

양자화 잡음 모델에 근거한 블록기반 동영상 부호화에서의 후처리

정희원 문기웅*, 장익훈**, 김남철***

Postprocessing in Block-Based Video Coding Based on a Quantization Noise Model

Ki-Woong Moon*, Ick-Hoon Jang**, Nam-Chul Kim*** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 블록기반 동영상 부호화에서 나타나는 양자화 잡음을 그 특성에 맞게 모델링을 하고, 이를 기반으로 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용하여 양자화 잡음을 제거하는 후처리 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 양자화 잡음을 특정 프로파일(profile)로 표현되는 블록화 잡음과 비에지 화소(non-edge pixel)에서 백색 가우시안 특성을 가지는 나머지 잡음의 합으로 모델링 한다. 이러한 양자화 잡음의 모델을 기반으로 정칙화 미분(regularized differentiation)을 표현하는 Mallat의 1차원 웨이블릿 변환을 이용하여 영상복원 관점에서 각각의 잡음을 제거한다. 먼저, 웨이블릿 영역의 블록경계에서 임펄스로 나타나는 블록화 잡음 성분들의 크기를 추정하여 줄임으로 해서 블록화 잡음을 제거한다. 이때 임펄스 크기의 추정은 매디안 필터와 양자화 파라미터(quantization parameter), 그리고 국부 활동도(local activity)를 이용하여 이루어진다. 그리고 나머지 잡음은 비에지 화소에서 연역치화(soft-thresholding)을 수행함으로써 제거한다. 이러한 후처리 방법의 구현은 실시간 응용을 위해 웨이블릿 필터를 이용하여 근사적으로 공간 영역에서 이루어진다. 실험 결과, 제안된 방법이 다양한 영상과 압축률에 대해 MPEG-4 VM(verification model) 후처리 필터(post-filter)보다 PSNR 성능뿐만 아니라 주관적 화질면에서도 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the quantization noise in block-based video coding is modeled compatibly with its characteristics, and a post-processing method based on the model is presented for reducing the quantization noise by using a wavelet transform (WT). In the proposed method, the quantization noise is modeled as the sum of a blocking noise expressed as a deterministic profile and the remainder noise having characteristics of white Gaussian noise at non-edge pixels. Based on this model, each noise is removed in a viewpoint of image restoration using a 1-D WT introduced by Mallat, which yields a regularized differentiation. The blocking noise first is reduced by estimating and weakening the strength of each blocking noise component that appears as an impulse at the block boundary in wavelet domain. The impulse strength estimation is performed using median filter, quantization parameter (QP), and local activity. The remainder noise, which is considered as a white noise at non-edge pixels, then is reduced by soft-thresholding. For real-time application, the proposed method is implemented approximately in spatial domain using wavelet filter. The experimental results show that the proposed method yields better performance in terms of subjective quality as well as PSNR performance over VM post-filter in MPEG-4 for all test sequences of various compression ratios.

* LG전자 차세대 단말 연구소(heromylife@lge.com),
*** 경북대학교 전자전기공학부(nckim@ee.knu.ac.kr)

** 경운대학교 컴퓨터전자정보공학부(itjang@kyungwoon.ac.kr),

논문번호 : K01010-0108, 접수일자 : 2001년 1월 8일

I. 서론

MPEG^[1], H.263^[2]과 같은 블록기반의 동영상 부호화에서는 양자화라는 유손실 압축과정으로 인하여 양자화 잡음이 부가된 재생영상을 얻게 된다. 이러한 양자화 잡음은 압축률이 높아질수록 두드러져서 블록기반 부호화 영상에서 화질을 저하시키는 요인이 되는데, 그 대표적인 것이 블록화 현상(blocking artifact)과 링잉 현상(ringing artifact)이다. 블록화 현상은 인접 블록간의 독립적인 양자화로 인하여 부호화 영상에서 블록 경계를 따라 밝기값의 불연속으로 나타나고, 링잉 현상은 고주파 계수들의 손실로 인해 에지 주위에서 오진동(spurious oscillation)형태로 나타난다. 이러한 양자화 잡음에 의한 현상들을 제거하기 위해 다양한 후처리 방법들이 연구되어 왔다^[3-16].

블록기반 동영상 부호화에서의 후처리 방법은 계산량을 줄이기 위해 대부분 공간 영역에서 간단한 1차원 또는 2차원 필터를 적용적으로 사용하여 블록화 현상과 링잉 현상을 제거하고 있다^[3-6]. 최근, MPEG-4에서는 VM (verification model) 후처리 필터^[3,4]를 사용하여 블록화 현상과 링잉 현상을 순차적으로 제거하고 있다. 이 방법은 먼저 블록화 현상을 제거하기 위하여 각 블록경계 영역을 평탄 정도에 따라 DC 오프셋 모드(DC offset mode)와 디폴트 모드(default mode)로 나눈다. 그런 다음 DC 오프셋 모드일 경우에는 블록경계 주변 화소에 대해 1차원 저역통과필터(low pass filter)를 사용하고, 디폴트 모드일 경우에는 블록경계 화소에 대하여 DCT(discrete cosine transform)를 이용한 비선형 필터링을 적용함으로써 블록화 현상을 제거한다. 그리고 링잉 현상을 제거하기 위하여 각 블록에서 화소값의 최소값과 최대값을 이용하여 결정된 역치에 의해 에지맵을 구성한 후, 비에지 화소에 대해 2차원 필터링을 수행하였다. Apostolopoulos^[5]와 Park^[6]은 DCT 계수나 움직임 벡터(motion vector)를 이용하여 각 블록에 대한 처리 유무와 필터링의 강약을 조절하여 블록화 현상과 링잉 현상을 적응적으로 제거하였다.

이러한 후처리 방법과는 달리 정지 영상 부호화의 경우 잡음 모델에 근거한 영상 복원 관점에서 접근하여 블록화 현상을 줄이는 후처리 기법들이 연구된 바 있다^[7-9]. Kim^[7]은 웨이블릿 변환을 이용하여 블록화 잡음을 다중 스케일 공간상에서 모델

링을 하였다. Jang^[8]의 모델은 Kim의 모델을 공간 영역에서 등가적으로 표현한 것으로서, 블록화 잡음을 각 블록경계에서의 불연속(discontinuity)을 가중치로 한 반대칭적 프로파일(anti-symmetrical profile)들의 합으로 나타내었다. 이러한 공간 영역에서의 블록화 잡음의 모델과 프로파일은 Yang^[9]이 블록화 잡음을 추정하기 위해 제시한 그것들과 유사하다. 본 논문의 목표는 Kim이 제시한 잡음 모델^[7]을 블록화 잡음뿐만 아니라 링잉 잡음 등을 포함한 나머지 잡음까지 확장하고, 그러한 잡음 모델을 블록기반 동영상 부호화를 위한 후처리에 효과적으로 적용하는데 있다.

본 논문에서는 블록기반 동영상 부호화에서 나타나는 양자화 잡음을 분석하고, 이를 기반으로 양자화 잡음을 모델링한 후 정칙화 미분(regularized differentiation)^[17]을 표현하는 웨이블릿 변환^[18]을 이용하여 양자화 잡음을 제거하는 후처리 방법을 제시한다. 양자화 잡음의 분석은 양자화 잡음을 블록화 잡음과 링잉 잡음을 포함한 나머지 잡음의 합으로 간주하고 이들 각각에 대하여 이루어진다. 블록경계를 따라 밝기값의 불연속으로 나타나는 블록화 잡음은 웨이블릿 영역에서 임펄스로 나타남을 관측할 수 있다. 이 임펄스는 블록경계의 불연속의 정도를 정량적으로 표현하고 있으며, 이를 웨이블릿 영역에서의 블록화 잡음 성분으로 모델링 한다. 이러한 웨이블릿 영역에서의 블록화 잡음 모델은 웨이블릿 역변환을 통하여 블록경계를 기준으로 반대칭적 프로파일을 가지는 형태로 공간 영역에서 다시 표현할 수 있다. 나머지 잡음은 비에지 화소(non-edge pixel)에서 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)으로 모델링 한다. 또한 이러한 잡음의 모델들은 각각 학습 영상들(training image)을 통해 그 타당성이 검증된다.

제안한 후처리 방법은 이렇게 검증된 잡음 모델에 근거하여 블록화 잡음과 나머지 잡음을 순차적으로 제거한다. 블록화 잡음은 부호화된 신호를 두 번째 스케일까지 웨이블릿 변환하여 웨이블릿 영역에서 다음과 같이 제거된다. 먼저, 블록화 잡음 성분의 크기를 나타내는 각 블록 경계에서의 불연속을 추정함으로써 웨이블릿 영역에서의 블록화 잡음을 추정한다. 이때 복잡한 질감 영역이나 낮은 압축률에 대해서도 보다 효과적으로 불연속을 추정하기 위해 메디안 필터만 사용하는 Kim^[7]의 방법과는 달리 양자화 파라미터와 웨이블릿 영역에서의 국부 에너지도 함께 이용한다. 그런 다음, 부호화 신호와

이렇게 추정된 블록화 잡음과의 차로써 블록화 잡음을 제거한다. 그리고 나머지 잡음의 제거는 웨이브렛 영역에서의 블록화 잡음이 제거된 신호로부터 비에지 화소에 대해서만 백색 가우시안 잡음을 효과적으로 제거하는 것으로 알려진 연역치화(soft-thresholding)^[19]를 수행함으로써 이루어진다. 한편, 이러한 웨이브렛 영역에서의 양자화 잡음 제거는 공간 영역에서 부호화 신호와 추정된 양자화 잡음의 차로써 등가적으로 구현할 수 있다. 이때 양자화 잡음은 웨이브렛 영역에서 추정된 양자화 잡음을 웨이브렛 역변환을 통해 추정된다. 제안된 후처리 방법은 고속처리를 위해 이러한 잡음 제거 구조로 웨이브렛 필터들의 임펄스 응답을 근사화하여 구현된다. 제안한 후처리 방법의 성능을 실험하기 위해 H.263 부호화된 다양한 시험 동영상에 대해 VM 후처리 필터와 함께 비교하였다.

II. 양자화 잡음에 대한 모델

2.1 1차원 웨이브렛 변환

본 절에서는 제안된 후처리 방법에서 사용되는 Mallat 등^[18]이 소개한 1차원 웨이브렛 변환에 의한 다중 스케일 분해 및 합성에 대해 간단히 소개한다. 원 신호 $f(n) = S^0 f(n)$ 에 대한 1차원 웨이브렛 변환은 표 1의 디지털 필터를 이용하여 수행할 수 있는데, 각 $j(\geq 1)$ 번째 스케일에서의 웨이브렛 변환은 다음과 같이 $j-1$ 번째 스케일 개략신호(coarse signal) $S^{j-1} f(n)$ 로부터 j 번째 스케일의 상세 신호(detail signal) $W^j f(n)$ 와 개략 신호 $S^j f(n)$ 로 분해하는 것이다.

$$W^j f(n) = S^{j-1} f(n) * g(n/2^{j-1}), \quad j \geq 1 \quad (1)$$

$$S^j f(n) = S^{j-1} f(n) * h(n/2^{j-1}), \quad j \geq 1 \quad (2)$$

여기서 W 와 S 는 각각 웨이브렛 연산자와 평활화(smoothing) 연산자를 나타낸다. 그리고 디지털 필터 $d \in \{g, h, k\}$ 에 대해 $d(n/2^j)$ 은 다음과 같다.

$$d(n/2^j) = \begin{cases} d(m), & \text{if } n=2^j m \text{ for } m \in Z \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(1), (2)의 각 j 번째 스케일에서의 웨이브렛 변환을 $j=J$ 번째 스케일까지 수행하여 분해된 상세 신호와 개략 신호 $\{W^1 f(n), \dots, W^{j-1} f(n),$

표 1. 웨이브렛 변환 및 역변환에 사용되는 디지털 필터들의 임펄스 응답

| n | $h(n)$ | $g(n)$ | $k(n)$ |
|-----|--------|--------|------------|
| -3 | | | 0.0078125 |
| -2 | | | 0.0546850 |
| -1 | 0.125 | | 0.1718750 |
| 0 | 0.375 | -2.0 | -0.1718750 |
| 1 | 0.375 | 2.0 | -0.0546850 |
| 2 | 0.125 | | -0.0078125 |

$W^J f(n), S^J f(n)$ 로부터 원 신호 $f(n)$ 은 다음과 같은 웨이브렛 역변환에 의하여 복원된다.

$$f(n) = W^1 f(n) * k(n) + S^1 f(n) * \tilde{h}(n) \quad (4)$$

$$S^{j-1} f(n) = W^j f(n) * k(n/2^{j-1}) + S^j f(n) * \tilde{h}(n/2^{j-1}), \quad 2 \leq j \leq J \quad (5)$$

여기서 \tilde{h} 는 h 의 켈레복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 그림 1은 $J=2$ 인 경우 웨이브렛 변환 및 역변환에 의해 신호를 분해하고 합성하는 과정을 나타낸다. 이러한 웨이브렛 변환은 변환된 신호에 대해 간축(decimation) 및 보간(interpolation)을 하지 않기 때문에 각 스케일의 변환 신호가 원래의 크기로 유지된다. 이는 신호 혹은 잡음의 스케일별 전파 특성을 관측하기가 용이하게 한다.

한편, 웨이브렛 변환에 사용되는 디지털 필터 $g(n)$ 은 큐빅 스플라인 필터(cubic spline filter)에 대한 1차 도함수로부터 얻은 것으로서 미분의 기능을 갖는다^[18]. 근사 이론에 근거한 수치 미분(numerical differentiation)은 단일 해를 가지지 않는 불량 설정 문제(ill-posed problem)를 가질 뿐만 아니라 백색 잡음이 부가된 악조건(ill-conditioned problem)에서는 잡음의 영향이 증폭된다. 이러한 문제를 신호의 평활성 제약(smoothness constraint)을

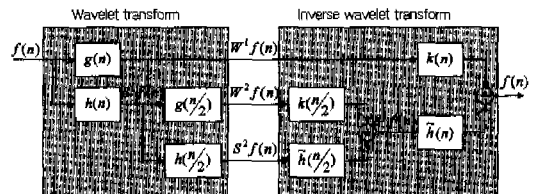


그림 1. 웨이브렛 변환 및 역변환을 나타내는 블록도

이용해 해결하는 과정을 정칙화(regularization)라 하는데, 이를 통해 안정된 수치 미분을 얻을 수 있다^[7]. 영상 신호의 경우 정칙화 미분(regularized differentiation)은 가우시안과 유사한 큐빅 스포라인 필터에 대한 일차 도함수를 영상 신호와 상승 적분(convolution)함으로써 구할 수 있다^[7]. 따라서 상세 신호 $W^j f(n)$ 이 $j-1$ 번째 스케일에서 평활화된 원 신호 $S^{j-1} f(n)$ 에 대한 정칙화 미분을 나타냄을 (1)식으로부터 알 수 있다. 이는 불연속으로 나타나는 블록화 잡음에 대하여 웨이브렛 영역에서의 안정된 모델링을 할 수 있게 한다.

2.2 양자화 잡음에 대한 모델

영상신호를 수평 또는 수직 방향의 1차원 신호들의 집합으로 간주하고 $M \times N$ 영상을 $B \times B$ 크기의 블록으로 부호화 했을 때 $1 \times N$ (또는 $M \times 1$)의 수평 또는 수직 부호화 신호를 $y(n)$ 이라고 하자. $y(n)$ 은 원 신호 $f(n)$ 과 양자화 잡음의 합으로 나타낼 수 있고 양자화 잡음은 다시 블록화 잡음 $b(n)$ 과 나머지 잡음 $r(n)$ 의 합으로 나타낼 수 있다^[7]. 그러므로 $y(n)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$y(n) = f(n) + b(n) + r(n) \tag{6}$$

Kim^[7]은 블록경계에서의 불연속 제거를 통한 블록화 잡음만을 제거하고자 한 반면, 본 논문에서는 블록화 잡음뿐만 아니라 나머지 잡음도 제거하고자 한다. 블록화 잡음과 나머지 잡음을 순차적으로 추정에 의해 제거함으로써 원 영상을 복원하는 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{f}(n) &= (y(n) - \hat{b}(n)) - \hat{r}(n) \\ &= \hat{p}(n) - \hat{r}(n) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\hat{p}(n)$ 은 부호화 신호 $y(n)$ 으로부터 추정

에 의한 블록화 잡음 $\hat{b}(n)$ 이 제거된 신호를 나타낸다.

블록화 잡음에 의해 나타나는 화질저하가 인간 시각 특성상 복잡한 영역보다 단순한 영역에서 더욱 두드러진다는 점^[21]에 근거하여 부호화 신호 $y(n)$ 의 각 블록경계 영역을 단순 영역과 복잡 영역으로 구분하기로 한다. 그림 2는 $B=8$ 인 경우 블록경계의 위치와 블록경계 영역에 대한 범위를 나타낸다. i 번째 경계 양쪽의 각 $B/2$ 화소들을 포함하는 영역을 Λ_i 라고 하고, 평탄 영역에 속하는 블록경계 영역들 Λ_i ($i=1, \dots, N/B-1$ 또는 $i=1, \dots, M/B-1$)의 집합을 I_S , 그리고 복잡 영역에 속하는 블록경계 영역들의 집합을 I_C 라고 표현하자. 그림 3은 첫번째 블록경계 영역이 평탄 영역 일 때 즉, $\Lambda_1 \in I_S$ 일 때의 부호화 신호와 이에 대한 웨이브렛 영역에서의 표현을 나타내는 한 예를 보여주고 있다. 그림 3에서 보면 블록경계에서 밝기 값의 불연속으로 나타나는 부호화 신호가 정칙화 미분에 의해 첫번째 스케일에서는 임펄스로 나타나고, 평활화 후 정칙화 미분이 이뤄지는 두번째 스케일에서는 첫번째 스케일의 임펄스가 평활화된 형태로 나타남을 알 수 있다. 이처럼 정칙화 미분의 결과가 급격하게 나타나는 부분은 신호의 활동도가 낮은 평탄 영역에서 자연스럽게 못하다. 따라서 그림 3의 웨이브렛 각 스케일에서의 부호화 신호를 평탄 영역에서의 블록화 잡음 성분으로 간주할 수 있는데, 본 논문에서는 이를 기반으로 블록화 잡음을 웨이브렛 영역에서 다음과 같이 모델링 한다.

$$W^1 b(n) = \sum_{\Lambda_i \in I_S \cup I_C} \beta_i \delta(n) \tag{8}$$

$$W^2 b(n) = \sum_{\Lambda_i \in I_S} \beta_i \gamma(n) \tag{9}$$

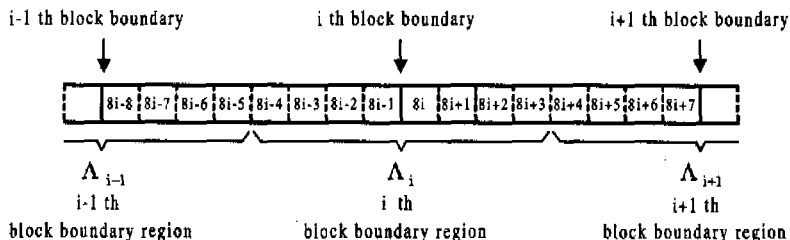


그림 2. B=8인 경우의 블록경계 위치와 블록경계 영역의 범위

$$S^2 b(n) = 0 \quad (10)$$

여기서 β_i 는 i 번째 블록경계 영역에서 블록화 잡음 성분의 크기로서 블록경계에서의 불연속의 정도를 정량적으로 나타낸다. 그리고 $\gamma(n) = 0.125\delta(n+1) + 0.5\delta(n) + 0.75\delta(n-1) + 0.5\delta(n-2) + 0.125\delta(n-3)$ 으로서 $\beta_i = 1$ 일때 블록화 잡음의 두번째 스케일 상세 신호 성분을 나타낸다. (8)식과 (9)식은, 블록화 잡음이 첫번째 스케일에서 영역의 종류에 관계없이 모든 블록경계에서 존재하고 두번째 스케일에서는 단순 영역에 속하는 블록경계에만 존재하는 것으로 간주함을 내포하고 있다. 이는 복잡 영역의 경우 두번째 스케일에서는 신호 성분과 블록화 잡음 성분의 구분이 어렵기 때문이다^[7]. (10)식은 두번째 스케일 개략 신호에서는 영역에 관계없이 블록화 잡음의 효과를 무시함을 의미한다.

블록화 잡음 $b(n)$ 의 공간 영역에서의 표현은 (8)-(10)식의 웨이브렛 영역에서의 표현을 (4)식 및 (5)식의 웨이브렛 역변환을 수행함으로써 다음과 같이 얻게 된다.

$$b(n) = \sum_{\Lambda_i \in I_S} \beta_i v_S(n-iB) + \sum_{\Lambda_i \in I_C} \beta_i v_C(n-iB) \quad (11)$$

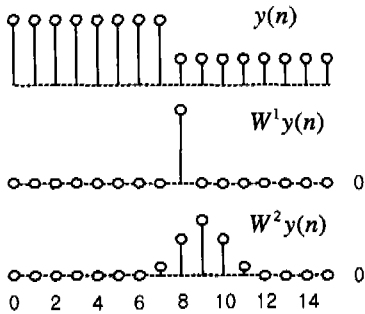


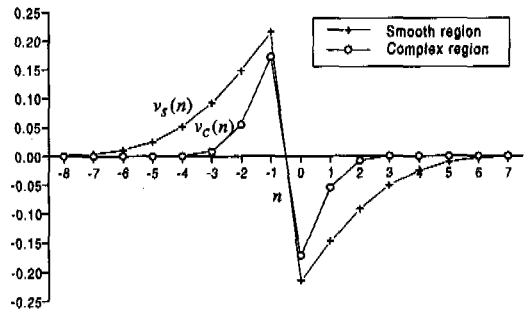
그림 3. B=8인 경우의 부호화 신호와 그것에 대한 웨이브렛 영역에서의 표현 예

여기서 $v_S(n) = \delta(n) * k(n) + \gamma(n) * k(n/2) * \tilde{h}(n)$, $v_C(n) = \delta(n) * k(n)$ 으로서 각각 i 번째 블록경계 영역 Λ_i 가 평탄 영역과 복잡 영역에 속하고 $\beta_i = 1$ 일때의 블록화 잡음 성분을 나타낸다. 그림 4(a)는 이들에 대한 프로파일들을 보여주는데, 블록화

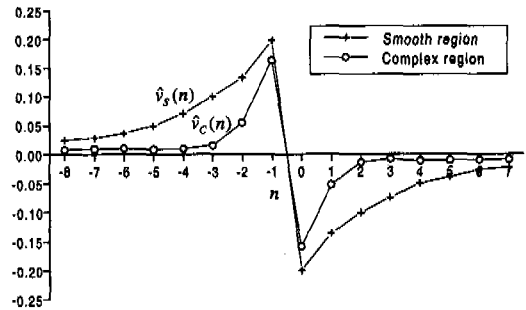
잡음 $b(n)$ 이 각 블록경계를 기준으로 활동도에 따라 서로 다른 반대칭적 프로파일들을 가짐을 알 수 있다. 따라서 (11)식으로부터 블록화 잡음이 각 블록 경계에서의 불연속을 가중치로 한 반대칭적 프로파일들의 합으로 주어짐을 알 수 있다.

한편, (11)식의 모델이 실제 블록화 잡음을 잘 표현하는지를 알아보자. i 번째 블록경계 영역이 평탄 영역일 때 즉, $\Lambda_i \in I_S$ 일 때, 블록화 잡음은 (11)식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_S(n) = \frac{b(n+iB)}{\beta_i} \Big|_{\Lambda_i \in I_S}, n \in [-B, B-1] \quad (12)$$



(a)



(b)

그림 4. B=8인 경우의 블록화 잡음의 영역별 프로파일: (a) 제안된 모델링으로부터 유도된 프로파일, (b) 학습 영상들로부터 추정된 실제 프로파일

그러면 평탄 영역에서의 블록화 잡음의 프로파일 $v_S(n)$ 은 (6)식과 (12)식을 이용하여 다음과 같이 평탄 영역에 속한 모든 블록 경계에 대한 앙상블 평균(ensemble average)으로 추정할 수 있다.

$$\hat{v}_S(n) = E \left[\frac{y(n+iB) - f(n+iB) - r(n+iB)}{\beta_i} \Big|_{\Lambda_i \in I_S}, n \in [-B, B-1] \right] \quad (13)$$

이때 나머지 잡음 $r(n)$ 이 β_i 와 독립적이고 $E[r(n)]=0$ 라고 가정하면 (13)식은 다음과 같다.

$$\hat{v}_S(n) = E \left[\frac{y(n+iB) - f(n+iB)}{\beta_i} \middle| A_i \in I_S \right], \quad n \in [-B, B-1] \quad (14)$$

마찬가지 방법으로 복잡 영역에서의 블록화 잡음의 프로파일 $v_C(n)$ 은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{v}_C(n) = E \left[\frac{y(n+iB) - f(n+iB)}{\beta_i} \middle| A_i \in I_C \right], \quad n \in [-B, B-1] \quad (15)$$

그림 4(b)는 표 3의 시험 동영상 800개의 프레임과 그것의 H.263 부호화된 프레임을 학습 영상으로 하여 그것들로부터 각각 원 신호 $f(n)$ 과 부호화 신호 $y(n)$ 을 얻은 후, (14)식과 (15)식에 근거하여 얻은 영역별 실제 블록화 잡음의 프로파일을 나타낸다. 이때 국부 활동도에 따른 영역 구분과 β_i 의 계산은 3.1절의 방법을 사용하였다. 그림 4(a)와 4(b)로부터 제안된 모델링에 의해 유도된 프로파일들이 실제 블록화 잡음과 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 다만 블록경계에서 멀어질수록 두 그림의 프로파일들이 조금의 차이를 보이는데, 이는 그림 4(b)의 실제 블록화 잡음의 프로파일을 구하는 데 있어서 인접 블록경계의 블록화 잡음을 고려하지 않은 중첩의 효과로 인한 것이다. 이로써 제안된 웨이브렛 변환을 이용한 블록화 잡음의 모델이 적절함을 확인할 수 있다.

나머지 잡음 $r(n)$ 은 (6)식의 관계로부터 블록화 잡음이 제거된 영상과 원 영상과의 차로써 얻을 수 있다. 그림 5는 Suzie 동영상을 학습 영상으로 하여 H.263 부호화기와 3.1절의 블록화 잡음 제거 방법을 이용함으로써 얻은 나머지 잡음 $r(n)$ 에 대한 전력 스펙트럼 밀도(PSD)와 확률 밀도 함수(PDF)를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 비에지 화소에서 나머지 잡음의 전력 스펙트럼 밀도를 나머지 잡음의 전력과 직접적 관계를 가지는 QP에 따라 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 나머지 잡음이 QP가 낮을수록 비에지 화소에 대해서 백색 잡음과 유사해짐을 알 수 있다. 그림 5(b)는 QP=5로 H.263 부호화 했을 때의 비에지 화소의 나머지 잡음과 그것과 같은 전력을 가지는 가우시안 잡음의 확률 밀도 함수를 비교한 것이다. 이로부터 나머지 잡음이 가우시안 잡음과 유사한 확률밀도 함수를 가짐을 알

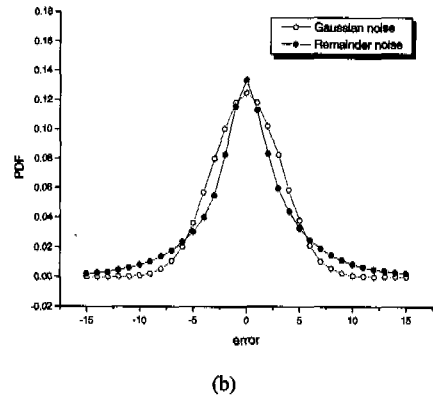
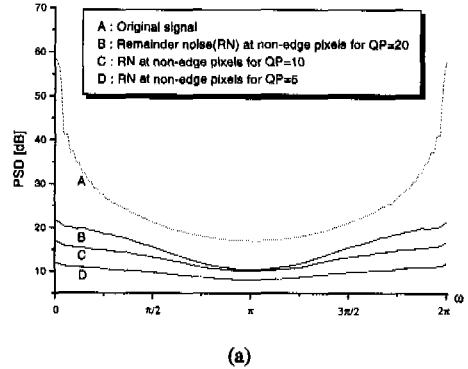


그림 5. H.263 부호화된 Suzie 동영상에서 나머지 잡음의 전력 스펙트럼 밀도와 확률 밀도 함수: (a) QP에 따른 비에지 화소에서 나머지 잡음의 전력스펙트럼 밀도 (b) QP=10에서의 나머지 잡음과 그것과 같은 전력을 갖는 가우시안 잡음의 확률 밀도 함수

수 있다. 비에지 화소에서의 나머지 잡음이 낮은 압축률에서만 백색 가우시안 잡음의 특성을 갖지만, 편의상 높은 압축률에서도 백색 가우시안 잡음으로 간주하여 제거하기로 한다.

III. 제안한 후처리 방법

3.1 블록화 잡음의 제거

블록경계 영역에 대한 평탄 및 복잡 영역의 분류를 위한 신호의 활동도의 척도로서 $W^1y(n)$ 의 블록경계 영역에서 국부 절댓합(local absolute sum)을 사용한다. i 번째 블록경계 영역 A_i 에서의 활동도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_i = \sum_{l \in A_i} |W^1y(l)| \quad (16)$$

여기서 R_i 는 블록경계 영역 A_i 에서의 $W^1y(n)$

의 국부 절대값으로서 블록화 잡음의 영향을 배제하기 위하여 블록경계 위치인 iB 화소는 계산에서 제외하였다. R_i 의 값이 다음과 같이 특정 역치 (threshold)보다 작으면 i 번째 블록경계 영역을 평탄 영역으로, 그렇지 않으면 복잡 영역으로 구분한다.

$$A_i \in \begin{cases} I_S, & \text{if } R_i < T_1 \\ I_C, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

여기서 T_1 은 블록경계 영역을 신호의 활동도에 따라 구분하기 위한 역치로서 2.2절에서 블록화 잡음의 실제 프로파일을 추정하기 위해서 사용한 학습 영상들로부터 구한 R_i 의 평균값을 사용한다.

블록화 잡음 성분의 크기 β_i 는 Kim^[7]의 방법과 유사하게 1×3 (또는 3×1) 메디안 필터를 첫 번째 스케일 상세 신호에 사용함으로써 추정할 수 있다.

$$\hat{\beta}_i = A_i \cdot [W^1 y(iB) - \text{median } W^1 y(iB + l)]_{l \in [-1, 1]} \quad (18)$$

여기서 A_i 는 0에서 1의 값을 가지는 i 번째 블록경계에서의 메디안 필터의 신뢰도 인자 (confidence factor)이다. (18)식의 β_i 를 추정하는 데 있어서 이러한 필터의 신뢰도 인자가 추가로 사용된 이유는, 메디안 필터만에 의한 잡음 추정이 상대적으로 복잡한 영역이나 압축률이 낮은 경우 과도한 추정으로 인해 신호의 에지를 손상시킬 수 있기 때문에 이를 고려하기 위한 것이다. 메디안 필터의 신뢰도 인자 A_i 는 블록경계 영역의 활동도와 압축률을 나타내는 양자화 파라미터를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$A_i = \min\left(\frac{c_1 \times QP_i}{R_i}, 1\right) \quad (19)$$

여기서 QP_i 는 iB 번째 화소가 속하는 매크로 블록의 양자화 파라미터이고, c_1 는 비례 상수로서 양자화기에 의존하는 값이다.

웨이브렛 영역에서의 블록화 잡음 $\{W^1 b(n), W^2 b(n), S^2 b(n)\}$ 은 (18)식에서 구한 $\hat{\beta}_i$ 를 (8)-(10)식에 대입함으로써 추정된다. 이로부터 (7)식에 근거하여 웨이블렛 영역에서의 블록화 잡음이 제거된 신호를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$W^l \hat{p}(n) = W^l y(n) - W^l \hat{\delta}(n), \quad l=1, 2 \quad (20)$$

$$S^2 \hat{p}(n) = S^2 y(n) \quad (21)$$

3.2 나머지 잡음의 제거

백색 가우시안 잡음을 제거하는 데 있어 웨이블렛 상세신호에 대한 연역치화가 효과적이라는 것은 이미 잘 알려져 있다^[9]. 제안된 방법은 비에지 화소에서 백색 가우시안 잡음으로 간주한 링잉 잡음을 포함한 나머지 잡음을 웨이블렛 영역에서 연역치화를 수행함으로써 제거한다. 에지 화소에서는 에지 보존을 위해 나머지 잡음을 무시한다. 먼저 비에지 화소를 찾기 위해 신호의 에지가 웨이블렛 각 스케일 상세 신호에서 국부 최대값들로 나타난다는 사실^[18]을 이용하여 첫번째와 두번째 스케일 상세 신호간의 곱을 사용한다. 이 값은 스케일간 상관도를 의미하며, 특정 역치보다 작으면 비에지 화소로 판단하여 연역치화를 수행함으로써 웨이블렛 영역에서 나머지 잡음까지도 제거한다.

$$W^j \hat{f}(n) = \begin{cases} T_S(W^j \hat{p}(n), \lambda), & \text{if } W^1 \hat{p}(n) \times W^2 \hat{p}(n) < T_2 \\ W^j \hat{p}(n), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad j=1, 2 \quad (22)$$

$$S^2 \hat{f}(n) = S^2 \hat{p}(n) \quad (23)$$

여기서 $W^j \hat{f}(n)$ 과 $S^2 \hat{f}(n)$ 은 원 신호 $f(n)$ 에 대한 웨이블렛 영역에서의 추정 신호들을 나타내고, $T_2 = c_2 \times QP$ 로서 에지 추출을 위한 역치로서 나머지 잡음의 표준 편차와 직접적 관련을 갖는 QP를 비례상수 c_2 와 함께 사용하였다. 그리고 $T_S(x, \lambda)$ 는 연역치화 연산자로서 다음과 같다.

$$T_S(x, \lambda) = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - \lambda), & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

여기서 $\lambda = c_3 \times QP$ 로서 연역치화 연산자의 역치로서 T_2 와 마찬가지로 QP를 비례상수 c_3 와 함께 사용하였다. 원 신호 $f(n)$ 은 (22)식 및 (23)식을 (4)식 및 (5)식의 웨이블렛 역변환을 수행함으로써 추정할 수 있다. 결국, 양자화 잡음이 제거된 2차원 영상은 3.1절과 3.2절의 과정을 각 수평, 수직방향 신호에 대해 수행함으로써 얻을 수 있다.

3.3 제안한 후처리 방법의 고속화 구현

본 절은 실시간 후처리에 적합하게 3.1과 3.2절에서 소개된 웨이브렛 변환을 이용한 후처리 방법을 실제 구현하는 것에 관한 것이다. 웨이브렛 영역에서의 양자화 잡음을 제거하는 제안한 후처리 방법은 (7)식에 근거하여 블록화 잡음 $b(n)$ 과 나머지 잡음 $r(n)$ 을 순차적으로 추정에 의해 제거하는 공간 영역에서의 처리 구조로 구현된다. 각 잡음에 대한 추정은 앞절에서 $S^2 \hat{b}(n) = 0, S^2 \hat{r}(n) = 0$ 라고 하였기 때문에 각 잡음에 대한 상세 신호들만의 추정과 이에 대한 웨이브렛 역변환에 의해 이루어진다. 먼저, 블록화 잡음은 첫 번째 스케일 상세 신호 $W^1 y(n)$ 으로부터 (18)식을 이용하여 각 블록경계에서의 불연속 β_i 를 추정 한 후 이를 (11)식에 대입함으로써 추정된다. 그리고 나머지 잡음은 상세 신호에서 블록화 잡음이 제거된 신호와 (22)식의 연역치화를 통해 추정 한 원 신호간의 차로써 추정한다.

$$W^j \hat{r}(n) = W^j \hat{p}(n) - W^j \hat{f}(n), \quad j=1,2 \quad (25)$$

그런 다음, 상세 신호 영역에서 추정 한 나머지 잡음 $W^j \hat{r}(n)$ 을 웨이브렛 역변환 필터를 통과함으로써 공간 영역에서의 나머지 잡음은 다음과 같이 추정 된다.

$$\hat{r}(n) = W^1 \hat{r}(n) * k(n) + W^2 \hat{r}(n) * k(n/2) * \tilde{h}(n) \quad (26)$$

표 2. 양자화 잡음의 추정을 위해 사용되는 필터들에 대한 근사화된 임펄스 응답

| n | $h(n)*g(n/2)$ | Approximated impulse responses | | |
|----|---------------|--------------------------------|---------------|----------|
| | | $k(n/2)*\tilde{h}(n)$ | $k(n)=v_c(n)$ | $v_s(n)$ |
| -3 | | 3/64 | | 3/32 |
| -2 | | 5/64 | | 5/32 |
| -1 | -1/4 | 3/64 | 3/16 | 7/32 |
| 0 | -3/4 | -3/64 | -3/16 | -7/32 |
| 1 | -2/4 | -5/64 | | -5/32 |
| 2 | 2/4 | -3/64 | | -3/32 |
| 3 | 3/4 | | | |
| 4 | 1/4 | | | |

결국, 원 신호는 (7)식을 근거로 하여 부호화 신호로부터 블록화 잡음을 추정하여 제거한 신호와 (26)식에서 추정된 나머지 잡음과의 차로 추정된다. 또한, 제안된 후처리 방법의 고속화 구현을 위하여 웨이브렛 필터들의 임펄스 응답과 블록화 잡음의 프로파일을 표 2와 같이 근사화 하였다. 이때, $h(n)*g(n/2)$ 필터의 임펄스 응답과 같이 shift 연산과 덧셈 연산에 의한 필터링 구현이 되도록 다른 필터들의 임펄스 응답도 정수형 분수로 하였다. 그림 6은 제안한 후처리 방법의 구현을 설명하는 블록도를 나타낸다.

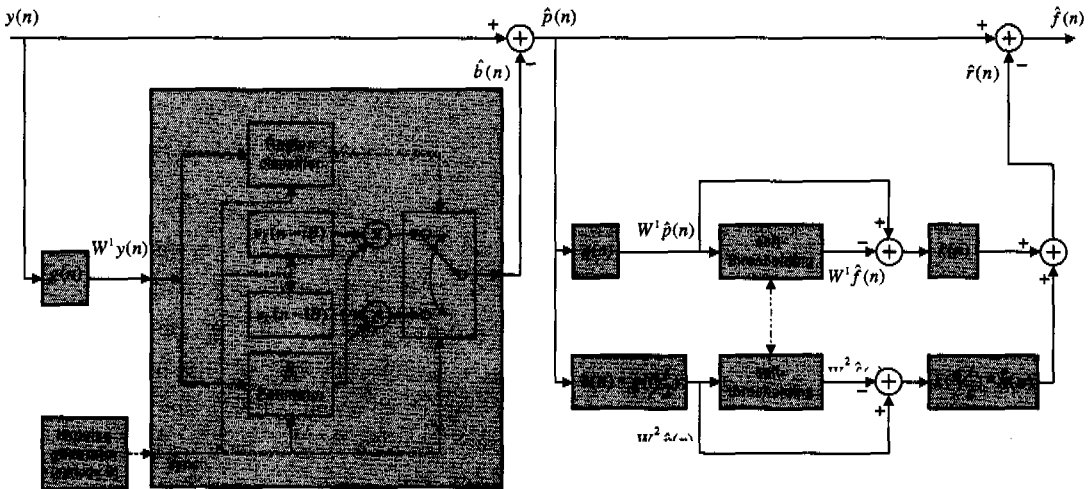


그림 6. 제안한 후처리 방법의 구현을 나타내는 블록도

표 3. 컴퓨터 모의 실험을 위한 시험 동영상들

| Format | Video sequence | # of frame |
|---------------|--|------------|
| 4:2:0 QCIF | Foreman, Hall monitor, Suzie, Miss America, Grandmother, Coastguard, Glasgow, News | 100 |

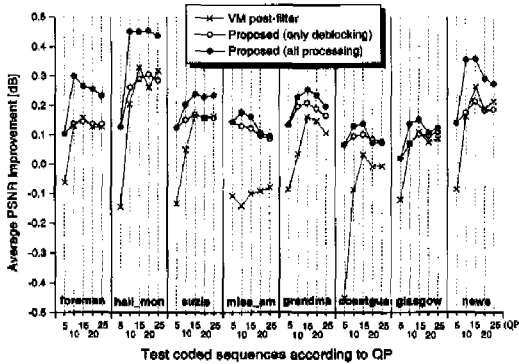


그림 7. 다양한 QP로 H.263 부호화된 동영상의 후처리 결과에 대한 평균적인 PSNR 성능 향상

IV. 실험 결과 및 고찰

본 장에서는 제안한 후처리 방법의 성능을 평가하기 위한 컴퓨터 모의 실험 결과를 보인다. 시험 영상으로는 표 3과 같은 각각 100 프레임으로 구성된 8 가지 동영상을 사용하였고 이들 영상에 대해서 H.263 TM5^[20]를 적용하여 부호화 영상을 얻었다. 이때, 프레임율(frame rate)은 30Hz로 하였고,율제어(rate control) 없이 고정된 QP를 사용하여 IPPP...P(첫 장은 I프레임, 나머지는 P프레임)의 형태로 부호화하였다. 그리고 제안한 후처리 방법의 모의 실험에 필요한 비례 상수들인 c_1 과 c_3 는 각각 5~25까지의 다양한 QP를 사용하여 부호화된 시험 동영상들에 대하여 블록화 잡음만을 제거할 때와 나머지 잡음만을 제거할 때의 평균적인 PSNR을 최대화시키는 값으로 선택하고, 비례 상수 c_2 는 블록화 잡음이 제거된 시험 동영상들에서 평균 15%의 에지를 검출하게 하는 값으로 선택하였다. 본 논문에서는 이들 값을 각각 $c_1=5$, $c_3=3/4$ 그리고 $c_2=40$ 로 하고, 블록경계 영역의 종류를 구분하기 위한 역치 T_1 은 10으로 하여 모의 실험에 사용하였다.

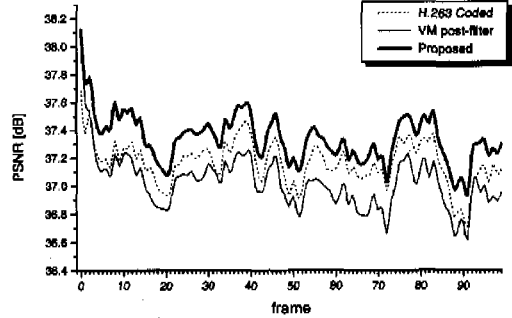
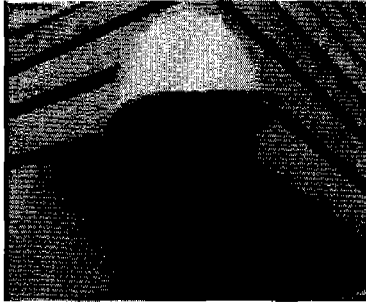


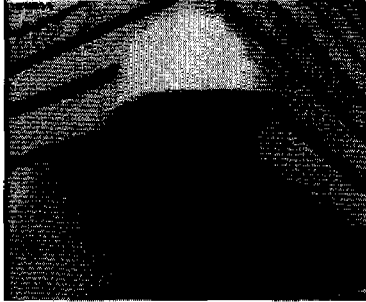
그림 8. QP=10으로 H.263 부호화된 Miss America 동영상 후처리 결과에 대한 프레임별 PSNR 성능

제안한 후처리 방법을 PSNR과 주관적 화질면에서 VM 후처리 필터와 비교함으로써 성능을 평가하였다. 그림 7은 8가지 동영상 각각 100 프레임에 대해 5~25까지 QP를 사용하여 부호화한 영상에 대해 제안한 방법에 의해 후처리 했을때의 평균적인 PSNR 성능 향상을 보여주고 있다. 이때 제안한 방법은 블록화 잡음만을 제거했을 경우와 나머지 잡음까지 제거했을 경우의 두 경우로 나누어 각각의 PSNR 성능을 보여준다. 그림 7에서 보던 제안한 방법이 모든 영상과 압축률에 대해 VM 후처리 필터보다 최대 0.5 dB의 성능 향상을 PSNR 보이는데, 특히 QP=5와 같은 낮은 압축률에서 VM 후처리 필터가 과도한 필터링으로 인해 오히려 PSNR 면에서 손해를 보는 반면 제안된 방법은 어떤 경우에도 PSNR 향상을 보이고 있다. 이는 압축률과 신호의 활동도를 고려한 적응적인 잡음 제거가 이뤄졌기 때문이다. 그리고 제안한 방법으로 블록화 잡음만을 제거했을 때보다 나머지 잡음까지 모두 제거했을 때 최대 0.2 dB까지 PSNR 성능 향상을 보이는데, 이는 연역치화에 의한 나머지 잡음 제거가 효과가 있음을 나타낸다. 그림 8은 QP=10으로 부호화된 Miss America 동영상에 대해 0에서 99번째 프레임 각각에 대한 후처리 결과를 PSNR로서 보여주고 있다. 여기서는 VM 후처리 필터에 의한 후처리가 오히려 PSNR을 떨어뜨리는 결과를 보인 반면 제안된 방법은 평균적으로 0.2 dB 정도 향상을 보임을 알 수 있다.

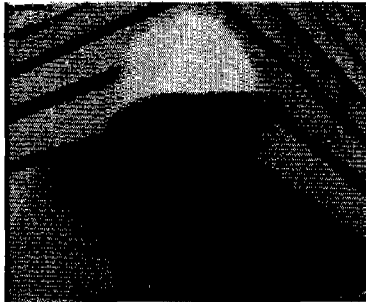
그림 9와 10은 각각 QP=15으로 부호화된 Forman 동영상의 0번째 프레임과 QP=10로 부호화된 Hall monitor 동영상의 50번째 프레임에 대한 후처리 결과들을 보여주고 있다. VM 후처리 필터에 의한 후처리 결과들을 보면, 그림 9(b)는 볼 부위



(a)

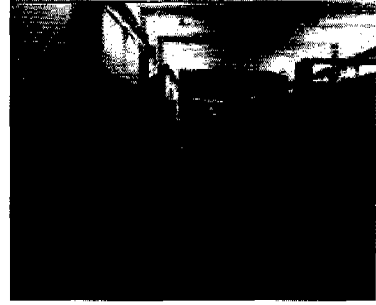


(b)



(c)

그림 9. Foreman 동영상의 0번째 프레임에 대한 후처리 결과: (a) QP=10으로 H.263 부호화된 영상, (b) VM 후처리 필터로 후처리한 영상, (c) 제안한 방법으로 후처리한 영상



(a)



(b)



(c)

그림 10. Hall monitor 동영상의 50번째 프레임에 대한 후처리 결과: (a) QP=15로 H.263 부호화된 영상, (b) VM 후처리 필터로 후처리한 영상, (c) 제안한 방법으로 후처리한 영상

표 4. QP=15로 H.263 부호화된 Miss America 동영상에 대한 후처리 방법들의 계산 복잡도

| Post-processing method | # of operating per pixel | |
|------------------------|--------------------------|----------------|
| | Addition | Multiplication |
| VM post-filter | 25.7 | 18.2 |
| Proposed | 19.0 | 20.4 |

가 뭉롱화(blurring)가 심하고 눈 주위 부분이 블록화 잡음이 여전히 남아 있고, 그림 10(b)는 좌측 하단 벽면에 블록화 잡음으로 인해 여전히 눈에 거슬린다. 반면에, 제안한 방법에 의한 후처리 결과인 그림 9(c)와 그림 10(c)는 뭉롱화 없이 블록화 잡음뿐만 아니라 링잉 잡음이 거의 제거됐음을 알 수 있다. 이러한 결과들로부터 영상복원 관점에서 제안된 본 논문의 방법이 다양한 동영상과 압축률에 대해 VM 후처리 필터보다 객관적으로 원영상과 더 가까움을 나타낼 뿐만 아니라 주관적 화질면에서도

우수함을 확인할 수 있다.

한편, 제안한 후처리 방법의 계산의 복잡도 (computational complexity)를 알아보기 위해 VM 후처리 필터와 제안된 방법에 대하여 각각 후처리 시 소요되는 덧셈과 곱셈 연산의 수를 표 4와 같이 비교하였다. 이때, 후처리를 위해 QP=15로 H.263 부호화된 Miss America 동영상을 사용하였다. 표 4를 보면, 제안된 방법이 VM 후처리 필터에 비해 덧셈과 곱셈 각각의 연산에 대해 약 26%와 약 12%의 연산량 감소를 보임으로써 계산의 복잡도면에서는 제안된 방법이나 VM 후처리 방법은 그다지 차이가 없음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 블록기반 동영상 부호화시 발생하는 양자화 잡음을 제거하기 위해 웨이블릿 변환을 이용한 효과적인 후처리 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 양자화 잡음을 특정 프로파일로 표현되는 블록화 잡음과 랜덤한 나머지 잡음의 합으로 보고 웨이블릿 변환을 이용하여 영상복원 관점에서 각각의 잡음을 제거하였다. 블록화 잡음 성분을 부호화 신호에 대한 정칙화 미분에 의해 블록경계에서 나타나는 임펄스로 간주하고, 그 크기를 메디안 필터 뿐만 아니라 양자화 파라미터와 웨이블릿 영역에서의 국부 에너지를 이용하여 적응적으로 줄임으로써 블록화 잡음을 제거하였다. 그리고 나머지 잡음은 비에지 화소에서 백색 잡음으로 간주하고 연역치화를 수행함으로써 제거하였다. 또한 이러한 후처리 방법은 고속 처리를 위하여 웨이블릿 분해 및 합성 없이 공간 영역에서 근사적으로 구현할 수 있었다. 실험 결과, 제안된 방법이 MPEG-4 VM 후처리 필터보다 계산의 복잡도면에서 거의 유사하면서도 주관적·객관적 화질면에서는 더욱 우수한 결과를 가져왔다. PSNR의 경우 제안된 방법은 MPEG-4의 VM 후처리 필터보다 영상과 압축률에 관계없이 모두 향상된 결과를 가져왔는데 최대 0.5 dB의 개선을 보였다. 그리고 주관적 화질면에서도 제안된 방법이 에지의 뭉롱화 없이 잡음을 거의 제거됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] ISO/IEC JTC1/SC29, "Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital

Storage Media up to about 1.5Mbits/s," 1992.
 [2] ITU-T Recommendation H.263, "Video coding for low bitrate communication," May 1996.
 [3] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/N3093, "MPEG-4 video verification model V.15.0," Maui, Dec. 1999.
 [4] S. D. Kim, J. Y. Yi, H. M. Kim, and J. B. Ra, "A deblocking filter with two separate modes in block-based video coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 9, pp. 156-160, Feb. 1999.
 [5] J. G. Apostolopoulos and N. S. Jayant, "Postprocessing for very low bit-rate video compressing," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 8, pp. 1125-1134, Aug. 1999.
 [6] H. W. Park and Y. L. Lee, "A postprocessing method for reducing quantization effects in low bit-rate moving picture coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 9, pp. 161-171, Feb. 1999.
 [7] N. C. Kim, I. H. Jang, D. H. Kim, and W. H. Hong, "Reduction of blocking artifact in block-coded images using wavelet transform," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 3, pp. 253-257, June 1998.
 [8] I. H. Jang, N. C. Kim, and S. M. Lee, "A fast algorithm with adaptive thresholding for wavelet transform based blocking artifact reduction," in *Proc. IASTED ICSPC'98, Canary Islands*, Feb. 1998, pp. 345-351.
 [9] J. H. Yang, H. Choi, and T. J. Kim, "Noise estimation for blocking artifacts reduction in DCT coded images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 10, pp. 1116-1120, Oct. 2000.
 [10] Z. Xiong, M. T. Orchard, and Y. Q. Zhang, "A deblocking algorithm for JPEG compressed images using overcomplete wavelet representations," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 7, pp. 433-437, Apr. 1997.
 [11] B. Ramamurthi and A. Gersho, "Nonlinear space-variant postprocessing of block coded images," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-34, pp. 1258-1268, Oct. 1986.

[12] S. O. Choy, Y. H. Chan, and W. C. Siu, "Reduction of block-transform image coding artifacts by using local statistics of transform coefficients," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 4, pp. 5-7, Jan. 1997.

[13] S. D. Kim, J. Y. Yi, H. M. Kim, and J. B. Ra, "A deblocking filter with two separate modes in block-based video coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 9, pp. 156-160, Feb. 1999.

[14] Y. Yang, N. P. Galatsanos, and A. K. Katssaggelos, "Regularized reconstruction to reduce blocking artifacts of block discrete cosine transform compressed images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 3, pp. 421-432, Dec. 1993.

[15] A. Zakhor, "Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 2, pp. 91-94, Mar. 1992.

[16] H. Paek, R. C. Kim, and S. U. Lee, "On the POCS-based postprocessing technique to reduce the blocking artifacts in transform coded images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 8, pp. 358-367, June 1998.

[17] V. Torre and T. Poggio, "On edge detection," *IEEE Trans. on Patt. Anal., Machine Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 147-163, Mar. 1986.

[18] S. Mallat and S. Zhong, "Characterization of signals from multiscale edges," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 14, pp. 710-732, July 1992.

[19] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, pp. 613-627, May 1995.

[20] ITU-T Study Group 15, *Video Codec Test Model TMN5*, Jan. 1995.

[21] S. A. Karunasekera and N. G. Kingsbury, "A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 4, pp. 713-724, June 1995.

문기웅(Ki-Woong Moon)

정회원



1999년 2월 : 경북대학교
전자공학과 (공학사)
2001년 2월 : 경북대학교
전자공학과 (공학석사)
2001년 1월~현재 : LG전자
<주관심 분야> 영상처리, 영상
통신, 3세대이동통신

장익훈(Ick-Hoon Jang)

정회원



1986년 2월 : 경북대학교
전자공학과 (공학사)
1988년 2월 : 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1998년 8월 : 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

1988년 2월~1994년 2월 : 국방과학연구소 연구원
1998년 3월~현재 : 경운대학교 컴퓨터전자정보공학
부 조교수
<주관심 분야> 영상처리, 영상압축, 컴퓨터비전

김남철(Nam Chul Kim)

정회원



1978년 2월 : 서울대학교
전자공학과 (공학사)
1980년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과
(공학석사)
1984년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과
(공학박사)

1984년 3월~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 교수
1990년 1월~1994년 12월 : 생산기술연구원 HDTV
신호처리분과위원
1994년 1월~1996년 12월 : 한국통신학회 편집위원
1994년 1월~1996년 12월 : 대한전자공학회 편집위원
1996년 1월~현재 : 한국방송공학회 편집위원, 이사
1997년 1월~1998년 12월 : 한국통신학회 신호처리
연구회 위원장
<주관심 분야> 영상처리, 영상압축, 영상복원, 컴퓨터
비전