

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.1.77

IIBC 2014-1-10

과표본화된 이산 웨이브렛 변환의 성능 향상에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement of Over-sampled Discrete Wavelet Transform

지인호*

Innho Jee*

요약 과표본화된 이산 웨이브렛 변환은 입력 데이터보다 더 많은 양의 부대역 데이터들이 생성되지만 기존의 웨이브렛 변환의 이동 불변 불만족의 단점을 극복할 수 있다. 비분리 표본화를 기반으로 하는 이산 웨이브렛 변환은 이동 불변의 특징의 만족과 방향 선택성 등에서 더 많은 부대역 영상을 통하지만 더 효율적이다. 본 논문에서는 보다 많은 부대역 영상을 생성하는 2차원 영상처리 과표본화 된 웨이브렛 변환의 효율적인 처리를 가능하게 하여 디지털 영상의 품질 향상 및 잡음제거 응용 분야에 적용시킬 수 있음을 제안하였다.

Abstract Over-sampled discrete wavelet transformation is one way to overcome the disadvantages of the standard wavelet transform of shift invariance even though it increases the number of subband signals. Non-separable based discrete wavelet transform is efficient that it satisfies shift invariance and directional selectivity. In this paper, since efficient over-sampled wavelet transform is possible in a two-dimensional image processing, we show that the proposed method is well applied with performance improvement of digital image and noise removal.

Key Words : Over-sampled, Wavelet Transform, Shift Invariance

1. 서 론

과표본(oversampling) 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform : DWT)는 비압축 형식의 DWT와는 다른 방법으로 단계의 증가와 독립적으로 확장인자 2에 의해서만 데이터의 양이 증가하는 특징을 갖는다. 과표본화된 DWT의 대표적인 방법으로 이중 트리 이산 웨이브렛 변환(Dual-Tree Discrete Wavelet Transformation : DIDWT)^[1]이 있다. 이 변환은 이동 불변의 특징을 만족하도록 설계된 필터를 사용하며, 두 개의 트리 구조로 웨이브렛 변환을 수행한다. 따라서 2차

원 이산 웨이브렛 변환보다 추가된 트리 구조로 인해서 방향성에 대한 선택도 또한 더 증가하게 된다.

과표본 이산 웨이브렛 변환의 또 다른 한 종류로 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환(Double Density Discrete Wavelet Transformation : DDDWT)^[1]이 있다. 이것은 이중 트리 이산 웨이브렛과 마찬가지로 정밀하게 표본화 되는 이산 웨이브렛 변환(Critically sampling Discrete Wavelet Transform : CDWT)에 중요한 특징을 추가하여 그 성능을 개선한 것이다. 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환은 하나의 스케일링(scaling) 함수와 두 개의 웨이브렛 함수가 존재한다. 즉, 3개 채널로 분해가 되며, 두 웨

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수일자 2013년 12월 23일, 수정완료 2014년 2월5일
게재확정일자 2014년 2월 7일

Received: 23 December 2013 / Revised: 5 February 2014 /
Accepted: 7 February 2014

*Corresponding Author: ijee@hongik.ac.kr

Dept. of Computer & Information Communications,
Engineering, Hongik University, Korea

이브렛 함수는 주파수 대역을 1/2씩 분할하도록 설계되었다. 이중 트리 이산 웨이브렛 변환과 비교해서 불 방향성분의 선택성이 부족하다.

그러나 사용되는 필터의 수는 세 종류만 존재하므로 두 개의 트리에서 8 종류의 필터를 사용하는 이중 트리 이산 웨이브렛 변환보다 복잡도는 훨씬 낮다.

본 논문에서는 quincunx 표본화를 이용하여 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환의 기본 장점을 유지하면서 방향의 선택성을 증가시키는 방법을 제안하였다. 기존의 웨이브렛 변환은 90도씩 분리해서 2번의 필터 처리하지만 제안된 3방향 분리처리 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환에서는 quincunx 표본화의 동작이 영상을 45도씩 회전하면서 표본을 수행하는 것에 착안하여 45도씩 분리해서 3번의 필터 처리를 수행하게 하였다. 그 결과 2차원 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환의 방향 선택성을 증가시킬 수 있었다. 따라서 제안된 방법은 이동 불변성과 많은 방향성의 특성들은 잡음 제거, 텍스처 분할 등에서 효율적으로 사용될 수 있다.

본 논문의 구성으로 2장에서는 과표본화된 이산 웨이브렛 변환의 개념을 이해할 수 있는 기본적인 설계와 구조를 제시하였다. 3장에서는 이중 밀도의 웨이브렛 개념을 설명하고 4, 5장에서는 quincunx 표본화 기반의 과표본화된 이산 웨이브렛 변환 기술을 설명하였다. 제안된 방법으로 3단계의 분리 처리를 수행하는 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환 기술을 설명하였다. 그리고 6장에서는 제안된 방법에 대한 성능을 평가하기 위한 실험과 그 결과를 제시하였다. 마지막으로 7장에서는 본 연구에 대한 결론을 제시하였다.

II. 과표본화 이산 웨이브렛 변환의 개념

정교하게 표본화하는 이산 웨이브렛 변환(CDWT)에서는 다운 샘플링에 의해서 단계가 증가할수록 부대역 신호의 길이가 1/2씩 감소한다. 그래서 입력 데이터 신호와 생성된 부대역의 웨이브렛 계수의 크기가 동일하다. 그림 1은 시간-주파수 평면에서의 표본을 나타낸 것으로, 각 단계(scale)에 따른 임의의 부대역 웨이브렛 계수들의 표본수를 나타낸 것이다. 첫 번째 그림이 CDWT를 나타낸 것으로 단계가 증가할수록 1/2씩 감소하는 것을 확인할 수 있다.

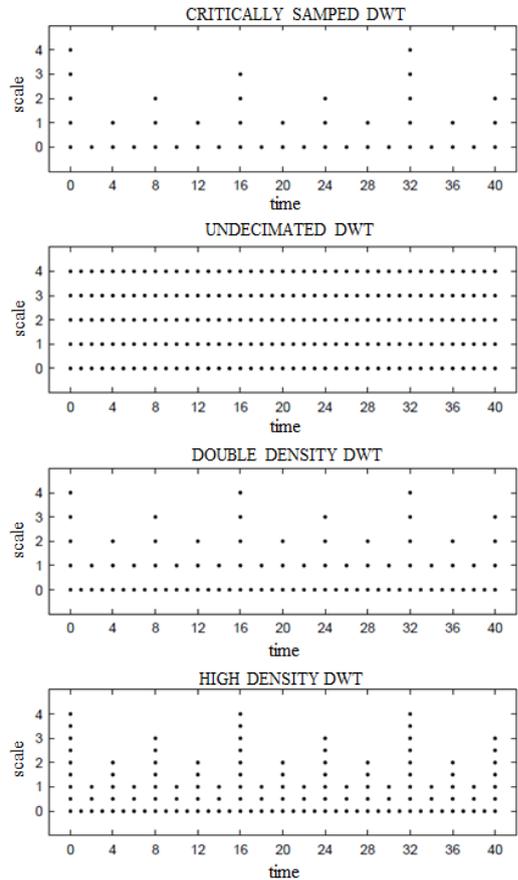


그림 1. 웨이브렛의 시간-주파수 평면도
Fig. 1. Wavelet time-frequency plane

그림 1의 두 번째 이하부터는 고비용 웨이브렛 변환들을 나타낸 것으로 이동 불변특성을 만족하도록 표본화되었다. 두 번째 그림의 압축 표본화를 수행하지 않은 이산 웨이브렛 변환(Un-decimated Discrete Wavelet Transform : UDWT)에서는 표본들이 각 스케일에서 모두 동일하다. 이것은 저주파 성분에 대해서는 비효율적이고 J번째 스케일이 실행될 때, UDWT는 J+1 인자에 의해서 고비용이 된다.

UDWT와 CDWT의 절충된 방식인, 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환(DDDWT)^[1]은 세 번째 그림이다. DDDWT는 중간 스케일을 갖고 있으며, 스케일 수와 관계없이 두 배의 고비용이 된다. 그렇지만 UDWT 보다는 그 비용이 많지 않으며 근사적으로 이동 불변을 만족한다. 따라서 DDDWT는 부분적 압축 웨이브렛 변환(partially decimated WT : PWT)이라고 한다. PWT의 초과되는 데이터는 1부터 J+1까지의 임의의 상수가 될 수

있다. 그리고 이 초과 데이터는 변환이 이동 불변이 되는 정도를 조절한다. 또한 중간 스케일은 잡음 제거를 위한 향상된 성능을 제공한다.

그림 1의 마지막 그림은 본 논문에서 실험한 방식으로, 인자 2에 의해서 시간과 주파수 모두에서 과표본화하는 고비용 웨이브렛 변환이다. 이것은 DDDWT와 같이, 각 스케일에서 CDWT보다 두 배 많은 계수들이 존재하며, 중간 스케일들을 갖는다. 중간 스케일들은 CDWT의 각 스케일 쌍의 사이에 위치한다. 이 고비용 변환은 DDDWT와 마찬가지로 한 개의 스케일링 함수와 두 개의 웨이브렛을 갖는다. 그렇지만 이 변환은 일반 웨이브렛 변환보다 세 배 많은 밀도를 갖도록 시간-주파수 평면을 표본화하므로, 3의 인자에 의한 고비용이 된다. 또한 이 변환은 기존의 CDWT와 같이 디지털 필터 뱅크를 가지고 실행될 수 있다.

III. 이중 밀도의 웨이브렛 변환

이중 밀도(double density) 이산 웨이브렛 변환은 정밀하게 표본화(critically sampling)되는 이산 웨이브렛 변환에 중요한 특징을 추가하여 그 성능을 개선한 것이다. 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환의 첫 번째 특징은 하나의 스케일링(scaling) 함수와 두 개의 웨이브렛 함수가 존재한다. 즉, 3개 채널로 분해가 되며 두 웨이브렛 함수는 주파수 대역을 절반씩 분할하도록 설계되었다. 따라서 입력 데이터보다 더 많은 양의 부대역 데이터들을 생성하면서도 완전재생을 만족한다. 그리고 두 번째 특징으로, 근사적으로 이동 불변의 특징을 만족하도록 설계되었다. 따라서 영상처리를 위한 2차원 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환은 기존의 2차원 이산 웨이브렛 변환보다 우수한 성능을 갖는다. 그러나 이중 트리 웨이브렛 변환과 비교해서 불 때 방향성분의 선택성이 부족하다.

이중 밀도 이산 웨이브렛 변환을 만족시키기 위해서는 필터뱅크의 구조를 새롭게 설계하여야 한다. 또한, 실험적인 측면을 고려해서 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환은 정교화 표본의 이산 웨이브렛 변환 실행에서 사용되는 필터 뱅크와 유사성을 유지해야 한다. 그래서 FIR 필터를 사용하는 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환은 그림 2의 과표본 하는 필터뱅크의 구조로 설계가 된다. 여기서, FIR 필터 $h_0(n)$ 은 저대역 통과(스케일링) 필터이고 그리고 FIR 필터 $h_1(n)$ 과 $h_2(n)$ 은 고대역 통과(웨이브렛)

필터가 된다.

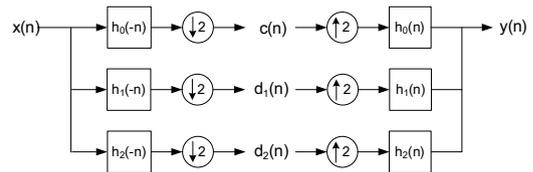


그림 2. 이중 밀도 이산 웨이브렛의 필터뱅크
Fig. 2. Double-density discrete wavelet filter banks

1. 완전재생 조건

이 구조가 완전재생 조건을 만족하기 위해서 $X(z)$ 의 항으로 $Y(z)$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$Y(z) = \frac{1}{2} [H_0(z)H_0(1/z) + H_1(z)H_1(1/z) + H_2(z)H_2(1/z)]X(z) + [H_0(z)H_0(-1/z) + H_1(z)H_1(-1/z) + H_2(z)H_2(-1/z)]X(-z) \quad (1)$$

따라서, 완전재생을 만족하는 조건은 식(2)와 식(3)과 같다.

$$H_0(z)H_0(1/z) + H_1(z)H_1(1/z) + H_2(z)H_2(1/z) = 2 \quad (2)$$

$$H_0(z)H_0(-1/z) + H_1(z)H_1(-1/z) + H_2(z)H_2(-1/z) = 0 \quad (3)$$

2. 스케일링과 웨이브렛 함수

이중 밀도 이산 웨이브렛 변환은 그림 2에서 설계된 것처럼 하나의 스케일 함수 $\phi(t)$ 와 그리고 두 개의 웨이브렛 함수 $\psi_1(t)$ 와 $\psi_2(t)$ 로 구성된다. 스케일링 함수 $\phi(t)$ 는 저역통과 필터 $h_0(n)$ 과 웨이브렛 함수 $\psi_1(t)$ 와 $\psi_2(t)$ 는 고역통과 필터 $h_1(n)$ 과 $h_2(n)$ 에 의해서 정의 된다. 따라서 스케일링 함수와 웨이브렛 함수와의 전이(transition)는 다음과 같이 표현된다^[2].

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_n h_0(n)\phi(2t-n) \quad (4)$$

$$\psi_i(t) = \sqrt{2} \sum_n h_i(n)\phi(2t-n), i=1,2.$$

IV. Quincunx 기반의 비분리 이산 웨이브렛 변환

Quincunx 표본화를 채택한 방식을 2차원 비분리 웨이

브릿 변환(non-separable wavelet transformation)이라고 한다. 이 경우 기존의 2차원 분리 이산 웨이브릿 변환과 마찬가지로 주파수 대역 분할 특성과 완전 재생의 특징은 그대로 유지되어야 한다.

그림 3은 quincunx 표본화를 사용한 2차원 이산 웨이브릿 변환을 나타낸 것으로 표본화 과정을 D로 표시하였다. 여기서, D는 식 (5)에서의 45도 회전 행렬을 나타낸다.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1단계의 필터링이 완료가 되면 디지털 영상은 시계 방향으로 45도 회전하여서 표본화를 수행하게 된다. 계속해서 2단계에서도 필터링을 수행하고 45도를 회전하게 되는데 결과적으로 디지털 영상은 90도 회전을 하게 되고 그 크기는 1/4이 된다. 복원 과정에서는 처음으로 업 샘플링(up-sampling)이 수행되는데 반시계방향으로 45도 회전하여서 얻어진다. 그리고 복원 필터를 통과하는 필터링을 수행하게 된다. 마지막 단계에서도 마찬가지로 업 샘플링과 필터링을 수행하고 여기서 얻어진 각 부대역 신호들을 합쳐서 최종적으로 복원 신호를 생성한다.

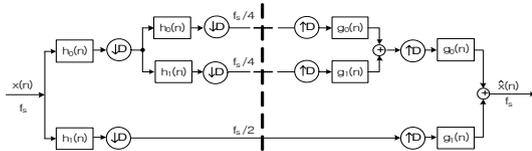


그림 3. Quincunx 표본화를 활용한 웨이브릿 변환과 역변환
Fig. 3. Wavelet transform and inverse wavelet transform using quincunx sampling

그림 4는 quincunx 표본화를 채택한 이산 웨이브릿 변환의 3단계 과정을 나타낸 것이다. 2차원 분리 웨이브릿 변환과 다르게 특정 방향에 대한 분리 처리 없이 한 방향으로 처리가 된다. 하지만 표본화에 의해서 여러 방향으로 처리가 가능하다.

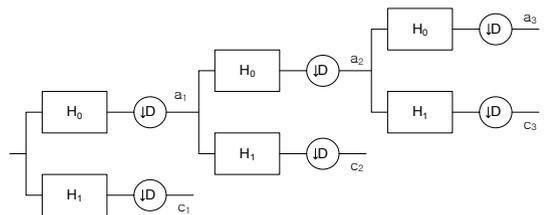


그림 4. Quincunx 표본화를 채택한 3단계 이산 웨이브릿 변환
Fig. 4. 3-stage discrete wavelet transform using quincunx sampling

V. Quincunx 표본 기반의 과표본화 이산 웨이브릿 변환

1. Quincunx 표본 기반의 이중 트리 이산 웨이브릿 변환

Quincunx 표본화를 채택한 2차원 이산 웨이브릿 변환은 풍부한 방향 선택성을 얻을 수 있었지만 이동 불변성을 만족하지는 못한다. 그래서 비분리 처리의 효과와 이동 불변의 특징을 동시에 얻기 위해서는 2차원 이중 트리 이산 웨이브릿 변환에 quincunx 표본화를 적용하는 것을 제안하였다. 그림 5는 quincunx 표본화를 채택한 2차원 이중 트리 이산 웨이브릿 변환을 나타낸 것이다. D의 표시가 quincunx 표본화를 나타낸 것이다. 여기서, D는 식 (5)에서의 45도 회전 행렬을 나타낸다. 그리고 우측 하단은 사용된 필터와 quincunx 표본화를 통해서도 완전 재생을 만족하는 것을 나타내었다.

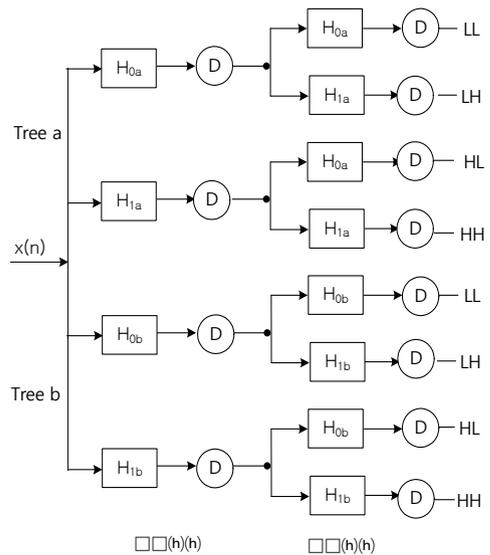


그림 5. Quincunx 표본화를 채택한 이중 트리 웨이브릿 변환
Fig. 5. Dual tree wavelet transform using quincunx sampling

본 논문에서 제안한 quincunx 표본화를 채택한 2차원 이중 트리 이산 웨이브릿 변환은 비분리 처리 방법으로 수행되고 각각의 트리에서 표본화 과정 동안 영상의 회전으로 다양한 방향성을 갖게 된다. 결과적으로 제안된 방법은 이중 트리 이산 웨이브릿 고유만의 특징인 이동 불변성을 만족하고 더 많은 방향성분을 갖는 부대역 영

상을 생성할 수 있다. 그리고 비분리 영상처리로 인해서 분리 영상처리에서 발생할 있는 웨이브렛 변환의 비효율적인 부분을 극복할 수 있다.

2. Quincunx 표본 기반의 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환

2차원 이중 트리 이산 웨이브렛 변환은 두 개의 트리 로 동작하므로 처리 과정이 복잡하다. 그래서 간단하면서도 이동 불변의 특징과 풍부한 방향 선택성을 동시에 얻을 있는 방법으로 2차원 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환에 quincunx 표본화를 적용하는 것을 제안하였다. 그림 6은 quincunx 표본화를 채택한 2차원 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환을 나타낸 것이다. 3개 채널의 표본화는 D 표시의 quincunx 표본화를 수행한다. 이 변환은 3개의 채널에서 표본화 과정동안 영상의 회전으로 다양한 방향성을 갖게 된다. 결과적으로 제안된 방법은 이중 밀도 이산 웨이브렛 고유한 특징인 이동 불변성을 만족하고 더 많은 방향성분을 갖는 부대역 영상을 생성할 수 있다. 그리고 분리 영상처리에서 발생할 있는 웨이브렛 변환의 비효율적인 부분을 극복할 수 있다.

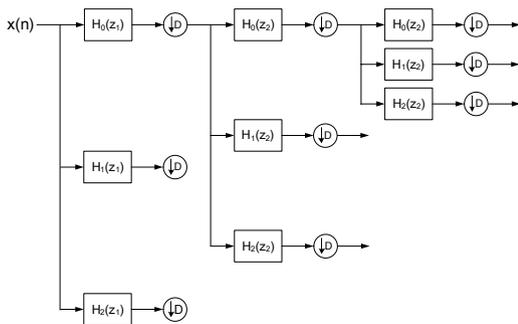


그림 6. Quincunx 표본화를 채택한 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환

Fig. 6. Dual density discrete wavelet transform using quincunx sampling

VI. 과표본화된 이산 웨이브렛 변환의 성능 실험

본 논문에서 사용된 실험 디지털 영상은 8비트 그레이 영상을 사용하였다. 그리고 영상의 크기는 256 X 256 또

는 512 X 512의 Lenna 영상을 선택적으로 사용하였다. 그리고 변환을 위해서 참고문헌^[5] 표 1의 계수를 갖는 필터들을 사용하였다.

실험 성능을 정량적으로 평가하기 위해 식(6)로 정의되는 첨두 신호대 잡음비(Peak Signal to Noise Ratio)를 사용하였다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (6)$$

여기서, MSE(mean square error)는 평균 제곱 오차로 다음과 같다.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - k(i, j)\|^2 \quad (7)$$

여기서, I(i,j)는 원 영상, k(i,j)는 복원 영상을 나타낸다.

1. 완전 재생실험

웨이브렛 변환은 기본적으로 완전재생을 만족하여야만 한다. 따라서 제안된 방법으로 복원된 영상이 원 영상과 동일한 지를 PSNR를 가지고 확인하였다. 또한 다른 웨이브렛의 완전재생 성능과 비교를 수행하였다. 표 1은 Lenna 영상에 대한 이산 웨이브렛 변환(DWT), 이중 트리 이산 웨이브렛 변환(DTDWT), quincunx 표본화 기반의 이중 트리 이산 웨이브렛 변환(QDTDWT), 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환(DDDWT), quincunx 표본화 기반의 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환(QDDDWT), 그리고 제안된 방법(3방향 분리 처리 2차원 이중 밀도 웨이브렛)을 1 ~ 5단계까지 수행하고 역변환을 통해서 복원했을 때의 복원된 영상의 PSNR을 나타낸 것이다.

표 1과 그림 7의 실험 결과를 분석하여 보면 이중 트리 이산 웨이브렛 변환이 제일 성능이 좋지 못하다. 그리고 quincunx 표본화 기반의 이중 밀도 이산 웨이브렛 변환이 제일 우수하다. 제안된 방법은 완전재생을 잘 만족한다. 제안된 방법과 이중 트리 이산 웨이브렛 변환은 많은 필터링과 표본화를 수행하므로 이상적이지 못한 필터 설계로 부터의 오차를 감안하여야 한다. 그렇지만 간단한 필터뱅크 구조를 가진 제안된 방법은 성능저하는 거의 없다고 할 수 있다.

표 1. 웨이블릿 변환에 대한 완전 재생 실험
Table 1. Perfect reconstruction of wavelet transform

실험 영상	DWT	DTDWT	QDTDWT	DDDWT	QDDDWT	Proposed	
Lenna (256*256)	1단계	267.60	267.57	267.70	277.25	283.24	273.85
	2단계	261.69	153.67	261.86	271.34	277.32	268.14
	3단계	258.29	147.77	258.60	267.93	273.86	265.01
	4단계	255.91	144.36	256.40	265.56	271.46	263.22
	5단계	254.04	141.97	254.90	263.75	269.64	262.37

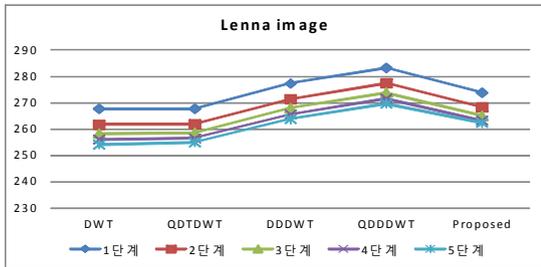


그림 7. Lenna 영상의 완전 재생에 대한 PSNR
Fig. 7. PSNR for perfect reconstruction of Lenna image

2. 잡음 제거 실험

과표본화 이산 웨이블릿 변환이 가장 대표적으로 응용되는 분야는 디지털 영상에 존재하는 잡음을 제거하는 기술이다. 본 논문에서는 잡음이 포함된 디지털 영상에 여러 이산 웨이블릿 변환들의 수행하고 생성된 부대역에 임계값 처리 기법을 적용하여 잡음을 제거한 다음 복원한 영상의 성능을 평가하는 실험을 수행하였다.

이 방법에서 임계값이 작으면, 적은 양의 부대역 계수들만이 잡음으로 판단되어 제거되므로 결과는 만족스럽지 못하다. 그렇지만 반대로 임계값이 너무 크면, 많은 부대역 계수들이 잡음으로 판단되어 0으로 대체하게 되어 이 또한 결과가 만족스럽지 못할 것이다. 따라서 임계값은 적절하게 선택이 되어야 효과적인 잡음 제거가 가능하다. 부대역 영상이 많을수록 방향성분이 많이 존재해서 잡음 제거 성능이 유리하게 된다. 따라서 실험의 객관성을 유지하기 위해서, 웨이블릿 변환들은 제안된 방법의 부대역 영상의 수와 비슷하거나 더 많게 생성되도록 단계를 선정하였다.

그림 8은 실험 Lenna 영상에 대한 잡음 제거 실험 결과를 나타낸 것이다. 임계값을 0부터 70까지 변경하면서 이에 따라 잡음이 제거된 영상의 PSNR를 그래프로 나타

내었다. 첨가된 잡음은 평균 2배의 가우시안 균일 랜덤 잡음을 사용하였다. 실험 결과에서 제안된 3방향 분리처리 2차원 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환 방법이 우수한 것을 확인할 수 있다.

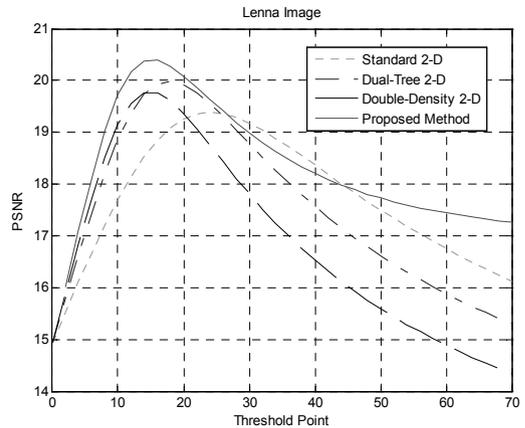


그림 8. 실험 영상에 대한 잡음제거 성능
Fig. 8. Noise removal performance of test image



그림 9. 잡음이 제거된 Lenna 영상
Fig. 9. Noise removed Lenna image

그리고 그림 9는 Lenna 영상을 네 가지 방법으로 잡음 영상에서 잡음을 제거한 결과영상을 나타낸 것이다. 그림 9에서는 임계값은 6으로 설정되었고, 잡음이 제거된 영상의 PSNR을 비교하면 DWT는 23.28 dB이고

DTDWT는 24.03 dB이다. 그리고 DDDWT는 23.95 dB 이고 제안된 3방향 분리처리 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환 방법은 24.28 dB이다. 따라서 제안된 방법이 수치적으로 가장 우수하다.

VII. 결론

본 논문에서는 quincunx 표본화를 이용하여 이중 밀도 이산 웨이블릿의 방향의 선택성을 증가시키는 방법을 제안하였다. 기존의 웨이블릿 변환은 90도씩 분리해서 2번의 필터 처리하지만 제안된 3방향 분리처리 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환에서는 quincunx 표본화의 동작이 영향을 45도씩 회전하면서 표본을 수행하는 것에 착안하여 45도씩 분리해서 3번의 필터 처리를 수행하게 하였다. 그 결과 2차원 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환의 방향 선택성을 증가시킬 수 있었다. 실험을 통해서 제안된 3방향 분리처리 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환이 완전재생을 만족하고 다른 웨이블릿 변환보다 그 성능도 우수하다는 것을 확인하였다. 그리고 잡음 제거 실험에서 여러 다른 웨이블릿 변환 보다 잡음 제거 성능이 우수하다는 것을 증명하였다. 결과적으로 제안된 3방향 분리처리 이중 밀도 이산 웨이블릿 변환은 이동 불변의 특성을 근사적으로 만족하며, 이중 트리 이산 웨이블릿 보다 많은 방향 선택을 갖는다. 그러나 세 종류만의 FIR 필터를 사용하기 때문에 간단하면서도 고속의 변환을 수행할 수 있다.

References

- [1] I. W. Selesnick, "The double density Dual - Tree DWT," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 52, no. 5, pp. 1304-1314, May 2004.
- [2] I. W. Selesnick, "A higher-density discrete wavelet transform," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 54, no. 8, pp. 3039-3048, Aug. 2006.
- [3] N. G. Kingsbury, "The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and

directional filters," Proc. 8th IEEE DSP Workshop, Bryce Canyon, Aug. 1998.

- [4] Jingyu Yang, Yao Wang, "Image Coding Using Dual-Tree Discrete Wavelet Transform," IEEE Trans. on Image Processing, vol. 17, no. 9, pp. 1555-1569, Sep. 2008.
- [5] Joonghee Lim and Jonghong Shin, and Innho Jee, "2D Digital Image Processing Using High Density Discrete Wavelet Transformation," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 13, no 1, pp. 1-8, Feb. 2013.
- [6] Joonghee Lim and Innho Jee, "A Study on enhancement of digital image performance using dual tree wavelet transformation in non-separable image processing," The Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, vol. 12, no. 1, pp. 65-74, Feb. 2012.

저자 소개

지 인 호(정회원)



- 1980년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
- 1983년 8월 : 서울대학교 전자공학과 공학석사
- 1995년 월 : Polytechnic School of Engineering at New York University, USA, 전기 및 컴퓨터공학과 공학박사

- 1982년~1988년 : 국방과학연구소 선임연구원
- 2004년~2005년 : University of Maryland at College Park, USA, 연구교수
- 2012년~2013년 : Temple University at Philadelphia, USA, 연구교수
- 1995년~현재 : 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과 정교수
<주관심분야 : DSP and 3D Image Processing, Multimedia Security, Multimedia Signal Processing>

※ 본 논문은 2011년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.