

엔트로피 제한 Lattice 벡터 양자기를 이용한 적응적 동영상 부호화 기법

正會員 李鍾碩*, 李商郁**

An adaptive image sequence coding scheme employing
the entropy constrained lattice vector quantizer

Jong Seok Lee*, Sang Uk Lee** Regular Members

要 約

본 논문에서는 엔트로피 제한 lattice 벡터 양자기(entropy-constrained lattice VQ : ECLVQ)를 이용한 적응적 동영상 부호화 기법을 제안한다. ECLVQ는 규칙적인 구조를 갖는 lattice VQ에 엔트로피 제한 양자화 기법을 결합한 양자화 기법이다. 또한 엔트로피 부호화시 전송률 및 벡터 차수에 따라 기하 급수적으로 증가하는 가변 길이 부호를 효율적으로 저장하기 위해 lattice 벡터의 크기 정보와 부호 정보를 분리하는 코드북 감축 기법에 대한 전송률-왜곡 성능을 검토해 본다. 제안된 동영상 부호화 기법은 시간상 및 공간상의 잉여 정보는 각각 움직임 보상 부호화 기법 및 DCT 변환을 이용하여 감축한다. 양자화는 차영상 신호의 통계적인 특성에 적합하도록 피라미드 형태의 코드북을 갖는 ECLVQ로 수행한다. 부호화 성능을 보다 향상시키기 위해서 몇가지 적응적 부호화 기법을 결합한다. 실제 영상 데이터에 대한 모의 실험 결과, 제안된 동영상 부호화 기법은 H.261에 비해 움직임이 적은 영상에서는 두 시스템이 비슷한 성능을 보인 반면 움직임이 비교적 많은 영상에서는 대략 0.5~2.0dB 좋은 결과를 보였다.

ABSTRACT

In this paper, an adaptive image sequence coding technique employing the entropy-constrained lattice VQ(ECLVQ) is proposed. The ECLVQ is a regular structure VQ constructed by combining the lattice VQ with the entropy-constrained quantization scheme. In order to reduce the size of VWL codebook, which grows exponentially with the rate and dimension, the lattice code-words are decomposed into its magnitude and sign information. It is also shown analytically that the codebook reduction scheme does not degrade the rate-distortion performance. In the proposed image sequence coding scheme, the spatial and temporal redundancies are removed by the DCT and the motion compensation, respectively. The ECLVQ with the pyramidal shaped codebook

*LG 전자 기술원 지능 정보 부문

**서울대학교 제어계측공학과 신호처리 연구실

論文番號 : 95238-0712

接受日字 : 1995年 7月 12日

is employed to take the statistics of the displaced frame difference image into consideration. In order to improve the performance further, several adaptation schemes are also employed. From the computer simulation results, it is shown that the proposed image sequence coder provides about 0.5~2.0dB gain over the H.261 on the images containing relatively large motion. But the performance is comparable to that of the H.261 on the images containing relatively small motion.

1. 서 론

시간에 따라 연속적으로 변화하는 동영상의 효율적인 부호화는 낮은 전송률을 요하는 영상 전화(video phone), 화상 회의(video conference)로부터 고품질의 화질을 요하는 디지털 VCR, HDTV에 이르기까지 다양하게 요구되고 있다^[1]. 그런데 동영상 데이터에는 한 영상 프레임에 존재하는 공간상의 잉여 정보 뿐만 아니라 연속된 프레임간에도 많은 시간상의 잉여 정보가 존재한다. 공간상의 잉여 정보는 이산 여현 변환(discrete cosine transform : DCT)^[2]과 같은 변환 부호화 방식 또는 대역 분할 필터 방식^[3]으로 제거가 가능하다. 시간상의 잉여 정보 감축은 인접한 프레임간의 정보를 이용하여 현재의 프레임에 대한 움직임 정보를 추정하여 예측한 프레임과 현재 프레임과의 차 신호를 부호화하는 움직임 보상 부호화(motion compensated coding : MCC) 기법을 주로 사용한다^[4].

표준 동영상 부호화 기법인 H.261^[5], MPEG^[6] 등과 같은 동영상 부호화 기법은 다음과 같이 크게 세 부분으로 이루어진다. 시간상 및 공간상에 존재하는 잉여 정보를 감축하는 기법, 잉여 정보가 감축된 신호를 양자화하는 기법, 그리고 양자화된 정보를 효율적으로 전송하기 위한 기법 등이다. 따라서 효율적인 동영상 부호화를 수행하기 위해서는 이들 각 기법들을 가장 적절히 적용할 필요가 있다. 그런데 이들의 양자화 기법을 살펴보면 우수한 성능을 갖는 벡터 양자화 기법(vector quantization : VQ)^[7]을 사용하지 못하고 있다. 일반적으로 인접한 화소 사이의 상관성을 이용하는 VQ는 약 0.5bpp 이하의 저 전송률 압축시 스칼라 양자화 기법을 비롯한 다른 부호화 기법에 비해 부호화 복잡도는 높지만 효율적임이 알려져 있다. 그런데 동영상 부호화에서는 수 많은 연속 프레임 데이터를 부호화하여야 하기 때문에 부호화 복잡도, 즉 수행 시간이 문제가 된다. 이러한 이유로 표준 동영상 부호화 기법에서는 VQ를

사용하지 못하고 DCT 변환된 계수들에 가중치를 부여한 후 균일 스칼라 양자기(uniform scalar quantizer)를 사용하여 양자화를 수행한다^[5,6].

그러나 보다 좋은 성능을 얻기 위해서 동영상 부호화에 VQ를 적용한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. W.T. Chen 등^[8]은 FSVQ(finite-state vector quantization)를 이용하여 부호화를 수행하였다. 그런데 FSVQ는 성능이 우수한 반면 부호화 복잡도가 아주 높다. 이러한 문제점 때문에 VQ는 최적의 성능은 얻지 못하더라도 부호화 복잡도를 감소시키는 형태로 적용이 이루어지고 있다. [9]에서는 부호화 복잡도를 감소시키기 위해 TSVQ(tree-structured vector quantization)를 이용하여 부호화를 수행하여 좋은 결과를 얻었다. 또 하나의 기법은 규칙적인 구조로 인하여 부호화 복잡도 측면에서 잇점을 갖는 lattice VQ^[7]을 동영상 부호화에 적용하는 기법이다^[10,12]. 기본적으로 lattice VQ는 균일 양자기이기 때문에 소스의 확률 밀도 함수를 함유하는 가변 길이 부호화 기법이 결합되는 형태를 이룬다. 그런데 이들 기법들은 모두 lattice VQ를 먼저 수행한 후 엔트로피 부호화 기법인 가변 길이 부호화를 수행한다. 하지만 양자화시 왜곡치와 엔트로피를 함께 고려하는 엔트로피 제한 양자화 기법을 사용하면 보다 우수한 성능을 얻을 수 있다고 알려져 있다^[13]. 엔트로피 제한 양자기의 부호화 효율의 향상은 엔트로피 제한 양자기에서의 목적 함수가 기존의 Lloyd-Max 양자기^[14]와 다르다는 사실과, 주어진 전송률에서의 최적의 양자화 단계의 갯수가 Lloyd-Max 양자기의 양자화 단계의 갯수보다 커진다는 사실에 기인한다^[13,15]. 따라서, 본 논문에서는 [16]에서 제안된 lattice VQ의 양자화 과정에서 왜곡치와 엔트로피를 함께 고려하는 엔트로피 제한 lattice 벡터 양자화(entropy-constrained lattice VQ : ECLVQ)를 이용하여 동영상을 부호화하는 기법을 제시한다. [16]에서 정지 영상에 대해 성능을 평가해 본 결과 ECLVQ는 표준화 기법인 JPEG 보다

우수한 성능을 보였고, 부호화 복잡도가 낮으면서도 엔트로피 제한 벡터 양자기(entropy constrained VQ : ECVQ) [13]와 유사한 성능을 보였다.

또한, lattice VQ는 코드북을 저장할 필요가 없지만 lattice VQ에 엔트로피 부호화 기법이 결합되기 위해서는 lattice VQ의 각 코드 벡터들의 부호화 길이 정보를 저장해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 lattice VQ의 코드북 감축 기법이 전송률-왜곡치 성능 측면에서 손실이 없음을 해석적으로 증명하였다.

본 논문에서는 ECLVQ를 이용하여 동영상 부호화 시스템을 구성하고 효과적으로 부호화할 수 있는 방안을 살펴본다. 특히 코드북 감축 기법을 적용하여 기존의 VQ 기법에서는 얻기 어려운 고 전송률에서 고품질을 얻을 수 있도록 한다. 또한 움직임에 따라 또는 영상의 특성에 따라 국부적으로 성격을 달리하는 데이터들에 보다 효과적으로 적용할 수 있는 방안을 제시한다.

2. ECLVQ

양자기의 기본 목표는 정보량을 최소화시키면서 복원 성능을 향상시키는 것이다. 그런데 전송률-왜곡치 이론에 의하면 최적 양자기의 성능은 양자기의 양자화 단계로 표시되는 것이 아니라 엔트로피로 표시된다 [17]. 또한 엔트로피 부호화 기법에 의한 가변 길이 부호화는 고정 길이 부호화에 비해 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다 [15]. 이러한 점들을 고려하여 전송률과 성능간의 관계를 충분히 활용할 수 있는 엔트로피 제한 양자화 기법이 제안되었다 [13, 16]. 엔트로피 제한 양자화 기법은 양자기에 의해 산출되는 코드들의 엔트로피를 일정량으로 제한할 때 양자화 왜곡을 최소화시키도록 설계하는 양자화 기법이다. 엔트로피 제한 양자기는 Lloyd-Max 양자기와는 달리 양자기의 설계 과정에서 직접 엔트로피를 고려하기 때문에 보다 효율적인 양자기의 설계가 가능해진다. 그러나 이러한 엔트로피 제한 양자화 기법을 VQ에 적용한 ECVQ는 좋은 성능에도 불구하고 부호화 복잡도가 매우 높은 단점이 있다. 이러한 이유로 부호화 복잡도 측면에서 장점을 갖는 lattice VQ에 엔트로피 제한 양자화 기법을 결합시킨 ECLVQ 기법이 [16]에서 제안되었다.

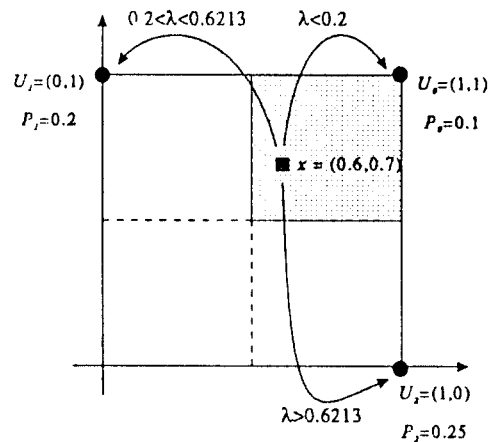
ECLVQ는 lattice VQ를 수행한 후 가변 길이 부호화를 수행하는 기존의 기법과는 달리 양자화 과정에서

왜곡치 뿐만 아니라 엔트로피도 함께 고려하는 기법이다. 이러한 ECLVQ의 목적 함수는 양자화 과정에서 발생하는 왜곡치 D 와 양자화된 코드 벡터로부터 발생하는 엔트로피 R 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$J = D + \lambda \cdot R$$

$$= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{n} (\|x_i - \tilde{x}_i\|^2 + \lambda \cdot \|c\|), \quad (1)$$

여기서 x_i 는 입력 벡터, \tilde{x}_i 는 복원 벡터, L 은 부호화하고자 하는 벡터의 갯수이고 n 은 벡터의 차원이다. 그리고 c 는 양자기의 출력 벡터의 가변 길이 부호의 비트량을 의미한다. 식 (1)을 살펴 보면 기존의 lattice VQ는 양자화 왜곡치만을 최소화하는 스케일 값을 얻게 되므로 목적 함수는 $\lambda=0$ 인 경우가 된다. 그러나 ECLVQ에서는 적당한 λ 값을 가짐으로써 왜곡치와 엔트로피를 함께 고려하는 형태가 된다. 이와 같이 왜곡치와 엔트로피의 가중 평균으로 이루어지는 목적 함수를 최소화하는 스케일 값을 얻음으로써 ECLVQ가 수행되게 된다.



$x = (0.6, 0.7)$

	$u_0 = (1,1)$	$u_1 = (0,1)$	$u_2 = (1,0)$
	$p_0 = 0.1$	$p_1 = 0.2$	$p_2 = 0.25$
	$c_0 = 3.32$	$c_1 = 2.32$	$c_2 = 2.00$
	$d_0 = 0.25$	$d_1 = 0.45$	$d_2 = 0.65$
$\lambda = 0.1$	$J_0 = 0.58$	$J_1 = 0.68$	$J_2 = 0.85$
$\lambda = 0.3$	$J_0 = 1.25$	$J_1 = 1.15$	$J_2 = 1.25$
$\lambda = 0.7$	$J_0 = 2.58$	$J_1 = 2.08$	$J_2 = 2.05$

그림 1. ECLVQ의 예

그림 1을 이용하여 2 차원상에서의 ECLVQ의 개념을 살펴보겠다. 입력 벡터가 $\underline{x} = (0.6, 0.7)$ 이라 하면 정수 lattice⁽¹⁸⁾의 경우 lattice VQ의 출력 벡터는 정수 벡터로 양자화되어 $\underline{u}^0 = (1, 1)$ 이 된다. 이 경우는 ECLVQ에서 전송률이 고려되지 않는 경우, 즉, $\lambda = 0$ 인 기존의 lattice VQ의 출력 벡터이다. 코드 벡터 \underline{u}^0 , \underline{u}^1 , \underline{u}^2 의 확률값이 각각 p_0 , p_1 , p_2 로 서로 다르게 주어졌다고 가정하자. 이 경우에 각각의 목적함수 J_0 , J_1 , J_2 를 구해보면 $\lambda < 0.2$ 일 때 출력 벡터는 $\underline{u}^0 = (1, 1)$ 이 된다. 그러나 λ 가 증가하여 $0.2 < \lambda < 0.6213$ 이 되면 전송률에 비중이 두어져서 확률이 보다 높은 $\underline{u}_1 = (0, 1)$ 로 양자화된다. $\lambda > 0.6213$ 일 경우는 $\underline{u}_2 = (1, 0)$ 로 양자화됨을 볼 수 있다. 결론적으로, λ 가 증가할수록 양자화 왜곡치는 다소 증가하더라도 보다 적은 비트로 양자화가 수행된다.

3. 코드북 감축 기법의 이론적 해석

일반적으로 양자기에 엔트로피 부호화 기법이 결합되면 각 코드 벡터들의 가변 길이 정보를 저장해야 하므로 코드북이 필요하고 이 크기는 제한이 되어야 한다. 이에 따라 [16]에서 벡터의 크기 정보와 부호 정보를 분리하여 부호화하는 코드북 감축 기법을 제안하였다. 이 기법은 벡터내 각 원소의 부호를 제거하여 양의 값을 취했을 때 같아지는 벡터들을 모두 한 그룹으로 모으고, 이들의 대표 벡터는 모든 원소가 양수인 양수 벡터로 설정하여 가변길이 부호화를 수행하고, 그룹내에서는 각 원소의 부호 정보에 한 비트씩 할당하는 고정 길이 부호화를 수행한다. 이제 [16]에서 제안된 코드북 감축 기법이 전송률-왜곡치 성능 측면에서 성능 저하가 없음을 해석적으로 분석하겠다. 코드북 감축 기법은 왜곡치에 대한 성능 측면에서 양의 벡터인 대표 벡터 및 각 원소에 할당된 부호 비트에 의해 벡터를 완벽하게 복원할 수 있기 때문에 왜곡치의 저하는 없다. 코드북을 분리하는 과정에서 엔트로피의 증가만 없다면 전송률-왜곡치 성능 측면에서 성능 저하가 없다고 할 수 있다. 이를 위해 영상 부호화에 많이 사용하는 Gaussian 및 Laplacian 소스에 대해서 원래의 코드북과 감축된 코드북의 엔트로피를 측정하여 엔트로피의 증가가 없음을 살펴보겠다.

먼저 n 차원 벡터 \underline{x} 의 각 원소 x_i 가 평균이 0 이고 분산이 1 인 iid Gaussian 및 Laplacian 불규칙 변

수라 하면, 이들의 joint pdf는 각각 다음과 같이 주어진다⁽¹⁹⁾.

$$f(\underline{x}) = H_{i=1}^n f(x_i) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

$$f(\underline{x}) = H_{i=1}^n f(x_i) = 2^{-\frac{n}{2}} e^{-\sqrt{2} \sum_{i=1}^n |x_i|} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 살펴보면, 두 식 모두 $f(\underline{x})$ 는 x_i 의 부호에 무관하여 $f(\underline{x}) = f(-\underline{x})$ 임을 쉽게 알 수 있다. 따라서, 정보량이 클 경우 크기 정보가 같은 벡터들의 Voronoi 영역의 확률값은 모두 같아진다고 가정할 수 있다.

이를 이용하여 크기 정보와 부호 정보를 분리하여 부호화하는 경우와 분리하지 않는 경우의 코드북의 엔트로피를 각각 구해보자. Lattice가 n 차원상에서 코드 벡터가 L 개가 되도록 그림 2와 같이 truncation 될 때, 한개의 사분면에 존재하는 코드 벡터의 수를 M 이라 하고, 사분면의 수를 N 이라 하면 $N = 2^n$ 이 되고, $L = M \cdot N$ 이 된다.

한 코드 벡터의 Voronoi 영역을 C_j 라 하고, C_j 가 코드가 될 확률을 $p_j = \Pr\{X \in C_j\}$ 라 하자. 이때 j 는 대표 벡터의 번호, i 는 사분면의 번호이다.

코드북의 크기 정보와 부호 정보를 분리하지 않은 원 코드북의 엔트로피 $H(X)$ 는 다음과 같다.

$$H(X) = - \sum_{j=1}^L p_j \log_2 p_j \quad (4)$$

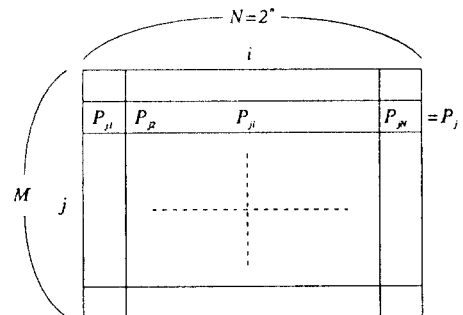


그림 2. 크기 $L=M \cdot N$ 의 코드북

그런데 대표 벡터 확률 p_j 는 각 사분면간의 대응 코드 벡터들의 확률값 p_j 와 모두 같으므로 식 (4)를 대표 벡터 확률 p_j 로 표현하면 다음과 같다.

$$H(X) = -2^n \sum_j p_j \log_2 p_j \quad (5)$$

다음으로, 크기 정보와 부호 정보를 분리하였을 경우의 엔트로피의 측정을 위해, 먼저 양의 사분면에 존재하는 대표 벡터들의 엔트로피, 즉, 크기 정보량 $H(Y)$ 를 측정해 보자. 각 사분면에서 서로 대응되는 코드 벡터들의 확률값이 p_j 로 모두 같으므로 대표 벡터들의 확률값을 이들의 합으로 표현하면 $2^n \cdot p_j$ 가 된다. 따라서 $H(Y)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} H(Y) &= -\sum_j (2^n p_j) \log_2 (2^n p_j) \\ &= -\sum_j 2^n p_j \log_2 p_j - n \sum_j 2^n p_j \\ &= -2^n \sum_j p_j \log_2 p_j - n \sum_j \sum_{\mu=1}^{2^n} p_{\mu} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 첫번째 항은 $H(X)$ 이고, 두번째 항의 확률의 합은 자체 코드북의 확률값이므로 1이 되어 $H(Y)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} H(Y) &= -2^n \sum_j p_j \log_2 p_j - n \\ &= H(X) - n \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5)와 식(7)을 살펴보면 분리하였을 때의 크기 정보량 $H(Y)$ 에 사분면을 표현하기 위한 비트, 즉 부호 정보량 n 을 더해주면 분리하지 않았을 때의 엔트로피 $H(X)$ 와 같아짐을 알 수 있다. 결론적으로, 코드북을 분리하는 과정에서 엔트로피의 증가가 없기 때문에 전송률-왜곡치 성능 측면에서 성능 저하가 없음을 알 수 있다.

4. ECLVQ 동영상 부호화 기법

본 절에서는 ECLVQ를 이용한 동영상 부호화 기법을 제안한다. 제안하는 ECLVQ 동영상 부호화 기법은 그림 3과 같이 도시할 수 있고 잉여 정보 감축 기법, 양자화 기법 및 전송 부호 처리 기법 등의 세가지 부분으로 이루어진다. 먼저 영상이 입력되면 밝기 성분 Y와 색도 성분 U, V로 분리된 후 입력 영상과 움직임이 추정된 영상과의 차 신호를 얻는다. 움직임 정보를 얻는 대상은 Y 프레임이며 U 및 V 프레임에 대해서는 Y 프레임을 기준으로하여 얻어진 정보를 이용한다. 차 신호 영상에 남아 있는 공간상의 잉여 정보는 DCT 변환을 수행하여 제거한 후 양자화가 이루어진다. 양자화는 제안된 ECLVQ를 사용하여 수행하고 보다 성능을 향상시키기 위해 다음 절에서 제시하는 영상 신호의 국부적인 특성에 따른 적응적 부호화를 수행한다. 양자기의 출력 코드

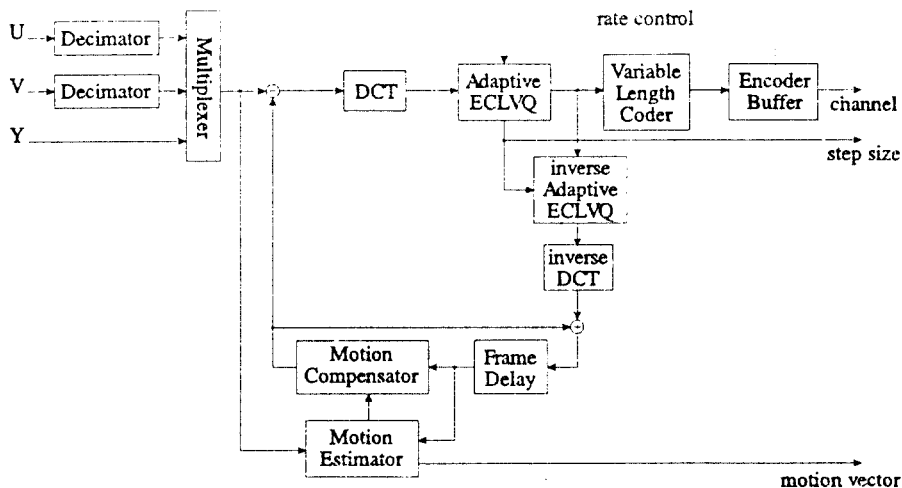


그림 3. ECLVQ를 이용한 동영상 부호화기

들은 가변 길이 부호화가 수행된 후 부가 정보들과 함께 전송이 이루어진다. 한편 양자화된 신호는 다시 역 양자화 과정과 역 DCT 변환 과정에 의해 영상이 복원된 후 움직임 추정이 이루어진다.

그런데 효과적인 동영상 신호의 양자화를 수행하기 위해서는 먼저 동영상 신호의 특성을 살펴봐야 한다. 본 논문은 전송한 바와 같이 움직임 보상된 차 신호에 DCT 변환을 수행하는 기법을 인여 정보 감축 기법으로 사용한다. 그런데 움직임 보상된 차 영상 신호는 원 영상의 특성 및 움직임에 따라 변화가 심한 특성을 지니므로 해석이 쉽지 않다. 그러나 일반적인 차 영상 신호의 특성은 전체적으로 영의 주변에 집중되는 확률 분포를 보이기 때문에 차 영상 신호에 대해 DCT 변환을 수행할 경우 Laplacian 확률 밀도 함수 모델로 근사화될 수 있다고 알려져 있다²⁰⁾. 제안하는 동영상 부호화 기법의 양자기는 이와 같이 Laplacian 확률 밀도 함수로 근사되는 신호를 양자화하므로 피라미드 형태의 코드북을 갖는 lattice VQ¹⁹⁾로 양자기를 구성하는 것이 유리하다. 또한 정수 lattice [18]는 벡터 차원이 4 차 이상이면 그 벡터 차원에서 가장 우수한 성능을 보이는 lattice와 유사한 성능을 보이기 때문에²¹⁾ 본 논문에서는 정수 lattice를 사용한다.

한편 lattice VQ를 수행하기 위해서는 양자화 수행 단위를 먼저 설정해야 한다. 양자화 수행 단위는 다수의 표준 동영상 부호화 기법에서 사용하듯이 움직임 추정 단위 블럭에 근거한 매크로 블럭 단위로 수행^{16,6)}하는 것이 유리하다. 왜냐하면 움직임 추정, 전송률 제어 등과 쉽게 연계시킬 수 있기 때문이다. 이때 몇개의 변환 블럭이 모여 형성되는 매크로 블럭에 대해 VQ를 수행할 경우 블럭내 및 블럭간의 인여 정보를 활용하는 방안을 강구할 필요가 있다. 양자화 대상인 차 영상 신호는 움직임 보상 부호화에 의해 시간상의 인여 정보가 제거된 상태이고 DCT 변환을 수행함으로써 블럭내에서도 상관도가 제거된 상태이다. 그런데 VQ의 성능이 벡터 성분간의 상관도의 함수임⁷⁾을 감안하면 상관도가 제거된 상태에서 벡터를 형성하기 보다는 매크로 블럭내에서 Mandala 블럭¹²⁾을 형성함으로써 블럭간의 상관 관계를 활용할 수 있다. Mandala 블럭은 DCT 변환된 각 블럭 마다 같은 주파수를 갖는 계수들을 모아 블럭으로 만들기 때문에 각 블럭은 유사한 통계적 특성을 갖게 되어 벡터내에서 성분간의 상관도를 높여 VQ를 수행함으

로써 성능 향상을 도모한다.

밝기 성분 Y와 색도 성분 U, V의 양자화는 전송률 배분 및 조절을 위해 분리하여 부호화를 수행한다. 즉 벡터의 형성은 그림 4와 같이 4 개의 Y 성분에 대해서는 매크로 블럭내에서의 Mandala 블럭을 형성하고 U, V 성분은 한 블럭내에서 인접한 DCT 계수들을 모아 벡터를 형성한다.

코드북의 크기는 VQ의 성능이 코드북의 크기가 증가함에 따라 향상되는 점을 감안하여 가능한 크게 설정한다. 기존의 비구조적인 VQ는 코드북의 크기가 증가함에 따라 부호화 복잡도가 기하 급수적으로 증가하는 단점이 있어 주로 저 전송률 부호화에 적용이 되고 있다. 그러나 ECLVQ는 코드북의 증가에 따른 부호화 복잡도의 증가 문제는 없기 때문에 코드북의 크기는 단지 부호화기의 구현시 요구되는 기억 용량 및 가변 길이 부호 정보를 얻기 위한 훈련 과정에 의해 제한이 된다. 따라서 이러한 제한을 가급적 줄이고 코드북을 크게 하기 위해 코드북 감축 기법을 적용한다. 이와 같이 양자기를 구성할 경우 기존의 VQ 기법으로는 얻기 어려운 고 전송률에서의 VQ의 이득을 얻을 수 있다. 이제 ECLVQ의 가변 길이 코드북을 효과적으로 얻을 수 있는 방안을 살펴보자.

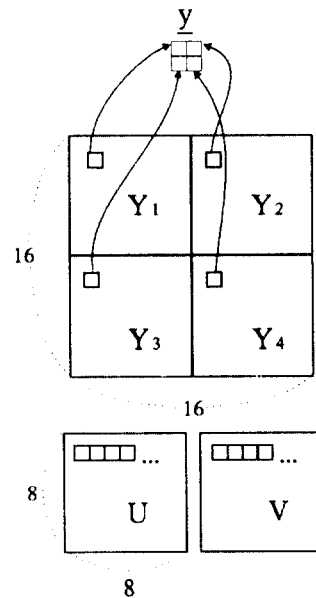


그림 4. 매크로 블럭내에서의 벡터의 형성

비균일 소스를 균일 양자기로 양자화를 수행하려면 소스의 통계적인 특성이 양자기와 결합되는 가변 길이 부호 정보에 적절히 함유되도록 설계되어야 한다. 본 논문에서는 ECLVQ의 가변 길이 코드북을 가급적 크게 하기 위해 코드북 감축 기법을 적용하므로 크기 정보와 부호 정보를 분리하여 크기 정보만으로 코드북을 훈련시킨다. 코드북 감축 기법은 [16]에서 제시하였듯이 코드북의 크기를 $\frac{1}{10}$ 이상으로 감축시키기 때문에 훈련 벡터의 양 및 훈련 시간도 그만큼 줄여준다. 소스의 특성을 충분히 함유하기 위해서는 λ 값에 의한 전송률과 왜곡치의 적절한 가중치에 의해 몇 차례 반복 훈련을 수행해야 한다. 먼저 엔트로피 부호화를 수행하지 않고 양자화 왜곡치만을 최소화시키는 lattice VQ를 수행하여 1 차적인 코드 벡터들의 분포를 파악한다. 이는 ECLVQ에서 $\lambda = 0$ 인 경우로 코드북이 클 경우 1.0bpp 이상의 높은 전송률에서 최적의 성능을 갖게 된다. 이제 저 전송률에서의 성능을 얻기 위해 λ 값을 증가시켜 전송률을 낮추면서 코드북을 훈련시킨다.

이 때는 직전 훈련 과정에서 얻어진 코드 벡터들의 분포로부터 얻어진 가변 길이 부호의 정보를 이용하여 ECLVQ를 수행한다. 서너 차례의 반복 훈련에 의해 원하는 대역에서의 코드북을 얻을 수 있다.

5. 적응화 기법

동영상 부호화시 차 영상 신호는 움직임의 크기 및 방향에 따라 영상의 부분적인 특성이 매우 다르다. 따라서 영상의 국부적인 특성에 따라 양자기를 적응적으로 적용하면 보다 효과적인 양자화가 가능해지므로 본 절에서는 이에 대한 방안을 살펴본다. 양자기의 적응화는 양자화의 기본 단위인 매크로 블럭 단위로 ECLVQ를 수행하고 이로부터 발생되는 부가 정보를 전송하는 기법을 사용한다. 이와 같은 기법은 양자화 및 적응화를 연계시킴으로써 양자기의 제어 및 부가 정보의 전송을 쉽게 할 수 있는 측면이 있다. 매크로 블럭내에서의 적응화를 위해 다음과 같은 사항들이 고려된다.

· 양자기의 스케일 값

일반적으로 lattice VQ의 최적의 스케일 값은 입력 소스의 에너지의 크기에 관계된다 [19]. ECLVQ의 경우에도 소스의 에너지와 정보량에 따라 통계적인 스케일값

을 얻을 수도 있으나 본 논문에서는 영상의 국부적인 특성에 보다 적합하도록 스케일값을 얻고 있다. 그런데 이 스케일값들은 높은 정밀도를 요하지 않고 또 인접 매크로 블럭의 스케일값들과도 상관도가 높다. 따라서 부가 정보로 전송되어야 하는 이 스케일값들은 움직임 벡터의 부호화와 같이 인접 매크로 블럭의 스케일값과의 차이에 대해 가변 길이 부호화를 수행한다.

· 코드 벡터 주사 방법

양자화를 위해 움직임이 보살된 차 영상 신호는 DCT 변환이 수행된다. 그런데 DCT는 주파수의 성분에 따라 신호를 모으는 성질이 있기 때문에 차 영상 신호의 주파수 성분에 따라 신호들이 한 곳에 집중된다. 이러한 성질 때문에 DCT를 사용하는 대부분의 동영상 부호화 시스템에서는 저주파수 성분을 시작으로 하는 zigzag 주사 방식을 사용한다 [5,6]. 그러나 매크로 블럭내에 움직임의 가장자리(edge)가 존재하면 고주파수 성분이 한 쪽으로 모이는 현상이 발생한다. 이 때 에너지가 큰 부분이 모여 있는 곳을 모아서 코드 벡터를 주사하면 보다 많은 영 벡터들의 모임을 만들 수 있어 영 벡터의 run-length 부호화 [22] 측면에서 유리해진다. 따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 주파수 성분의 특성에 따른 4가지 주사 방식을 도입한다. 이외에도 여러 방법으로

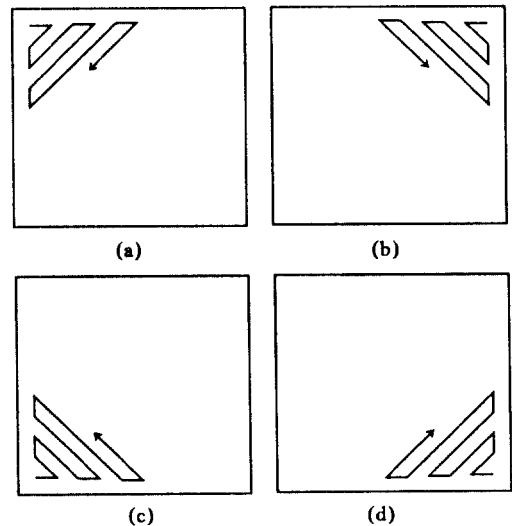


그림 5. 코드 벡터들의 주사 방법

주사할 수 있으나 부가 정보의 전송에 대한 부담 때문에 두 비트를 할당하는 4 가지만을 사용한다. 그런데 ECLVQ에서는 최적의 스케일값을 얻는 양자화 과정에서 정보량을 측정할 때도 각각의 주사 방식을 모두 사용할 수 있으나 실험 결과 큰 이득이 없기 때문에 후처리 방식으로 적용한다. 즉 양자화 과정에서는 그림 5의 (a)와 같이 저주파수 성분에서 시작하는 주사 방식으로 먼저 양자화를 수행한 후, 양자화된 코드 벡터들에 대해 각각의 주사 방식을 적용하여 전송량을 측정해 보아 최소의 전송량을 갖는 주사 방식을 선택한다.

· 영 코드 벡터의 Voronoi 영역의 가중치 부여 기법

움직임 추정 단위인 한 마크로 블록내에는 움직임이 매우 큰 경우와 매우 작은 경우가 공존할 수 있다. 그런데 한 마크로 블록에 대하여 양자화를 수행하므로 움직임이 작은 대부분의 코드 벡터들은 영 벡터가 된다. 양자화된 벡터들 중에 영 벡터가 많은 경우에는 영 벡터를 각기 부호화하기 보다는 연속된 영 벡터를 함께 부호화하는 영 벡터 run-length 부호화 기법이 효율적이기 때문에 표준 영상 부호화 기법등에서 사용하고 있다. 영 벡터 주변에 에너지가 작은 벡터가 존재하는 경우 강제로 영 벡터로 만들어 연속된 영 벡터로 해주면 왜곡치는 약간 증가하더라도 전송률을 줄일 수 있기 때문에 전송률-왜곡치 성능 측면에서 이득을 얻을 수 있다. 특히 동영상 부호화의 경우에는 정지 영상의 경우에 비해 영 벡

터의 수가 훨씬 많기 때문에 가변 길이 부호 정보에서 영 벡터의 비중이 매우 높다. 따라서 본 논문에서는 영 벡터에 가중치를 쉽게 부여하기 위해 영 벡터의 Voronoi 영역의 크기를 조절하는 기법을 적용한다. 그림 6에 2 차원상에서 문턱값의 크기에 따라 영 벡터의 Voronoi 영역의 크기를 변화시키는 형태를 제시하였다. 그림 6에서 원래의 영 벡터 Voronoi 영역은 -0.5에서 0.5 사이의 값이 된다. 그러나 양자기를 수정하여 그림과 같이 $-Z_{th}$ 에서 Z_{th} 사이값이 영 벡터가 되도록 Voronoi 영역을 확대하여 영 벡터에 대해 가중치를 부여한다.

6. 모의 실험 및 검토

본 절에서는 적용적 ECLVQ 동영상 부호화기의 성능을 평가하기 위한 모의 실험을 수행한다. 엔트로피 부호화를 위한 가변 길이 정보의 학습 영상으로는 움직임이 많은 352×240 화소 크기의 Flower Garden 영상 및 움직임이 비교적 적은 352×288 화소 크기의 Salesman 영상들에 다양한 λ 값을 부여하여 전송률을 변화시켜 사용하였다. 컬러 영상은 Y:U:V 성분이 4:1:1 인 Common Intermediate Format(CIF) 형식을 사용하였다. 움직임 정보를 위한 마크로 블록은 인접한 변환 블록 4개를 결합하여 16×16 화소 크기로 하였다. 휘도 성분인 Y 성분은 16×16 화소 크기의 마크

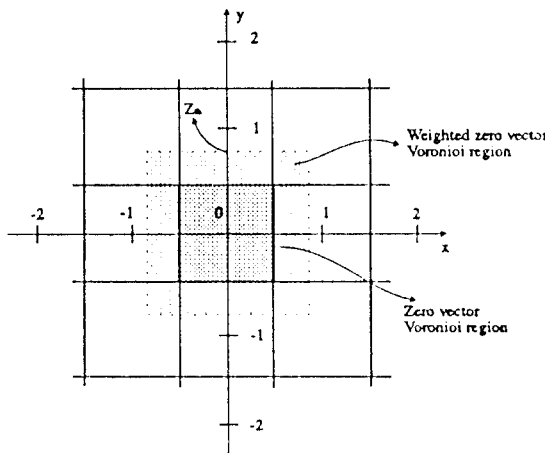


그림 6. 영 벡터 Voronoi 영역 가중치 부여 기법

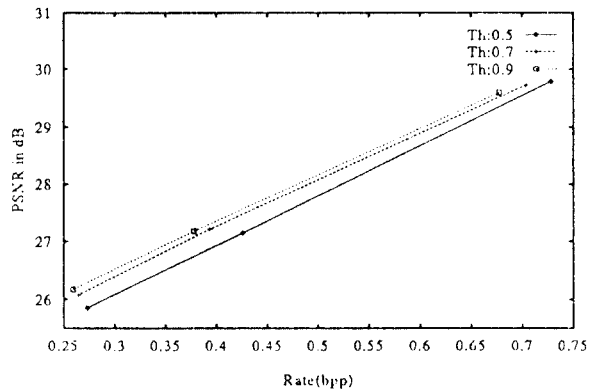


그림 7. Flower Garden에 대한 영 벡터 Voronoi 영역의 크기 문턱값 Z_{th} 에 따른 부호화 성능

로 블럭내에서 벡터 차수를 4 차로 Mandala 블럭을 형성하였고, U, V 성분은 8×8 화소 크기의 블럭내에서 4 차 벡터를 형성하였다.

동영상 부호화기의 성능 실험에 앞서 우선, 영 벡터 Voronoi 영역의 크기를 조절하는 기법의 적용을 위해 적당한 문턱값을 얻는 실험을 수행하여 결과를 그림 7에 제시하였다. 그림 6의 문턱값 Z_{th} 에 대해 여러 값으로 실험을 수행한 결과 0.7-0.9로 하여 영 벡터의 Voronoi 영역을 확대하였을 경우 대략 0.5 dB 향상됨을 확인할 수 있었다. 이 값은 영상의 특성에 따라 약간 달라질 수 있으나 본 실험에서는 0.9로 하였다.

차 영상 신호에 대한 ECLVQ는 양자화 성능에 중요한 영향을 미치는 Y 성분은 최적화시키고 U, V 성분은 Y 성분의 정보를 이용하여 양자화를 수행한다. 먼저 Y 성분의 마크로 블럭에 대해 ECLVQ를 수행한 후 이에 대한 최적의 스케일값을 얻는다. 이 Y 성분의 스케일값은 그대로 U, V 성분의 스케일값으로 이용한다. 이는 Y 성분의 부호화 성능이 U, V 성분의 부호화 성능에 비해 중요하므로 Y 성분의 스케일값은 최적화시키고 U, V 성분에 대해서는 부가 정보의 전송 부담을 줄이기 위해 Y 성분의 스케일값을 이용하는 것이다. 이때 Y 및 U, V 성분의 전송 비트수의 배분은 각각의 λ 값으로 조절이 가능한데 U, V 성분의 전송률을 상대적으로 낮추기 위해 Y 성분의 λ 값에 일정값을 더해 주어 U, V 성분의 λ 값으로 사용하였다. 따라서 이 과정에

서 발생하는 부가 정보는 Y 성분의 스케일값 뿐이다. 이 스케일값은 인접 마크로 블럭들의 스케일값들과 상관도가 높기 때문에 이들의 차이를 구한 후 가변 길이 부호화를 수행한다. 이와 같이 구성된 동영상 부호화기에 의해 수행된 Football 영상의 Y 성분 및 U, V 성분의 부호화 성능을 그림 8에 제시하였다. 일반적으로 U, V 성분은 Y 성분에 비해 상관도가 매우 높기 때문에 U, V 성분의 부호화 성능은 Y 성분의 부호화 성능에 비해 매우 좋은 경향을 보인다. 따라서 이 경우 각 성분의 비트수를 적절히 배분하기 위해 Y 성분의 λ 는 200으로 해주고 U, V 성분의 λ 는 300으로 해 주어 U, V 성분의 전송량의 비중을 낮추도록 구성하였다. 연속된 30 프레임의 평균 성능은 Y 성분은 0.433 bpp에서 27.55 dB, U, V 성분은 각각 0.078 bpp에서 30.42 dB 및 0.021 bpp에서 33.36 dB를 얻었다.

다음으로 ECLVQ와 여타 기법들과의 성능 비교를 위해 실제 영상 데이터에 대한 부호화 실험을 수행하였다. 실험 영상은 움직임이 비교적 적은 Miss America 영상을 사용하였고 결과를 표 1에 제시하였다. 동영상 부호화에는 움직임 추정 기법, 움직임 추정 영역, 가변 길이 부호화 여부 등 성능에 영향을 주는 요소가 많아 직접적인 비교는 어렵지만 대략적인 비교는 가능하다. 표 1의 첫번째 기법은 wavelet 변환된 영상 데이터에 lattice VQ로 양자화한 후 엔트로피 부호화를 수행하는 기법이다^[10]. 이 기법은 성능이 약간 우수한 반면 전

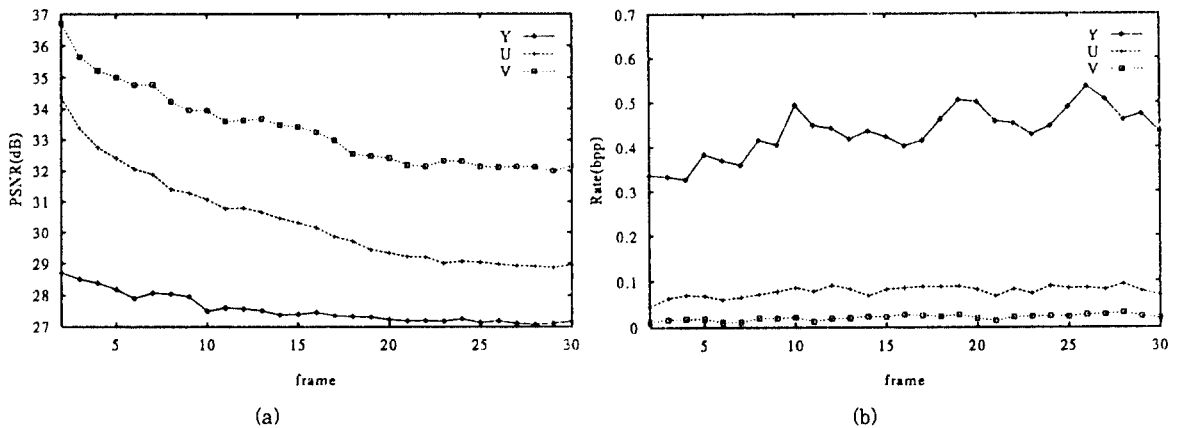
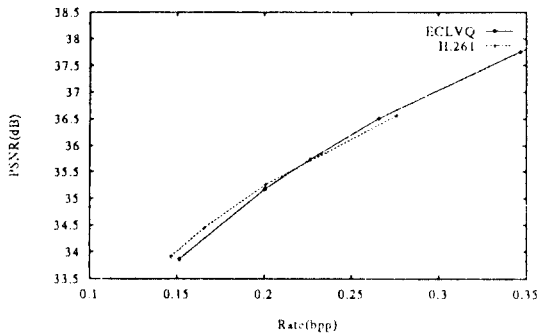


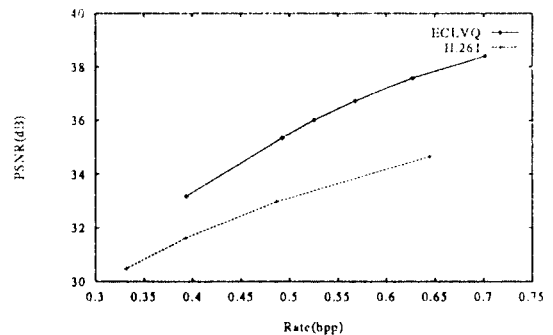
그림 8. Football 컬러 영상에 대한 성능. (a) 평균 PSNR(Y:27.55 dB, U:30.42 dB, V:33.36 dB). (b) 평균 전송률(Y:0.433 bpp, U:0.078 bpp, V:0.021 bpp).

표 1. Miss America 영상에 대한 성능 비교.

부호화 기법	전송률	성능
Wavelet 변환+Lattice VQ+VWL ^[10]	0.16 bpp	38 dB
ECSCB ^[23]	0.14 bpp	37 dB
H.261	0.137 bpp	37.62 dB
ECLVQ	0.137 bpp	37.58 dB



(a)



(b)

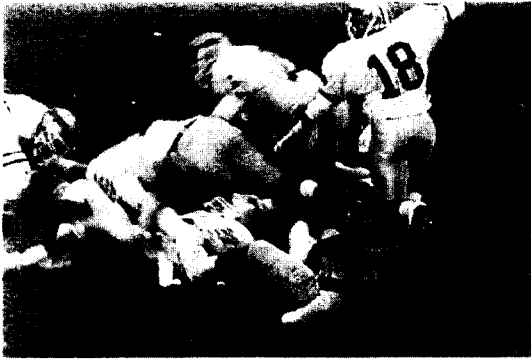
그림 9. 전송률-왜곡치 평균 성능. (a) Susie 영상. (b) Popple 영상

송률이 높다. 두번째 부호화 기법은 움직임 보상된 신호에 대역 분할 필터링을 수행한 후 엔트로피 제한 양자화를 적용하는 기법이다^[23]. 나머지 두 기법은 표준 부호화 방식인 H.261 및 제안된 ECLVQ를 이용한 부호화 기법의 결과이다. 표 1에서 알 수 있듯이 움직임이 적은 Miss America 영상에 대해서는 네 기법 모두 유사한 성능을 얻고 있다.

이제 ECLVQ를 이용한 동영상 부호화 시스템과 표준 동영상 부호화 시스템인 H.261과의 성능 비교를 위해 몇가지 영상에 대해 실험을 수행한다. 진술한 바와 같이 동영상 부호화기의 성능에 영향을 주는 몇가지 요소를 고려하여 가급적 두 기법에 대해 같은 조건을 만들어 준 후 실험을 수행함으로써 제안된 양자화 기법에 의한 성능 향상 여부를 보다 엄밀히 측정할 수 있도록 하였다. 우선 DCT는 8×8 화소 크기의 블럭에 대해 수행하였다. 움직임 추정은 Y 성분의 16×16 화소 크기의 마크로 블럭에 대해 3 step search 기법^[24]을 사용하여 예

측하였다. 그림 9에 Susie 영상과 Popple 영상에 대한 Y 성분의 30 프레임의 평균 전송률 대 평균 PSNR 성능을 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 움직임이 비교적 적은 Susie 영상은 비슷한 성능을 보이는 반면 움직임이 많은 Popple 영상은 ECLVQ가 H.261에 비해 대략 2 dB 가량 우수한 성능을 보이고 있다. 이는 움직임이 많은 경우 차 영상 신호의 에너지가 증가하여 상대적으로 높은 전송률에서 좋은 성능을 발휘할 수 있는 ECLVQ의 특성을 잘 나타내고 있다. 한 영상내에서도 전송률이 증가함에 따라 ECLVQ의 성능이 점점 좋아지는 것을 관찰할 수 있다. ECLVQ가 전송률이 높은 경우에 좋은 성능을 보이는 또 하나의 이유는 마크로 블럭의 움직임의 크기에 따라 ECLVQ가 적응적으로 최적의 스케일 값을 적용함으로써, 움직임이 큰 부분에서 보다 좋은 성능을 보이는 것이라고 판단된다.

그림 10 및 그림 11에 ECLVQ 및 H.261에 의해 부호화가 수행된 후 복원된 Football 영상 및 Popple



(a)

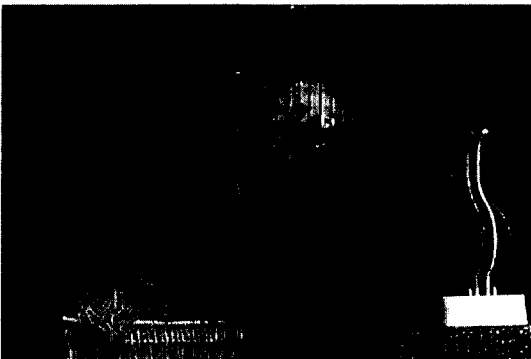


(b)

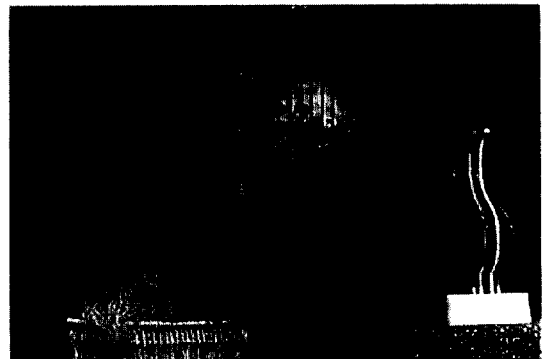


(c)

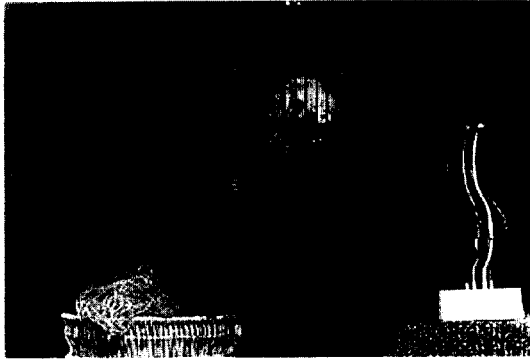
그림 10. 복원된 30 번째 Football 영상들. (a) 원영상. (b) ECLVQ 영상($\lambda=100$). (c) H.261 영상(step size=18).



(a)



(b)



(c)

영상들을 제시하였다. 두 영상이 대체적으로 유사한 성능을 보이고 있으나 H.261에 의해 복원된 영상에는 움직임이 많은 부분 중 일부에서 스케일값이 너무 커져 영상이 많이 일그러지는 현상이 발생하지만 ECLVQ에서는 적응적 부호화로 인하여 이런 현상이 적게 발생하고 있다. 다음으로 그림 11의 Popple 영상의 경우에는 새장이 회전 운동을 하여 움직임이 전체적으로 많이 발생하는 영상이다. 새장을 살펴보면 ECLVQ에 의해 복원된 영상이 보다 선명함을 관찰할 수 있다. 이상의 복원 영상을 종합해 볼 때 움직임이 큰 부분에서 ECLVQ가 H.261에 비해 보다 충실히 영상을 복원시키고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 양자화시 왜곡치와 전송률을 함께 고려하여 부호화를 수행하는 ECLVQ 기법을 이용한 적응적 ECLVQ 동영상 부호화 시스템을 제안하였다. 또한 엔트로피 부호화가 결합된 lattice VQ에 수반되는 코드북 크기의 제한 문제를 해결하기 위한 코드북 감축기법의 성능을 검토해 보았다. 코드북 감축 기법은 Laplacian 소스 및 Gaussian 소스에 대해 전송률-왜곡치 성능 측면에서 성능 저하가 없음을 확인하였다. 이 기법은 고차원 피라미드 형태의 코드북에 대해 $\frac{1}{10}$ 이상의 감축 효과를 나타내기 때문에 양자기 구현시 적절한 코드북의 크기를 유지할 수 있으므로 lattice VQ에 보다 높은 벡터 차수 및 전송량을 부여하여 성능 향상을 도모할 수 있고, 기억 용량 및 훈련 벡터의 수도 줄일

그림 11. 복원된 30 번째 Popple 영상들. (a) 원영상, (b) ECLVQ 영상($\lambda=100$), (c) H.261 영상(step size=18).

수 있다.

제안된 ECLVQ 동영상 부호화 시스템은 움직임 보상 부호화 기법 및 DCT를 이용하여 감축하였다. 양자화는 움직임 보상된 차영상 신호의 DCT 변환된 신호에 대해 양자화가 이루어지므로 이 신호의 특성에 적합하도록 피라미드 형태의 코드북을 갖는 lattice VQ로 ECLVQ를 구성하였다. 코드북 감축 기법을 적용하여 코드북의 크기를 증대시켜 성능 향상을 도모하였고, 매크로 블럭 단위로 Mandala 블럭을 형성하여 가급적 데이터의 상관도를 높여 VQ의 이득을 얻도록 구성하였다. 매크로 블럭 단위로 최적의 스케일 값을 얻고 이를 부가 정보로 전송하는 적응적 부호화를 수행하였다. 또한 lattice VQ는 균일 양자기이지만 비중이 매우 큰 영 코드 벡터의 Voronoi 영역의 크기를 확대하여 더욱 비중을 높임으로써 성능 향상을 도모하였다.

모의 실험 결과, 영 코드 벡터의 Voronoi 영역의 크기 확장 기법은 대략 0.5dB의 성능 향상을 얻을 수 있었다. 제안된 동영상 부호화 시스템은 움직임이 비교적 적은 영상에 대해서는 H.261과 비슷한 성능을 보인 반면, 비교적 움직임이 많은 영상에 대해서는 ECLVQ 시스템이 0.5~2.0 dB 향상되는 좋은 결과를 보였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 적응적 ECLVQ 동영상 부호화 시스템은 움직임의 크기에 따라 효과적으로 부호화가 가능하며, 특히 움직임이 많은 영상 데이터의 부호화에 보다 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. M.I. Sezan and R.L. Lagendijk, *Motion Analysis and Image Sequence Processing*, Norwell, MA, USA : Kluwer Academic Publishers, 1993.
2. K.R. Rao and P. Yip, *Discrete Cosine Transform : Algorithms, Advantages, Applications*, Sandiego, CA, USA : Academic Press, 1990.
3. J.W. Woods and S.D. O'Neil, "Subband coding of images," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, vol. 34, pp.70-80, Oct. 1986.
4. J. Aggarwal and N. Nandhakumar, "On the computation of motion from sequences of images - A review," *Proc. of the IEEE*, vol. 76, pp.917-935, Aug. 1988.
5. CCITT Rec. H.261, *Video codec for audiovisual services at $p \times 64$ kbit/s*, 1990.
6. Motion Picture Experts Group, *MPEG Draft International Standard Technical Report*, ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, March. 1994.
7. A. Gersho and R.M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*, Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.
8. W.T. Chen, R.F. Chang and J.S. Wang, "Image sequence coding using adaptive finite-state vector quantization," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 2, pp.15-24, March. 1992.
9. R.F. Chang, W.T. Chen and J.S. Wang, "Image sequence coding using adaptive tree-structured vector quantization with multipath searching," in *Proc. Internat. Conf. on Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Toronto, Canada, pp.2281-2284, 1991.
10. T. Gaidon, M. Barlaud and P. Mathieu, "Wavelet transform and lattice vector quantization for image sequence coding," in *Proc. of EUSIPCO-92*, Brussels, Belgium, pp.1337-1340, Aug. 24-27, 1992.
11. P.D' Alessandro, P. Formenti and R. Lancini, "Pyramid vector quantization applied to a video coding scheme for contribution quality," in *Proc. Internat. Conf. on Acoust., Speech, and Signal Proc.*, Minneapolis, Minnesota, pp.V 249~V 252, 1993.
12. D. Sampson and M. Ghanbari, "Fast lattice-based gain-shape vector quantization for image-sequence coding," *IEE Proc. Part-I*, vol. 140, No. 1, pp.56-66, Feb. 1993.
13. P.A. Chou, T. Lookabaugh, and R.M. Gray, "Entropy-constrained vector quantization," *IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Proc.*, vol. 37, pp.31-42, Jan. 1989.
14. N.S. Jayant and P. Noll, *Digital Coding of Waveforms*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1984.
15. N. Farvardin and J.W. Modestino, "Optimum quantizer performance for a class of non-Gaussian memoryless sources", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-30, pp.485-497, May. 1984.
16. J.S. Lee, R.C. Kim and S.U. Lee, "On the transformed entropy-constrained vector quantizers employing Mandala block for image coding," *Signal Processing : Image Communication*, vol 7, pp.75-92, March. 1995.
17. T. Berger, *Rate Distortion Theory: A Mathematical Basis for Data Compression*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1971.
18. J.H. Conway, N.J.A. Sloane, "Fast quantizing and decoding algorithms for lattice quantizers and codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-28, pp.227-232, March. 1982.
19. D.G. Jeong, Design of Cubic Lattice Vector Quantizers, Ph. D. dissertation, Dept. of Electrical Eng., Texas A\&M University, College Station, Texas, December 1990.
20. F. Bellifemine, A. Capellino, A. Chimienti, R. Picco, and R. Ponti, "Statistical analysis of the

- 2D-DCT coefficients of the differential signal for images," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 4, pp.477-488, Nov. 1992.
21. Marc J. Bage, "Lattice quantizers: entropy reduction by proper tie-handling", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-32, pp.328-330, March 1986.
22. J.L. Thomas, Data compression : techniques and applications, Belmont, CA, USA : Lifetime Learning Publications, 1985.
23. Y. H. Kim, *Adaptive Entropy-Coded Predictive Vector Quantization and Sub-band coding of images*, Ph. D. dissertation, Computer and System Engineering Dept., Rensselaer Polytechnique Institute, Troy, New York, Nov. 1990.
24. T. Koga and et al., "Motion compensated interframe coding for video conferencing," in National Telecommunication conference, New Orleans L.A., USA, Nov. 1981.



李鍾碩(Jong Seok Lee) 정회원

1960년 7월 14일생.

1983년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사).

1985년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학석사).

1995년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학박사).

1985년 1월~현재 LG 전자 기술원 재직중.

李商郁(Sang Uk Lee)

정회원

한국통신학회 논문지 제19권 제6호 참조