

2차원 비트율-왜곡 모델을 이용한 매크로블록 단위 비트율 제어

정희원 손남례*, 이귀상**, 임창훈***

A Macroblock-Layer Rate Control for H.264/AVC Using Quadratic Rate-Distortion Model

Nam Rae Son*, Guee Sang Lee**, Changhoon Yim***^o *Regular Members*

요 약

H.264/AVC 부호화 방식이 압축성능이 뛰어나더라도 가변길이부호화방식을 따르기 때문에 동영상상을 부호화할 때 발생하는 데이터량은 시간의 흐름에 따라 큰 폭으로 변할 수 밖에 없다. 따라서 부호화된 비디오 비트스트림을 고정된 저대역폭의 네트워크를 통해 실시간으로 전송하고자 할 경우에는 부호기로부터 출력되는 비트율을 반드시 제어할 필요가 있다. 기존의 비트율 제어 알고리즘은 각 프레임당 목표 비트를 결정하는 2차원 비트율-왜곡 모델을 채택하고 있다. 본 논문에서는 전송율이 고정된 비디오 채널에서 H.264/AVC 부호화 기법으로 압축된 동영상상을 전송할 때 움직임이 많은 영상의 비트율을 보다 효율적으로 제어하는 알고리즘을 제시한다. 제안된 비트율 제어 알고리즘은 2차원 비트율-왜곡 모델을 이용하여 이전 프레임의 매크로블록과 현재 프레임의 매크로블록간에 움직임 변화량을 예측함으로써 매크로블록 단위로 비트율을 제어한다. 움직임이 많고 장면전환이 빈번한 동영상 샘플을 대상으로 비교 실험한 결과, 비트율 제어의 경우 기존의 알고리즘은 채널전송 환경에 부적합하게 비트율을 초과하지만, 새롭게 제안한 알고리즘은 채널전송에 적합하게 부호화됨을 확인할 수 있었다. 화질 또한 제안한 방법이 기존의 비트율 제어 방법보다 평균적으로 0.4~0.9 dB로 높게 나타남을 확인하였다.

Key Words : Rate control, Video transmission, Mean absolute difference, Quadratic rate-distortion model, H.264/AVC

ABSTRACT

Because the H.264/AVC standard adopts the variable length coding algorithm, the rate of encoded video bitstream fluctuates a lot as time flows, though its compression efficiency is superior to that of existing standards. When a video is transmitted in real-time over networks with fixed low-bandwidth, it is necessary to control the bit rate which is generated from encoder. Many existing rate control algorithms have been adopting the quadratic rate-distortion model which determines the target bits for each frame. We propose a new rate control algorithm for H.264/AVC video transmission over networks with fixed bandwidth. The proposed algorithm predicts quantization parameter adaptively to reduce video distortion using the quadratic rate-distortion model, which uses the target bit rate and the mean absolute difference for current frame considering pixel difference

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업 (Seoul R&BD Program) 지원으로 수행되었음.

* 호남대학교 인터넷소프트웨어학과 (nrson@honam.ac.kr), ** 전남대학교 컴퓨터정보학부 (gslee@chonnam.ac.kr)

*** 건국대학교 인터넷미디어공학부 (cyim@konkuk.ac.kr) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2007-01-020, 접수일자 : 2007년 1월 20일, 최종논문접수일자 : 2007년 8월 2일

between macroblocks in the previous and the current frame. On video samples with high motion and scene change cases, experimental results show that (1) the proposed algorithm adapts the encoded bitstream to limited channel capacity, while existing algorithms abruptly exceed the limit bit rate; (2) the proposed algorithm improves picture quality with 0.4~0.9dB in average.

I. 서론

최근 다양한 멀티미디어 매체의 발전으로 고화질 서비스의 수요가 증가하고 있으며 이에 따라 MPEG이나 H.264 등 국제 압축 표준이 제정되어 사용되고 있다^[1]. 이동통신의 발달은 기존 유선망에서의 서비스를 시간과 장소의 제한 없이 이동 중에도 이용할 수 있도록 하였고 국내에서는 세계 최초로 디지털 멀티미디어 방송(DMB: Digital Multimedia Broadcasting)이 상용화 단계에 있다. 영상시스템의 경우 서비스에 대한 수요는 막대하게 증대되고 있으나 실제 망의 용량이 한정되어있기 때문에 주어진 채널용량 한도에서 비트를 효율적으로 할당하여 최적의 화질을 얻을 수 있도록 하는 영상압축기법 연구가 활발히 진행되고 있다. 대부분의 영상 압축 표준에서는 시공간적으로 중복되어 있는 정보를 제거하기 위해서 움직임 보상기법과 DCT 변환 기법을 사용한다. 움직임이 크고 화면의 복잡도가 큰 영상일수록 부호화해야 하는 정보량이 증가하게 된다. 실제 상용되는 영상은 움직임의 변화와 화면의 복잡도가 다양하므로 영상 압축 부호화기를 통과하면 변동이 심한 비트율이 출력되는데 이는 제한된 채널용량과 부호화기의 버퍼용량에 의해 화질의 열화를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인코더에서는 출력 비트량의 변동을 줄이고 주어진 비트를 영상 데이터에 효과적으로 할당하기 위한 비트율 제어 알고리즘을 적용한다.

비트율 제어 기법은 우선 전체 영상의 왜곡을 최소화 하도록 영상의 프레임이나 하위 매크로블록에 목표 비트를 할당한다. 그 후 매크로블록마다 할당된 비트에 따른 양자화 계수(QP: Quantization Parameter)를 설정하여 부호화한다. 이러한 과정에서 두 가지 방향으로 연구가 이루어져 왔다. 하나는 모델 기반의 비트율 할당으로 통계적 특성을 바탕으로 비트율과 양자화 계수 그리고 왜곡 값과 양자화 계수 사이의 관계를 정의하여 수식적으로 최적의 양자화 계수를 찾아 부호화하는 방식이다^[2-13]. 이는 정해진 모델을 기반으로 지연을 최소화하는 실시간 코딩 환경에서 많이 사용하고 있지만 통계적 특성에 따른 모델을 사용하기 때문에 장면이 급격히 변하는 프레

임에서는 비트-왜곡 특성의 예측이 어려워 화질 열화를 가져온다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 프레임 내의 매크로블록 단위의 코딩으로 현재 프레임의 특성을 비트 모델에 피드백으로 반영하는 연구가 이루어져 왔지만 문제를 완전히 해결하지는 못했다. 비트율 할당을 위한 두 번째 접근방식은 실제 코딩에 의한 최적의 코딩 파라미터를 찾는 것이다. 다이나믹 코딩기법^[14,15]이나 라그랑지 최적화 기법^[16,17]을 이용하여 가능한 코딩 파라미터 조합 중 주어진 비트율 조건을 만족시키고 왜곡을 최소화 하는 것을 찾아보고 코딩하는 방식이다. 가장 이상적인 방법이지만 모든 양자화 파라미터에 따른 실제 비트율과 왜곡 값을 구해야 하므로 계산량이 큰 단점이 존재한다.

현재 H.264/AVC의 참조 소프트웨어에서 사용하는 비트율 제어 알고리즘은 두 번째 방법을 취하고 있다. 즉 주어진 비트율에 최소의 왜곡 값을 가진 매크로블록 모드를 결정하여 부호화하는 방법을 취하고 있다. 하지만 이 방법 역시 장면전환과 같이 움직임이 많은 영상인 경우에는 비트율과 왜곡에 대한 예측이 어려워 화질 열화 및 채널전송에 부적합하게 비트율을 부호화한다. 따라서 본 논문에서는 움직임이 많은 영상에 대하여 효율적으로 비트율을 제어하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존 비트율 제어 기법들에 대하여 소개하고, III장에서는 H.264/AVC의 비트율-왜곡 최적화 및 비트율 제어 알고리즘에 대하여 간단히 설명한다. IV장에서는 화면간 움직임이 많은 영상인 경우에 효율적으로 비트율을 할당하는 알고리즘을 제안한다. V장에서는 기존 비트율 제어 알고리즘과 제안한 비트율 제어 알고리즘을 각각 시뮬레이션하여 그 결과를 비교, 분석한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 기존 비트율 제어 알고리즘

지금까지 동영상 부호기에서 부호화된 가변 비트율을 제어하는 방법은 크게 피드 백워드(feed backward) 방법^[11,12], 피드 포워드(feed forward) 방법^[13,14], 하이브리드 방법^[15-19]으로 구분 할 수 있다. 피드 백워드 방법은 그림 1(a)와 같이 현재 버퍼의

상태를 예측하여 버퍼 상태에 따라 비트율을 조절하는 양자화 계수를 사용한다. 즉, 버퍼 상태가 차분부호 정보량을 부호화할 수 있는 충분한 양을 가지고 있으면 양자화 계수를 낮추어 비트율을 늘리고 화질을 높인다. 반대로 버퍼 상태가 차분부호 정보량을 충분히 부호화할 수 없는 상태이면 양자화 계수를 높여 비트율을 줄이고 화질을 떨어뜨린다. 피드 포워드 방법은 그림 1(b)와 같이 이전에 부호화된 영상들의 통계적 자료에 기초하여 영상의 복잡도를 예측하고 비트율을 조절하는 방식이다. 하이브리드 방법은 그림 1(c)와 같이 현재 전송해야 하는 차분부호 정보량과 버퍼 상태간의 관계를 이용하여 프레임 당 부호화할 비트율을 제어하는 방법이다.

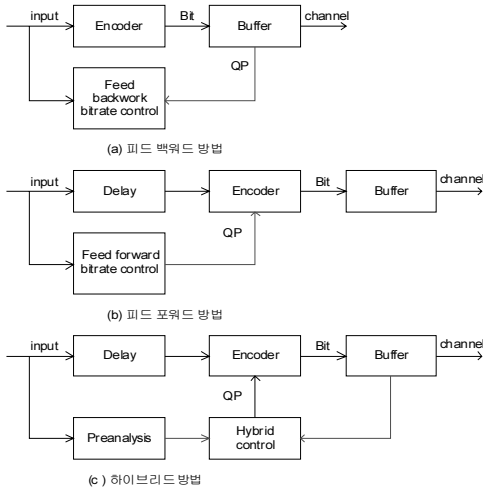


그림 1. 기존 동영상 부호기의 비트율 제어 방법

특히, 하이브리드 방법의 종류로는 H.264/AVC 부호기 이전에 개발된 MPEG-2의 TM5^[2], H.263의 TMN8^[3], MPEG-4의 Q2^[4] 등의 모델이 있고, H.264/AVC 부호기의 비트율 제어를 위한 참조 모델로는 JVT-D30^[15,16], JVT-H014^[17,18] 등이 있다. 그러나 H.264/AVC 부호기 이전에 사용하는 하이브리드 방법의 비트율 제어 방법과 H.264/AVC 부호기의 비트율 제어방법은 다음과 같은 차이점이 있다. 즉, H.264/AVC 부호기 이전에 사용하는 MPEG-2의 TM5의 비트율 제어 방법은 그림 2와 같이 매크로블록 활성도(macrobloc activity)를 이용하여 차분부호 정보량을 예측하고, 각 I, P, B 프레임에 해당하는 가상 버퍼를 사용하여 적응적인 양자화 계수(Mquant)를 결정하고 최종적으로 적응적인 양자화 계수에 의해 비트율이 조절된다. 그러나 H.264/AVC 부호기의 비트율 제어 참조 모델은 그림 3과 같이

비트율-왜곡 최적화 방법을 사용한다. 이 때문에 H.264/AVC는 부호화할 차분부호 정보량을 알 수 없는 상태에서 비트율 제어에 필요한 목표 비트율을 할당해야 한다. 목표 비트율이 할당되면 프레임 단위로 양자화 계수를 결정하여 부호화한다. 그런 다음 비트율-왜곡 최적화를 수행한 후, 화질과 비트율을 모두 만족하는 매크로블록 모드를 부호화한다.

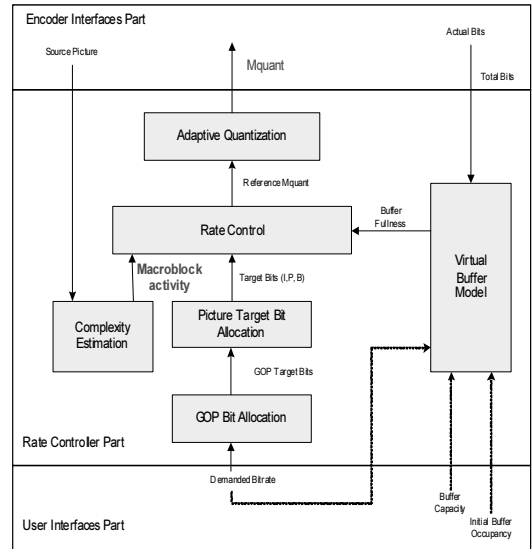


그림 2. MPEG-2의 TM5 비트율 제어 방법^[2]

이처럼 H.264/AVC 부호기의 비트율 조절 방법은 기존의 동영상 표준 부호기의 비트율 조절 방법과 근본적으로 다르기 때문에 H.264/AVC 부호기에 적합한 새로운 비트율 제어 방법이 필요하다.

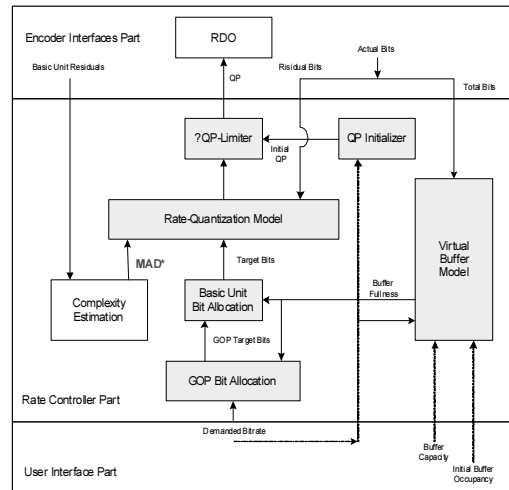


그림 3. H.264/AVC 참조 모델의 비트율 제어 방법^[17,18]

H.264/AVC 부호기의 비트율 제어 방법을 위한 참조 모델로는 JVT-D30^[15,16]와 JVT-H014^[17,18]이 있다. 그러나 JVT-D30와 JVT-H014의 비트율 제어 방법은 다음과 같이 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

첫째, JVT-D30와 JVT-H014 비트율 제어 방법은 현재 프레임에 목표 비트율을 할당하는데 문제가 있다. 즉, JVT-D30의 방법은 MPEG-2의 TM5와 같이 이전에 부호화되었던 영상의 복잡도를 계산하여 현재 프레임에 대하여 목표 비트율을 할당한다. JVT-H014 방법은 이전 영상의 차분 정보 부호량을 이용하여 부호화할 현재 프레임의 목표 비트율을 할당한다. 따라서 영상의 움직임이 비슷하거나 시간적으로 서서히 변화하는 경우에는 현재 프레임에 대한 목표 비트율을 효율적으로 할당할 수 있다. 그러나 이전 영상과 현재 영상간의 움직임이 많은 경우 현재 프레임에 목표 비트율을 효율적으로 대처하지 못하고 있다.

둘째, JVT-D30와 JVT-H014의 방법은 매크로블록 단위로 비트율을 제어한다. 하지만 JVT-D30의 방법은 한 영상 내에서 공간적인 비트할당을 고려하지 않기 때문에 같은 영상 내에서도 영상의 화질 차이가 발생할 수 있다. 또한 JVT-H014의 방법은 한 영상 내에서도 공간적인 비트 할당을 고려하기 때문에 한 영상 내에서도 화질 차이가 발생하지 않는다. 그러나 프레임을 구성하고 있는 매크로블록에 대한 목표 비트율을 예측할 때 부호화할 현재 프레임에 대한 정확한 목표 비트율을 예측하지 못한다.

셋째, JVT-D30의 방법은 실제 부호기의 버퍼를 고려하지 않고 I, P, B 프레임 부호화 모드마다 가상 버퍼를 사용하여 비트율을 제어함으로써 버퍼가 넘치거나 고갈되는 문제에 적절하게 대처하는 방안이 없다. JVT-H014의 방법은 부호기에 맞는 실제 버퍼를 사용하지만 버퍼가 넘치면 이 방법 역시 대처할 방안이 없다.

III. 관련 연구

3.1 비트율-왜곡 최적화

H.264/AVC의 비트율-왜곡 최적화(RDO:Rate Distortion Optimization)의 최종 목적은 부호화측에서는 최소의 비트율을 부호화하여 손실없이 최종단 말기에 전송하는데 목적이 있고, 복호화측에서는 최대의 화질을 제공받고자 왜곡 값이 최소인 매크로블록을 최적의 매크로블록 모드로 결정한다. 그림 4와 같이 결정된 매크로블록모드에 대하여 움직임 벡터

값과 원 영상과 보상된 영상에 대한 차분(MAD: Mean Absolute Difference)인 텍스처(texture)를 DCT(Discrete Cosine Transform)/양자화를 과정을 수행한 후, 부호화하여 최종 단말기인 복호기에 전송한다.

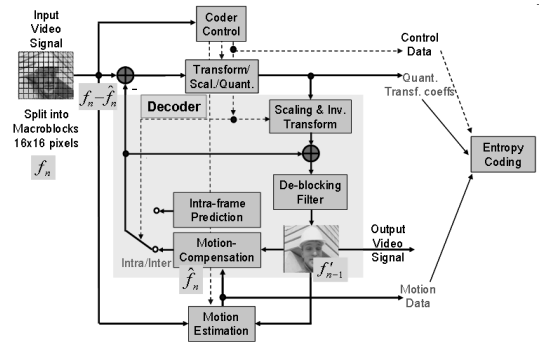


그림 4. H.264/AVC 인코더^[19]

참고문헌 [19]에서는 라그랑지 최적화 모드와 움직임 추정 방법에 대하여 설명하고 있다. 또한 H.264/AVC의 테스트 모델인 참조 소프트웨어^[17,18,21]에서도 참고문헌 [19]에서 제시한 방법을 채택하고 있다. 이 방법에서 라그랑지 계수(λ)는 다음 식 (1)와 같이 각각의 매크로블록에 대하여 양자화 계수(QP)을 사용하여 라그랑지 값을 결정한다.

$$\lambda = 0.85 \times 2^{\frac{QP-12}{3}} \quad (1)$$

라그랑지 최적화 방법^[22,23]에서 있어서, 라그랑지 계수가 작을 수록 높은 비트율과 좋은 화질을 보인 반면에 라그랑지 계수가 높을수록 낮은 비트율과 나쁜 화질을 초래한다는 결과와 같이 라그랑지 계수는 화질과 비트율에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 또한 매크로블록에 대한 모드를 결정할 때 식 (2)와 같이 왜곡 값과 비트율 그리고 라그랑지 계수에 의해서 결정된다.

$$J_i = D_i + \lambda \times R_i^{MV} \quad (2)$$

부호화 중 각각의 매크로블록에 대하여 모든 코딩 모드(16x16, 16x8, 8x16, sub 8x8)의 비트율(R_i)과 왜곡(D_i) 값을 계산한다. 그리고 식 (2)와 같이 비트율과 왜곡값이 최적인 모드를 선택한다. 선택된 모드를 가지고 매크로블록에 대하여 최종적으로 부호화한다.

3.2 H.264/AVC의 비트율 제어 알고리즘^(17,18)

3.2.1 프레임에 대한 초기화

비디오 시퀀스는 GOP(Group of Picture)로 구성되어 있고, GOP의 첫 번째 프레임은 인트라(intra) 모드로 부호화하고, 그 이후 프레임은 인터(inter) 모드로 부호화한다. 비디오 시퀀스를 구성하고 있는 총 프레임 개수가 N 이면 프레임 당 비트율을 제어하기 위해서는 먼저 첫 번째 프레임에 대한 가상버퍼 점유량(Virtual Buffer Occupancy)이 $B_c(1)$ 이면, 이때 초기 가상버퍼 점유량은 버퍼 사이즈(B_s)를 1/8로 설정한다.

$$B_c(1) = \frac{B_s}{8} \quad (3)$$

MPEG-2의 TM5에서는 가상 버퍼를 사용하여 실제 버퍼의 상태를 알 수 없었으나, H.264/AVC 비트율 참조 모델은 현재 버퍼 상태에 적합하도록 식 (4)와 같이 초기 목표 버퍼레벨(TBL: Target Buffer Level)을 설정한다.

$$TBL(2) = B_c(2) \quad (4)$$

버퍼의 넘침 및 고갈을 방지하기 위하여 버퍼의 상한($U(1)$) 및 하한($L(1)$) 초기값은 식 (5)와 같이 설정한다. 이때 u 은 채널 대역폭으로 압축된 영상 시퀀스를 일정하게 전송하는 비트율이고, F_r 은 초당 부호화된 프레임 율이다.

$$\begin{aligned} L(1) &= \frac{u}{F_r} \\ U(1) &= \alpha \cdot B_s, \quad (\alpha = 0.8) \end{aligned} \quad (5)$$

3.2.2 프레임에 대한 목표 버퍼량

n 번째 프레임을 부호화할 때마다 가상버퍼 점유량($B_c(n)$) 및 목표 버퍼레벨 ($TBL(n)$)은 각각 식 (6)와 식 (7)와 같이 유동적으로 변하는 유동 트래픽 모델 (fluid traffic model) 식을 따르고 있다. 식 (6)에서 $A(n-1)$ 는 $(n-1)$ 번째 프레임에 대한 부호화된 비트량이고, 식 (7)에서 N_p 는 하나의 GOP 내에 있는 P 프레임의 개수이다.

$$B_c(n) = \min(\max(0, B_c(n-1) + A(n-1) - \frac{u}{F_r}), B_s), \quad 3 \leq n \leq N \quad (6)$$

$$TBL(n) = TBL(n-1) - \frac{TBL(2) - B_s / 8}{N_p - 1} \quad (7)$$

n 번째 프레임 당 목표 비트량을 결정하는데 있어서 버퍼량 예측이 필요하다. 이때 버퍼량 예측은 가상버퍼 점유량 및 목표 버퍼레벨을 이용하여 식 (8)과 같이 예측할 수 있다.

$$T'_{buf}(n) = \frac{u}{F_r} + r(TBL(n) - B_c(n)), \quad r = 0.7 \quad (8)$$

프레임 당 버퍼량이 예측되면 버퍼 상태를 고려하여 식 (9)와 같이 버퍼의 상한과 하한 범위까지 고려하여 최종적으로 버퍼량($T_{buf}(n)$) 값을 결정한다.

$$T_{buf}(n) = \min(U(n), \max(L(n), T'_{buf}(n))) \quad (9)$$

3.2.3 프레임에 대한 목표 비트량 계산

n 번째 프레임에 대한 목표 비트량은 식 (9)에서 예측한 버퍼량과 식(10)에서 예측한 부호 비트량을 고려하여 식 (11)와 같이 최종적으로 n 번째 프레임에 대한 목표 비트량을 결정한다. 식 (10)는 프레임 당 부호할 수 있는 비트량(T_r)으로 현재 남아 있는 비트량(R)과 앞으로 부호화할 프레임 개수 즉, 남은 프레임 개수($N-n$)이다.

$$T_r = \frac{R}{N-n} \quad (10)$$

$$T(n) = \beta \cdot T_r + (1 - \beta) \cdot T_{buf}, \quad (\beta = 0.5) \quad (11)$$

3.2.4 MAD 예측 및 양자화 계수 예측

현재 H.264/AVC의 비트율을 제어하기 위해서 프레임 단위에 대한 양자화 계수는 식 (12)와 같이 2차 방정식 비트율-왜곡 모델^[24]을 사용한다. 식 (12)에서 $T(n)$ 는 n 번째 프레임에서의 목표 비트량, MAD_n 는 n 번째 프레임에서의 차분부호 정보량, QP 는 양자화 계수이다.

$$T(n) = \frac{x_1 \times MAD_n}{QP} + \frac{x_2 \times MAD_n}{QP^2} \quad (12)$$

식 (12)에서 x_1 와 x_2 는 각 프레임에서 얻어지는 2차원 비트율-왜곡값을 나타내는 변수이다.

그림 5는 MAD_n 을 구하는 과정을 나타내는데, F_n 은 현재 프레임인 n 번째 프레임, F_{n-1} 은 이전 프레임인 $(n-1)$ 번째 복원된 프레임을 나타낸다. 여기에서 (x, y) 는 프레임 내에서 매크로블럭의 좌표를, (i, j) 는 매크로블럭 내에서 픽셀의 좌표를 나타낸다. X, Y 는 프레임에 대한 가로와 세로 방향의 영상 사이즈이고, m, n 는 매크로블럭의 가로와 세로 방향의 사이즈이다. M, N 는 프레임 내에 존재하는 가로와 세로 방향의 매크로블럭의 개수이다. 이때 $M = \frac{X}{m}$ 및 $N = \frac{Y}{n}$ 은 가로 및 세로 영상 사이즈를 매크로블럭 사이즈로 나눈 값이다. $MAD_n(x, y)$ 는 n 번째 프레임의 (x, y) 좌표 매크로블럭의 MAD 값을 나타내고, $MB_{n-1}^i(x, y; i, j)$ 는 $(n-1)$ 번째 프레임의 (x, y) 좌표 매크로블럭의 (i, j) 좌표 픽셀의 복원된 값을 나타낸다. 그리고 (V_x, V_y) 는 (x, y) 좌표 매크로블럭의 모션 벡터를 나타낸다. 이전 프레임 매크로블럭들의 MAD 값인 $MAD_{n-1}(x, y)$ 는 식 (13)과 같이 구한다.

$$MAD_{n-1}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |MB_{n-1}^i(x, y; i, j) - MB_{n-2}^i(x, y; i + V_x, j + V_y)| \quad (13)$$

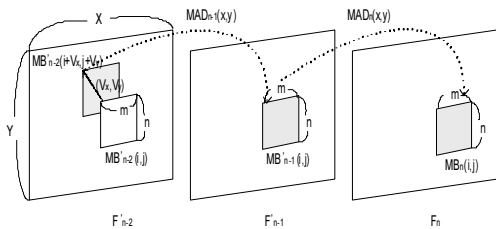


그림 5. 기존 MAD 방법

기존의 H.264/AVC의 비트율 제어를 위한 현재 프레임의 차분부호 정보량 MAD_n 은 이전 프레임 내 매크로블럭들의 MAD 값인 $MAD_{n-1}(x, y)$ 을 이용하여 식(14)와 같이 구한다.

$$MAD_n = a_1 \times \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} MAD_{n-1}(x, y) + a_2 \quad (14)$$

여기에서 a_1 와 a_2 는 $MAD_{n-1}(x, y)$ 에서 MAD_n 을 구하기 위한 변수이다.

프레임 당 목표 비트율과 차분부호 정보량을 2차 방정식 비트율-왜곡 모델 식을 이용하여 도출된 양

자화 계수는 프레임을 구성하고 있는 매크로블럭에 대하여 부호화하고, [19]에서 제안한 식 (2)와 같은 최적화된 비트율-왜곡 값을 최종 모드로 선택하여 부호화한다.

3.2.5 사후 부호화

한 프레임에 대한 부호화 결과로 발생하는 비트량 (Bit_{MB}) 즉 움직임 벡터와 차분정보에 대한 비트량을 다음 프레임에 부호화 할 때 사용하기 위해서 식 (15)와 같이 갱신한다.

$$T(n+1) = T(n) - Bit_{MB} \quad (15)$$

또한 부호화 수행 후, 현재 버퍼의 상한 및 하한 값을 식 (16)와 같이 갱신하여, 다음 프레임에서 버퍼가 넘치거나 고갈되지 않도록 한다. $\varpi(=0.8)$ 은 버퍼의 넘침을 방지하기 위한 상수이다.

$$L(n) = \min(\max(0, L(n-1) + \frac{u(n-1)}{F_r} - A(n-1)), B_s)$$

$$U(n) = \max(\min(U(n-1) + (\frac{u(n-1)}{F_r} - A(n-1)) \times \varpi), B_s), 0) \quad (16)$$

IV. 제안하는 비트율 제어 알고리즘

지금까지 제시된 H.264/AVC 부호기 비트율 제어 방법은 이전 영상들의 차분부호 정보량을 이용하여 현재 영상을 부호화한다. 따라서 네트워크 전송 환경이 급변하거나 영상 특징이 급격히 변화하는 경우 즉, 움직임이 많거나 장면 전환이 발생하는 경우에는 효율적으로 대처하지 못하고 화질 열화가 발생한다. 따라서 영상 정보를 효율적으로 실시간으로 전송하기 위해서는 효율적인 비트율 제어 방법이 필요하다.

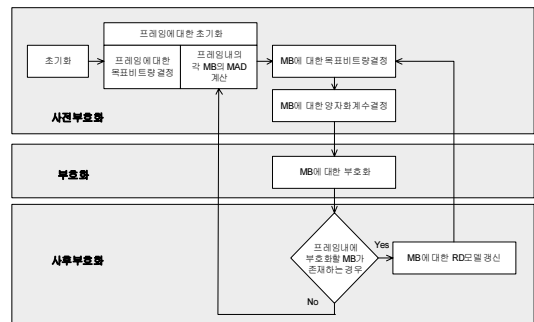


그림 6. 매크로블럭 단위의 부호화 순서도

본 논문에서는 그림 6과 같이 사전 부호화와 부호화 그리고 사후 부호화 과정으로 나누어 매크로블록 단위로 비트율 제어 알고리즘을 제안한다. 사전 부호화 과정에서는 프레임에 대한 초기화, 매크로블록에 대한 목표 비트율을 계산하고, 매크로블록에 대한 양자화 계수 예측 과정을 수행한다.

프레임에 대한 초기화, 프레임에 대한 목표 버퍼량 및 프레임에 대한 목표 비트량 계산 과정은 3.2절에서 언급한 H.264/AVC 비트율 제어방법과 같은 방법을 취한다. 부호화 과정에서는 예측된 양자화 계수를 가지고 부호화를 수행 후, RDO를 수행한다. 사후 부호화는 H.264/AVC 비트율 제어 방법과 같은 방법으로 부호화 결과 데이터를 메모리에 저장하여 다음 프레임의 매크로 블록에 대한 양자화 계수를 예측하는데 사용한다. 프레임에 대한 부호화가 끝날 때까지 프레임에 대한 초기화 과정을 제외한 매크로블록에 대한 비트율 제어 과정은 다음과 같이 수행한다.

4.1 프레임에 대한 MAD 계산

본 논문에서 제안한 프레임에 대한 MAD은 그림 7과 식 (17)와 같이 이전 프레임의 매크로블록 ($MB'_{n-1}(i, j)$)과 동일 위치에 있는 현재 프레임의 매크로블록 ($MB_n(i, j)$)에 대한 차분에 대한 평균값을 이용한다.

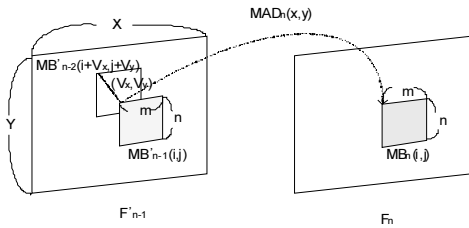


그림 7. 프레임 단위로 MAD 계산 방법

$$MAD_n(x, y) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |MB_n(x, y; i, j) - MB'_{n-1}(x, y; i, j)| \quad (17)$$

3.2.3절에서 설명하였듯이 현재 프레임에 부호화 하는데 있어서 이전 프레임과 현재 프레임에 대한 MAD를 예측해야 하는데 3.1절에서 설명한 H.264/AVC 부호기의 RDO 특성상 정확히 예측이 불가능하므로 식 (13)과 같이 이전 프레임의 이전 프레임과 이전 프레임의 MAD를 차분부호 정보량을 이용한다. 이때 움직임이 없는 영상인 경우 현재 프레임을 부호화하는데 있어서 차분부호 정보량에 대하여 영향을 받지 않지만, 움직임이 많은 영상인 경

우에는 차분부호 정보량의 영향을 많이 받는다. 따라서 식 (17)에서와 같이 현재 프레임과 이전 프레임 간의 관계에서 MAD를 예측하면, 움직임이 많은 경우 이전 프레임과 그 이전 프레임 간의 관계에서 MAD를 예측하는 기존의 방식에 비하여 더 정확한 MAD 값을 예측할 수 있다. 또한 MAD를 예측할 때 움직임 추정시 정수 화소(integer pel)에 대한 차분이 최소인 값을 예측하므로 계산시간을 감소할 수 있다.

본 논문에서는 현재 프레임에 대한 MAD_n 값을 현재 프레임의 매크로블록들의 MAD 값인 $MAD_n(x, y)$ 값들로부터 식 (18)과 같이 구하는 것을 제안한다.

$$MAD_n = a_1 \times \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} MAD_n(x, y) + a_2 \quad (18)$$

식 (18)에서와 같이 현재 프레임의 $MAD_n(x, y)$ 를 이용하여 현재 프레임의 차분부호 정보량 MAD_n 을 구하면, 이전 프레임의 $MAD_{n-1}(x, y)$ 를 이용하여 구하는 기존의 방식에 비하여, 더 정확한 현재 프레임의 차분부호 정보량의 예측이 가능하다.

4.2 매크로블록에 대한 목표 비트량 계산

영상을 프레임 단위로 비트율 제어하는 경우 프레임에 대하여 양자화 계수를 예측하고 프레임을 구성하는 매크로블록에 대하여 프레임의 양자화 계수 값을 동일하게 적용시켜 프레임에 대하여 부호화를 수행한다. 이 경우에 있어 동일한 양자화 계수를 프레임 내의 각 매크로블록에 적용하기 때문에 매크로블록 단위로 양자화 계수를 예측하고 비트율 제어를 수행하는 매크로블록 기반 비트율 제어에 비해서 프레임에 대한 목표 비트율에 대한 실제 발생 비트율의 정확성이 떨어진다. 따라서 다음과 같이 각 매크로블록 특성을 고려한 매크로블록 단위의 MAD 및 목표 비트량 예측방법이 필요하다.

매크로블록에 대한 목표 비트량은 식 (19)와 같이 프레임에 대한 목표 비트량에서 해당 매크로블록이 속한 프레임의 MAD_n 와 매크로블록의 $MAD_n(x, y)$ 에 대한 비에 의해 결정된다. 이때 식 (19)에서 MAD_n 는 이전 영상과 현재 영상간의 차분정보 부호량으로 식 (18)과 같은 방법으로 값을 결정하고, $T(n)$ 는 n 번째 프레임에 대한 목표 비트량이다. $T_{MB}(x, y)$ 는 (x, y) 좌표 매크로블록에 대한 목표 비트량이고, $MAD_n(x, y)$ 는 (x, y) 좌표 매크로블록에 대한 MAD

값이다.

$$T_{MB}(x, y) = T(n) \times \frac{MAD_n(x, y)}{MAD_n} \quad (19)$$

4.3 매크로블록에 대한 양자화 계수 예측

매크로블록에 대한 양자화 계수를 결정하는데 있어서 다음과 같이 2가지 경우를 고려한다.

경우 1. 한 프레임 내에 매크로블록을 부호화하기에 남은 비트수가 0보다 큰 경우.

프레임 단위 비트율 제어 기법에 사용하는 2차원 비트율-왜곡 모델 식 (12)을 이용하여 식 (20)과 같이 매크로블록 단위에 맞는 양자화 계수를 구한다.

$$T_{MB}(x, y) = \frac{x_1 \times MAD_n(x, y)}{QP} + \frac{x_2 \times MAD_n(x, y)}{QP^2} \quad (20)$$

그리고 양자화 계수는 최종적으로 다음 식 (21)과 같이 이전 프레임의 매크로블록의 양자화 계수인 $QP_{n-1}(x, y)$ 보다 2를 감소하여 화질을 향상시킨다[20].

$$QP = \min(QP_{n-1}(x, y) + 2, \max(QP_{n-1}(x, y) - 2, QP)) \quad (21)$$

경우 2. 한 프레임 내에 매크로블록을 부호화하기에 남은 비트수가 0보다 작은 경우.

현재 매크로블록에 할당할 비트량이 부족하므로 이전 프레임의 매크로블록 및 주변 매크로블록 간에 화질을 부드럽게 하기 위해서 $QP = QP_{n-1}(x, y) + 2$ 한다 [20]. 본 논문에서는 이전 프레임과 현재 프레임 간에 화질을 끊김없이 부드럽게 하기 위해서 현재 매크로블록 모드에 따라 그림 8과 같이 이전 프레임의 같은 위치에 있는 매크로블록의 양자화 계수를 조절한다. 이때 현재 매크로블록 모드가 SKIP이면 텍스처 및 움직임 정보에 대한 비트스트림이 '0'이므로 이전 프레임과 현재 프레임간에 움직임이 없으므로 이전 프레임의 매크로블록의 양자화 계수를 사용하여 비트량을 증가시키지는 않는 반면 화질에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 또한 현재 매크로블록 모드가 INTER 이면 현재 프레임의 매크로블록이 이전 프레임의 매크로블록과 비슷한 영상이 있으므로 움직임에 대한 차분이 있는 경우로 이전 프레임의 매크로블록의 양자화 계수에 '1'을 증가하여 화질은 약간 떨어질 수 있으나 비트량이 감소하는 장점이 있다. 그리고 INTRA 모드로 부호화하는 경우에는 이전

프레임의 매크로블록의 영상과 현재 프레임의 매크로블록의 영상이 완전이 다른 경우이므로 이전 프레임의 매크로블록의 양자화 계수에 '2'를 증가하여 비트량을 크게 감소하게 한다.

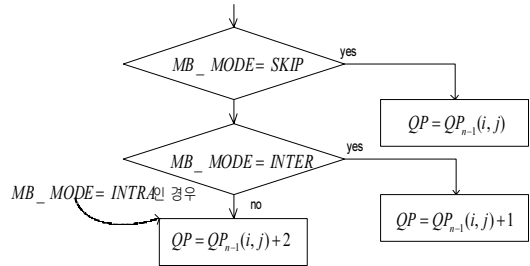


그림 8. 양자화 계수 결정 방법

V. 실험 및 결과

본 논문에서는 H.264/AVC 부호기를 기반으로 한 효율적인 비트율 제어 방법을 제시하였다. 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 H.264/AVC 참조 소프트웨어 JM9.0 부호기를 사용하였다^[21].

표 1. 실험환경

MV Resolution	1/4 pel
Hadamard Transform	ON
RDO	ON
Search Range	±16
Reference Frames	1
Symbol Mode	CAVLC
GOP size	10

실험환경은 표 1와 같고 실험에 사용된 영상은 기존 영상 부호기에서 성능 평가 테스트로 광범위하게 사용되는 QCIF급의 FOREMAN, CONTAINER, M&D(MOTHER & DAUGHTER), STEFAN, TABLE TENNIS, MOBILE, SILENT 영상으로서 10fps로 부호화 하였다.

I 프레임과 P 프레임에 대한 초기 양자화 계수는 '28'로 설정하여 부호화하고, 이 실험에서는 B 프레임 사용하지 않았다. 기존의 비트율 제어 알고리즘인 JVT-D30 와 JVT-H014 그리고 본 논문에서 제안한 비트율 제어 알고리즘은 영상압축 부호화에 의하여 저하된 복원 영상의 품질을 평가하기 위하여 일반적으로 사용하고 있는 PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)을 사용한다.

표 2와 표 3은 채널 전송대역폭이 각각 32, 64,

표 2. 32 kbps 채널 전송 환경에서 각 영상들의 부호화된 비트량, PSNR 및 계산량 비교

Sequence	JVT-D030			JVT-H014			Proposed		
	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량
FOREMAN	29.59	31.93	227.94	30.41	34.99	228.25	30.32	32.03	227.62
CONTAINER	34.22	31.96	271.05	35.00	35.27	270.73	34.95	31.84	271.37
M&D	36.71	31.98	251.29	36.95	34.50	256.36	36.95	31.51	246.22
SILENT	31.68	31.96	242.75	32.12	35.46	244.73	32.24	34.46	240.78
STEFAN	22.36	32.04	213.37	23.96	43.32	222.63	23.93	32.05	204.11
TABLE TENNIS	29.74	31.98	226.67	30.22	35.12	230.00	30.21	32.07	223.34
MOBILE	21.96	32.01	243.28	23.86	48.99	248.50	23.86	32.05	238.06

표 3. 64kbps 채널 전송 환경에서 각 영상들의 부호화된 비트량, PSNR 및 계산량 비교

Sequence	JVT-D030			JVT-H014			Proposed		
	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량
FOREMAN	33.42	63.96	283.56	34.19	67.72	283.66	34.25	63.44	283.46
CONTAINER	37.71	63.96	334.44	38.11	68.06	335.05	38.09	63.17	333.83
M&D	40.20	63.94	312.69	40.30	67.31	312.36	40.34	63.10	313.01
SILENT	35.50	63.82	315.13	35.91	68.23	316.11	35.91	63.99	314.15
STEFAN	25.57	64.12	260.96	26.30	70.39	260.80	26.30	64.11	261.13
TABLE TENNIS	33.90	63.98	285.47	34.50	67.89	290.49	34.50	63.97	280.46
MOBILE	25.65	63.99	306.91	26.52	72.68	307.43	26.55	63.94	306.39

표 4. 128kbps 채널 전송 환경에서 각 영상들의 부호화된 비트량, PSNR 및 계산량 비교

Sequence	JVT-D030			JVT-H014			Proposed		
	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량	PSNR	Bit rate	계산량
FOREMAN	37.66	127.95	366.31	38.07	132.56	372.22	38.12	127.96	360.39
CONTAINER	41.12	127.95	416.9	41.21	133.45	417.84	41.20	127.25	415.97
M&D	43.89	127.98	390.19	43.78	132.77	390.72	43.78	127.99	389.66
SILENT	40.03	127.57	416.96	40.27	133.76	421.87	40.16	127.60	412.05
STEFAN	28.92	128.01	343.27	29.91	135.9	345.77	29.87	128.20	340.78
TABLE TENNIS	38.02	127.91	365.11	38.71	132.26	372.70	38.69	128.33	357.53
MOBILE	29.44	128.09	420.94	30.02	137.91	421.21	30.07	128.20	420.67

128kbps이고 프레임율이 10fps일 때 기존 비트율 제어방법인 JVT-D30, JVT-H014 그리고 제안한 비트율 제어 알고리즘에 대한 부호화된 비트량, PSNR 및 계산량 비교이다.

JVT-D30 방법은 효율적으로 비트량을 조절하지만 PSNR 측면에서 평균적으로 제안한 방법이나 JVT-H014보다 0.4~0.9dB 정도 낮았다. 그리고 JVT-H014 방법은 제안한 방법에 비해 PSNR은 평균적으로 거의 비슷하였지만, 채널 전송 환경에 부적합하게 평균적으로 5~6kbps 비트량을 초과 발생하였다. 특히 움직임이 많은 영상인 경우, JVT-H014의 STEFAN 영상은 채널 전송에 부적합할 정도로 11kbps를 초과하여 버퍼의 넘침 상태가 지속되고 이로 인한 네트워크 상태가 더욱 악화 될 것으로 예측할 수 있다. 또한 실시간 처리를 위한 계산량을 비교한 결과 제안한 알고리즘은 기존 방법인 JVT-D30 보다는 평균적으로 1~3.5/sec 감소하였고, JVT-H014

보다는 1~7.1/sec 감소하였다. 따라서 제안한 비트율 알고리즘은 JVT-D30 방법과 같이 비트량을 효율적으로 할당하고, 기존 방법들보다 계산 시간이 감소하여 실시간 처리에 적합한 알고리즘이다.

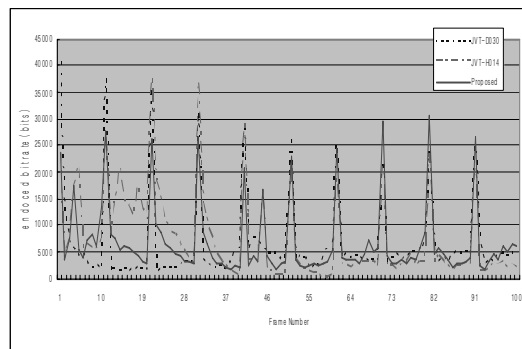


그림 9. FOREMAN 영상의 제안 및 기존 방법들의 부호화된 비트량 비교

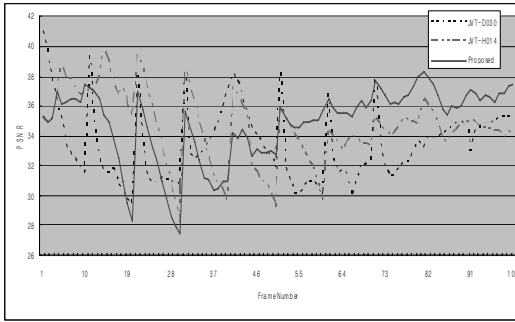


그림 10. FOREMAN 영상의 제안 및 기존 방법들의 PSNR 비교

그림 9와 그림 10은 FOREMAN 영상을 64kbps 채널로 전송할 경우, 제안한 방법과 기존 방법들에 대하여 부호화된 비트량과 PSNR 비교이다. 기존 비트율 알고리즘인 JVT-H014는 1~40번째 프레임에 부호화에 필요한 비트량보다 더 많은 목표 비트량을 예측하여 많은 비트량을 할당하는 모습을 볼 수 있다. 즉 불필요한 프레임 당 목표 비트량 할당으로 인하여 40번째 이후, 즉 움직임이 많은 영상 또는 장면전환이 있는 경우, 할당해야 할 프레임에 남아 있는 비트량의 부족으로 부호화되는 비트량의 감소 및 PSNR 화질의 악화를 볼 수 있다. 하지만 제안한

방법은 JVT-H014방법과 달리 움직임이 많은 영상이 발생할 때 프레임에 필요한 비트량을 효율적으로 할당하고 화질 역시 끊김 없이 연속적으로 보여 주었다.

그림 11는 FOREMAN 영상의 58번째 프레임에 대한 JVT-H014 와 JVT-D30 의 방법, 그리고 제안한 알고리즘에 대한 실험한 결과 영상이다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 알고리즘이 기존 비트율 제어 알고리즘보다 화질 성능이 좋았다. 특히 확대한 제안한 방법에서 얼굴 및 옷깃부분에서 기존 비트율 제어 알고리즘보다 블록 효과가 적어 화질이 더 선명하게 나타났다.

IV. 결론

본 논문에서는 H.264/AVC 부호기에서 부호화된 비트스트림을 PSTN이나 ISDN와 같이 고정된 채널로 전송할 경우, 기존의 비트율 제어 방법을 소개하고 문제점을 제시하였다. 기존의 비트율 제어 방법의 가장 큰 문제점은 현재 프레임을 부호화하는데 있어서 이전 프레임의 차분부호 정보량을 부호화할 때 사용한다는 것이다. 이때 발생하는 문제점은 화면간 움직임이 많이 발생한 경우, 현재 프레임을 부호화할 때 이전 프레임의 차분부호 정보량은 정확하게 예측이 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 이전 프레임의 차분부호 정보량이 아니라 현재 프레임의 매크로블록과 이전 프레임의 매크로블록간의 차분을 차분부호 정보량으로 이용하여 움직임이 많은 영상인 경우 정확하게 움직임을 예측할 수 있는 비트율 제어 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 비트율 제어 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 기존의 비트율 제어 알고리즘과 비교 실험하였다. 실험결과에서 보듯이 움직임이 없는 영상인 경우에는 제안한 방법이나 기존 비트율 제어 방법의 화질 척도인 PSNR 값은 비슷하였다. 그러나 움직임이 많은 영상인 경우에는 기존의 비트율 제어 방법은 채널 전송에 부적합할 정도로 비트량을 초과하지만, 제안한 방법은 채널 전송에 적합하게 효율적으로 부호화되는 것으로 나타났다. 또한 제안한 알고리즘이 기존의 비트율 제어 알고리즘보다 계산량이 감소하여 실시간 처리에 적합한 것으로 나타났다.



그림 11. FOREMAN 영상 화질 비교

참 고 문 헌

- [1] Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG&ITU-T VCEG, "Draft ITU-T recommendation and final draft international standard of joint video specification (ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC)," Doc. JVT-G050r1, Mar. 2003.
- [2] MPEG-2, Test Model 5, Doc. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11/93-400, Apr. 1993.
- [3] ITU-T Standardization Sector, Study Group 6, Video Coding Experts Group, Video Codec Test Model, Version8(TMN8), ISO/IEC JTC1/SC29/ WG11, Portland, OR, pp. 24-27, June 1997.
- [4] F. Pam, Z Li, and K. Lim, "A study of MPEG-4 rate control scheme and its improvements", IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol., vol. 13, no. 5, pp. 440-446, May 2003.
- [5] J. Yang, Q. Dai, W. Xu, and R. Ding, "A rate control algorithm for MPEG-2 to H.264 real-time transcoding", Visual Commun. Image Proc., pp. 1995-2003, 2005.
- [6] Z. He and S. K. Mitra "A linear source model and a unified rate control algorithm for DCT video coding," IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol., vol. 12, no. 11, pp. 970-982, Nov. 2002.
- [7] A. Ortega, K. Ramchandran, and M. Vetterli, "Optimal Trellis-based buffered compression and fast approximations," IEEE Trans. Image Proc., vol.3, no. 1, pp. 26-40, Jan. 1994.
- [8] D. Seo and S. Han, "Optimal quantization parameter set for MPEG-4 bit-rate control," IEICE Trans. Commun., vol. E87-B, no. 11, pp.3338-3342, Nov. 2004.
- [9] Y. Shoham and A. Gersho, "Efficient bit allocation for an arbitrary set of quantizers," IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Processing, vol. 36, no.9, pp. 1445-1453, Sept. 1988.
- [10] K. Ramchandran and M. Vetterli, "Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense," IEEE Trans. Image Proc., vol. 2, no. 2, pp. 160-175, Apr. 1993.
- [11] ISO/IEC JTC1, "Generic coding of moving pictures and associated audio information - Part 2: video," ISO/IEC 13818-2(MPEG-2), Nov. 1994.
- [12] C.-T. Chen and A. Wong, "A self-governing rate buffer control strategy for pseudo constant bit rate video coding," IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech., Vol. 2, No. 1, pp. 50-59, Jan 1993.
- [13] J. Zdepski, D. Raychaudhuri, and K. Joseph, "Statistically based buffer control policies for constant rate transmission of compressed digital video," IEEE Trans. Commun., Vol. 39, No. 6, pp. 947-957, June 1991.
- [14] K.-H. Tzoe, "An intra-field DCT-based HDTV coding for ATM networks," IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol., Vol. 1, No. 2, pp. 184-196, June 1991.
- [15] S. Ma, W. Gao, and Y. Lu, "Rate control on JVT standard," JVT of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG, JVT-D030.doc, 2002.
- [16] S. Ma, W. Gao, P. Gao, and Y. Lu, "Rate control for advanced video coding Standard," IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, Vol. 2, pp.892-895, May 2003.
- [17] Z. Li, F. Pan, K. P. Lim, G. Feng, X. Lin, and S. Rahardja, "Adaptive basic unit layer rate control for JVT," JVT-G012r1, 7th Meeting, Pattaya II, Thailand, Mar. 2003.
- [18] Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG Document JVT-G050r1, June, 2003.
- [19] T. Wiegand, H. Schwarz, A. Joch, F. Kossentini, and G. J. Sullivan, "Rate-constrained coder control and comparison of video coding standards," IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol., Vol. 13, No. 7, pp. 688-703, July 2003.
- [20] G. M. Schuster and A. K. Katsgelos, "Fast and efficient mode and quantization selection in the rate distortion sense for H.263", VCIP, Proceeding of the SPIE, Vol. 2727, No. 2, March 1996.
- [21] <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/>.

- [22] G. J. Sullivan and T. Wiegand, "Rate-distortion optimization for video compression", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 74-90, November, 1998.
- [23] A. Ortega and K. Ramchandran. "Rate-distortion methods for image and video compression", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 23-50, November, 1998.
- [24] T. Chiang and Y.-Q. Zhang, "A new rate control scheme using quadratic rate distortion model," IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol., vol. 7, pp, 246-250, Feb. 1997.

손 남 레 (Nam Rae Son)

정회원



1995년 2월 호남대학교 컴퓨터공학과 학사
 1999년 8월 전남대학교 전산학과 석사
 2005년 2월 전남대학교 전산학과 박사
 2007년 3월 ~ 현재 호남대학교 인

터넷소프트웨어학과 교수

<관심분야> 영상통신, 영상처리 및 복원, 디지털콘텐츠

이 귀 상 (Guee Sang Lee)

정회원



1980년 2월 서울대학교 전기공학
 과 학사
 1982년 2월 서울대학교 전자계산
 기공학과 석사
 1983년 ~ 1984년 금성통신연구소
 1984년 ~ 현재 전남대학교 컴퓨터
 정보학부 교수

<관심분야> 멀티미디어 통신, 영상처리 및 컴퓨터 비전, 임베디스 시스템

임 창 훈 (Changhoon Yim)

정회원



1986년 2월 서울대학교 제어계측
 공학과 학사
 1988년 2월 한국과학기술원 전기
 및 전자공학과 석사
 1996년 12월 The University of
 Texas at Austin, Electrical and
 Computer Engineering 박사

1988년 3월 ~ 1991년 6월 한국방송공사 기술연구소, 연구원

1996년 12월 ~ 1999년 3월 Sarnoff Corporation, 연구원

1999년 3월 ~ 2000년 7월 Lucent Technologies, Bell Labs, 연구원

2000년 8월 ~ 2002년 3월 KLA Tencor Corporation, Sr. Software Engineer

2002년 5월 ~ 2003년 8월 삼성전자 디지털미디어연구소, 수석연구원

2003년 9월 ~ 현재 건국대학교 인터넷미디어공학부, 부교수

<관심분야> 멀티미디어 통신, 멀티미디어 네트워크, 비디오 압축, 디지털 영상처리