\sum_{p=0}^3 \binom{3+p}{p} \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^{2p} = 1 + 4\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 + 10\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^4 + 20\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)^6.$$

$\sin\left(\frac{\omega}{2}\right) = x$ 라면

$$f(x) = 1 + 4x + 10x^4 + 20x^6 = 20(x^6 + 0.5x^4 + 0.2x^2 + 0.05).$$

IMSL 소프트웨어를 사용하면 우리는 6개의 근을 얻고 $h(n)$ 찾을 수 있다.

$$H_0(\omega) = 20h_0(0) + 2 \sum_{n=1}^4 20h_0(n)\cos(n\omega)$$

$$h_0(0) = 1.76102, \pm h_0(1) = 0.77942, \pm h_0(2) = -0.22846,$$

$$\pm h_0(3) = -0.04924, \pm h_0(4) = 0.07812].$$

또한, $G_0(\omega) = g_0(0) + 2 \sum_{n=0}^3 g_0(n)\cos(n\omega)$

$$[g_0(0) = 0.190894, \pm g_0(1) = 0.101221,$$

$$\pm g_0(2) = -0.009852, \pm g_0(3) = -0.015625].$$

보다 좋은 결과를 제공해 주는 다른 필터군이 있지만 많은 계산량이 요구된다. 본 논문의 모의 실험에서는 양자화 효과를 고려하지 않은 복원 신호의 SNR을 계산하였다. 1차원에서는 AR(1) 신호로 모의실험을 하였고 2차원에서는 quincunx 표본화 행렬과 연관된 McClellan 변환을 적용한 Lena 영상으로 모의실험을 하였다.

- 1 차원 경우 : SNR = 103.3 decibel
- 2 차원 경우 : SNR = 114.2 decibel

4. Ortho-normal 필터에 유사한 필터

$R \neq 0$ 인 경우에 많은 예가 존재한다. 특히 두 개의 필터가 서로 거의 같고 ortho-normal 웨이브렛 필터와 매우 유사한 필터를 얻는 특별한 R 을 선정할 수 있다. 첫째 예는 두 개의 필터가

Laplacian pyramid 필터(Burt and Adelson)[9]이다. 이 Laplacian pyramid 필터는 다음과 같다.

$$-ae^{2j\omega} + .25e^{j\omega} + (.5 + 2a) + .25e^{-j\omega} - ae^{-2j\omega}$$

비전 응용에서 보통 우리는 $a = 0.05$ 택한다.

$$H_0(\omega) = 0.6 + 0.5\cos(\omega) - 0.1\cos(2\omega)$$

$$= (\cos^2\frac{\omega}{2})(1 + \frac{4}{5}\sin^2\frac{\omega}{2}) \tag{18}$$

그러나 Burt and Adelson의 pyramid는 과표본화 표본화이므로 우리는 쌍직교 제한 조건을 사용하여 정규 표본화의 완전 재생의 필터 \tilde{H} 와 H 에 쌍직교 구속조건[10]인 다음을 만족하여야 한다.

$$H_0(\omega)G_0(\omega) + H_0(\omega + \pi)G_0(\omega + \pi) = 1.$$

또한 우리는 $(\cos\frac{\omega}{2})^2$ 로 나누어지는 G_0 을 선택한다. 그러면,

$$G_0(\omega) = (\cos^2\frac{\omega}{2})P(\sin^2\frac{\omega}{2}).$$

여기서

$$(1-x)^2(1 + \frac{4}{5}x)P(x) + x^2(\frac{9}{5} - \frac{4}{5}x)P(1-x) = 1 \tag{19}$$

$x=0$ 놓고 우리는 $P(0)=1$ 얻고 식(19)을 확장하고 미분한다. $x=0$ 하면 $P'(0) = \frac{6}{5}$. 만약 우리는 식(19) 다시 미분하고 $x=0$ 대입하면 $P(1)$ 항을 얻는다. 만약 $x=0$ 놓고 $P''(0) = \frac{102}{25} - \frac{18}{5}P(1)$ 을 얻는다[11]. 그래서 유일한 P 의 해인 $P(x) = 1 + \frac{6}{5}x - \frac{24}{35}x^2$ 이다. 그래서 다음의 결과를 얻는다.

$$G_0(\omega) = (\cos^2\frac{\omega}{2})(1 + \frac{6}{5}\sin^2\frac{\omega}{2} - \frac{24}{35}\sin^4\frac{\omega}{2})$$

$$= -\frac{3}{280}e^{3j\omega} - \frac{3}{56}e^{2j\omega} + \frac{73}{280}e^{j\omega} + \frac{17}{280}$$

$$+ \frac{73}{280}e^{-j\omega} - \frac{2}{56}e^{-2j\omega} - \frac{3}{280}e^{-3j\omega}$$
(20)

이 H_0, G_0 는 사실 한 쌍의 쌍직교 웨이렛 기저들이다. 본 논문의 모의실험에서 양자화 효과를 고려하지 않은 복원신호의 SNR을 계산하였다. 1차원에서는 AR(1) 신호로 모의실험을 하였고 2차원에서는 quincunx 표본화 행렬과 연관된 McClellan 변환을 적용한 Lena 영상으로 모의실험을 하였다.

1차원 경우 : SNR = 241.9 decibel

2차원 경우 : SNR = 240.2 decibel

Table 1. Performance Comparison of Bi-orthogonal Filter
표 1. 쌍직교 필터들의 성능 비교표

	1D simulate AR(1)	2D Lena Image
Short Kernel	318.6 dB	∞
Binomial	315.6 dB	316.0 dB
Spline Variant	100.3 dB	114.2 dB
Orthonormal	241.9 dB	240.2 dB

IV 결론

본 논문은 짧은 kernel 필터 뱅크의 구현과 영상을 위한 여러 종류의 쌍직교 필터뱅크를 구현을 제시하였다. 또한 2차원 경우의 쌍직교 필터뱅크가 1차원에서 2차원으로 변환을 McClellan 변환을 사용하여 구현됨을 보였다. 미래 연구에는 첫째, 전체 시스템의 MSE를 최소화하는 분석과 합성의 필터 계수들의 최적화이다. 둘째, 3장의 4절에 제시된 ortho-normal 필터에 근사한 필터의 최적화이다. 셋째, 웨이브렛 변환에서 복잡도(곱셈기의 수)를 감소시키는 것이다.

References

[1] A. N. Akansu and R. A. Haddad, *Multi-resolution Signal Decomposition: Transforms, Subbands and Wavelets* Academic Press, 1992.
 [2] A. N. Akansu, R. A. Haddad and H. Calgar, "The binomial QMF-wavelet transform for multi-resolution signal decomposition," *IEEE Trans on Signal Processing* vol. 41, no 1, pp 13-36, Jan. 1993.

[3] D. Estban and C. Galand, "Application of Quadrature mirror filters to split band voice coding scheme," *Int'l., IEEE Conf. on ASSP*, pp 191-195, 1977.
 DOI: 10.1109/ICASSP.1977.1170341
 [4] M. Vetterli, "Multi-dimensional subband coding: Some Theory and Algorithms," *Signal Processing IEEE*, pp 97-112, June 1984.
 DOI:10.1016/0165-1684(84)90012-4
 [5] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform." *IEEE Trans on Image Proc.*, vol. 1, no 2, pp 205-220, April 1992.
 DOI: 10.1109/83.136597
 [6] S. Lyu and E. P. Simoncelli, "Statistical modeling of images with fields of Gaussian scale mixtures, in *Adv. Neural Information Processing Systems* vol. 19, pp 100-105, 2007.
 [7] W. A. Pearlman and A. Said, *Digital Signal Compression Principles and Practice* Cambridge University Press, 2011.
 [8] I. Daubechies, "Ortho-normal bases of compactly supported wavelet, II Variations on a theme," *ATT Bell lab., Tech. Rep. TM 11217-891116-17*, 1990.
 DOI:10.1137/0524031
 [9] P. Burt and E. Adelson, "The laplacian pyramid as a compact image code," *IEEE Trans Commun.*, vol. 31, pp 482-540. April 1983. DOI: 10.1109/TCOM.1983.1095851
 [10] S. Mallet, "A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation," *IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, July 1989.
 DOI: 10.1109/34.192463
 [11] D. Lee Fugal, *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing* Space and Signal Technical Publishing, 2009.
 [12] Dong-Min Woo, "Quantitative assessment of 3D reconstruction procedure using stereo matching," *j.inst.Korean.electr.electron.eng* vol. 17, no 1, pp 1-9, Mar. 2013.
 DOI : 10.7471/keee2013.17.1.001

BIOGRAPHY

Innho Jee (Member)



1980 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1983 : MS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1995 : Ph.D degree in Electrical and Computer Engineering, New York University, USA.

1981~1988 : Senior Research Engineer, Agency for Defense Development(ADD).

2004~2005 : Research Professor, in Electrical and Computer Engineering, University of Maryland at College Park, USA.

1995~ : Professor, Dept. of Computer and Information Communications Engineering, Hongik University.