

후보벡터 분류에 의한 영상 에러 복원

손 남 레[†] · 이 귀 상^{††}

요 약

이동 통신 채널과 같은 저대역 통신망에서는 비디오 전송을 위해서는 높은 압축율을 갖는 부호화 방법들이 사용된다. 본 논문에서는 저대역 폭 통신을 위한 비디오 부호화 표준인 H.263 부호화를 기반으로 전송도중 손실된 움직임 벡터의 복원기법을 제안하고 실험하였다. 공간적으로 인접한 블록간에는 움직임 벡터의 상관성이 높기 때문에 손실블록 또한 이 블록들과 움직임이 비슷할 가능성이 높다. 이러한 특성을 이용하여 손실블록의 주변블록 중에서 같은 방향으로 움직임을 갖는 블록들로 구성된 동일 움직임 영역을 추출하고, 이 블록들을 이용하여 손실블록의 움직임벡터를 복구한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 정확한 손실블록의 움직임 벡터를 찾아 거의 완벽하게 복원하기도 하지만 정확한 움직임벡터를 찾지 못한 경우에는 주변블록과 가장 비슷한 움직임벡터를 찾아서 에러를 은닉하는 효과가 있다. 제안한 방법으로 복원한 영상은 전체적으로 눈에 거슬리는 오류가 생기지 않으므로 주관적인 화질이 좋았다. 또한 객관적인 척도인 PSNR 측면에서는 영상의 움직임 정도에 따라 기존 BMA 방법보다 약 0.5dB~1dB까지의 향상이 있었다.

Error Recovery by the Classification of Candidate Motion Vectors for H.263 Video Communications

NamRye Son[†] · GueeSang Lee^{††}

ABSTRACT

In transmitting compressed video bit-stream over Internet, packet loss causes error propagation in both spatial and temporal domain, which in turn leads to severe degradation in image quality. In this paper, a new approach for the recovery of lost or erroneous Motion Vector(MV)s by classifying the movements of neighboring blocks by their homogeneity is proposed. MVs of neighboring blocks are classified according to the direction of MVs and a representative value for each class is determined to obtain the candidate MV set. By computing the distortion of the candidates, a MV with the minimum distortion is selected. Experimental results show that the proposed algorithm exhibits better performance in many cases than existing methods.

키워드 : 블럭매칭 알고리즘(BMA : Block Matching Algorithm), 움직임 벡터(Motion Vector), 에러 은닉(Error Concealment), H.263

1. 서 론

이동 통신 채널과 같은 저 대역 통신망에서 비디오 전송을 위해서는 높은 압축율을 갖는 부호화 방법들이 사용된다. 이러한 방법들로 부호화된 비디오가 에러율이 높은 통신 채널로 전송될 때, 비트열에 에러가 발생하면 복호되기 어려울 뿐 아니라 다른 부분까지 영향을 미치게된다. 이러한 문제들에 대한 해결책으로 ARQ(Automatic Retransmission Request)[1], FEC (Forward Error Correction)[2, 3], 그리고 Interleaving 기법 등이 제안되었다. 그러나 ARQ는 재전송을 하기까지 Delay Time이 발생하여 오히려 채널에 오버헤드를 가중시킬 수 있으며, FEC는 에러 감지나 에러 은닉을 위한 추가 패리티비트들이 필요하게 되므로 오버헤드가

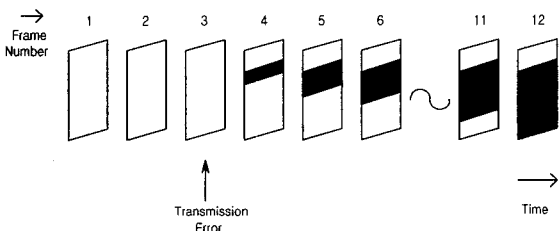
발생한다. 그리고 인터리빙 기법은 계산시간이 오래 걸리는 문제점들이 있다[4]. 따라서 복호기에서는 어느 정도의 성능을 보장할 수 있는 오류은닉기법에 대한 연구가 필요하다. 하이브리드 블록 기반으로서 MC/DPCM/DCT 코딩 알고리즘을 채택하였으므로 움직임 벡터들은 예측된 프레임으로부터 복원하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 예를 들어 만약 VLC된 하나의 움직임 벡터가 Burst Error로 인하여 손실된 경우, 새로운 재동기(Resynchronization)가 나타날 때 까지 (그림 1)와 같이 연속적으로 에러가 전파(Error Propagation)된다. 따라서 에러를 방지하기 위해서 최소 재동기 단위인 매크로블록(MB : MacroBlock)의 행, GOB(H.26x), 그리고 슬라이스(MPEG-2)를 사용한다. 더욱이 움직임 보상(MC : Motion Compensation) 방법은 전 프레임(Previous Frame)이 나타날 때까지 에러가 전파된다. 동영상 부호화는 대개 코딩 방법에 상관없이 인트라(Intra) 부호화되는

[†] 준 회원 : 전남대학교 대학원 전산학과

^{††} 종신회원 : 전남대학교 전산학과 교수
논문접수 : 2002년 7월 24일, 심사완료 : 2003년 2월 13일

픽처와 그 픽처를 바탕으로 인터(Inter) 부호화하는 부분으로 나뉘어져 있다. H.261[10], H.263[11], MPEG-1,2,4[12]와 같이 인터 프레임에서 움직임보상을 사용하고 차영상에 대한 DCT를 수행하는 경우 해당 프레임의 정보중 움직임 벡터가 가장 중요한 정보가 된다. 반면 인트라 프레임의 경우에는 이와는 달리 DCT 계수에 가장 중요한 정보가 있게 된다. 시퀀스에 에러가 발생할 경우 중요한 정보인 헤더의 경우에는 프레임을 계속 재생시키고 재전송을 연구하는 등의 방법을 취하고, 인트라프레임에서 계수가 유실 되었을 경우에는 [13]의 연속도 측정식(Smoothness Constraint)를 사용하여 DCT 블록을 복구한다[14]. 인터프레임에서는 BMA(Boundary Matching Algorithm)에 의하여 원 블록과 가장 비슷한 블록을 움직임벡터를 통해 찾아내도록 한다[15]. 본 논문에서는 영상 시퀀스에서 가장 많이 나오는 인터프레임서의 오류은닉을 우선적으로 연구하였다. 특히 인터프레임 특성상 공간적으로 인접한 블록간에는 움직임 벡터의 상관성이 높기 때문에 손실블록 또한 인접한 움직임 영역들과 비슷하게 움직임 가능성이 높다. 이러한 특성을 이용하여 주변블록들 중 동일한 움직임을 갖는 영역이 있을 때 손실블록 또한 동일 움직임 영역에 포함되는지를 조사하여 포함되는 경우 이 영역에 속한 블록들의 움직임 벡터를 이용하여 손실블록의 움직임벡터를 복원하게 된다[14].

본 논문의 실험은 저대역폭 통신을 위한 비디오 부호화 표준으로 널리 이용되는 H.263 부호화를 기반으로 하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같이 2장에서는 손실된 블록의 오류 은닉을 위해 가장 많이 사용되고 있는 블록정합기법인 BMA와 SME(Side Motion Estimation)기법을 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 제안한 동일 움직임 벡터 복원기법을 설명한다. 그리고 4장에서는 본 논문에서 제안한 방법에 대하여 실험 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.



(그림 1) H.263에서의 에러 전파 효과

2. 기존 연구

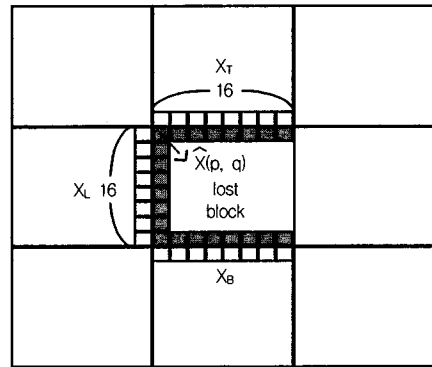
2.1 BMA(Boundary Matching Algorithm)

블록경계정합방식(BMA)은 손실 블록의 주변에 바르게 복호 되어 있는 블록과 블록경계선간의 유사성을 고려하여 가장 유사한 블록경계선을 갖는 블록으로 손실 블록을 대체한다는 개념에서 시작된 알고리즘이다[6]. 이러한 개념은

연속도 측정식이라는 척도를 통해 설명될 수 있다[6-14]. 즉 영상의 좌측상단을 기준으로 $N \times N$ 크기의 매크로블록 X 상의 화소의 위치 (p, q) 를 (그림 2)와 같이 표시하고, 매크로블록 X 의 가변장 부호화된 데이터에 에러가 침투하여 X 를 포함한 같은 GOB(슬라이스)내의 이후 매크로블록이 모두 손실되었다고 볼 때, 최소화되는 에러 비용함수(Error Cost Function)는 식 (1)와 같다.

본 논문에서는 H.261, H.263, MPEG에서와 같이 차분 부호화 방식(Difference Coding)과 가변장 부호화 방식을 사용함으로 인해 블록에러가 생길 때 해당블록의 오른쪽, 즉 연속되는 블록까지 복호가 불가능해지는 최악의 상황을 고려하기 때문에 오른쪽 블록의 에러 비용 함수는 제외시킨다. 에러 비용 함수를 적용하여 움직임 벡터를 추정하는 후보벡터군(Candidate Set)는 다음과 같다.

- ① 이전 프레임에서 같은 위치의 블록이 갖고 있는 움직임 벡터
- ② 에러의 영향을 받지 않아 복원이 가능한 주변의(위, 아래, 왼쪽) 움직임벡터
- ③ 이용 가능한 주변블록들의 움직임 벡터들의 중앙값
- ④ 이용 가능한 주변블록들의 움직임 벡터들의 평균값
- ⑤ 시간적 내삽을 위한 제로 움직임 벡터



(그림 2) 블록경계정합 알고리즘

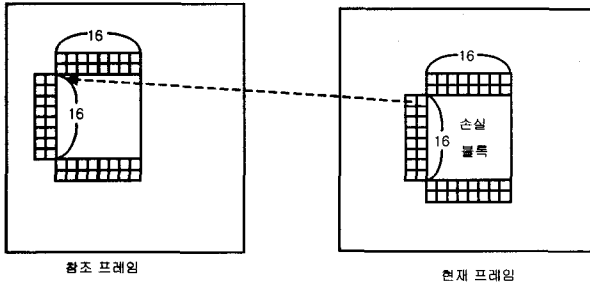
$$\begin{aligned}
 d_L &= \sum_{i=0}^{N-1} [\hat{X}(p, i) - X_L(p-1, i)]^2 \\
 d_T &= \sum_{i=0}^{N-1} [\hat{X}(i, q) - X_T(i, q-1)]^2 \\
 d_B &= \sum_{i=0}^{N-1} [\hat{X}(i, q+N-1) - X_B(i, q+N)]^2 \\
 d_S &= d_L + d_T + d_B
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

이러한 후보벡터들 중에서 d_s 가 가장 최소인 값을 손실된 움직임 벡터로 간주한다.

2.2 SME(Side Motion Estimation)

객체의 에지가 손실블록의 경계부근에 있을 때 BMA 방

법에서 사용하는 SMD(Side Motion Distortion)는 블록 경계의 유사성만을 이용하기 때문에 정확한 움직임 벡터를 찾는데 실패할 확률이 높다. 따라서 SME는 (그림 3)와 같이 현재 프레임에서 손실블록의 경계 바깥쪽에 있는 픽셀과 참조(이전)프레임에서 움직임이 보상된 블록의 경계 바깥쪽에 있는 픽셀간의 휘도값의 유사성을 비교하여 후보벡터 중에서 가장 최소값을 최적의 움직임 벡터로 선택한다[8].



(그림 3) SME

3. 제안한 알고리즘

손실블록의 움직임은 인접블록들의 움직임과 깊은 상관성이 있으므로 그 움직임 벡터로써 블록의 성질을 판단할 수 있다. 즉, 인접블록들의 움직임 벡터의 크기가 거의 일정한 경우는 전체적으로 블록들의 움직임 방향이 일정하다고 볼 수 있다. 이 경우 손실 블록 또한 같은 방향의 움직임을 갖는다고 판단할 수 있다. 반대로 인접블록들의 움직임 벡터들이 일정하지 않는 값들을 갖는 경우는 손실 블록의 움직임을 예상하기 어렵다. 그러나 대부분 영상의 움직임은 일정한 방향으로 움직이는 특성을 가지고 있음에도 불구하고 기존 알고리즘인 BMA나 SME 방법은 손실블록의 움직임과 상관없이 주변 블록들의 움직임벡터 평균값, 중앙값 등을 이용하여 최대 후보벡터군을 8개까지 사용한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 첫째, 손실블록에 인접한 주변블록들의 방향과 크기를 구한다. 둘째, 주변블록들의 방향과 크기에 따라 동일 영역으로 분류한다. 셋째, 동일 영역으로 분류된 후보벡터군에서 최적의 후보벡터를 구한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 단계는 다음과 같다.

Step 1 : 인접블록의 움직임 벡터 분류

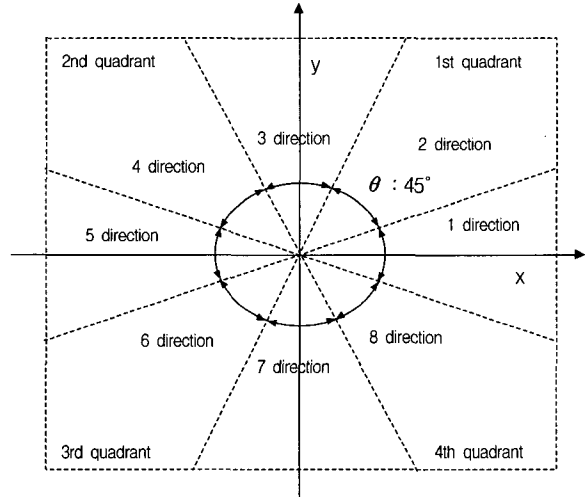
손실블록의 움직임은 블록의 움직임 방향과 크기를 고려해야 하는데 이것은 블록의 움직임벡터를 이용하여 얻을 수 있다. 블록의 움직임 크기(거리)와 각도는 식 (2)을 이용하여 움직임 벡터의 x, y좌표를 유클리디언 공식에 의하여 움직임의 크기를 구한다. 또한 블록의 움직임 방향은 크기에 의하여 움직임 벡터의 기울기를 구하고, (그림 4)와 같이 움직임 벡터의 기울기를 이용하여 <표 2>와 같이 움직임 벡터의 기울기와 기울기 값에 따른 각도(MVangle : θ)

의 범위에 맞추어 8가지 방향 중 하나를 설정하여 블록의 움직임 방향을 구한다.

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$Radian = \arcsin\left(\frac{|y|}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (2)$$

$$MVangle = Radian \times \frac{180}{\pi}$$



(그림 4) 움직임 벡터의 기울기

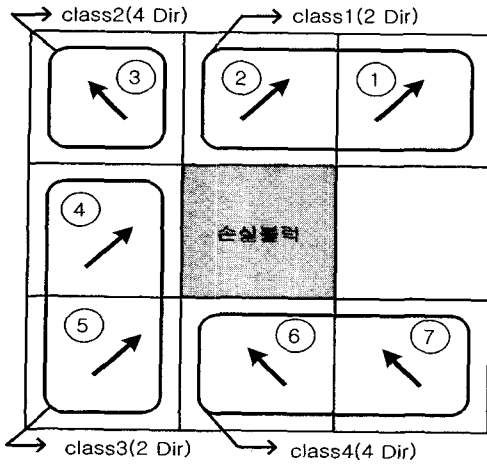
<표 1> 움직임 벡터의 기울기와 블록의 방향

움직임 벡터의 기울기	블록의 움직임 방향
$0 < G < 22.5$ and $337.5 < G < 360$	1
$22.5 < G < 67.5$	2
$67.5 < G < 112.5$	3
$112.5 < G < 157.5$	4
$157.5 < G < 202.5$	5
$202.5 < G < 247.5$	6
$247.5 < G < 292.5$	7
$292.5 < G < 337.5$	8

Step 2 : 후보벡터군 생성

손실 블록의 움직임 벡터를 동일 움직임 영역으로 분류하는 방법은 손실블록에 인접한 블록에 대해 각각 움직임 벡터의 방향을 구하고, 방향이 같은 부분은 동일 움직임으로 구분한다. 즉 분류(class) 한다. 동일 움직임으로 구분된 영역에서 중간값(Median)을 구하고, 이것을 후보 움직임벡터로 한다. 이때 (그림 5)와 같이 후보움직임 벡터는 손실블록에 인접한 주변블록의 오른쪽의 상단 (①)부터 오른쪽의 하단 (⑦)까지 Step 2 단계를 반복하여 후보벡터군을 생성한다. 동일 움직임 영역으로 분류한 예제 (그림 5)을 보면 class 1은 2방향, class 2은 4방향, class 3은 2방향, 그리고 class 4은 4방향이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘에 따르

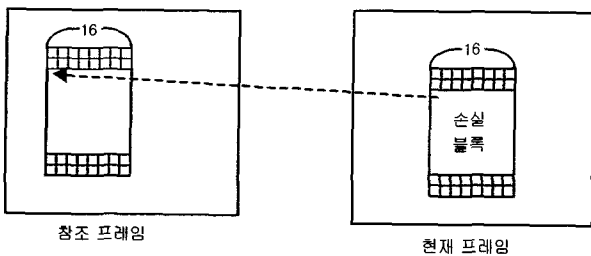
면 (그림 5)은 4개의 후보벡터를 생성한다.



(그림 5) 동일 움직임영역 분류 예제

Step 3 : 손실블록에 대한 최적 후보벡터 선정

본 논문에서는 비교대상인 BMA 방법과 마찬가지로 채널상의 에러로인하여 에러전파가 발생하므로 손실블록의 후보벡터 선택시 SME 방법을 변형한 적응적인 SME 기법을 사용한다. 본 논문에서는 MSME(Modified Side Motion Estimation)이라고 한다. 즉 (그림 3)와 같이 손실블록 중심으로 왼쪽에 인접한 블록의 움직임 벡터가 손실되지 않을 경우 SME 방법인 식 (3)와 같이 계산하고, (그림 6)와 같이 연속적으로 마크로 블록의 움직임벡터가 손실되었을 경우에는 식 (4)와 같이 MSME를 사용하여 후보 벡터 중에서 최소인 MSME 선택하여 영상을 복원한다. 식 (3)와 식 (4)에서의 dT , dB , dL 은 손실블록의 상, 하, 좌에 인접한 블록의 경계바깥 픽셀간 차의 합이다. 이때 Setp 2에서 생성한 후보벡터군중에서 가장 최소의 $dSum$ 값을 최적의 후보벡터로 선정한다.



(그림 6) MSME

$$\begin{aligned}
 dT &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n |[\widehat{X}(p, q-i)]_{1,j}^{row} - [X(p, q-i)]_{n,j}^{row}| \\
 dL &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n |[\widehat{X}(p-i, q)]_{1,j}^{col} - [X(p-i, q)]_{n,j}^{col}| \\
 dB &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n |[\widehat{X}(p, q+i)]_{1,j}^{row} - [X(p, q+i)]_{n,j}^{row}| \\
 dSum &= dT + dL + dB
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 dT &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n |[\widehat{X}(p, q-i)]_{1,j}^{row} - [X(p, q-i)]_{n,j}^{row}| \\
 dB &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n |[\widehat{X}(p, q+i)]_{1,j}^{row} - [X(p, q+i)]_{n,j}^{row}| \\
 dSum &= dT + dB
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

기존 BMA는 손실블록의 방향 및 주변블록간의 상관 관계없이 8개까지 후보 벡터군을 선택하여 손실블록을 복원한다. 그러나 본 논문에서 제안한 알고리즘의 후보 벡터군은 비록 영상 이미지에 따라 다르지만 <표 2>와 같이 기존 BMA의 후보벡터군보다 20~42%정도 감소하였다. 따라서 제안한 알고리즘은 기존 BMA 방법에 비해 Time Complex 은 훨씬 낮고, 동일 움직임으로 후보벡터를 생성하였기에 최적의 후보 벡터로 손실된 블록을 복원하였다.

4. 성능 비교 및 분석

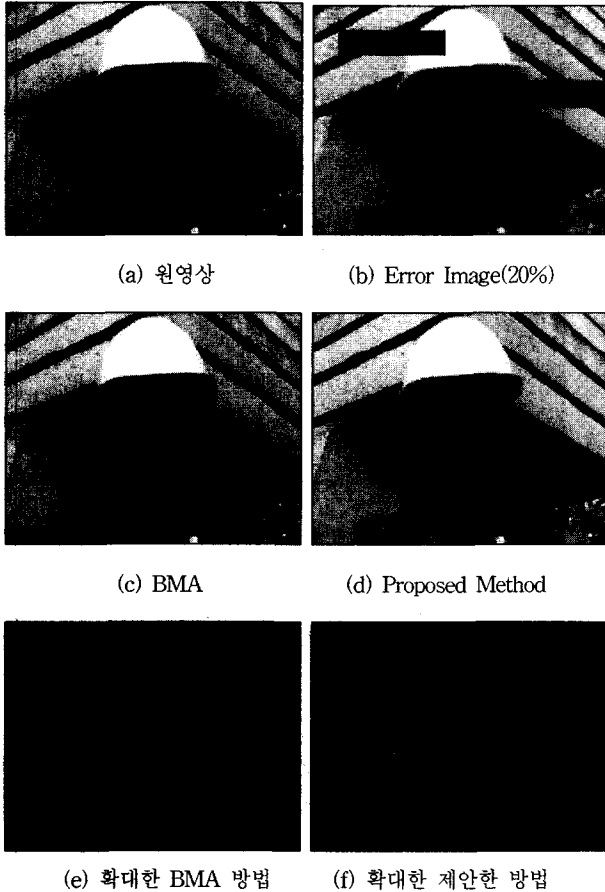
제안한 알고리즘을 실험하기 위하여 본 논문에서는 H.263 디코더를 이용하였다. 그리고 실험 영상은 각 176×144 pixels/lines의 Suzie, Carphone, Foreman, Mother & Daughter 영상에 대해 30frames/sec인 원영상을 10frames/sec으로 12프레임씩 끊어서 인코딩한 후 디코더측에서는 실제 이동 통신 채널 상에서의 전송효과를 재현하기 위해 블록 손실율(BER : Block Loss Rate)은 5%~20%까지로 랜덤하게 사용하였다. 디코더에서는 손실블록의 위치를 알고 있다는 것으로 가정하였다. 또한 손실 블록의 위치를 랜덤하게 주었지만, 이동 통신 채널상 특징으로 MB 단위의 에러 발생과 GOB(Group of Block)단위로 손실이 발생할 수 있으므로 적절하게 조합하여 에러를 주었다. <표 2>은 실험 결과의 PSNR 비교이다.

<표 2> 176×144 영상의 에러율에 따른 PSNR 비교

Image	Error Rate	BMA	Proposed Method	PCS/BMA Candidate Set
Carphone # 20	5%	37.01	37.00	22/55
	10%	36.99	37.01	47/100
	15%	36.97	36.98	69/165
	20%	36.97	36.97	88/220
Foreman # 3	5%	35.76	35.77	18/55
	10%	35.76	35.77	29/110
	15%	35.61	35.77	38/165
M&D # 15	20%	35.41	35.75	46/220
	5%	53.24	54.26	12/55
	10%	51.93	52.27	24/110
Suzie # 47	15%	51.83	52.64	47/165
	20%	50.50	51.19	70/220
	5%	52.90	53.25	13/55
	10%	47.78	49.06	30/110
	15%	47.72	48.63	58/165
	20%	45.77	46.60	78/220

* PCS : Number of Proposed Candidate Set
: Frame Number of Seauence

(그림 6)은 20%의 블록 손실율을 가진 3번째 Foreman 영상을 복원한 이미지로서 (a)는 원 영상, (b)는 에러 영상, (c)는 BMA 방법을 이용하여 복원한 영상이다. 그리고 (d)는 제안한 방법을 이용하여 복원한 영상이다. (e)는 확대한 BMA방법이고, (f)는 제안한 방법을 확대한 영상이다.



(그림 6) Foreman(#3) 영상에 대한 복원한 영상 비교

5. 결 론

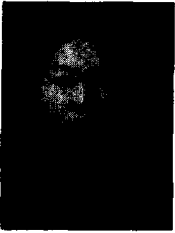
이동 통신 채널과 같은 저대역 통신망에서는 비디오 전송을 위해서는 높은 압축율을 갖는 부호화 방법들이 사용되는데, 본 논문에서는 저대역폭 통신을 위한 비디오 부호화 표준인 H.263 부호화를 기반으로 전송도중 손상된 움직임 벡터의 복원기법을 제안하고 실험하였다. 공간적으로 인접한 블록간에는 움직임 벡터의 상관성이 높기 때문에 손실블록 또한 이 블록들과 움직임이 비슷할 가능성이 높다. 이러한 특성을 이용하여 손실블록의 주변블록 중에서 같은 방향으로 움직임을 갖는 블록들로 구성된 동일 움직임 영역을 추출하고, 이 블록들을 이용하여 손실블록의 움직임벡터를 복구한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 정확한 손실블록의 움직임 벡터를 찾아 거의 완벽하게 복원하기도 하지만 정확한 움직임벡터를 찾지 못한 경우에는 주변블록과 가장 비슷한 움직임벡터를 찾아서 에러를 은닉하는 효과가 있다. 제안한

방법으로 복원한 영상은 전체적으로 눈에 거슬리는 오류가 생기지 않으므로 주관적인 화질이 좋았다. 또한 객관적인 척도인 PSNR 측면에서는 영상의 움직임 정도에 따라 기존 BMA 방법보다 약 0.5dB~1dB까지의 향상이 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Wada, "Selective Recovery of Video Packet Loss using Error Concealment," *IEEE Select. Areas Commun.*, Vol.7, pp.807-814, June, 1989.
- [2] E. Aynoglu, P. Pancha and A. R. Reibman, "Video Transport in Wireless ATM," *Proc. ICIP '95*, Washington, DC, pp.III400-403, Oct., 1995.
- [3] E. Ayanoglu, P. Pancha, A. R. Reibman and S. Talwar, "Forward Error Control for MPEG-2 Video Transport in a Wireless ATM LAN," *Proc. ICIP '96*, Lausanne, Switzerland, pp.II833-836, 1996.
- [4] S. Shirani, F. Kossentini, R. Ward, "An Adaptive Markov Random Field based Error Concealment Method for Video Communication in an Error prone Environment," *IEEE International Conference on*, Vol.6, pp.3117-3120, 1999.
- [5] Q. F. Zhu, Y. Wang and L. Shaw, "Image Reconstruction for Hybrid Video Coding Systems," in *Proc. IEEE Data Compression Conf.*, (Snowbird, UT), pp.229-238, Mar., 1992.
- [6] W. M. Lam, A. R. Reibman and B. Liu, "Recovery of lost or erroneously recieved Motion Vectors," *Prpoc. ICASSP*, No.5, pp.417-420, 1993.
- [7] K. W. Kang, S. H. Lee and T. Kim, "Recovery of coded Video Sequences from Channel Errors," *Proc. SPIE*, No. 2051, pp.19-27, 1995.
- [8] Z. Yu, H. R. Wu and S. Yu, "Lost Motion Vector Recovery for Digital Video Communication," *Visual Communications and Image Processing 2000, Proceedings of SPIE* Vol. 4067, pp.1250-1260, 2000.
- [9] Z. Yu, "Research on Key Technologies of HDTV Source Decoding," *Ph.D thesis*, Shanghai Jiaotong University, 1998.
- [10] E. Steinbach, N. Farber, B. Girod, "Standard Compatible Extension of H.263 for Robust Video Transmission in Mobile Environments," *IEEE Trans. Circuit Syst. Video Technol.*, Vol.7, No.6, pp.872-881, December, 1997.
- [11] "Video Codec for Audiovisual Service at p×64kbps," *ITU-T Recommendation H.261*, 1993.
- [12] "Video Coding for Low Bit Rate Communication," *ITU-T Recommendation H.263*, ITU-T SG-15, May, 1996.
- [13] ISO/IEC 13818-2, "Information Technology Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio," *Draft International Standard*, 1994.
- [14] Y. Wang, Qin-Fan Zhu and Leonard Shaw, "Maximally Smoothness Image Recovery in Transform Coding," *IEEE Trans., Comm.*, Vol.41, pp.1544-1551.
- [15] Jong Wook Park, Jong Won Kim and Sang Uk Lee, "DCT Coefficients Recovery based Error Concealment Technique and its Application to the MPEG-2 Bit Stream Error," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Vol.7, pp.845-854, Dec., 1997.



손 남 려

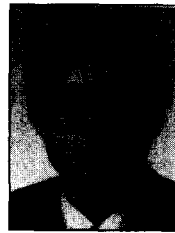
e-mail : nrson@chonnam.ac.kr

1996년 호남대학교 전산통계학과(학사)

1999년 전남대학교 대학원 전산학과(석사)

2000년~현재 전남대학교 대학원 전산학과
박사과정

관심분야 : 영상 압축 및 복원, 에러 은닉,
멀티미디어통신



이 귀 상

e-mail : gslee@chonnam.ac.kr

1980년 서울대 공대 전기공학과(학사)

1982년 서울대 대학원 전자계산기공학과
석사

1982년 금성통신 연구소

1991년 Pennsylvania 주립대학 전산학과
박사

1984년~현재 전남대 전산학과 교수

관심분야 : 멀티미디어통신, 영상처리 및 복원, 논리합성, VLSI/
CAD