

이진 대역분할과 Zerotree 기반 산술부호기를 이용한 문서 영상 압축

(Document Image Compression Using Binary Subband Analysis and Zerotree-based Arithmetic Coder)

김정권, 김승환, 이충웅

서울대학교 전기공학부 뉴미디어통신공동연구소

요약

이진 영상의 압축은 디지털 도서관, 팩시밀리 전송, 문서 입출력 시스템과 같이 한정된 대역폭과 저장 공간을 가진 응용 분야에서 절실히 요구되고 있다. 현재 많은 영상 압축 알고리즘이 채택하고 있는 대역분할 기법을 문서와 같은 이진 영상의 압축에 적용한다면, 점진적 전송, 축소영상을 통한 빠른 검색 등의 장점을 얻을 수 있다. 그러나, 이진 영상 신호가 두 단계의 휘도 값을 가지므로, 이에 적합한 대역분할 방법과 산술부호기를 선택하여야 한다. 본 논문에서는 표본화-XOR 대역분할 기법을 선택하여, 알파벳 수의 증가를 막고 공간영역에서 국부적인 성질을 얻을 수 있다. 또한, 넓은 단일-색 영역을 Zerotree로 대표하여 부호화 되는 신호의 수를 줄이고, 대역분할 구조에서 예측성의 저하를 막기 위한 적절한 조건화문맥과 새로운 부호를 선택한다. 이진 영상에 적합한 대역분할 방법과 산술부호기를 선택하여, 대역분할의 장점과 우수한 압축 성능을 달성할 수 있다.

1. 서론

매체간의 호환성을 강한 장점으로 내세우며 다양한 미디어들이 디지털화하고 있는 추세이다. 그러나, 매체의 디지털화는 방대한 저장 공간을 필요로 하기 때문에 반드시 압축 알고리즘이 필요하게 된다. 특히, 문서와 같은 이진 영상의 압축 알고리즘은, 팩스와 같은 보편적인 응용분야에서 디지털 도서관, 문서 입출력 시스템, 지문 압축 등과 같은 개발 분야까지, 널리 응용되고 있다.

기존의 이진 영상 압축 알고리즘은, 연달아 똑같은 색이 나타나는 신호의 개수를 부호화 하는 줄-길이 부호화 [1], 윗줄의 변화 지점에서 상대적 위치를 부호화 하는 READ [1], 알파벳 확장을 통한 산술부호화, 조건화문맥을 이용한

산술부호화 [2] 등이 있다. 이와 같은 압축 알고리즘은 이진 영상 신호의 특성에 따라 적합한 부호화 방법을 채택하여, 높은 압축 성능을 얻었다.

압축 알고리즘은 적용되는 신호의 성질을 잘 이용해야 하기 때문에 응용분야에 따라 달라지게 된다. 이진 영상은 두 단계의 휘도로 표시되기 때문에, 기존의 회색조 (greyscale) 영상 압축 알고리즘을 그대로 적용하면, 압축 성능이 떨어지게 된다. 따라서, 회색조 영상에서 우수한 성능을 보이던 기법도 이진 영상의 압축에 적용하기 위해서는 이진 영상의 성질에 부합하도록 수정하여야 한다.

현재 주목받고 있는 부호화 방법 중, 대역분할 부호화 방법은 점진적인 전송, 축소 영상을 통한 고속 검색, 대역간의 자기-상관성을 이용

한 우수한 압축 성능 등과 같은 장점을 가지고 있기 때문에, 대역분할 구조를 이진 영상의 압축에 적용하는 것이 고무적으로 검토되고 있다. 그러나, 이진 영상은 두 단계의 휘도 값을 가지고 영역의 경계에서 휘도 값이 갑자기 변화하기 때문에, 이진 영상에서 채택하는 대역분할 방법은 유한체(finite field) 연산에서 정의되어야 하고 공간영역에서 국부적인 성질을 가져야 한다 [3]. 또한, 이진 영상에서 주위 화소 사이의 강한 상관성과 예측성이 대역분할을 통해 감소하게 되므로, 산술부호기는 이를 보상할 수 있도록 잘 설계되어야 한다.

본 논문에서는 이진 영상의 압축에서 대역분할 구조의 장점을 얻기 위하여, 이진 대역분할과 Zerotree 기반 산술부호기를 이용한 이진 영상 압축 알고리즘을 제안하였다. 표본화-XOR 대역분할을 적용하여 대역분할 결과가 이진수에 달려 있고, 고주파 필터의 영향 범위가 두 화소밖에 되지 않아 공간영역에서 국부적인 성질을 갖는다. 그리고, 문서와 같은 이진 영상에서 자주 나타나는 넓은 단일-색 영역을 Zerotree 심벌로 대표하여 부호화 되는 신호의 수를 감소시킨다. 또한, 대역분할 구조에서 영상을 축소하기 때문에 실질적인 거리가 멀어져서 고주파 대역의 신호의 예측 능력이 감소하게 되는데, 이를 막기 위해 적절한 조건화문맥(conditioning contexts)을 선택하고, 고주파 대역(LH, HL, HH)의 신호들을 하나의 심벌로 연결시켜 부호화 한다. 이와 같은 부호화 기법을 이용하여, 대역분할 기법의 장점을 가지면서 우수한 압축 성능을 보인다.

2장에서는 이진 영상의 대역분할 기법이 가져야 될 요구 사항과 본 논문에서 사용한 표본화-XOR 대역분할에 대하여 설명을 하고, 3장에서는 산술부호기에서 Zerotree의 도입, 고주파 대역에서 적절한 조건화문맥의 선택과 LH, HL, HH 대역의 연결 부호화에 대하여 설명하겠다. 4장에서는 CCITT 팩스 시험 영상을 압축한 결과를 제시한다.

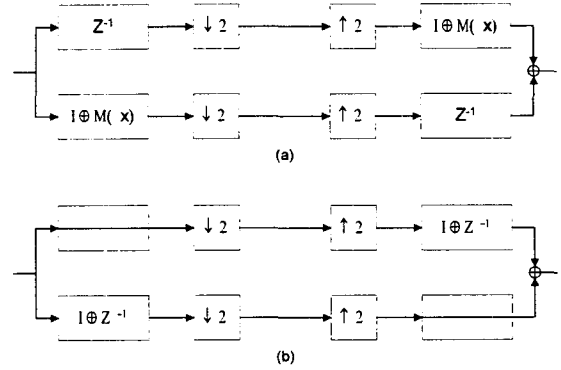


그림 1 이진 영상의 비선형 대역분할
(a) Egger 제안 (b) 표본화-XOR

2. 이진 대역분할

대역분할 기법은 다해상도의 지원, 점진적인 전송, 축소 영상을 통한 고속 검색 등의 많은 장점을 가지고 있다. 하지만, 대역분할에 사용되는 필터들이 보통 실수체(real field)에서 정의되어 있기 때문에, 이진 영상에 적용하였을 경우 신호값의 단계가 매우 커져서 엔트로피의 증가를 유발시킨다. 따라서, 유한체(finite field)내에서 연산으로 이루어진 대역분할에 관한 연구들이 많이 이루어 졌다.

Swanson과 Tewfik은 대역분할 기법 중 하나인 웨이블릿 필터를 이진수의 집합 GF(2) (Galois Field)에서 구현하여 실수체에서 웨이블릿들의 장점을 보존하였으나, 필터의 충격응답이 길기 때문에 영역의 경계에서 떨림 효과가 나타나고 우수한 압축 성능을 갖지 못한다 [3]. 선형 웨이블릿 이론과 병행하여, Egger는 비선형 대역 분할 기법을 사용하였고, 그림 1. (a)와 같은 구조에서 메디안 필터와 같은 적절한 M(x)를 선택하면 완전 복원이 가능하다는 것을 보였다 [4].

이진 영상은 휘도 값이 갑작스럽게 변화하기 때문에, 그림 1.(a)에서 M(x)의 필터 영역이 비교적 작아 공간영역에서 국부적인 성질을 가지는 것이 부호화에 유리하다. 따라서, 본 논문에서는 Egger의 비선형 대역분할 구조를 간단히 하여 표본화-XOR 대역분할을 사용하였다. 대역분할 과정은 그림 1. (b)와 같이 주어지고, 이를

식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} l(n) &= x(2n) \\ h(n) &= x(2n) \oplus x(2n+1) \end{aligned} \quad (1)$$

n 은 표본화 한 후의 공간적인 위치를 나타내고, \oplus 는 이진수에서 XOR(배타적-OR) 연산이다. XOR는 modulo-2 연산에서 빼기에 해당하므로 Haar 웨이블릿의 고주파 대역 필터와 유사한 특징을 나타낸다.

표본화-XOR 대역분할 방법은 연산 결과가 이진수의 집합 GF(2)에 닫혀 있기 때문에, 신호의 단계가 늘어나지 않아 심한 엔트로피의 증가는 일어나지 않는다. 또한, 고주파 대역 필터의 충격응답이 단지 두 개의 화소값을 사용하기 때문에, 영역의 경계에서 생기는 휘도 신호의 갑작스러운 변화가 대역분할 결과 계수에 공간적으로 국부적 영향을 미치게 되어 고주파 성분의 확산을 막을 수 있다. 그리고, 연산이 비교적 간단하기 때문에 빠른 대역분할 속도를 얻을 수 있다.

한편, 회색조 영상의 압축에서 부호화 신호수의 증가 때문에 우수한 압축 성능을 보이지 못한 Gaussian 피라미드는 이진 영상의 압축에서는 다른 국면을 나타낸다. 축소 영상의 추가에 의해 부호화 신호수는 증가하지만, 이진 영상에서 높은 공간 영역 예측 능력을 유지하면서 축소 영상으로부터 비인과 조건화문맥을 얻을 수 있다. 따라서, JBIG [5]과 같은 이진 영상 압축 표준에서는 다해상도를 지원하기 위해서 Gaussian 피라미드를 사용한다.

이와 달리, 본 논문에서 사용한 표본화-XOR 대역분할은 부호화 신호의 수는 원 신호의 수와 같지만, 대역분할에서 표본화에 의하여 실질적인 거리가 떨어져 상관성이 감소할 뿐 아니라 고주파 대역 신호는 공간 영역의 저주파 대역 신호에 비해 예측성이 떨어진다. 따라서, 다음 장에서는 이러한 문제를 하기 위한 조건화문맥과 산술부호기의 설계 방법에 대하여 논의한다.

3. Zerotree 기반 산술부호기

대역분할과 웨이블릿 필터 이론은 최근 많은 응용 분야에서 우수한 성능으로 주목을 받고 있다. 특히, 영상 압축에서는 대역분할 방법에서 대역간의 공간적인 상관성과 자기-상관성을 이용하여 우수한 압축 성능을 얻는다. 이러한 접근 방법 중, EZW (Embedded Zerotree Wavelet) [6]는, 비활성 모(parent)-신호와 같은 공간적 위치에 있는 고주파 대역의 자(children)-신호 역시 비활성일 가능성이 높다는 사실을 이용한다. 즉, 모-신호와 자-신호 모두 다 비활성인 나무 구조의 신호 집합을 Zerotree라는 새로운 심벌로 대체하여 부호화의 효율성을 높인다. Said와 Pearlman은 EZW를 변형하여 SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Tree)를 제안하였고 EZW에 비해 조금 우수한 성능을 보인다 [7].

팩스 문서와 같은 이진 영상에서도 넓은 단일-색 영역이 자주 나타나기 때문에, 이런 영역을 Zerotree와 같은 심벌을 이용하여 압축 이득을 얻을 수 있다. 대역분할에서 XOR는 두 값이 서로 다를 때 '1'이 되므로 넓은 단일-색 영역의 모든 고주파 대역의 신호값들은 '0'이 된다. 따라서, 넓은 단일-색 영역을 최저주파 근사 영상의 Zerotree로 대표하여 부호화하고, 같은 위치의 모든 고주파 대역의 신호들은 부호화하지 않는다.

Zerotree와 같은 심벌은 부가적으로 보내주어야 하므로, 부가 정보의 양과 부호화 신호수의 감소를 비교한 후 신중하게 사용하여야 한다. 모의 실험에 의하면 넓은 단일-색 영역은 예측 산술부호화에 의해서 예측이 잘 되기 때문에, 부호화 신호수가 감소하는 만큼 압축 파일의 크기가 줄어들지 않는다. 따라서, 최저주파 근사 대역 이외의 대역에서 Zerotree 심벌을 사용하면 부가정보가 더 크기 때문에, Zerotree 심벌은 최저주파 근사 대역에서만 사용한다.

Zerotree 정보와 최저주파 근사 대역은 원 영상의 축소판이기 때문에, 산술부호기에서 기존의 조건화문맥을 그대로 사용한다. 대역분할에

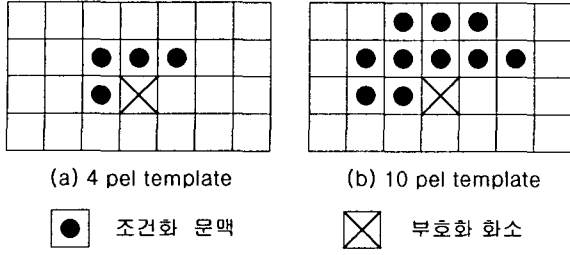


그림 2. 최저주파 근사 대역의 조건화 문맥

의해 영상이 축소되었기 때문에, 인접한 화소끼리의 상관성이 감소되어 그림 2.(a)와 같이 4개의 조건화문맥을 사용하여도 되지만 실험에서는 그림 2.(b)와 JBIG에서 사용하는 10개의 인접 화소를 조건화문맥으로 사용하였다 [5]. 조건화문맥 $C(i,j)$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$C(i,j) = \sum_{k=0}^9 c_k(i,j) 2^k$$

$$\begin{aligned} c_0(i,j) &= l(ij-2) & c_1(i,j) &= l(ij-1) \\ c_2(i,j) &= l(i-1j-2) & c_3(i,j) &= l(i-1j-1) \\ c_4(i,j) &= l(i-1j) & c_5(i,j) &= l(i-1j+1) \\ c_6(i,j) &= l(i-1j+2) & c_7(i,j) &= l(i-2j-1) \\ c_8(i,j) &= l(i-2j) & c_9(i,j) &= l(i-2j+1), \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $l(i,j)$ 는 Zerotree 또는 최저주파 근사 대역의 위치 (i,j) 의 화소값이다.

팩스와 같은 이진 영상은 공간적으로 매우 상관성이 높기 때문에, 대역분할의 축소에 의해 실질적 거리가 멀어져 예측능력이 감소할 뿐 아니라 XOR에 의해서 얻어지는 고주파 대역의 신호 역시 주위와 상관성이 떨어진다. 이를 수식적으로 보이기 위하여, 그림 3과 같이 1차원 표본화-XOR 대역분할을 수행한 후 2개의 조건화문맥을 둔 경우의 엔트로피를 구하면 식 (3) 과 같이 주어지고, 원 신호가 2차 마르코프 모델인 경우는 부등식과 같이 대역분할에 의하여 엔트로피가 증가하게 된다.

$$\begin{aligned} & H(X_{2n} \oplus X_{2n-1} | X_{2n}, X_{2n-2} \oplus X_{2n-1}) \\ &= H(X_{2n-1} | X_{2n}, X_{2n-2} \oplus X_{2n-1}) \\ &= H(X_{2n-1} | X_{2n}, X_{2n-1}) + I(X_{2n-1}; X_{2n-1} | X_{2n}) \\ &\quad - I(X_{2n-1}; X_{2n-2} \oplus X_{2n-1} | X_{2n}) \\ &\geq H(X_{2n-1} | X_{2n}, X_{2n-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

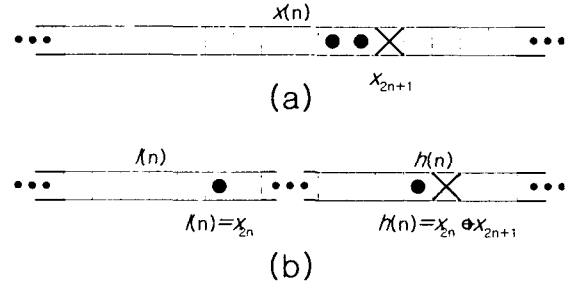


그림 3. 대역분할 전·후의 조건화 문맥의 비교
(a) 대역분할 전 (b) 대역분할 후

여기서, $I(\cdot; \cdot)$ 는 두 신호간의 정보량이다.

본 논문에서는 이와 같은 엔트로피의 증가를 막기 위하여 고주파 대역(LH, HL, HH)의 신호 세 개를 하나의 심벌로 연결(concatenation)시켜 부호화하고 그에 적절한 조건화 문맥을 선택한다. 표본화-XOR 대역분할은 직교성이 보장되지 않기 때문에, 고주파 대역 LH, HL, HH 대역간의 상관성이 크다. 또한, 공간영역에서 고주파 필터가 국부적이기 때문에 같은 대역-내 조건화문맥을 두는 것보다, LH, HL, HH 세 신호를 연결하여 결합-확률을 구하는 것이 압축 성능을 향상시킨다. 세 고주파 대역 신호를 연결-부호화 할 때 결합-엔트로피를 구하여 보면, 식(4)와 같이 $LL_{ij}, LH_{ij}, HL_{ij}, HH_{ij}$ 로부터

$I_{2i,2j}, I_{2i,2j-1}, I_{2i-1,2j}, I_{2i-1,2j-1}$ 를 구할 수 있기 때문에 공간영역에서 그에 대응하는 조건화 문맥을 둔 경우의 엔트로피 값과 비슷하게 된다.

$$\begin{aligned} & H(LH_{ij}, HL_{ij}, HH_{ij} | LL_{ij}, NS_{CS}) \\ &= H(I_{2i,2j-1}, I_{2i+1,2j}, I_{2i-1,2j+1} | I_{2i,2j}, NS_{CS}) \\ &\quad - H(I_{2i,2j-1} | I_{2i,2j}, NS_{CS}) + H(I_{2i+1,2j} | I_{2i,2j}, NS_{CS}) \\ &\quad + H(I_{2i-1,2j+1} | I_{2i-1,2j}, I_{2i,2j}, NS_{CS}) \\ &\approx H(I_{2i,2j-1} | NS_{CS}) + H(I_{2i+1,2j} | NS_{CS}) + H(I_{2i-1,2j+1} | NS_{CS}) \end{aligned} \quad (4)$$

NS_{CS} 는 대역분할 구조에서 인과(causal) 인접영역 조건화문맥으로서 아래의 내용에서 적절하게 선택하여야 한다. 그리고, NS_{CS} 는 공간영역에서 현재 부호화 위치의 가장 가까운 인접 화소들로 구성된 조건화문맥이다.

이제 새로운 조건화문맥 NS_{CS} 을 적절히 선택하여 공간영역에서 NS_{CS} 에 대응하는 영역을

나타내어야한다. 게다가, 대역분할 구조에서는 저주파 근사 대역에서는 비인과(noncausal) 조건화문맥 NS_{NCS} 도 얻을 수 있다. 식 (5)는 제안된 압축 방법에서 사용하는 조건화문맥이다.

$$C(i,j) = \sum_{k=0}^{11} c_k(i,j)2^k$$

$$\begin{matrix} c_0(i,j) = ll(i,j) & c_1(i,j) = ll(i,j+1) \\ c_2(i,j) = ll(i,j-1) & c_3(i,j) = ll(i-1,j) \\ c_4(i,j) = ll(i+1,j) & c_5(i,j) = ll(i+1,j+1) \\ c_6(i,j) = lh(i,j-1) & c_7(i,j) = lh(i-1,j) \\ c_8(i,j) = hl(i,j-1) & c_9(i,j) = hl(i-1,j) \\ c_{10}(i,j) = hh(i,j-1) & c_{11}(i,j) = hh(i-1,j) \end{matrix} \quad (5)$$

근사 영상에서 인접 화소간에 예측 능력이 우수하기 때문에, 위와 같이 항상 이전 대역까지 대역합성을 하여 LL 대역을 구한 후 조건화문맥을 두었다. c_0, c_1, c_4, c_5 가 비인과 조건화문맥 NS_{NCS} 에 해당하고 나머지가 인과 조건화문맥이다. 모의 실험 결과 고주파 대역자체내의 조건화문맥은 예측 능력이 떨어지기 때문에, $c_6 \sim c_{11}$ 과 같이 바로 왼쪽과 위의 신호만을 조건화문맥으로 사용한다. 식 (5)와 같이 주어지는 조건화 문맥과 연결-부호를 그림으로 나타내면 그림 4와 같이 주어진다.

공간 영역에서의 조건화문맥과 비슷한 예측 능력을 얻기 위하여 조건화문맥의 수를 증가시켰고, 고주파 대역에서 LH, HL, HH 세 신호를 연결하여 부호화 하기 때문에 산술부호기의 알파벳 수가 증가하였다. 따라서, 산술부호기가 필요로 하는 메모리의 양이 증가하고 알파벳의 증가 때문에 동작 속도가 약간 느려지게 된다. 이와 같은 속도와 메모리를 희생하여, 제안된 이진 영상 압축 기법은 대역분할 기법의 장점을 가지면서 공간 영역에서의 산술부호화 기법과 비슷한 압축 성능을 가진다.

4. 모의 실험 결과

제안된 이진 영상 압축 기법을 평가하기 위하여, CCITT에서 제공하는 8 가지 팩스 시험 영상을 이용하였다. 영상의 크기는 가로×세로

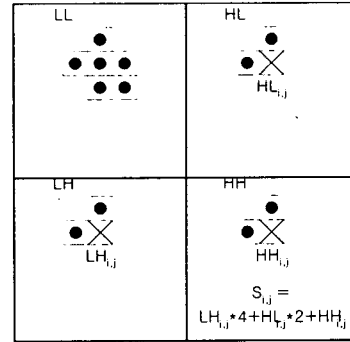


그림 4. 고주파 대역의 조건화문맥과 연결-심벌

1728×2376이고, 이것은 A4 용지를 200 dpi로 표본화한 경우 영상의 크기이다. 200 dpi 정도 해상도이면 보통 크기 글자의 크기가 약 10 ~ 40 정도이므로, 넓은 단일-색 영역도 그 정도의 크기로 나누어 부호화 하는 것이 유리하므로, 5 단계의 대역분할을 수행한다. 표본화-XOR 대역분할을 수평, 수직 방향으로 한번씩 수행하여 LL, LH, HL, HH를 얻는다.

대역분할 후, 최저주파 근사 영상과 같은 크기의 Zerotree 정보는 식 (2)와 같이 10 비트 조건화문맥을 가지는 이진 산술부호화를 수행하여 부호화 한다. 최저주파 대역과 Zerotree 정보는 확률분포가 다르기 때문에 확률분포를 재초기화 시킨 후 부호화 하여야 한다. 고주파 대역은 식 (5)와 같이 12 비트 조건화문맥을 가지는 팔진 산술부호기를 이용하여 부호화 한다. LH, HL, HH를 연결 부호화 하므로, 팔진(octave) 산술부호기가 된다.

CCITT PTT1 영상을 5단계 대역분할을 수행하여 압축한 경우, Zerotree를 부호화 하는데 2480 비트의 저장 공간이 필요하다. 한편, Zerotree를 사용하지 않은 경우의 파일 크기는 136936 비트이고, Zerotree를 사용한 경우는 그 정보의 양까지 포함한 파일 크기가 134560 비트이다. Zerotree를 사용함으로써 파일 크기가 3% 정도 감소하는데, 이것은 원래 넓은 단일-색 영역에 위치한 신호들이 주위의 화소들로부터 예측이 잘 되기 때문이다.

표 1은 이진 영상 압축 기법들의 압축 성능을 비교하기 위하여 압축 파일의 크기를 비트

표 1. 이진 영상 압축 기법의 압축 성능 비교
(1728×2376 영상을 압축한 경우 파일 bit 수)

부호화기법	READ	LANGDON Nonstationary	조건부 산술부호화	제안기법
PTT1	144472	119615	123144	134560
PTT2	86176	70595	69416	73504
PTT3	229361	189240	183680	192048
PTT4	552970	455132	461432	468320
PTT5	257410	215822	214848	223608
PTT6	133096	112343	103976	109152
PTT7	553099	465715	442880	474064
PTT8	151865	122748	120576	127104

수로 나타내었다. READ 기법 [1]은 CCITT에서 팩스 신호의 압축 표준으로 채택한 것으로 윗줄의 변화 지점에서 상대적 위치를 부호화 한다. 산술부호기를 이용한 방법들을 제외하고 우수한 성능을 보이는 방법 중 하나이다. Langdon [2]은 공간 영역에서 조건화문맥을 두어 곱셈 과정이 없는 이진 산술부호기를 사용하였고, 실제 영상에서는 확률분포가 공간적으로 유동적(non-stationary)이기 때문에 적절히 확률값을 재초기화하여 보다 우수한 성능을 얻었다. '조건부 산술부호화' 기법은 JBIG의 가장 기본적인 10 비트 조건화문맥만을 실험한 결과로서 점진적 모드(progressive mode)를 지원하지 않기 때문에 가장 우수한 결과를 보여 준다 [5]. JBIG에서 점진적 모드를 작동시키면 압축 성능이 떨어지게 된다.

제안한 이진 대역분할과 Zerotree 기반 산술부호기를 이용한 압축 기법은 기존의 대역분할 구조의 장점인 점진적 전송, 다해상도 지원, 축소 영상을 통한 고속 검색 등을 유지한다. 뿐만 아니라, 표 2의 실험 결과에서와 같이 READ보다는 훨씬 우수하고 '조건부 산술부호화'에 비해 약 10 % 정도 압축 성능이 떨어진다. 이는 JBIG에서 점진적 모드를 작동시킨 경우보다 훨씬 우수한 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 이진 대역분할과 Zerotree 기반 산술부호기를 이용한 이진 영상 압축 기법을 제안하였다. 대역분할에 의한 알파벳의 증가

를 막기 위해 표본화-XOR 대역분할을 적용하여, 그 결과가 이진수 집합 GF(2)에 닫혀 있고 갑작스런 휘도의 변화가 국부적인 고주파 대역 신호에만 영향을 미친다. 또한, 대역분할 구조에서 예측 능력이 떨어지는 문제를, 세 고주파 대역 신호를 연결-부호화하고 적절한 조건화문맥을 선택하여 해결하였다. 결과적으로 제안된 압축 기법은 대역분할 기법의 장점을 가지면서 우수한 압축 성능을 지닌다.

참고 문헌

- [1] R. Hunter and R. H. Robinson, "International digital facsimile coding standards," Proc. IEEE, vol. 68, pp. 854-867, July 1980.
- [2] G. G. Langdon and J. Rissanen, "Compression of block-white images with arithmetic coding," IEEE Trans. Communications, vol. COM-29, pp. 858-867, June 1981.
- [3] M. D. Swanson and A. H. Tewfik, "A binary wavelet decomposition of binary images," IEEE Trans. Image Processing, vol. 5, pp. 1637-1650, Dec. 1996
- [4] O. Egger, W. Li, and M. Kunt, "High Compression Image Coding Using an Adaptive Morphological Subband Decomposition," Proc. IEEE, Vol. 83, No. 2, February 1995.
- [5] ITU-T. "JBIG: progressive bi-level image compression. Technical Report T.82," International Telecomm. Union 3 1993.
- [6] J. M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 41, pp. 3445-3462, Dec. 1993.
- [7] A. Said and W. A. Pearlman, "An image multiresolution representation for lossless and lossy compression," IEEE Trans. Image Processing, vol. 5, pp. 1303-1310, Sep. 1996.