

Objective Picture Quality Assessment of Block Based Moving Picture Coder

鄭泰允* · 洪敏碩** · 朴康緒** · 金賢述** · 朴相暻***

(Tae-Yun Chung · Min-Suk Hong · Kang-Seo Park · Hyun-Sool Kim · Sang-Hui Park)

Abstract - Conventional MSE or PSNR based methods for objective picture quality assessment of moving picture coder are not well correlated with subjective human evaluation. In recent years, the design of better objective quality assessment has attracted much intention and several picture quality metrics based on the properties of Human Visual System has been proposed. This paper proposes new metric which is appropriate for objective picture quality assessment of block based moving picture coder by considering frequency sensitivity, inter-intra channel masking and several distortion artifacts caused by block based coding. The experimental results show that the proposed method is good correlated with subjective assessment.

Key Words : Picture quality assessment, MPEG, Human visual system, vision model

1. 서 론

최근 고속 및 대용량의 특성을 갖는 디지털 영상정보 서비스에 대한 요구가 나날이 증대하여 D-TV, DVD 및 영상회의 시스템등의 실용화가 이루어졌다. 영상정보의 디지털화는 신뢰도, 화질, 보안성 그리고 정보 조작의 편의성에 있어 아날로그 방식에 비해 월등히 우수한 성능을 갖고 있으나 그 정보량의 방대함 때문에 전송 및 저장매체의 효율적 사용이라는 측면에서 정보 압축이 필수적이다[1]. 디지털 동영상정보의 압축 혹은 부호화기술은 MPEG1/2/4, H.261/263 등의 국제규격의 표준안들이 대표적이며 앞으로도 이러한 표준안들을 실현할 수 있는 시스템들의 사용이 더욱 확산될 전망이다[2].

일반적으로 전송채널 또는 저장매체에 전송될 수 있는 정보량은 정보전달매체의 정보용량에 의해 제한되기 때문에 디지털 영상정보의 전달시 그의 정보용량을 고려하여 영상정보를 감축해야 하며 이 경우 영상정보의 왜곡은 필연적이다. 따라서 영상 부호화기 설계에 있어 가장 중요한 문제는 원영상의 어떤 정보를 어느 정도로 왜곡시키는 것이 부호화된 영상의 화질열화를 최소로 할 수 있는가 하는 것이며 따라서 정확한 화질평가 방법은 부호화기 개발에 있어 가장 중요한 요소중의 하나가 된다. 일반적으로 영상정보의 화질평가방법으로는 인간이 직접 왜곡영상을 평가하는 주관적 화질평가방법과 정량적 측정도구로 왜곡영상의 화질을 평가

하는 객관적 화질평가방법이 있다[3].

주관적 화질평가방법은 화질에 대한 최종적인 평가가 인간에 의해 이루어진다는 점에서 그 신뢰도가 높아 부호화기의 성능 검증등에 널리 사용되고 있으나, 평가환경 구축시의 비용의 상승 및 장시간의 평가 소모시간등에 문제점이 있다. 또한 현재 객관적 화질평가방법으로 주로 사용되는 MSE 또는 PSNR 측정법은 아날로그 영상의 화질측정에는 비교적 적합하나 부호화 방식에 따라 아날로그 영상과 왜곡특성이 다른 디지털 영상정보의 화질측정시에는 평가된 화질이 인간의 주관적 화질평가와 직접적인 관련성이 적은 문제점을 안고 있다[4-6].

본 논문의 목적은 블록 기반의 동영상 부호화기, 특히 MPEG2 동화상 부호화기의 성능 검증에 필수적인 HVS (Human Visual System) 기반의 객관적 화질평가 모델을 개발하는 것이며 이를 위해 전자생리학 및 정신물리학적 실험에서 제시하고 있는 HVS를 신호처리 기법으로 해석하여 DCT의 블록기반 동영상 부호화시 발생하는 왜곡특성들 별개로 분석, 각각의 왜곡특성에 대해 인간의 시각 민감도에 따른 가중치를 부여함으로써 주관적 화질평가와 대등한 성능을 보이는 객관적 화질평가의 모델을 제시하며 이의 타당성을 실험을 통해 입증하였다.

2. 인간의 시각특성

그림 1은 동일한 PSNR을 갖는 왜곡영상을 나타낸 것으로 동일한 PSNR을 갖는 왜곡영상이라도 (b)의 영상이 (a)의 영상보다 시각적으로 화질열화가 더 심하게 보인다. 이러한 이유는 MSE 또는 PSNR 측정은 공간적 화소단위로 측정되며 이때 부호화된 영상의 왜곡특성에 대한 HVS에서의 인지(perception) 또는 가시도(visibility) 특성을 고려하지

* 正 會 員 : 三星電子 中央研究所 先任研究員
** 正 會 員 : 延世大 電氣·컴퓨터工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 延世大 電氣·컴퓨터工學科 教授·工博
接受日字 : 1999年 10月 1日
最終完了 : 1999年 10月 29日

않기 때문에 측정값과 인간에게 인지되는 화질특성의 상관성이 낮게 된다. 따라서 부호화된 영상의 정량적이며 객관적인 화질평가를 위해서는 인간의 시각특성에 대한 모델링이 필수적이다[7].

시각특성을 모델링하기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 정신물리학적 실험을 통해 서로 다른 배경영상 위에 어떤 시각적 자극이 가해졌을 때 눈이 이를 감지하기 시작한 자극의 크기를 측정하여 이것을 정량화하는 방법이다[8]. 이때 자극이 시각적으로 관측가능(just noticeable)한 상태가 되는 크기를 가시도 문턱값(visibility threshold)이라 하며 여기서 얻어진 결과들은 공간영역 및 주파수영역에서 해석된다.

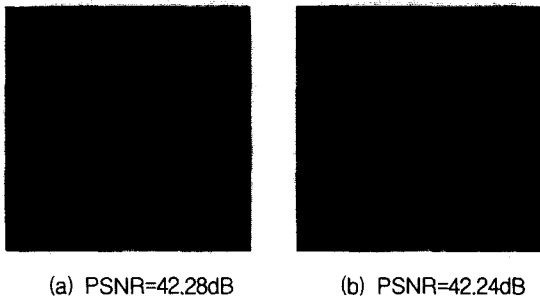


그림 1 동일한 잡음성분을 갖는 영상의 시각적 차이
Fig. 1 Visual quality difference of images

2.1 세기 민감도(Intensity Sensitivity)

시험자극에 대한 인지특성은 배경영상뿐 아니라 자극의 형태 및 크기등의 특성에 많은 영향을 받는다. 다양한 배경영상위에 가해지는 상이한 자극에 대한 가시도 문턱값은 일반적으로 관찰자가 자극을 인지할 수 있는 확률이 50%일 경우의 자극의 크기로 측정된다. 이러한 측정을 통해 다음과 같은 시각특성을 얻는다.

(1) 대비(Contrast)

인간의 눈은 밝기의 세기 그 자체보다는 밝기의 차이에 더욱 민감하다. 즉, 인간의 눈은 밝기의 변화를 인지하는데 있어 비선형특성을 보인다. 이러한 영상의 대비특성은 그 응용에 따라 수많은 방법으로 정의되고 있으나 정현파 격자(sinusoidal grating)와 같은 주기패턴으로 대비특성을 측정하는 Michelson 대비와 균일한 밝기를 갖는 배경에 대한 균일자극의 변화량을 측정하는 Weber 대비등의 2가지 방법이 일반적으로 사용된다.

(2) 마스킹(Masking) 효과

대부분의 영상은 배경의 밝기가 균일하지 않고 복잡하다. 따라서 시공간적(spatio-temporal)으로 밝기의 큰 변화가 있는 영역에서의 자극에 대한 가시도를 측정하는 것이 필요하다. Fiorentini등은 밝기의 변화에 대한 가시도 문턱값을 측정하여 밝기의 변화가 큰 인접부분은 자극에 대한 가시도의 민감도가 낮아져 자극을 인식하기 어렵다는 것을 밝혀냈다[9]. 이러한 현상을 공간마스킹(spatial masking) 효과라 한다. 이러한 공간마스킹 효과와 마찬가지로 밝기의 변화가 시간적으로 존재하는 영상에 대한 마스킹 효과가 존재하는데 이러한 현상을 시간마스킹(temporal masking) 효과라 한다.

2.2 주파수 민감도(Frequency Sensitivity)

배경의 밝기에 따라 시각 민감도가 변화하는 것과 마찬가지로 또한 주파수에 따라 인간의 시각 민감도가 변화한다.

(1) 공간주파수 민감도

공간주파수에 대한 시각 민감도의 변화는 MTF(Modulation Transfer Function)로 정의된다. Campbell은 공간주파수 변화에 따른 정현파 격자의 가시도 문턱값을 관찰함으로써 MTF를 측정하였다[10]. 이때 CSF(Contrast Sensitivity Function)는 가시도 문턱값의 역으로 정의된다. 그림 2는 공간주파수 함수로서의 CSF를 나타낸 것이다. 그의 실험에서 CSF는 대역통과필터의 특성을 보이며 따라서 동일한 양의 잡음성분에 대해서도 잡음의 주파수 분포에 따라 실제 시각특성은 다르게 나타난다.

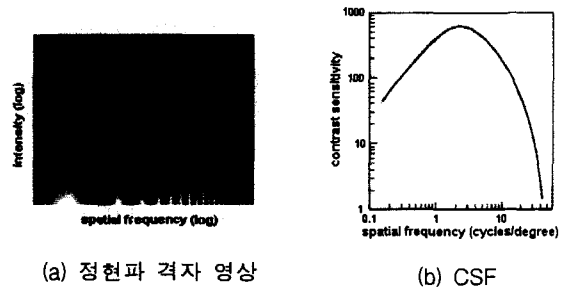


그림 2 정현파 격자 영상에 대한 CSF
Fig. 2 CSF for sinusoidal grating image

(2) 시간주파수 민감도

공간주파수에 대한 시각 민감도와 비슷하게 시간주파수에 대한 시각 민감도도 대역통과필터의 특성을 보인다. 즉, 시간적으로 변화하지 않은 영상은 인간의 눈으로 쉽게 인지되지 않으며 또한 어느 주파수 이상의 영상의 민감도는 감소한다. Robson등은 시공간적인 주파수 성분을 갖는 영상에 대한 민감도를 측정하여 이러한 사실을 밝혀냈다.

(3) 방위 민감도(Orientation Sensitivity)

Campbell등은 서로 다른 방위 성분을 갖는 정현파 격자의 대비 민감도 측정을 통해 인간의 시각 민감도는 등방성(isotropic)이 아니라 수평 및 수직 성분에 더욱 민감하다는 것을 밝혀냈다. 즉, 시각 민감도는 수평, 수직 성분으로부터 단조감소하여 대각 격자에 대해 최소값을 갖는다.

3. 동영상 부호화기와 화질열화

3.1 동영상 압축 부호화

동영상 압축 부호화의 대표적인 방식은 ISO(International Standardization Organization)와 IEC(International Electrotechnical Commission)가 합동으로 규격화를 추진한 MPEG 부호화 방식이다. 먼저 MPEG1은 CD등의 저장매체를 대상으로 한 1.5Mbps의 전송비트율을 갖는 방식이며 MPEG2는 MPEG1과는 순방향 호환성(forward compatibility)을 가지며 또한 통신 및 방송환경에 적합한 뛰어난 성능 및 유연성을 지닌, 현행 TV 뿐 아니라 HDTV급의 품질을 실현할 수 있는 동영상 압축 부호화 규격이다.

이와 같은 MPEG 방식의 동영상 부호화 알고리즘은 블록 기반의 움직임 추정 및 보상과 DCT에 의해 시공간적인 중복성이 제거되며 또한 블록단위의 독립적인 양자화를 수행하므로 일반적인 영상신호처리와는 다른 화질열화 특성이 발생된다.

3.2 화질열화 특성

부호화된 영상의 화질열화 특성에 대한 고찰은 객관적 화질평가뿐만 아니라 부호화기 설계에 있어서도 매우 중요하다. 즉, 화질열화 특성에 대한 정확한 분석은 부호화기내의 양자화기 설계에 반영되어 부호화기 효율 및 화질을 향상시킬 수 있다. 따라서 블록기반의 독립적인 변환 부호화, 양자화 및 움직임 추정/보상을 그 특징으로 하는 MPEG 동영상 압축 부호화기의 경우, 시각적으로 서로 다른 형태로 나타나는 개별적인 화질열화 특성의 분석을 통한 통합적인 열화 특성의 제시는 객관적 화질 평가에 필수적이다[11].

(1) 구획화 현상(blocking effect)

구획화 현상은 인접 블록과의 경계에서 나타나는 불연속(discontinuity)으로 정의되는, 블록기반의 DCT 부호화에 의한 가장 시각적으로 두드러진 화질열화 특성이다. 즉 이러한 현상은 인접 블록과의 상관성은 고려하지 않고 해당 블록을 독립적으로 부호화 함으로써 발생한다. 일반적으로 블록 DCT는 입력 영상에 대해 8×8 화소 단위로 수행된다.

화면내(intra) 부호화 모드의 경우, DC와 AC 계수의 양자화 방법이 다르며 따라서 영상의 화소값이 수평 또는 수직 방향으로 단조 증가 또는 감소하고 또한 양자화 스텝 크기가 크다면 DC 계수를 제외한 나머지 영역의 양자화 오차가 커지게 되어 복원된 영상은 8 화소 단위로 불연속하게 나타난다. 또한 매크로블록당 수평, 수직의 선형적인 움직임 벡터만으로 물체의 움직임을 표현해야 하는 화면간(inter) 부호화 모드의 경우, 다양한 움직임을 갖는 화면내의 별개의 물체로부터 기원(origination)된 화소로부터 매크로블록이 구성될 때 움직임 추정 및 보상시의 부정합(mismatching)에 의해 예측 오차가 크게 발생한다. 이와 같은 매크로블록이 성기계(coarse) 양자화되면 매크로블록의 경계를 따라서 불연속이 발생한다. 그림 3의 (a)는 화면내 부호화 모드에 대한 복원된 영상의 구획화 현상을 나타낸 것이다.

(2) 번짐(blurring) 현상

번짐 현상은 texture 영역 또는 물체의 에지(edge) 주변과 같은 공간적으로 높은 활성도(activity)를 갖는 영역에서 발생하며 에지의 예리함(sharpness)의 감소 및 공간적인 상세함의 손실로 나타난다. 그림 3의 (b)는 번짐 현상의 예를 보여준다.

화면내 부호화 모드의 경우, 번짐 현상은 성긴 양자화에 의한 고주파 영역의 AC 계수의 억압과 직접적으로 관련되며 따라서 매크로블록은 저주파 영역의 계수에 의해 표현된다. 결국 이 현상은 저역통과필터의 현상으로 나타난다. 또한 화면간 부호화 모드는 공간적인 상세함이 감소한 예측 부호화 및 순방향과 역방향 예측의 보간에 의한 쌍방향 예측 부호화되는 매크로블록에서 평균필터의 현상으로 나타날 수 있다.

(3) Ringing 현상

Ringing 현상은 영상의 비교적 균일한 영역에서 에지와

같은 영상의 경계면 주위에 어른거리거나 물결(rippling) 형태와 같은 주기적인 의사(pseudo) 에지로 나타난다. 이 현상은 DCT 계수중 고주파 성분의 잘림(truncation)에 기인하며 에지의 대비값이 커질수록 물결형태의 첨두값(peak)이 커지고 골(trough)이 깊어지는 Gibbs 현상과 관련이 있다.

즉, 영상내에서 하나의 선이 균일하게 존재할 때 이 선은 무한의 해상도를 갖는 DCT 및 역(inverse) DCT에 의해 완전히 복원될 수 있다. 그러나 MPEG의 경우 DCT는 일반적으로 12bit로 표현되며 또한 양자화 과정에서 고주파 성분이 제거된다. 따라서 이와 같은 선이 물체의 에지 성분을 포함하고 있으면 에지의 인접 화소는 overshoot 또는 undershoot 되며 이것이 에지의 ringing 현상으로 보인다. 그림 3(c)는 ringing 현상을 나타낸 것이다.

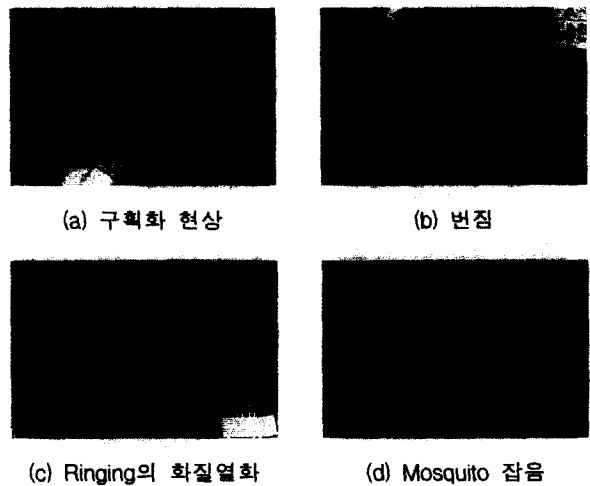


그림 3 MPEG 부호화에 의한 화질열화 특성
Fig. 3 Coding artifacts by MPEG compression

(4) Mosquito 현상

Mosquito 현상은 연속적인 4 frame의 차영상으로 표현된 그림 3의 (d)에 나타난 바와 같이 주로 시간적인 화질열화 특성으로서 높은 대비값을 갖는 에지 또는 동영상 시퀀스의 움직임 물체 주변부에서의 휘도 및 색 신호값의 변동이 심할 때 나타나는 잡음 현상이다. 이 현상은 시간적인 움직임 보상의 부정합 때문에 발생하는 예측오차와 공간적인 ringing 현상에 의해 유도되는 고주파성분의 왜곡과 관련이 있다.

일반적으로 mosquito 현상의 가시도는 ringing 현상보다는 움직임 보상의 부정합에 의한 예측오차에 더 큰 영향을 받는데 이것은 연속되는 화면의 동일한 영역에서의 가변적인 부호화에 의한 결과로 나타난다. 즉, MPEG 부호화의 경우, I, P, B picture에 따라 부호화 방법, 움직임 추정/보상 방법 및 양자화 수준이 다르기 때문에 mosquito 현상의 발생은 필연적이다.

4. 동영상 부호화기의 화질평가

동영상 압축 부호화에 따른 화질열화 특성은 아날로그 시스템의 그것과는 매우 다른 성질을 갖는다. 따라서 동영상 압축 부호화기의 성능을 효율적으로 측정하기 위해서는 동영상 압축 부호화 알고리즘의 특성에 맞는 주관적, 객관적 화질평가방법의 제시가 필수적이다.

일반적으로 화질에 대한 최종평가는 인간에 의해 이루어진다는 관점에서 주관적 평가방법이 부호화기의 성능 검증용으로 널리 사용되고 있으나 평가환경 구축시의 비용 증가 및 장시간의 평가 소모시간등의 문제점 때문에 주관적 평가방법과 대등한 성능을 갖는 객관적 화질평가방법이 필요하다.

4.1 ITS의 객관적 화질평가

동영상 압축 부호화의 객관적 화질평가 방법에 대한 국제적 표준화 노력의 일환으로 ITS(Institute for Telecommunication Sciences)는 고유의 평가척도를 마련하여 ITU에 제안하였으며 현재 ANSI(American National Standards Institute)에서 ANSI T1.803.03 규격으로 ITS 평가법을 채택하였다[3]. 그림 4는 ITS 평가법의 블록도를 나타낸 것이다. 이 방법은 3가지의 화질열화 측정값의 선형조합으로 정량적 화질평가를 수행하며 표 1에서 제시된 주관적 화질평가 척도와와의 벤치마킹을 통해 성능을 검증하였다.

표 1 주관적 화질평가 등급 척도
Table 1 Rating scale for subjective quality assessment

등급	열화	화질
5	Imperceptible	Excellent
4	Perceptible, not annoying	Good
3	Slightly annoying	Fair
2	Annoying	Poor
1	Very annoying	Bad

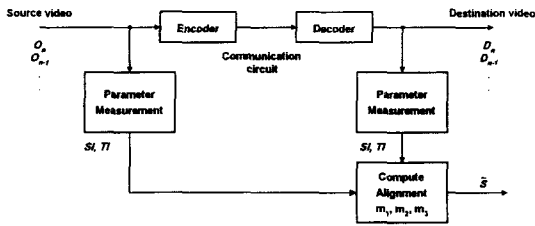


그림 4 ITS 객관적 화질평가 방법
Fig. 4 ITS objective quality assessment

정량적 화질은 기본적으로 공간정보 SI 및 시간정보 TI의 측정치를 바탕으로 평가된다. 먼저 n번째 프레임 F_n에 대한 SI는 식 (1)을 통해 측정된다.

$$SI(F_n) = STD_{space}\{Sobel[F_n]\} \quad (1)$$

여기서 STD_{space} 는 프레임내의 수평, 수직 화소의 표준편차 연산자이며 Sobel은 에지 검출을 위해 사용되는 고역통과필터 성질의 Sobel 필터 연산자이다. 또한 TI는 연속하는 두 프레임의 움직임 차를 통해 식 (2)를 통해 얻어지며

$$TI(F_n) = STD_{space}[\Delta F_n] \quad (2)$$

이때 $\Delta F_n = F_n - F_{n-1}$ 이다.

그림 5는 각각 원영상과 5Mbps의 전송률로 MPEG2 부호화된 영상의 SI 및 TI의 결과를 나타낸 것이다. 이와 같이 얻어진 SI 및 TI로부터 3가지의 화질손상 변수 $m_1, m_2,$

m_3 를 측정하고 이를 선형조합하여 최종적인 정량적 화질의 단일 등급척도를 구한다. 먼저 m_1 은 원영상 O_n 과 왜곡영상 D_n 사이의 공간영역상의 왜곡정도를 측정하는 변수로서 식 (3)과 같다.

$$m_1 = RMS_{time}\left(5.81 \cdot \left| \frac{SI[O_n] - SI[D_n]}{SI[O_n]} \right| \right) \quad (3)$$

여기서 RMS_{time} 는 평가 시퀀스의 모든 시간동안 측정되는 RMS 함수이다. 또한 m_2 와 m_3 는 시간영역상의 왜곡정도를 측정하는 변수로서 각각 식 (4) 및 (5)로 표현된다.

$$m_2 = f_{time}[0.108 \cdot MAX\{(TI[O_n] - TI[D_n]), 0\}] \quad (4)$$

$$여기서 f_{time}[x_i] = STD_{time}\{CONV(x_i, [-1, 2, -1])\}$$

이때 STD_{time} 및 $CONV$ 은 각각 평가 시퀀스의 모든 시간동안 측정되는 표준편차 연산자 및 콘볼루션 연산자를 의미한다. 즉, m_2 는 원영상에는 존재하는 움직임 에너지가 왜곡영상에서 상실될 때의 양을, 그리고 m_3 는 시간의 함수로서 원영상과 왜곡영상사이에 나타나는 단속적인(jerky) 움직임을 측정하여 시간영역상의 화질열화를 측정한다.

$$m_3 = MAX_{time}\left(4.23 \cdot \log \frac{TI[D_n]}{TI[O_n]}\right) \quad (5)$$

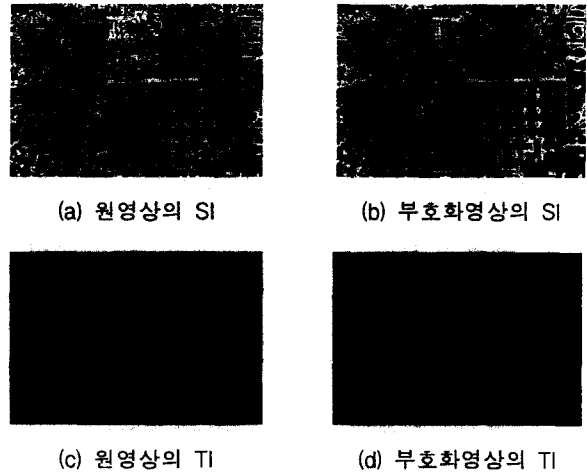


그림 5 원영상과 MPEG 부호화 영상의 SI와 TI 영상
Fig. 5 SI and TI of original and MPEG coded images

이와 같이 측정된 시공간영역상의 화질열화 변수로부터 식 (6)과 같은 선형조합을 통해 최종적인 정량적인 화질평가의 등급척도를 얻는다.

$$\hat{s} = c_0 + \sum_{i=1}^3 c_i m_i \quad (6)$$

ITS 평가법은 기본적으로 64Kbps에서부터 45Mbps의 전송률을 갖는 동영상 압축 부호화기의 객관적 화질평가용으로 제시되었으나 많은 실험을 통해 10Mbps이하의 MPEG에는 적합하지 않은 것으로 밝혀졌으며 따라서 MPEG 부호화 알고리즘에 적합한 새로운 객관적 화질평가 방법이 필요하다.

4.2 제안된 객관적 화질평가 모델

기존의 객관적 화질평가방법의 대부분은 시공간적인 주파수 민감도 및 왜곡의 가시도에 대한 시각적 마스킹만을 고려하여 이를 원영상과 왜곡영상사이의 차영상에 대해 가중치로 반영함으로써 시각적 왜곡에 대한 정량적 화질평가를 시행하였으나 이는 구획화 현상, 번짐, ringing 및 움직임 열화등의 다양한 왜곡특성을 보이는 동영상 부호화된 영상의 정량적이며 객관적 화질평가 방법으로는 불충분하다.

따라서 본 논문은 HVS 기반의 주파수 민감도와 채널간, 채널내의 마스킹에 의한 전반적인 왜곡의 가시도 측정 및 블록기반 동영상 부호화시 발생할 수 있는 국부적인 왜곡을 고려한 블록기반 동영상 부호화된 영상에 적합한 객관적 화질평가 모델을 제시한다. 그림 6은 제안된 동영상 부호화에 대한 객관적 화질평가 모델의 블록도이다.

(1) 인지채널 분해(Perceptual Channel Decomposition)

인간의 눈의 원시시각령(primary cortex, V1 영역)에서의 세포구조는 전자생리학적 실험을 통해 Gabor 형태의 수용체 구조를 갖는 것으로 밝혀졌다. 즉, 시각령 수용체는 Gabor 형태의 비원형 구조로서 방위와 주파수에 대해 선택적 민감성을 갖는 흥분성 및 억제성 영역으로 구성된다. 따라서 원영상과 부호화에 의해 왜곡이 발생한 복호화된 영상에 대해 시각시스템의 방위와 주파수 성분에 대한 다채널 구성을 위한 인지채널 분해는 Gabor 필터로 구현될 수 있다.

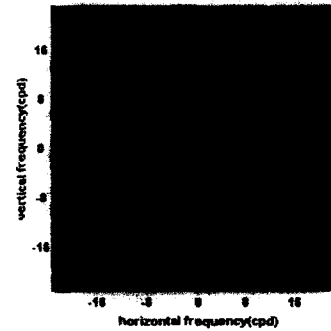


그림 7 주파수 영역에서의 Gabor filter의 응답
Fig. 7 Response of Gabor filter set in frequency domain

$$G_{f_0, \theta_0}(f, \theta) = e^{-\left(\frac{\log z(\frac{f}{f_0})}{\Delta f}\right)^2} e^{-\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta \theta}\right)^2} \quad (7)$$

따라서 Gabor 필터의 주파수 응답은 중심주파수 f_0 와 중심방위 θ_0 및 각각 주파수 대역폭 및 방위 대역폭을 나타내는 Δf 와 $\Delta \theta$ 에 대한 공간주파수 f 와 방위 θ 의 함수로 결정된다.

또한 저역통과필터는 방위성분의 영향이 매우 적으므로 식 (8)과 같은 등방성 필터로 구성할 수 있다. 본 논문의 목적은 원영상과 왜곡영상사이의 왜곡의 양을 측정하는 것이므로 저역통과필터의 DC성분은 무시할 수 있다. 왜냐하면 인간의 눈은 영상자체의 전반적인 밝기의 변화보다는 영상 내에서의 상대적인 밝기에 민감하기 때문이다.

$$G(f) = e^{-\left(\frac{f}{\Delta f_c}\right)^2} - e^{-\left(\frac{f}{\Delta f_s}\right)^2} \quad (8)$$

본 논문에서는 대역통과필터를 공간주파수에 대해 1 octave의 대역폭을 갖는 4채널 ($\Delta f=0.5$) 및 방위성분에 45° 의 대역폭을 갖는 4채널 ($\Delta \theta=1/4\pi$)씩 총 16채널로 구성하며 1채널의 등방성 저역통과필터 ($\Delta f_c=2cpd$, $\Delta f_s=1/4cpd$)를 포함하여 총 17채널의 필터뱅크로 HVS의 인지채널을 구성한다. 그림 7은 Gabor 필터의 17채널의 필터뱅크를 도시한 것이다.

(2) 대비측정

인간의 눈은 밝기의 세기 그 자체보다는 밝기의 차이에 더욱 민감하다. 따라서 Gabor 필터뱅크에 의해 다채널 성분의 시각적 인지채널로 분해된 영상신호의 화소값은 HVS에 대한 전자생리학 및 정신물리학 실험 결과를 반영하기 위해 대비값으로 변환되어야 한다. 대비측정에 일반적으로 사용되는 Michelson 대비법 및 Weber 대비법은 정현파 격자와 같은 단순한 주기패턴을 바탕으로 한 방법이며 따라서 통계적 성질이 다양하고 복잡한 배경영상을 지닌 자연(natural) 영상의 대비측정에는 적합치 않다. Peli는 이러한 문제를 해결하기 위해 자연영상의 대비측정으로 식 (9)와 같은 LBC (Local Band-limited Contrast)법을 제안하였다[13].

$$c_k(x, y) = \frac{b_k(x, y)}{\sum_{i=0}^k a_i(x, y)} \quad (9)$$

여기서 x, y 는 각각 영상의 수평, 수직의 화소 위치이며

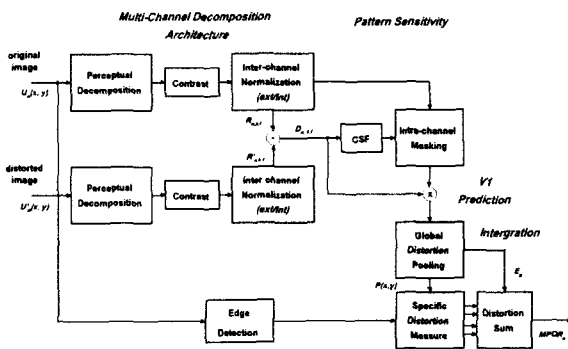


그림 6 제안된 동영상 부호화기의 화질 평가 모델
Fig. 6 Proposed picture quality assessment model

Gabor 필터의 단점은 스택트럼 영역상에서 매우 선택적(selective)이며 또한 필터링이 주파수 영역에서 수행되어야 한다는 점이다. 이것은 Gabor 프로파일의 FFT 연산을 필요로 하며 따라서 연산에 대한 부담을 가중시킨다[12]. 따라서 본 논문에서는 Comes가 제안한 분해필터와 유사한 분석적인 Gabor 필터를 사용한다. 이 방법은 양(positive)의 주파수 영역에 대해서만 필터를 정의하며 따라서 입력 신호가 실수일 때 복소쌍을 갖는 필터링의 출력은 대칭 필터에 의한 필터링의 결과와 같은 실수부만으로 정의할 수 있게 된다. 식 (7)은 본 논문에서 적용한 공간주파수와 방위성분의 선택적 분해를 위한 대역통과필터의 Gabor 필터를 나타낸 것이다.

c_k 는 특정한 주파수대역 k 에서의 국부대비를 그리고 b_k 와 a_i 는 각각 대역통과필터링된 영상 및 국부 밝기의 평균을 나타낸다. 그러나 이 방법 또한 a_i 가 0이 될 경우가 발생할 수 있기 때문에 자연영상의 대비측정에는 결함이 있다. 따라서 본 논문에서는 LBC 방법을 수정하여 공간주파수 채널대역 k 와 방위의 채널대역 l 에서의 대비 $c_{k,l}(x, y)$ 를 식(10)과 같이 영상의 평균 b_{mean} 으로 정규화하여 측정한다.

$$c_{k,l}(x, y) = \frac{b_k(x, y)}{b_{mean}} \quad (10)$$

(3) 정규화에 의한 채널간 시각적 마스크

기존의 대부분의 HVS 모델은 공간주파수와 방위성분으로 분해된 다채널 성분들이 서로 독립적으로 작용한다고 가정하였다. 그러나 최근의 전자생리학적 실험을 통해 각 채널간에 중요한 상호작용(interaction)이 존재하고 있음이 밝혀졌다. 특히 Foley는 이러한 채널간 상호작용은 시각적 마스크효과에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다는 사실을 정신물리학적 실험으로부터 입증하였다[14]. 이러한 결과를 바탕으로 Teo등은 영상의 왜곡정도의 산출을 위한 정규화 모델을 제시하였으며[15] Watson등은 대비제어를 위한 시각 모델로서 식 (11)와 같이 Teo의 모델을 일반화하였다[16].

$$V = \frac{aR_{ext}^p}{b + \sum R_{inh}^q} \quad (11)$$

여기서 R_{ext} 와 R_{inh} 는 각각 흥분성 및 억제성 뉴런의 응답이며 ϕ 는 채널수를, 그리고 a, b, p, q 는 상수값을 나타낸다. 이것은 규합(pooling)연산 $\sum R_{inh}^q$ 에 의해 임의의 뉴런이 다른 뉴런층에 의해 마스크되는 것을 의미한다. 일반적으로 시각적 마스크는 문턱값 상승(threshold elevation) 또는 포화변환 함수(saturation transducer function)를 통해 구현할 수 있다. 따라서 식 (11)를 포화변환 함수에 의한 채널간 마스크효과와 식으로 일반화하면 식 (12)과 같다.

$$V_{k,l}(x, y) = \frac{a|c_{k,l}(x, y)|^p}{b + \sum |c_{k,l}(x, y)|^q} \quad (12)$$

본 논문에서는 계산의 복잡도를 줄이기 위해 억제성 규합연산을 동일한 공간주파수 대역에서의 방위성분으로 제한한다.

(4) 패턴 민감도 측정

부호화영상에 대한 왜곡의 가시도는 결국 원영상과 부호화영상의 차영상으로 표현되는 부호화 오차의 가시도이며 이는 HVS에 따른 배경영상의 밝기 변화 및 시공간적 구조, 그리고 오차신호의 주파수 분포등에 영향을 받는다. 따라서 인지채널로 분해되어 채널간 마스크효과가 고려된 식 (13)과 같은 원영상 $V_{k,l}(x, y)$ 과 왜곡영상 $V'_{k,l}(x, y)$ 의 차영상 $D_{k,l}(x, y)$ 에 대한 왜곡의 가시도를 정량화하는 것이 필요하며 이를 위해 채널내 패턴 민감도 측정이 수행된다.

$$D_{k,l}(x, y) = |V_{k,l}(x, y) - V'_{k,l}(x, y)| \quad (13)$$

본 논문에서는 원영상과 차영상을 각각 마스크패턴(배경패턴) 및 자극패턴으로 간주하여 공간주파수상의 CSF를 고

려한 문턱값 상승을 표현하는 비선형변환함수로부터 차영상이 원영상에 의해 마스크되는 채널내 마스크효과를 측정함으로써 패턴 민감도를 측정한다.

식 (14)는 차영상에 대한 마스크 문턱값을 나타낸 것이다.

$$C_T = \begin{cases} 1 & \text{if } V < C_{T0} \\ \left(\frac{V}{C_{T0}}\right)^\epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서 V 는 채널간 마스크가 고려된 원영상의 대비값이며 C_{T0} 는 CSF가 고려된 마스크가 없을 때의 자극, 즉 차영상의 검출문턱값이며 식 (15)와 같다

$$C_{T0} = (A_f \cdot D)^{0.62} \quad (15)$$

윗식에서 $A_f = 2.6 \cdot (0.0192 + 0.114f) e^{(-0.114f)^{1.1}}$ 는 CSF를 나타내며 D 는 차영상의 대비값이다. 그림 8과 그림 9는 각각 채널내 마스크를 위한 비선형변환함수 및 CSF를 나타낸 것이다.

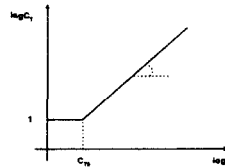


그림 8 마스크 함수
Fig. 8 Masing Function

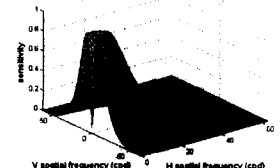


그림 9 CSF
Fig. 9 CSF

(5) 규합에 의한 왜곡 가시도의 정량적 측정

공간주파수와 방위성분의 각 인지채널로부터 CSF 및 채널간, 채널내 마스크효과가 고려된 왜곡의 가시도는 공간영역상의 왜곡량에 대한 최종적인 인지를 위해 규합된다. 공간영역상의 왜곡의 가시도 $P(x, y)$ 는 식 (16)으로부터 측정되며 이때 왜곡량에 대해 가중치를 부여하기 위해 Minkowski합을 사용한다.

$$P(x, y) = \left\{ \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} \left(\frac{D_{k,l}(x, y)}{C_T} \right)^m \right\}^{1/m} \quad (16)$$

여기서 N_x 와 N_y 는 각각 공간주파수 및 방위성분의 인지채널 수를 나타낸 것이며 m 은 Minkowski합을 위한 지수 상수이다. 이와 같이 얻어진 $P(x, y)$ 로부터 공간영역상의 최종적인 단일 왜곡량이 측정되며 이는 식 (17)과 같다.

$$E_g = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{l=1}^{N_y} P(x, y) \quad (17)$$

여기서 N_x 와 N_y 는 각각 영상의 수평, 수직 화소크기를 나타낸 것이다.

(6) 블록기반 동영상부호화기의 화질열화 측정

블록기반 동영상 부호화 과정에서 발생하는 화질열화 특성은 매우 다양하며 따라서 공간영역상의 전반적인 왜곡의 가시도 측정만으로는 정량적이며 객관적인 화질평가에 불충분하다. 따라서 본 논문에서는 인간의 눈에 민감한 구획화

현상, 번짐, ringing 및 mosquito 잡음등의 국부적인 화질열화 요인을 측정하여 이를 객관적 화질평가에 반영한다.

· 구획화 현상의 열화측정

구획화 현상은 인접블록과의 상관성을 고려하지 않고 해당블록만을 독립적으로 부호화하는 DCT등의 블록기반 변환 부호화 과정에서 발생하는 화질열화의 요인으로 블록경계면을 따라 인접 블록과의 불연속으로 나타난다. 따라서 공간영역상의 왜곡의 가시도 $P(x, y)$ 로부터 식 (18)을 이용하여 각각 수평, 수직 블록의 경계면에서 발생하는 불연속의 양 B_h 와 B_v 를 측정후 식 (19)를 통해 구획화 현상의 화질열화 성분 B_d 을 정량적으로 평가한다.

$$B_h = \frac{1}{NB_h} \sum_{x,y} (P(x, y)_{\in m, n} - P(x, y+1)_{\in m, n})^2 \quad (18)$$

여기서 $NB_h = N_y / BlockSize$ 이고 m, n 은 각각 수평, 수직의 블록경계면의 화소위치를 나타내며 이때 B_v 도 동일한 방법으로 구한다.

$$B_d = \sqrt{B_h^2 + B_v^2} \quad (19)$$

· 번짐의 열화측정

번짐현상은 물체의 에지 주변 또는 texture 영역과 같이 공간적으로 높은 활성도를 갖는 영역에서 성긴 양자화에 의한 고주파 성분의 억압에 의해 발생하는 화질열화 특성이 다. 따라서 번짐 현상은 가시적으로는 저역통과필터의 현상으로 나타나며 결국 화소간의 상관관계의 감소를 초래한다. 따라서 $P(x, y)$ 로부터 식 (20) 및 (21)을 이용하여 화소간의 국부적인 상관도 $C_b(x, y)$ 를 측정한다.

$$C_r(i, j) = \frac{1}{N_w - 1} \left\{ \sum_{i,j,m,n \in w} P(i, j)P(i+m, j+n) - \frac{1}{N_w} \sum_{i,j,m,n \in w} P(i, j) \sum_{i,j,m,n \in w} P(i+m, j+n) \right\} \quad (20)$$

여기서 w 는 수평, 수직의 화소위치 x, y 에서의 5×5 창(window)크기이며 N_w 는 창 내부의 화소의 수를 의미한다.

$$C_b(x, y) = \sum_{i,j \in w} |C_r(i, j)|^r \quad (21)$$

여기서 r 는 왜곡의 상대적인 크기를 감쇄하기 위해 지수 상수이다. 이와 같이 얻어진 각 화소당 국부적 상관도로부터 식 (22)를 통해 번짐현상의 화질열화 특성 C_d 를 정량적으로 평가한다.

$$C_d = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} C_b(x, y) \quad (22)$$

· Ringing의 열화측정

Rining 현상은 비교적 균일한 배경영상에서 에지와 같이 주변부와의 대비가 큰 영역의 고주파 성분의 잘림에 의해 나타나는 화질열화 특성으로 가시적으로 물체의 경계면 주변등에 어린거리는 주기적인 의사 경계면으로 보이게 된다. 따라서 원영상으로부터 물체의 경계면을 표현하는 에지를 검출하여 공간영역상의 왜곡의 가시도 $P(x, y)$ 로부터 에지 주변부의 국부적인 활성도를 측정함으로써 rining의 화질열

화 특성을 정량적으로 평가한다. 먼저 원영상에서의 에지 검출은 식 (23)과 같이 Sobel 연산자를 사용한다.

$$E_s(x, y) = \begin{cases} Sobel[u(x, y)] & \text{if } sobel[u(x, y)] \geq Th \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

여기서 $u(x, y)$ 는 원영상이며 Th 는 경계면 검출을 위한 문턱값이다. 이와 같이 얻어진 물체의 경계면 영상에 대해 수평방향의 국부 활성도 $A_h(x, y)$ 를 식 (24)로부터 구한 후

$$A_h(x, y) = \frac{|u(x, y-1) - u(x, y+1)|}{2} \quad (24)$$

식 (25)의 수평방향의 마스크 함수 $M_h(x, y)$ 를 통해 식 (26)의 각 화소당 ringing 현상에 의한 마스크오차 $R_b(x, y)$ 를 구한다.

$$M_h(x, y) = e^{(-r \cdot A_h(x, y))} \quad (25)$$

여기서 r 은 마스크함수의 지수감쇄상수이며 $A_v(x, y)$ 및 $M_v(x, y)$ 도 동일한 방법으로 구한다.

$$R_b(x, y) = P(x, y) \{M_h(x, y) + M_v(x, y)\} \quad (26)$$

이와 같이 얻어진 각 화소당 마스크 오차신호로부터 식 (27)를 통해 ringing현상의 화질열화 특성 R_d 을 정량적으로 평가한다.

$$R_d = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} R_b(x, y) \quad (27)$$

· Mosquito 잡음의 열화측정

일반적으로 동영상의 화질측정을 위해 시간적 대비함수를 고려해야 하지만 아직까지 시간적 대비함수에 대한 완전한 모델이 제시되지 못하고 있다. 또한 시간적 대비함수의 구현을 위해서는 수십 picture 분량의 메모리가 필요하며 이 경우 연산시의 지연시간이 길어지는 등의 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 공간영역상에 나타나는 시간적인 화질열화특성인 mosquito 잡음의 화질열화를 측정함으로써 인간이 가시적으로 느끼는 시간적 화질열화요인을 평가한다.

먼저 원영상에서 현재 picture와 이전 picture와의 시간적인 차영상을 식 (28)로부터 구한 후 이 차영상이 임계값이하일 경우인 화소위치에 대해 식 (29)로부터 각각 현재 picture와 이전 picture의 공간영역상의 왜곡의 가시도를 나타내는 $P_n(x, y)$ 와 $P_{n-1}(x, y)$ 와의 차신호를 측정한다.

$$F_d(n, x, y) = |u(n, x, y) - u(n-1, x, y)| \quad (28)$$

이때 n 은 picture의 순서를 나타낸 것이다.

$$T_e(n, x, y) = \begin{cases} |P_n(x, y) - P_{n-1}(x, y)| & \text{if } F_d \leq Th \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

이때 Th 는 인간이 영상의 밝기의 변화를 인지하는 문턱값이다. 이와 같이 얻어진 화소단위의 mosquito 잡음으로부터 식 (30)을 통해 시간적 화질열화특성 T_d 를 정량적으로 평가한다.

$$T_d = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} T_e(n, x, y) \quad (30)$$

(7) 최종적인 화질평가

주관적인 화질평가와 동일한 단일 등급척도를 표현하기 위해 블록기반 동영상 부호화에 의한 n 번째 picture의 화질 열화특성을 식 (31)과 같이 같은 선형조합으로 표현한다.

$$MPQR_n = a_0 + E_s(n) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i(n)w_i \quad (31)$$

여기서 a_0 는 열화의 요인이 없을 때의 화질을 나타내며 표 1의 5단계의 등급척도를 사용할 경우 5이다. 또한 k 는 측정된 화질열화요인의 수로서 본 실험에서는 총 5가지의 변수를 측정하며 a_i 는 E_g, B_d, C_d, R_d 및 T_d 등의 화질열화요인을, 그리고 w_i 는 각 화질열화요인의 가중치를 나타낸 것으로 본 실험에서는 3회에 걸쳐 실시된 11명의 MOS (Mean Opinion Score)와의 회귀모델을 통해 $w_1 = -7.31, w_2 = 2.63, w_3 = 0.009, w_4 = 9.86, w_5 = -12.46$ 을 사용한다.

평가에 사용되는 전체 동영상 시퀀스에 대해 최종적인 단일등급척도는 식 (35)와 같이 각 picture의 $MPQR_n$ 을 평균으로부터 얻어진다.

$$FMPQR = \frac{1}{F_n} \sum_{n=1}^{F_n} MPQR_n \quad (32)$$

여기서 F_n 은 평가에 사용된 총 picture 수를 나타낸 것이다. 또한 PSNR과의 직접적인 비교평가를 위해 식 (31)에서의 E_s 를 $E_l = 2^{|E_s|}$ 로 변환하여 식 (33)의 MPQPSNR를 산출한다

$$MPQPSNR_n = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{E_l^2} \right) \quad (33)$$

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 실험에 사용된 동영상

실험에 사용된 동영상은 CCIR601(720pels × 480lines)표준 테스트 시퀀스인 Mobile&Calendar 및 Popple 각 60 frame 씩이다. 또한 동화상 압축 부호화는 평가의 객관화를 위해 MPEG2 TM5 CBR(constant bit rate)을 사용하였으며 평가의 벤치마킹을 위한 주관적 화질평가는 11명의 영상부호화 분야의 전문가가 행하였으며 주관적 평가는 DSCQS(Double Stimulus Continuous Quality Scale)법을 사용하였다. 또한 실제 객관적 화질 평가의 연산은 휘도(Y)신호에만 적용하였다.

5.2 결과 고찰

그림 10, 11은 각각 1~15Mbps의 비트율로 MPEG2 부호화된 Mobile&Calendar 및 Popple 영상에 대한 본 연구에서 제안한 FMPQR과 ITS 그리고 주관적 MOS에 의해 평가된 결과를 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 ITS법은 비트율의 증가와 무관한 화질척도를 보이고 있으므로 MPEG 부호화에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제안한 객관적 화질등급척도인 FMPQR은 주관적 화질 평가와 RMS가 0.074로서 거의 대등한 결과를 나타내고 있다.

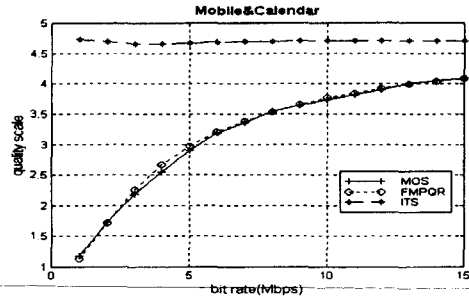


그림 10 Mobile&Calendar의 FMPQR
Fig. 10 FMPQR of Mobile&Calenda sequence

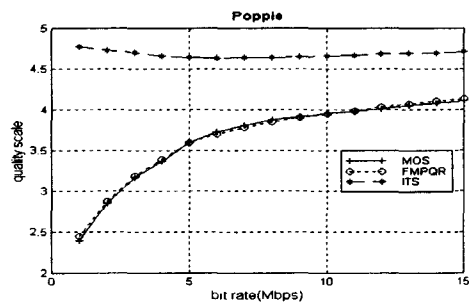


그림 11 Popple의 FMPQR
Fig. 11 FMPQR of Popple sequence

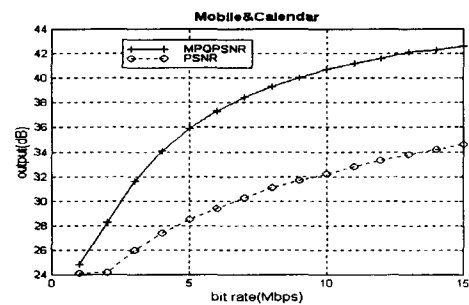


그림 12 Mobile&Calendar의 PSNR과 MPQPSNR
Fig. 12 PSNR and MPQPSNR of Mobile&Calendar

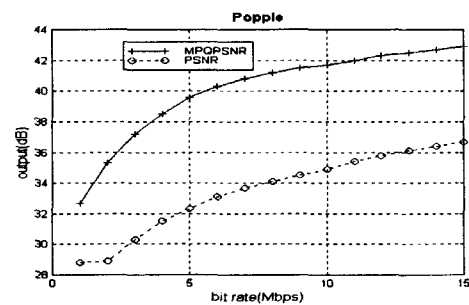


그림 13 Popple의 PSNR과 MPQPSNR
Fig. 13 PSNR and MPQPSNR of Popple

그림 12, 13은 Mobile&Calendar 및 Popple영상의 각 비트율에서의 PSNR 및 본 연구에서 제안한 MPQPSNR을 도시한 것으로서 그림에서 알 수 있듯이 PSNR은 각 영상 모두 비트율이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하나 MPQPSNR은 Mobile&Calendar 영상의 경우 10Mbps에서,

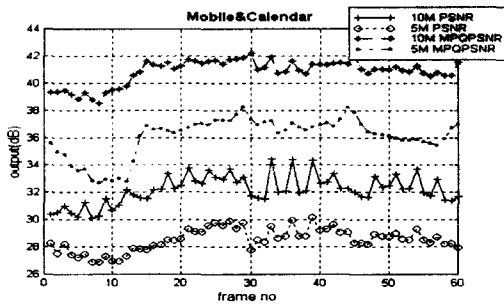


그림 14 Frame 당 Mobile&Calendar의 결과
Fig. 14 Results of Mobile&Calendar per frame

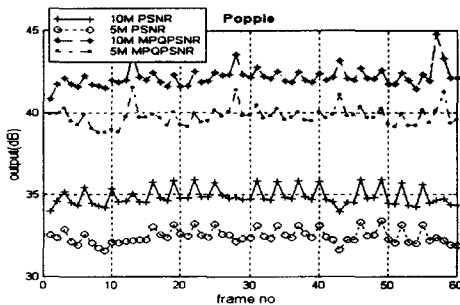


그림 15 Frame 당 Popple의 결과
Fig. 15 Results of Popple per frame

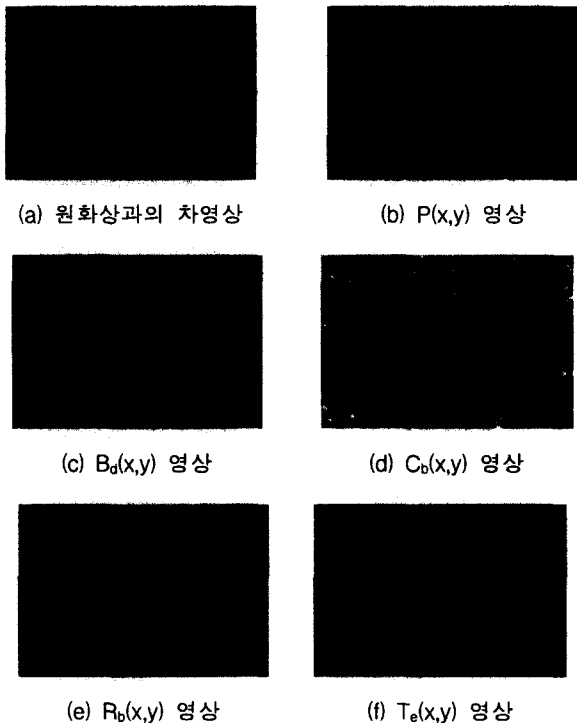


그림 16 왜곡 측정의 결과
Fig. 16 Results of distortion measurement

Popple 영상의 경우는 약 7Mbps에서 그 증가폭이 감소함을 알 수 있다. 이것은 영상에 따라 비트율의 증가 만큼의 화질이 증가하지 않는 포화영역이 존재함을 의미하는 것이다.

또한 그림 14와 15는 각 영상의 비트율이 5 및 10Mbps일 때 각 frame에 대한 PSNR 및 MPQPSNR을 도시한 것이다.

결과에서 알 수 있듯이 높은 PSNR을 갖는 frame이 그렇지 않은 frame에 비해 MPQPSNR이 떨어지는 경우가 있다. 이것은 PSNR이 왜곡에 대한 실제 인간의 화질인지와는 다를 수 있다는 것을 의미한다.

그림 16은 4Mbps로 부호화된 Mobile&Calendar 영상에 대한 본 논문에서 제안한 왜곡측정의 결과를 나타낸 것이다.

제시된 결과는 디스플레이를 위해 16~235의 계조도로 스케일링한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)의 원화상과 부호화영상의 차영상에서 복잡한 배경을 갖는 영역의 상당부분이 채널간/채널내 마스킹 효과에 의해 왜곡정도의 인식이 완화되며 또한 블록기반의 동화상이 갖는 독특한 화질열화의 특성도 제안된 모델에 의해 비교적 정확히 측정됨을 알 수 있다.

5. 결 론

기존의 객관적 화질평가의 척도로 사용되는 PSNR 측정법은 실제 측정치와 인간이 인지하는 가시적인 왜곡치와는 그 상관성이 낮으며 따라서 부호화된 디지털 영상신호의 정량적인 평가에 많은 문제점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 블록 기반의 동영상 부호화기, 특히 MPEG2 동화상 부호화기의 성능 검증에 필수적인 HVS기반의 객관적 화질평가 모델을 제시하였다. 즉 HVS 기반의 주파수 민감도와 채널간, 채널내의 마스킹에 의한 전반적인 왜곡의 가시도 측정 및 블록기반 동영상 부호화시 발생할 수 있는 구획화 현상, 번짐, ringing 그리고 시간적인 열화특성인 mosquito 잡음등의 국부적인 왜곡을 고려하여 각각의 왜곡특성에 대한 인간의 시각 민감도를 반영함으로써 주관적 화질평가와 대응한 성능을 보임을 실험을 통해 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] N. Farvandin, "Optimum Quantizer Performance for a Class of non-Gaussian Memoryless Source", IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 30, pp. 485-497, May 1984.
- [2] ISO/IEC13818-2, "Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio, Recommendation H.262 MPEG2", International Standard, 1995.
- [3] A. A. Webster, C. T. Coleen, "An Object Video Quality Assessment System based Human Perception", in SPIE Human Vision, Visual Processing and Digital DisplayIV, Vol. 1913, pp. 15-26, 1993.
- [4] S. Comes and B. Macq, "Human Vision Quality Criterion", SPIE Visual Communications and image Processing, Vol. 1360, pp. 2-7, 1990.
- [5] S. Daly, "The Visible Differences Predictor : An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity", in Proceedings of SPIE, Vol. 1616, pp. 2-15, 1992.
- [6] C. J. van den Branden Lambrecht and M. Hunt, "Quality Metric for Compressed Video Sequences", IEEE Transactions on Image Processing, 1996, submitted paper
- [7] J. Lubin and D. Fibush, "Sarnoff JND Vision Model", T1A1.5 Working Group Document #97-612, T1 Standards Committee, 1997.

[8] A. B. Watson, "The Cortex Transform : Rapid Computation of Simulated Neural Images", Computer Vision Graphics and Image Processing, Vol. 39, No. 3, pp. 311-327, 1987.

[9] A. Fiorentini and M. Jeanne, "Measurement of Differential Threshold in the Presence of Spatial Illumination Gradient", Atti Ford. Ronchi, Vol. 10, pp. 371-379, 1967.

[10] F. W. Campbell and J. G. Robson, "Application of Fourier Analysis to the Visibility of Grating", Journal of Physiology, Vol. 197, pp. 551-566, 1968.

[11] M. Yuen and H. R. Wu, "A Survey of Hybrid MC /DPCM/DCT Video Coding Distortions", Signal Processing, Vol. 70, No. 3, 1998.

[12] S. Comes and M. Mattavelli, "Postprocessing of Images by Filtering the Unmasked Coding Noise", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 8, No. 8, pp. 1050-1062, 1999.

[13] E. Peli, "Contrast in Complex Images", Journal of the Optical Society of America, Vol. 7, No. 10, pp. 2032- 2040, 1990.

[14] G. E. Legge and J. M. Foley, "Contrast Masking in Human Vision", Journal of the Optical Society of America, Vol. 70, No. 12, pp. 1458-1471, 1980.

[15] P. C. Teo and D. J. Heeger, "Perceptual Image Distortion", in Proceedings of SPIE, Vol. 2179, pp. 127-141, 1994.

[16] A. B. Watson and J. Solomon, "Model of Visual Contrast Gain Control and Pattern Masking", Journal of the Optical Society of America, Vol. 14 pp. 2379-2391, 1997.



홍민석(洪敏碩)

1966년 3월 28일 생. 1988년 연세대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~1996년 삼성전자 중앙연구소 근무. 1997년~현재 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : 361-2768

E-mail : mshong@cyber.yonsei.ac.kr



박강서(朴康緒)

1973년 2월 10일 생. 1996년 연세대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : 361-2768

E-mail : pks@cyber.yonsei.ac.kr

김현술(金賢述)

전기학회논문지 제48A권 제4호 참조

Tel : 361-2768

E-mail : khs@cyber.yonsei.ac.kr

박상희(朴相暻)

전기학회논문지 제48A권 제4호 참조

Tel : 361-2768

E-mail : psh@cyber.yonsei.ac.kr

저 자 소개



정태윤(鄭泰允)

1964년 11월 21일 생. 1987년 연세대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~1996년 삼성종합기술원 근무. 1996년~현재 삼성전자 중앙연구소 선임연구원. 1996년~현재 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : (0331) 200-4795, Fax : (0331) 200-3160

E-mail : tychung@samsung.co.kr