

논문-03-08-4-13

저비트율 동영상 부호화에 적합한 웨이블릿 기반의 차영상 양자화기

주 수 경*, 유 지 상*

A differential image quantizer based on wavelet for low bit rate video coding

Sookkyung Joo* and Jisang Yoo*

요 약

본 논문에서는 차영상(differential image)에 대해 효율적으로 양자화 하기 위해 기존 큐드 트리(Quadtree) 부호화의 단점을 개선한 새로운 큐드트리 부호화 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 실제 표준화되고 있는 영상의 크기에 대응하면서, 기존의 큐드트리와 제로트리 기반의 양자화기보다 계산량을 줄여 부호화 및 복호화 처리 시간을 줄이고, 영상의 화질을 높일 수 있다. 실제 동영상 코덱에 적용 가능하도록 차영상의 특징을 분석하였고, 임의의 크기를 갖는 영상을 처리할 수 있도록 블록단위로 처리하는 기존의 큐드트리 부호화의 기능을 개선하였다. 또한 웨이블릿 변환된 차영상의 계수값을 스케일링(scaling)하여 화질을 향상시킬 수 있었다. 제안한 기법을 기존의 큐드트리와 SPIHT 기법과 비교한 결과 부호화 시간 및 복호화 시간의 손실 없이 영상의 화질을 향상시킬 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose a new quadtree coding algorithm to improve the performance of the old one. The new algorithm can process any frame of size in standard and reduce encoding and decoding time by decreasing computational load. It also improves the image quality comparing with any old quantizer based on quadtree and zerotree structure. In order for the new algorithm to be applied for real video codec, we analyze the statistical characteristics of coefficients of differential image and add a function that makes it deal with an arbitrary size of image by using new technique while the old one process by block unit. We can also improve the image quality by scaling the coefficient's value from a differential image. By comparing the performance of the new algorithm with quadtree and SPIHT, it is shown that PSNR is improved, that the computational load is not reduced in encoding and decoding.

I. 서 론

동영상 정보는 저장이나 전송을 위해 대용량의 저장매체나 큰 대역폭을 필요로 하므로 데이터를 압축하는

기술은 필수적이라 할 수 있고, 따라서 고압축을 위한 효율적인 압축 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

MPEG, H.26x의 경우 공간적 중복성을 제거하기 위해 DCT에 기반을 둔 변환 부호화를 이용하였다. 그러나 DCT를 사용하여 영상을 압축할 경우 8×8 화소단위로 블록을 처리하기 때문에 압축률이 높을 경우 블록화 현상이 발생하여 많은 화질열화가 생기는 단점을 가지고 있다. 이러한

* 광운대학교 전자공학과 디지털미디어 연구실
Kwangwoon University Digital Media Lab.

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00350-0) 지원으로 수행되었습니다.

단점을 보완하기 위해 여러 방법들이 연구되어 왔고, 그 중 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용한 영상 압축이 크게 부각되고 있다. 웨이블릿 변환은 영상을 블록 단위로 처리하지 않고 영상 전체를 분해함으로 블록화 현상이 생기지 않는다^{[1][2][3]}.

웨이블릿 변환을 이용한 부호화 기법 중에서 주요 임계치를 이용하여 웨이블릿 계수를 중요 계수와 비중요 계수로 분류하고 부대역간의 상관관계를 이용한 제로트리(zerotree) 부호화 기법이 많이 사용되고 있다^{[4][5]}.

일반 정지영상의 경우에는 웨이블릿 변환 후 기저대역에 에너지가 집중되기 때문에 제로트리 기반의 양자화기가 적합하지만, 차영상의 경우에는 움직임이 많은 부분에 고주파 성분이 분포되어 있고, 기저대역에 상대적으로 에너지 집중 정도가 낮다. 전 대역에 에너지가 불규칙하게 분포되어 있는 차영상을 효율적으로 양자화 하기 위해서는 제로트리 기반의 양자화기보다는 쿼드트리 부호화가 적합하다^[6]. 하지만 기존의 쿼드트리 부호화는 임의의 크기의 영상에 적용하려면 블록 단위로 처리를 하였다.

본 논문에서는 블록 단위로 처리하지 않고 표준 크기를 갖는 동영상의 차영상에 적합한 양자화기를 제안하고 있다. 제안된 기법에서는 웨이블릿 변환된 각각의 대역을 하나의 독립된 공간으로 보고 각 대역에 대해 쿼드트리 부호화를 수행한다. 쿼드트리 부호화의 특성상 각 대역들을 4개의 부대역으로 나누어 진행해야 하는데 $2^n \times 2^n$ 크기가 아닌 장방형 모양의 대역에서는 더 이상 분할을 할 수 없는 상황이 있게 된다. 이 때의 부대역을 가상의 영역을 만들고 쿼드트리 부호화를 수행한다. 가상 영역에 대해서는 실제로 부호화하지 않기 때문에 영상 압축을 효율적으로 할 수 있다.

모의실험을 통하여 성능 평가를 한 결과, 제안된 기법이 기존의 블록기반의 쿼드트리 부호화보다 높은 화질을 보장할 수 있고, 제로트리 부호화에 기반을 둔 SPIHT 보다도 좋은 화질을 유지하고, 처리시간도 현저하게 감소시키는 것을 알 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 리프팅을 이용한 웨이블릿 변환과 웨이블릿 변환된 차영상의 특징을 분석하였고, III장에서는 기존의 쿼드트리 부호화와 제안하는 새로운 기법에 대하여 설명하였다. IV장에서는 모의실험을 통하여 기존의 블록기반의 쿼드트리 부호화와 SPIHT를 제안된 새로운 기법과의 성능을 비교하였다. 마지막으로 V장에서 본 논문에 대한 결론을 내린다.

II. 리프팅 기법과 차영상 웨이블릿 계수의 특징 분석

1. 리프팅을 이용한 웨이블릿 변환

영상을 압축하는데 있어 웨이블릿을 이용한 방식은 DCT를 이용한 방식에 비해 블록화 현상이 나타나지 않고 각 부대역 별로 처리가 가능하여 압축율을 높일 수 있다. 웨이블릿 변환은 Morlet에 의해 소개된 이후에 효율이 높고 계산량이 적은 웨이블릿에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

리프팅(lifting)을 이용한 변환은 기존 필터 링크 방식에 비해 연산속도가 빠르고, 입력되는 영상에서 바로 변환이 가능하기 때문에 별도의 보조 메모리가 필요하지 않고, 정방향 변환에서 부호만 바꾸어주면 쉽게 역변환을 구할 수 있다는 장점이 있다^[7].

리프팅을 이용한 웨이블릿 변환은 분할(split), 예측(predict), 갱신(update) 등 크게 3단계로 나된다. 분할 단계는 입력되는 영상의 신호를 홀수 성분과 짝수 성분으로 분할하는 과정이다. 입력 신호를 $x[n]$ 라 하면 짝수 번째 신호는 $x_e[n]$ 으로, 홀수 번째 신호는 $x_o[n]$ 으로 분할 한다.

$$x_e[n] = x[2n], \quad x_o[n] = x[2n+1] \quad (1)$$

예측은 짝수 성분인 $x_e[n]$ 으로부터 예측 연산자 P 를 통하여 홀수 성분인 $x_o[n]$ 을 예측할 때 얻어지는 오차 성분을 웨이블릿 계수 $d[n]$ 로 얻는다.

$$d[n] = x_o[n] - P(x_e[n]) \quad (2)$$

갱신은 입력 신호 $x[n]$ 을 균사화하는 스케일링(scaling) 계수 $c[n]$ 을 얻기 위해 짝수 성분인 $x_e[n]$ 과 $d[n]$ 을 갱신 연산자 U 를 통하여 값을 구한다.

$$c[n] = x_e[n] - U(d[n]) \quad (3)$$

그림 1은 정방향 변환의 리프팅 구조를 나타낸 것이고, 그림 2는 역방향 변환의 리프팅 구조를 나타낸 것이다.

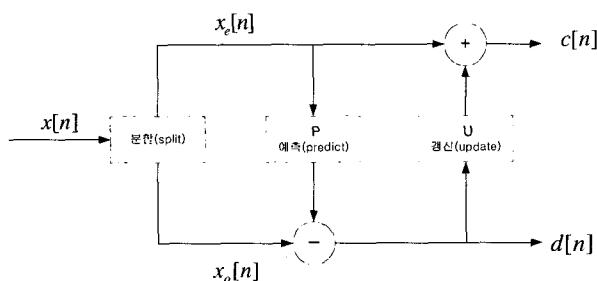


그림 1. 정방향 리프팅 구조도

Fig 1. Forward lifting block diagram

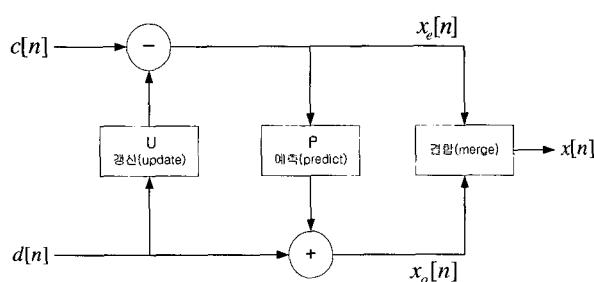


그림 2. 역방향 리프팅 구조도

Fig 2. Inverse lifting block diagram

2. 차영상 웨이블릿 계수의 특징 분석

동영상 부호화는 시간적 중복성을 제거하기 위해 움직임 보상 기법을 사용한다. 즉, 현재 프레임과 시간적으로 이웃

한 프레임인 참조 프레임으로부터 움직임 벡터를 구하고, 이를 이용하여 움직임 보상된 현재 프레임을 재구성하게 된다. 현재 프레임과 움직임 보상을 통해 재구성된 영상의 차성분을 오차영상(residual image)이라 하며, 오차영상은 양자화 과정을 거쳐 수신단에 전송된다. 이러한 오차영상을 효율적으로 양자화하기 위해 웨이블릿 기반의 양자화 기법이 활발히 연구되고 있다^[8]. 하지만 기존의 웨이블릿 기반 양자화기에 대한 연구는 일반적인 영상에 적용한 기법을 그대로 적용하고 있다.

본 논문에서는 시스템의 복잡도를 고려하여 움직임 보상을 제외한 이웃한 두 프레임간의 단순한 차영상(differential image)만을 대상으로 하였다. 먼저 일반적인 정지영상과 차영상을 웨이블릿 변환한 후 계수의 분포를 분석하고, 이를 이용하여 효율적인 웨이블릿 기반의 차영상 양자화기를 제안하고 있다. 차영상의 웨이블릿 계수와 정지영상의 웨이블릿 계수의 분포를 비교해 보면 다음과 같다.

그림 3의 (a)는 352×288 크기의 Silent 영상에서 첫 번째 프레임을 2 레벨로 웨이블릿 변환 후 176×144 크기의 상위 4개 부대역 계수의 분포를 절대값을 취한 모습이다. 그림에서 알 수 있듯이 웨이블릿 변환 후 기저대역에 에너지 집중이 가장 높다.

그림 3의 (b)는 352×288 크기의 Silent 영상을 2 레벨로 웨이블릿 변환된 두 번째 영상에서 2 레벨로 웨이블릿 변환된 첫 번째 영상을 뺀 차영상의 상위 4개 부대역 계수 분포를 절대값을 취한 모습이다. 그림 3에서 알 수 있듯이

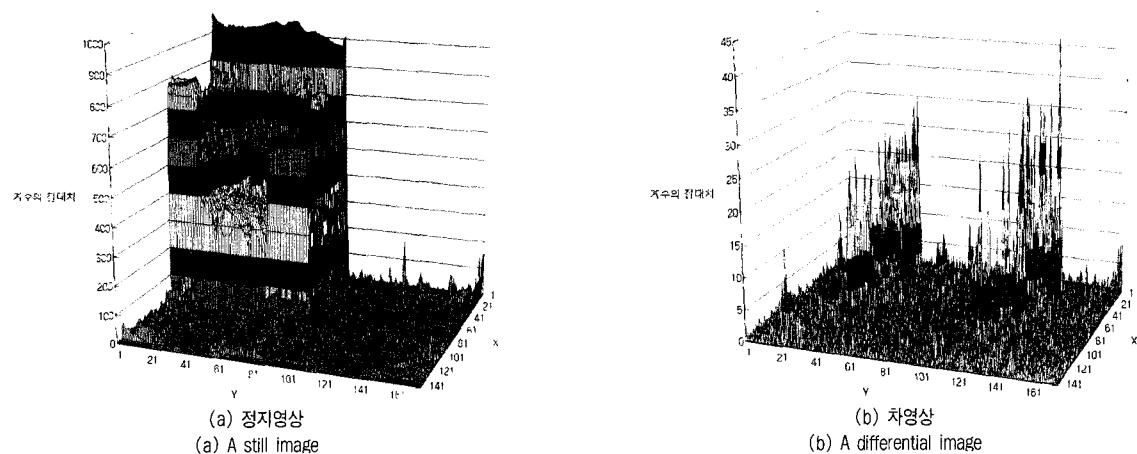


그림 3. 웨이블릿 계수의 분포도
Fig 3. Distribution of wavelet coefficients

차영상은 일반 영상과는 달리 기저대역에 에너지 집중이 낮고, 전 대역에 에너지가 불규칙하게 분포되어 있다. 이는 일반 정지영상 보다 부모 대역과 자식 대역간에 상관도가 낮아 제로트리 구조의 발생빈도가 낮아진다. 이러한 현상들은 제로트리 기반 양자화기의 효율을 떨어트리고, 낭비되는 비트가 많아지는 것을 예상할 수 있고, 큰 압축 효율을 기대하기가 어렵다.

III. 새로운 쿼드트리 부호화 기법

1. 기존 쿼드트리 부호화 기법

그림 3의 (b)와 같이 전 대역에 에너지가 불규칙적으로 분포되어 있는 차영상을 효율적으로 양자화하기 위해서는 제로트리 기반의 양자화기 보다 쿼드트리 부호화가 적합하다^[6]. 그림 4의 (a)는 일반 정지 영상을 웨이블릿 변환할 경우 제로트리 기반의 대역간 상관도를 나타낸 것이고, 그림 4의 (b)는 각 대역을 하나의 독립된 공간으로 보고 그 독립된 공간 내에서 쿼드트리 부호화를 수행하는 것을 나타내고 있다. 쿼드트리 부호화란 웨이블릿 변환된 영상 각각의 대역을 독립적인 공간으로 설정하고, 이 영역을 계속 분해하면서 중요 계수를 찾는 부호화 기법이다. 중요 계수

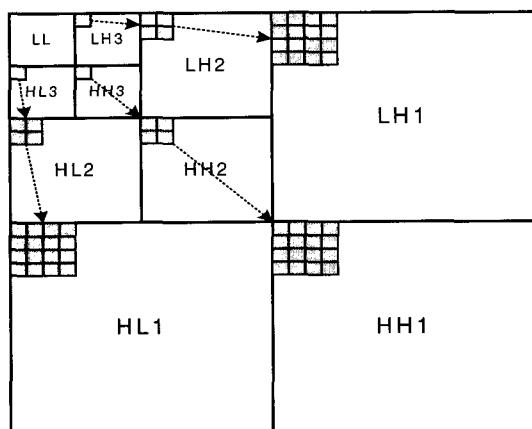
가 존재하는 영역은 $2^n \times 2^n$ 크기를 갖는 4개의 부대역으로 나누면서 부대역내에 1개의 중요 화소가 남을 때까지 부호화를 계속한다^[6].

하지만 쿼드트리 부호화의 특성상 각 대역들을 분할 할 때 $2^n \times 2^n$ 가 아닌 장방형 모양의 부대역에서는 더 이상 분할을 할 수 없게 된다. 실제로 표준화에서 사용되는 영상의 크기는 장방형의 모양을 띠고 있는 것이 대부분이기 때문에 장방형의 영상에 적용이 가능하게 하려면 블록 단위로 나누어 쿼드트리 부호화를 수행해야 한다.

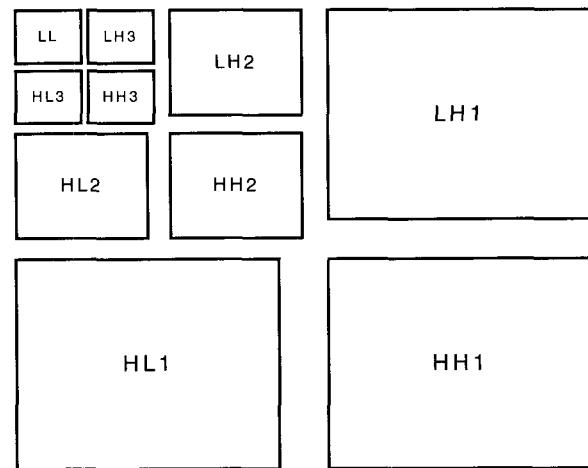
2. 새로운 차영상 부호화기

실제 표준화에서 사용되고 있는 영상의 크기는 H.261의 경우 CIF(common intermediate format)의 352×288 , 또는 QCIF(quarter common intermediate format)의 176×144 이고, MPEG-1의 입력 영상 해상도는 360×240 , MPEG-2의 경우는 SIF(source input format)를 사용하는데 NTSC에서는 352×240 , PAL과 SECAM에서는 352×288 이고, ITU-R601 표준인 720×480 크기를 갖는 영상에서 최적화되어 있다.

이러한 다양한 크기를 갖는 영상을 지원하는 시스템과 호환이 가능하게 하기 위한 방법으로 장방형의 부대역에서 분할을 더 이상 할 수 없는 상황이 되면 이 부대역에 가상으로



(a) 제로트리 부호화
(a) Zerotree coding



(b) 쿼드트리 부호화
(b) Quadtree coding

그림 4. 각 기법의 부대역 상관관계
Fig 4. Subband correlation of each method

$2^n \times 2^n$ 크기로 만들고 다시 쿼드트리 부호화를 수행한다.

그림 5는 CIF 영상의 예를 든 것이다. CIF영상의 크기는 352×288 이며 이 영상을 웨이블릿 변환하면 최하위 계층의 고주파 대역 크기는 176×144 가 된다. 이 대역에 중요 계수 하나가 존재한다고 가정하면 한 화소를 찾을 때까지 쿼드트리 부호화가 수행될 것이고, 4번의 쿼드트리 부호화가 이루어졌을 때 중요 계수가 포함되어 있는 부대역의 크기는 11×9 크기가 되어 더 이상 분할을 할 수 없게 된다. 이때 11×9 의 영역을 포함하면서 $2^n \times 2^n$ 의 정방형이 되기 위한 가장 작은 n 값을 찾는다. 가상 영역으로 설정된 부분은 0의 값을 갖는 화소로 채웠지만 사실은 실제 영상이 존재하는 부분이 아니라 11×9 크기의 영상을 4개의 부대역으로 분할하기 위한 가상 공간으로 생각하면 된다. 가상으로 채워진 부분은 실제 부호화시 중요 계수의 유무를 확인하는 스캔 작업이 수행되지 않기 때문에 비트가 할당되지 않아 비트의 손실을 막을 수 있다. 그림 5에서 어두운 부분이 가상으로 채워진 부분이고, 점선과 같이 4개의 부대역으로 분할한다.

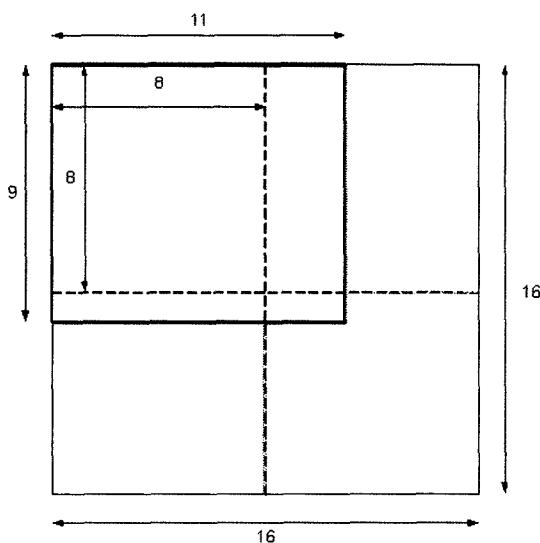


그림 5. CIF영상의 예
Fig 5. Example of CIF image

이때 분할되어야 할 부대역의 정보를 리스트에 저장시킨다. 이를 C 언어의 함수로 표현하면 다음 식과 같다.

Insert_List (cx, cy, coefficient, index, limit_x, limit_y) (4)

Insert_List 함수는 부대역 내에 중요 계수가 있을 때 다음 단계의 쿼드트리 부호화를 위해 부대역의 리스트를 저장하는 함수이고, cx , cy 는 각각 부대역의 좌측 상단의 좌표값을 갖고, *coefficient*는 중요 계수가 있는지 판단하기 위해 스캔한 계수값을 갖는다. *Index*는 해당 부대역의 크기를 나타내는 것이고, *limit_x*, *limit_y*는 각 부대역의 가상 영역이 시작되는 좌표값을 나타낸다.

*limit_x*와 *limit_y*는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$limit_x = cx + x_odd, \quad limit_y = cy + y_odd \quad (5)$$

x_odd 와 y_odd 는 부대역을 더 이상 4 개로 분할할 수 없을 때의 부대역의 크기를 말한다. x_odd 와 y_odd 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$x_odd = \frac{s_x}{2} (m_L - index_padding) \quad (6)$$

$$y_odd = \frac{s_y}{2} (m_L - index_padding)$$

s_x 와 s_y 는 영상 전체의 크기를 나타내고, m_L 은 부대역의 크기별 리스트 종류의 개수를 뜻한다. 즉, 1부터 m_L 까지 m_L 개의 부대역의 크기별 리스트가 있는 것이다. *index_padding*은 1부터 m_L 까지의 부대역의 크기별 리스트 중에서 가상 영역이 만들어 져야할 리스트를 말한다.

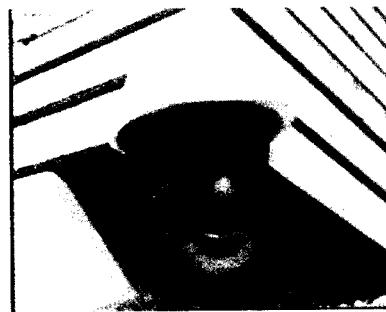
IV. 모의 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 새로운 쿼드트리 부호화 기법의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 CIF 규격인 352×288 크기의 Foreman, Hall monitor, Silent 영상을 100프레임씩을 테스트 영상으로 사용하였다. 웨이블릿 변환은 영상 압축에 효율적인 Antonini 9-7 필터를 리프팅 구조로 구현하여 2 레벨까지 분할하였다. 제안된 기법은 기존 블록 기반의 쿼드트리 부호화와 세로트리 부호화 기반 중에서 그 성능이 매우 우수하다고 알려진 SPIHT 기법과 성능을 비교하였다.^{[5][6]}

또한 쿼드트리 부호화는 비트 평면 기반의 양자화기이기 때문에 제안된 기법에서는 웨이블릿 계수의 스케일링을 통

하여 중요 계수를 더욱 부각시키는 과정이 추가되었다. 100 프레임에서 GOP(group of picture)는 5로 설정하여 순방향 예측을 하였다. 객관적인 성능 평가를 위해 식 (7)과 같이 정의된 PSNR (peak signal-to-noise ratio)을 이용하였고, 부호 및 복호시 계산량은 CPU 처리 시간으로 계산하였다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \text{ db} \quad (7)$$



(a) Foreman의 첫번째 프레임
(a) 1'st frame of foreman



(c) Hall monitor의 첫번째 프레임
(c) 1'st frame of Hall monitor



(e) Silent의 첫번째 프레임
(e) 1'st frame of Silent

식 (7)에서의 MSE는 원영상과 복원된 영상 사이의 평균제곱오차를 의미한다. 그림 6의 (a)와 (b)는 Foreman 영상의 첫번째 프레임과 100번째 프레임이고, (c)와 (d)는 Hall monitor 영상의 첫번째 프레임과 100번째 프레임을 보인 것이고, (e)와 (f)는 Silent영상의 첫번째 프레임과 100번째 프레임이다.

표 1은 제안한 새로운 공간 부호화 기법과 SPIHT 기법



(b) Foreman의 100번째 프레임
(b) 100'th frame of foreman



(d) Hall monitor의 100번째 프레임
(d) 100'th frame of Hall monitor



(e) Silent의 100번째 프레임
(e) 100'th frame of Silent

그림 6. 테스트 영상

Fig 6. Test images

표 1. 새로이 제안한 기법과 성능 비교

Table 1. Performance comparison of a new algorithm

		SPIHT	Quadtree	Proposed method
Foreman	Encoding time(sec)	0.104	0.067	0.078
	Decoding time(sec)	0.07	0.026	0.032
	PSNR(db)	26.014	26.866	28.157
Hall monitor	Encoding time(sec)	0.103	0.066	0.085
	Decoding time(sec)	0.068	0.026	0.027
	PSNR(db)	33.519	33.115	35.299
Silent	Encoding time(sec)	0.103	0.066	0.08
	Decoding time(sec)	0.07	0.025	0.027
	PSNR(db)	32.528	33.466	35.115

을 이용하여 그림 6에 보인 테스트 영상들의 100 프레임 모두에 대하여 0.25bpp의 속도로 부호화 및 복호화를 수행한 후 그 결과를 보인 것이다. CPU 처리 시간과 PSNR는 프레임당 평균값을 의미한다.

표 1에서 보면 제안한 새로운 기법이 SPIHT 보다 프레임당 부호화 시간은 21%~33% 정도 줄일 수 있고, 복호화 시간은 100% 이상 단축할 수 있었다. 화질을 가늠할 수 있는 PSNR 값도 새로이 제안한 기법이 SPIHT 보다 프레임

당 평균 1.78db~2.587db의 향상되었고, 기존 블록 기반의 큐드트리 부호화보다 프레임당 평균 1.291db~2.184db의 향상되는 것을 알 수 있다.

그림 7의 (a)는 Foreman 영상, (b)는 Hall monitor 영상, (c)는 Silent 영상의 100프레임에 대하여 새로이 제안한 기법과 기존 블록 기반의 큐드트리 부호화와 SPIHT를

0.25bpp의 속도로 부호화하였을 때 프레임에 대하여 PSNR이 변화하는 모습을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 전반적으로 새로이 제안된 기법이 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 차영상을 효율적으로 양자화하기 위한 웨이블릿 기반의 큐드트리 부호화 기법을 제안하였다. 실제 표준화에서 사용되고 있는 영상의 크기에 적용 가능하면서 기존의 양자화 기법들을 개선하였고, 그 결과 계산량은 줄이면서 높은 화질을 유지할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 기법에 움직임 예측 및 보상 기법이

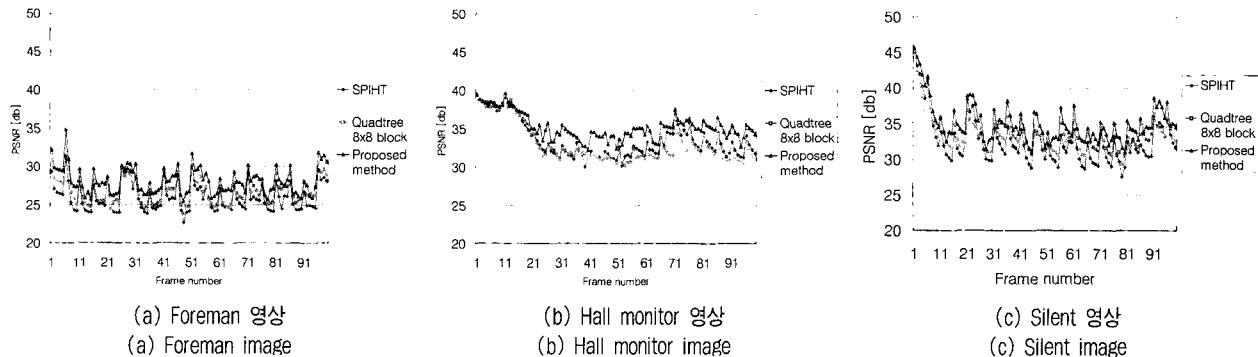


그림 7. 테스트 영상들의 PSNR 성능 비교
Fig. 7. PSNR comparison of test images

추가된다면 화질 향상을 더 높일 수 있을 것으로 예상되며, 이 경우 이동통신 환경에서 멀티미디어 서비스 및 실시간 동영상 서비스 등 여러 분야에 효율적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform," IEEE Trans. Image Processing, vol.1, no.2, pp.205-220, Apr. 1992.
- [2] Amir Averbuch, Danny Lazar, and Moshe Israeli, "Image Compression Using Wavelet Transform and Multiresolution Decomposition," IEEE Trans. Image Processing, vol.5, pp.4-15, Jan. 1996.
- [3] Rodrigues, da Silva, Diniz, "Minimizing ringing effect on images

coded at low bit rates with wavelets,"Image Processing, 1998. ICIP 98. Proceedings, 1998 International Conference, vol.3, pp.668-672 Oct. 1998.

- [4] J. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," IEEE Trans. on Signal Processing, vol.41, no.12, pp.3445-3463, December 1993.
- [5] A. Said and W. A. Pearlman, "A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol.6, pp.243-250, Jun. 1996.
- [6] Tsorng-Wuu Lin, "Image compression using fixed length quadtree coding," IEEE Signal Processing, 3rd International Conference on, vol.2, pp.970-973, Oct. 1996
- [7] W. Sweldens and P. Schröder, "Building your own wavelets at home", Wavelets in Computer Graphics, pp.15-87, ACM SIGGRAPH Course notes, 1996
- [8] S. A. Martucci, I. Sodagar, T. Chiang, and Y.-Q. Zhang, "A zerotree wavelet video coder," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol.7, pp.109-118, Feb. 1997.

저 자 소 개

주 수 경



- 2002년 2월 : 흥의대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 웨이블릿 기반 영상처리, 영상압축

유 지 상



- 1985년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1987년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1993년 5월 : Purdue 대학교 전기공학과 졸업(Ph.D.)
- 1993년 9월 ~ 1994년 8월 : 현대전자산업(주) 산전연구소 선임연구원
- 1994년 9월 ~ 1997년 8월 : 한림대학교 전자공학과 조교수
- 1997년 9월 ~ 2001년 8월 : 광운대학교 전자공학과 조교수
- 2001년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 부교수
- 주관심분야 : 웨이블릿 기반 영상처리, 영상압축, 영상인식, 비선형 신호처리