

A Study on the Improvement of EZW Algorithm for Lossy Image Compression

秋亨錫[†] · 安鍾久^{*}
(Hyung-Suk Chu · Chong-Koo An)

Abstract - Data compression is very important for the storage and transmission of informations. EZW image compression algorithm has been widely used in real application due to its high compression performance. In the EZW algorithm, when a new significant coefficient is generated, its children are all encoded, although its all descendants may be insignificant, and thus its performance is declined. In this paper, we proposed an improved EZW algorithm using IS(Isolated Significant) symbol, which checks all descendants of significant coefficient and avoids encoding the children of each newly generated significant coefficient if it has no significant descendant.

Key Words : Lossy image compression, EZW algorithm, IS symbol, Wavelet transform

1. 서론

정보통신기술이 발달할수록 데이터를 저장하고 전송하는 것은 더욱 중요한 문제이다. 이러한 일을 효과적으로 수행하는데 있어서 신호의 압축은 가장 기본적인 요건이라 할 수 있다. Jerome M. Shapiro는 영상 데이터의 웨이블릿 계수(wavelet coefficient)에 대한 제로트리(zerotree)를 이용하여 영상을 embedded code화 하는 방법을 제안하였다[1][2]. 이러한 EZW(Embedded image coding using Zerotree of Wavelet coefficients) 알고리즘은 가장 효과적인 영상 압축 기법 중 하나로 남아있다. Shapiro가 제안한 EZW 알고리즘에서는 2차원 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)이 적용된다[3]. 입력 영상은 p 를 정수라 할 때 $N = 2^p$ 이 되는 $N \times N$ 크기의 데이터이다. 이것은 최대 p 가지의 서브밴드 영상(subband image)을 만들 수 있다. 각각 다른 스케일에서의 서브밴드 영상간의 유사성을 이용하여 효과적인 영상의 코딩이 가능하다. 인코딩된 각각의 서브밴드 영상이 전송되고, 역 이산 웨이블릿 변환(Inverse Discrete Wavelet Transform)을 이용해 영상이 복원된다[4][5][6].

EZW 알고리즘[1]을 요약하면 다음과 같다.

- 입력 영상을 DWT를 이용하여 멀티스케일의 계수들로 분해한다.
- 분해된 신호들의 제로트리가 정의하고 이것은 각각의 스케일에서의 계수들의 채택 여부를 결정하는데 이용된다.(dominant list)

- 채택된 계수의 크기를 근사화하는 계수열을 만든다.(subordinate list)
- 웨이블릿 계수들은 중요도의 순서에 따라 전송된다.
- 도미넌트 계수열(dominant list)를 처리하는 동안 디코더는 인코더에서와 똑같은 제로트리를 생성시킨다.
- 서브오디네이트 계수열(subordinate list)를 처리하는 동안 디코더는 채택된 계수들의 근사화 구간에 대해 중간값을 복원한다.
- 목표 압축률(target bit rate) 또는 목표 왜곡률(target distortion rate)이 될 때 까지 알고리즘은 계속 된다.

EZW 알고리즘을 수행하는 동안 네 가지의 심벌 (POS, NEG, IZ, ZT)을 사용하게 된다. 하지만 POS 또는 NEG 심벌을 가지는 계수들의 하위밴드의 계수들이 모두 ZT 심벌을 가질 경우 도미넌트 계수열을 만드는데 있어서 데이터의 낭비가 심하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 여섯 개의 심벌(POS, NEG, IPOS, INEG, IZ, ZT)을 이용한 알고리즘이 제안된 바 있다[2]. 하지만 경우에 따라서 4개의 심벌을 이용한 본래의 알고리즘보다 압축률이 떨어지는 경우가 간혹 발생하게 된다. 본 논문에서는 네 개의 심벌(LS, IS, IZ, ZT)을 이용한 새로운 알고리즘을 제안하였다.

서론에 이어 2장에서는 EZW 알고리즘의 개요에 관하여 언급하였고, 3장에서는 IS 심벌을 이용한 EZW 알고리즘에 대하여 언급하였다. 4장에서는 실험에 대하여 설명하고, 제안한 알고리즘의 실험결과와 Shapiro의 EZW 알고리즘에 의한 결과와 비교하였고, 5장에서 결론을 맺었다.

2. EZW 알고리즘의 개요

EZW 알고리즘은 중요한 정보를 가진 비트의 순서대로 계수를 정렬함으로써 간단하면서도 영상압축에 있어서 아주

[†] 교신저자, 正會員 : 蔚山大 工大 電氣電子工學部 講義專擔教授
E-mail : hschu4@mail.ulsan.ac.kr

^{*} 正會員 : 蔚山大 工大 電氣電子工學部 教授
接受日字 : 2006年 10月 30日
最終完了 : 2000年 12月 12日

효과적인 알고리즘이다. 또한 embedded code를 사용하여 인코더는 어느 시점에서나 인코딩을 종료할 수 있다. 따라서 목표 압축률나 목표 왜곡률에 대해 유연하게 적용할 수 있다. 디코더 또한 어떠한 시점에서 디코딩을 종료하던 영상을 적절하게 복구할 수 있다. 하지만 EZW 알고리즘은 어떠한 트레이닝, 저장된 코드북 또는 원래 영상에 대한 기초적인 지식도 필요하지 않다. 어떤 영상을 DWT하면 상하위 밴드의 계수들 간에 서로 유사한 종속성을 가지고 있다 [4][5]. 이러한 성질을 EZW에서 잘 활용하고 있다. 상위밴드의 계수가 클수록 하위밴드의 계수도 클 가능성이 높은 것이다. 자연계의 대부분의 신호들은 이와 같은 성질을 가지고 있다.

2.1 웨이블릿 계수들의 제로트리

DWT를 거치고 나면 입력 영상에 대한 웨이블릿 계수들이 얻어진다. 웨이블릿 계수들의 개수는 원래 입력영상의 계수의 개수와 같다. 임계값(threshold) e 가 주어지면 웨이블릿 계수 w_i 는 w_i 의 절대값이 e 보다 작거나 같으면 insignificant로 정의되고, 나머지 경우는 significant로 정의된다. 주어진 스케일에서의 모든 계수들은 그 하위 서브밴드의 계수들과 관련되어 있다. 상위 서브밴드의 계수들을 parents라 하고, 같은 위치를 나타내는 그 한 단계 아래 서브밴드의 계수들을 children 이라고 한다. 하나의 parent가 주어질 때 같은 위치를 나타내는 모든 하위 서브밴드의 계수들을 descendants라 한다. 비슷하게 어떤 계수들과 같은 위치를 나타내는 모든 상위밴드들의 계수들을 ancestors라 한다. 여기서 유심히 살펴볼 점은 상위밴드의 한 계수가 임계값 e 에 대해 insignificant이면 그 descendants도 임계값 e 에 대해 insignificant 일 확률이 아주 높다. 다시 말해서 하위밴드에 있는 계수의 insignificant 여부는 같은 위치를 나타내는 상위밴드 계수의 insignificant 여부에 의해 어느 정도의 예측이 가능하다.

임계값 e 에 대해 계수 w_i 가 insignificant 이고 의 모든 descendants가 insignificant 일 때 w_i 는 제로트리의 한 원소로 정의된다. 제로트리의 한 원소로 정의된 계수 w_i 가 그 이전의 임계값 e 에 의해 정의된 그 어떤 제로트리 원소의 descendant도 아닐 때 w_i 는 제로트리 루트(zerotree root)로 정의된다. 제로트리 루트는 같은 위치를 나타내는 하위 서브밴드의 모든 계수들의 insignificant 여부를 예측하게 해 준다. 만약 어떤 계수가 제로트리 루트라는 사실을 알게 되면 같은 위치를 나타내는 모든 descendant들이 제로라는 사실을 알 수 있다. 계수들의 스캐닝은 그 어떠한 children도 그 parent보다 먼저 스캔되지 않는 순서로 한다. 주어진 서브밴드의 모든 위치에 대한 계수들은 그 이하 서브밴드를 스캔하기 이전에 스캔된다.

N-스케일의 변환에 있어서, 스캔은 가장 저주파 서브밴드로부터 시작한다. 그리고 두 번째 저주파 서브밴드로 이동하게 된다. 최초의 임계값 e 는 일반적으로 $e \leq \max(w_i) < 2e$ 가 되는 범위에서 선택하게 되고, 보통 2의 정

수제공이 되게 선택하는데 그 이유는 그 다음 스캔에서 임계값이 반으로 나누어지기 쉽게 하기 위해서이다. 제로트리가 하위밴드의 계수들을 예측 가능하게 해 주지만, 어떤 계수들은 자신은 insignificant이면서 significant인 descendants를 갖는 경우가 있다. 이러한 계수들을 isolated zero라 한다. child를 갖지 않는 가장 고주파인 최하위 서브밴드의 insignificant 계수들을 zero라 한다.

주어진 임계값 e 에 대해서 스캐닝을 함으로서 중요도 맵을 만들 수 있다. 중요도 맵은 모든 insignificant 계수들을 0으로 만들고, significant 계수들에 대해서는 그 부호를 저장하게 된다. 중요도 맵은 네 개의 심볼들 중 하나의 심볼로 표현된 여러 심볼들의 열로 표현된다. 네 가지 심볼은 zerotree root(ZT), isolated zero(IZ), positive significant(POS), negative significant(NEG)이다. 중요도 맵에 대한 순서도는 그림 1에서 나타냈다.

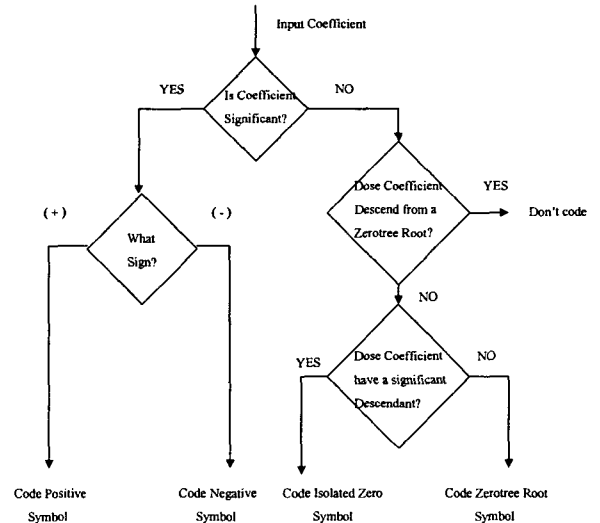


그림 1 중요도 맵의 계수들을 인코딩하는 순서도
Fig. 1 The flow chart for encoding a coefficient of the significance map

2.2 도미넌트 계수열과 서브오디네이트 계수열

인코딩과 디코딩을 수행하는 동안, 웨이블릿 계수들로부터 두 가지의 독립된 계수열이 얻어진다. 도미넌트 계수열은 각각의 스캔에서 찾아진 insignificant 계수들의 좌표를 포함하고 있다. 스캔은 서브밴드별로 순차적으로 이루어지며 각각의 서브밴드에서 계수들이 순차적으로 스캔된다. 서브오디네이트 계수열에는 significant로 인식된 계수들의 크기를 근사화하기 위한 값이 저장된다. 각각의 임계값에 대해서 한 번씩 스캔이 이루어지고 일반적으로 임계값을 순차적으로 반으로 줄이게 된다.

도미넌트 계수열을 만들기 위해 계수들을 스캔하면서 각각의 계수들에 대해 네 가지 심볼(ZR, IZ, POS, NEG) 중 한 가지를 할당하게 된다. 그리고 심볼들의 열이 인코딩된다. 하나의 계수가 significant로 할당될 때마다 서브오디네이트 계수열에 그 계수의 크기를 나타내는 데이터가 추가하게 된다. 서브오디네이트 계수열의 모든 계수들이 스캔이

되면서 복원될 값의 크기를 나타내기 위한 1 비트의 데이터가 추가된다. 각각의 계수들에 대해 그 값이 복원될 값의 구간에서 중간 이상의 값을 가지게 되면 '1'의 한 비트가 추가되고, 중간보다 작으면 '0'의 한 비트가 추가된다. 서브오디네이트 계수열을 만드는 과정을 수행하고 나면, 계수의 크기에 따라서 정렬이 되고, 디코더도 그 순서에 따라 복구할 수 있다. 그림 2에 32와 64 사이의 값을 근사화하는 과정이 나타나 있다. 임계값을 32로 선택했을 경우이다. Significant로 판명된 계수는 32와 64 사이의 값을 갖는다. 도미넌트 계수열에서 그 계수의 부호를 포함한다. 서브오디네이트 계수열에 '0'이 추가되는 경우는 계수가 32와 48 사이의 값일 경우이고 디코더에서 40으로 복구가 된다. 반대로 '1'이 추가되는 경우는 48과 64 사이의 값을 가지는 경우로서 56의 값으로 근사화 된다. 임계값을 반으로 줄여 새로운 단계의 스캔이 이루어지면 이전 단계의 significant 계수들에 대해 크기에 관한 1 비트의 정보가 추가되게 되며 따라서 근사화 구간이 다시 절반으로 줄어든다.

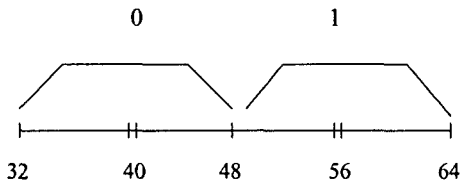


그림 2 근사화 구간과 복원값
Fig. 2 Approximation interval and reconstruction value

3. IS(Isolated Significant) 심벌을 이용한 EZW 알고리즘

EZW 영상 압축 알고리즘은 높은 압축률을 구현하여 아주 광범위하게 사용되는 알고리즘이다. 하지만 기존의 EZW 알고리즘은 하나의 계수가 significant로 판정이 되면 그 계수의 모든 descendants가 insignificant라 하더라도 그 세 개 또는 네 개의 children에 대해서도 코딩을 해야 한다. Insignificant인 계수들에 대해 각각 한 개씩의 ZTR 심벌을 부여하는 것이다. 그 영향으로 압축률이 저하되는 결과가 생기게 된다. 만약 significant로 판명된 계수의 descendants 중에 significant인 계수가 존재하는지 하지 않는지를 알 수 있다면 심벌로 변환되는 계수의 수를 줄일 수 있다. 모든 descendants가 insignificant라면 그 계수의 네 개의 children에 대해서는 심벌을 부여할 필요가 없는 것이다.

이러한 점을 이용하기 위해서 본 논문에서는 기존의 EZW 알고리즘에서 심벌의 체계를 변화시킨 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘에서는 기존의 심벌과 다른 체계의 네 가지 심벌을 이용한다. 기존의 알고리즘에서는 어떤 계수가 significant인 경우 그 계수의 부호의 정보를 포함한 심벌을 만들게 된다. 하지만 그 계수의 descendants에 대해서는 어떠한 정보도 포함하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 descendants에 대한 정보를 포함하는 심벌을 제안한다. 기존의 알고리즘에서는 네 가지의 심벌 zerotree root(ZT), isolated zero(IZ), positive significant(POS), negative

significant(NEG)을 이용하였다.

본 논문에서는 새로운 심벌 체계 [zerotree root(ZT), isolated zero(IZ), linked_significant(LS), isolated_significant(IS)]를 이용한다. LS는 어떤 계수가 significant이고 그 descendants 중에도 significant인 계수가 존재하는 경우 부여하는 심벌이고, IS는 자신은 significant이면서 그 어떠한 descendant도 significant가 아닐 때 부여하는 심벌이다. 최하위 밴드의 경우 LS와 IS의 구별이 없으므로 두 가지의 경우만 발생하게 되고, 따라서 두 개의 계수를 묶어서 하나의 심벌을 부여할 수 있다. 그림 3에서 새로운 알고리즘에 대한 순서도를 보였다.

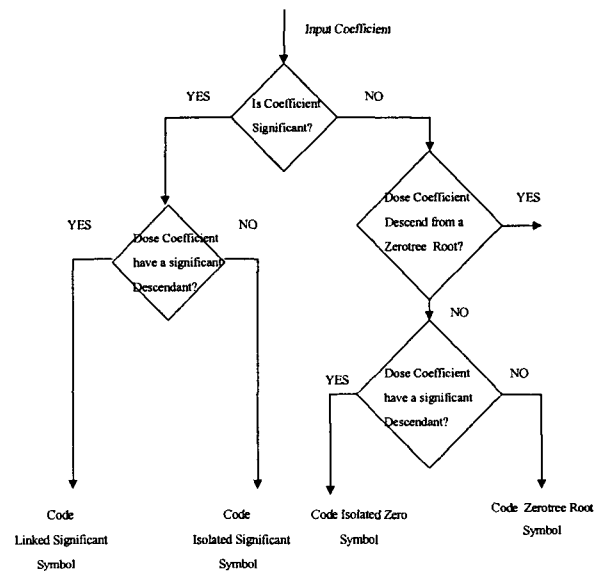


그림 3 제안된 알고리즘의 순서도
Fig. 3 The flow chart for the proposed algorithm

제안된 알고리즘은 significant 심벌에 대해 부호의 정보가 없으므로 근사화하는 값의 구간이 넓어지게 된다. 이러한 정보는 서브오디네이트 계수열에 하나의 significant 계수에 대해 한 비트씩의 데이터를 추가함으로써 해결할 수 있다. 따라서 처음으로 significant가 되는 패스에서는 두 비트의 정보가 서브오디네이트 패스에서 부여된다. 그 다음 패스부터는 한 비트의 정보만 추가하면 된다. 최하위 밴드에 있는 계수가 significant로 판명될 경우는 한 비트만을 부여하여도 기존의 방식과 같은 근사화 구간을 유지할 수 있다.

3.1 제안한 알고리즘의 예

제안한 알고리즘의 실제 적용 예를 살펴봄으로써 알고리즘의 수행 과정을 알아보자. 8*8 영상의 3단계 웨이블릿 변환의 경우를 예로 든다. 계수값들은 그림 4에 있는 것과 같다. LS와 IS 심벌을 이용한 알고리즘의 첫 번째 도미넌트 패스와 서브오디네이트 패스의 결과를 표 1과 표 2에서 볼 수 있다.

63	-34	49	10	7	13	-12	7
-31	45	35	-13	3	4	6	-1
15	14	41	-12	5	-7	3	9
-9	-7	-14	8	4	-2	3	2
-5	9	-1	47	4	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	-4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	4

그림 4 8×8 영상의 3단계 웨이블릿 변환의 예
 Fig. 4 The example of 3-scale wavelet transform of an 8×8 image

- 계수 63은 significant이면서 그 descendant에도 significant인 계수가 있으므로 LS 심벌이 부여된다.
- 계수 49는 significant이면서 그 descendants가 모두 insignificant이므로 IS 심벌이 부여된다.
- 계수 47은 significant이면서 최하위 밴드에 있으므로 IS와 LS를 구별할 필요가 없다. 따라서 POS 심벌이 부여된다. 이 심벌은 기존의 알고리즘과 마찬가지로 도미넌트 패스에서 부호의 정보가 추가되므로 서브오디네이트 패스에서는 한 비트의 정보만 추가된다.
- 나머지 경우는 기존의 알고리즘과 동일하다.

표 1과 기존의 EZW 알고리즘을 이용하여 얻은 결과와 비교하여보자. EZW 알고리즘에서는 32개의 심벌이 모든 트리를 완성할 수 있었다. 반면에 표 1의 결과에서는 20개의 심벌로서 모든 트리를 완성하였다. 산술부호화(arithmetic coding)을 하지 않았을 경우 12개의 심벌이 감소하였으므로 24 비트의 이득이 생긴다. 표 2와 비교하면 기존의 알고리즘에서는 서브오디네이트 계수열에 7 비트가 추가되었고, 제안한 알고리즘에서는 13 비트가 추가되었다. 산술 부호화를 하지 않은 상태에서 두 알고리즘을 비교하여보면, 똑같은 영상을 복구하는데 있어서 기존의 알고리즘은 71 비트가 필요하였고, 제안한 알고리즘에서는 53 비트가 필요하였다. 18 비트만큼의 이득이 생긴 것이다. 이와 같이 작은 크기의 영상의 예에서 효과가 좋음을 확인할 수 있으나 실제로 많이 쓰이는 실험 영상들에서는 이 예에서 만큼의 높은 압축률 차이는 기대하기 어려울 것이다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘을 비교하기 위하여 Lena와 Barbara의 영상을 이용하여 실험을 수행하였다. Biorthogonal 9/7 wavelets를 이용하여 영상을 여섯 단계까지 분해하였고, 각기 다른 압축률에서 EZW 알고리즘과 제안한 알고리즘의 PSNR 값을 표 3과 표 4에서 비교하였다.

실험결과에서 압축률이 64:1보다 작은 경우에는 기존의 알고리즘의 결과와 비교하여 비슷한 결과를 보이는 반면에 압축률이 클수록 성능이 개선됨을 볼 수 있다. 압축률이 1024:1 일 때 0.65dB 정도의 PSNR 값의 향상이 있음을 확인할 수 있다.

표 1 제안한 알고리즘을 이용한 첫 번째 도미넌트 패스
 Table 1 The first dominant pass using the proposed algorithm

서브 밴드	계수값	심벌	복원값	서브 밴드	계수값	심벌	복원값
LL3	63	LS	48	LH2	-9	ZTR	0
HL3	-34	LS	-48	LH2	-7	ZTR	0
LH3	-31	IZ	0	HH ₂	41	IS	48
HH3	45	LS	48	HH ₂	-12	ZTR	0
HL2	49	IS	48	HH ₂	-14	ZTR	0
HL2	10	ZTR	0	HH ₂	8	ZTR	0
HL2	35	IS	48	LH1	-1	IZ	0
HL2	-13	ZTR	0	LH1	47	POS	48
LH2	15	ZTR	0	LH1	-3	Z	0
LH2	14	IZ	0	LH1	2	Z	0

표 2 제안한 알고리즘을 이용한 첫 번째 서브오디네이트 패스.

Table 2 The first subordinate pass using the proposed algorithm

계수값	심벌	복원값
63	11	56
-34	00	-40
45	10	40
49	11	56
35	10	40
41	10	40
47	0	40

표 3 Lena 영상
 Table 3 Lena image

압축률	PSNR	
	EZW	New Method
8:1	39.55	39.60
16:1	36.28	36.29
32:1	33.17	33.24
64:1	30.23	30.79
128:1	27.54	28.16
256:1	25.38	25.98
512:1	23.63	24.12
1024:1	21.69	22.37

표 4 Barbara 영상
 Table 4 Barbara image

압축률	PSNR	
	EZW	New Method
8:1	35.14	35.12
16:1	30.53	30.62
32:1	26.77	26.98
64:1	24.03	24.42
128:1	23.10	23.47
256:1	21.94	22.32
512:1	20.75	21.06
1024:1	19.54	20.11

5. 결 론

본 논문에서는 IS라는 심벌을 이용한 새로운 심벌 체계로 웨이블릿 계수들의 제로트리 코딩하여 더 높은 압축률을 구현하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 EZW 알고리즘은 하나의 계수가 significant로 판정이 되면 그 계수의 모든 descendants가 insignificant라 하더라도 그 세 개 또는 네 개의 children에 대해서도 코딩을 해야 한다. 그 영향으로 압축률이 저하되는 결과가 생기게 된다. 만약 significant로 판정된 계수의 descendants 중에 significant인 계수가 존재하는지 하지 않는지를 알 수 있다면 심벌로 변환되는 계수의 수를 줄일 수 있다. 모든 descendants가 insignificant라면 그 계수의 네 개의 children에 대해서는 심벌을 부여할 필요가 없는 것이다.

제안한 알고리즘에서는 기존의 알고리즘에서의 네 가지의 심벌 zerotree root(ZT), isolated zero(IZ), positive significant(POS), negative significant(NEG) 심벌과 다른 체계의 descendants에 대한 정보를 포함하는 네 가지 심벌을 이용한다. 여기에서 IS와 LS 심벌을 이용함으로써 그러한 데이터의 낭비를 줄일 수 있었다. 실험결과에서 보는 바와 같이 새로운 알고리즘은 압축률이 클수록 좋은 성능을 보였고 압축률이 크게 높지 않은 경우는 기존의 알고리즘과 큰 차이가 없었다.

참 고 문 헌

[1] Vergara Villegas, Pinto Elias, Cruz Sanchez, "Apple Classification System with EZW and Daubechies D4 Lossy Image Compression", CONIELECOMP 2006 16th International Conference on, 27-01 Feb. 2006, pp. 50-52.

[2] Rui Xiaoping, "An improved EZW algorithm for image compression", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005 IEEE International, Volume 2, 25-29 July. 2005, pp. 4-8.

[3] J. M. Shapiro, "Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients", IEEE Trans. Signal Processing vol. 41, no. 12, Dec. 1993, pp. 3445-3462.

[4] J. M. Zhong, C. H. Leung, "An Improved Zerotree Wavelet Image Coder Based on Significance Checking in Wavelet Trees", IEEE Proc. Signal Processing, 1998, pp. 4567-4571.

[5] A. Said and W. A. Pearlman. "A new and Fast Image Codec Based on set Partitioning in Hierarchical Trees". IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, vol. 6, June 1996, 5:1303-1310, Sept. 1996.

[6] Stephane G. Mallat, "A theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 2, no. 7, July 1989

[7] Y. Meyer, "Wavelets: Algorithm and Application," Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1993, pp. 13-31.

[8] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks." Wellesley -Cambridge Press, Wellesley, 1996.

[9] A. Said and W. A. Pearlman. "An image multiresolution representation for lossless and lossy image compression". IEEE Trans. Image Processing, Sept. 1996, pp. 1303-1310.

저 자 소 개



추 형 석 (秋亨錫)

1971년 12월 16일생. 1997년 울산대학교 전자공학과 졸업. 1999년 울산대학교 전자공학과(공학석사). 2003년 울산대학교 전자공학과(공학박사). 2004년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 강의전담교수

Tel : 052-259-1282

Fax : 052-259-1686

E-mail : hschu4@mail.ulsan.ac.kr



안 종 구 (安鍾久)

1953년 7월 7일생. 1977년 서울대 전기공학과 졸업. 1979년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사). 1989년 Univ. of Texas at Austin (공학박사). 1979~1980년 현대중공업주식회사. 1980~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수

Tel : 052-259-2183

Fax : 052-259-1686

E-mail : ckan@mail.ulsan.ac.kr