H.264 인트라 프레임의 Rate Distortion 성능 향상을 위한 모드 결정 기법

준회원 유 종 민*, 최 창 렬*, 정회원 정 제 창*

Rate Distortion Improved Mode Decision Method for H.264 Intra Coding

Jong min You*, Chang ryuol Choi* ***Associate Members***,
Je chang Jeong* ***Regular Member***

요 약

H.264/AVC는 기존 영상 압축 표준과 달리 Intra 부호화에서도 가변 크기 블록과 예측 부호화를 사용하여 압축 효율을 높이고 있다. 한 매크로 블록을 부호화 하는 경우 I16x16 모드에서 4가지, I4x4 모드에서 9가지 예측 모드 중 가장 좋은 성능을 보이는 모드를 선택하여 부호화를 행한다. 현재 H.264 참조 소프트웨어인 JM에서는 모드 결정 방법으로 RDO (Rate Distortion Optimization)를 채택하여 사용하고 있으며 이는 RD 관점에서 가장 좋은 성능을 보이는 모드를 선택하여 부호화를 행하는 것이다.

본 논문에서는 H.264/AVC Intra 부호화의 부호화 효율을 향상 시킬 수 있는 모드 결정 방법을 제안한다. RDO는 영상 부호화기에 적용되는 과정에서 복잡도를 줄이기 위하여 부호화 되는 단위 블록들의 부호화 결과는 독립이라는 가정을 하였다. 하지만 실제 H.264/AVC 인트라 부호화 구조는 인접 블록의 이미 부호화 된 픽셀 값을 사용함으로써 인접 블록의 부호화 결과에 영향을 받도록 되어있다. 때문에 제안하는 방법은 이 블록 간 부호화 결과가 종속이라는 점을 고려하여, 기존 RDO 내 I4x4 예측 모드 결정 과정 중 다음 블록의 예측을 위해 사용되는 현재 블록 내 화소 값의 왜곡에 중점을 두어 모드 결정을 하는 과정을 추가함으로써 압축 성능 향상을 꾀한다. 제안하는 모드 결정 방법은 다양한 시퀀스와 QP에서 같은 화질대비 0.64~1.65%의 비트율 감소나 같은 비트율 대비 0.049~0.101dB의 PSNR 향상을 보인다.

Key Words : H.264, Intra Prediction, Mode Decision, Rate Distortion Optimization

ABSTRACT

In this paper, we present a improved rate distortion optimization (RDO) for H.264 intra coding. By using new mode decision criteria pass for I4x4 in company with the original RDO, the proposed method can achieve the better coding efficiency comparing with the original RDO. Our experimental results show that the proposed algorithm can archive about 0.64~1.6578% bit rate decrease at the same PSNR and 0.049~0.101dB PSNR increase at the same bit rate.

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업으로 구축된 서울 미래형 콘텐츠 컨버전스 클러스터 지원으로 수행되었습니다.
* 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 영상통신 및 신호처리 연구실(rjm1214@ece.hanyang.ac.kr)
논문번호 : kics2008-02-085, 접수일자 : 2008년 02월 13일, 최종논문접수일자 : 2008년 7월 16일

I. 서 론

최근 표준화가 완료된 영상 압축 부호화 표준인 H.264/AVC는 ITU-T 내 Video Coding Expert Group (VCEG)과 ISO/IEC Moving Picture Experts Group (MPEG)의 활동에 의해 표준화 되었다. H.264/AVC는 기존 영상 압축 부호화 표준인 MPEG-4, H.263, MPEG-2와 비교하여 동일 화질에서 39%, 49%, 64%의 비트율 감소를 보인다[1]. 이러한 H.264의 높은 압축 성능은 기존 영상 압축 부호화 표준에는 없었으나 새롭게 추가된 많은 예측 기법들로부터 기인한다. 인트라 프레임 부호화도 예외는 아니어서 H.264는 인트라 프레임 부호화에도 가변 크기 블록 모드와 다양한 예측 기법을 도입하여 높은 부호화 효율을 얻는다.

한 개의 16x16 크기 매크로 블록은 H.264 부호화기에 의해 인트라 부호화가 이루어지는 과정에서 블록의 특성에 따라 16x16 크기나 16개의 4x4 크기 블록으로 분할되어 예측을 수행한 후 부호화가 이루어진다. 인트라 예측은 주변 화소를 이용하여 이루어지는데 16x16 블록에 대해서는 4가지 예측 모드 중 하나의 모드를, 각각의 4x4 블록에 대해서는 9가지 예측 모드를 중 하나의 모드를 선택하여 부호화가 진행된다. 16x16 블록과 4x4 블록에 대해 정의된 각각의 예측 모드들은 그림 1과 같다. 각 예측 모드들은 블록 내의 특성을 반영하도록 설계되었으며 인접 블록의 화소 값으로부터 예측 된다.

이러한 다양한 블록 크기와 예측 모드들은 선택에 관한 문제를 야기 시킨다. 어떤 모드가 선택되느냐에 따라 압축 효율은 많은 영향을 받기 때문에 모드 선택은 매우 중요한 문제이다. 모드 선택에 대한 해결 방법으로 H.264 참조 소프트웨어인 JM은 Rate Distortion Optimization (RDO)이라는 방법을 사용하고 있다.

RDO는 제한된 비트율에 대하여 허용된 K개의 모드들 중 가장 적은 왜곡을 갖는 모드 집합을 선택하는 것이다. X=(X_1, X_2,…, X_N)는 하나의 매크로 블록의 그룹 (GOB)을 나타낸다고 하자. 만약 부호화기가 하나의 매크로블록에 대하여 K개의 모드를 허용한다고 하면, 각 매크로블록은 다음과 같은 K개의 모드 집합 I={I_1, I_2, …, I_K} 중 하나를 사용하여 부호화 된다. 각 매크로블록에 대하여 선택된 모드들의 집합을 M={M_1, M_2,…, M_N}, 주어진 비트를 Rc라 하면, 왜곡을 최소로 하는 모드 집합을 찾는 문제는 다음과 같이 표현된다.

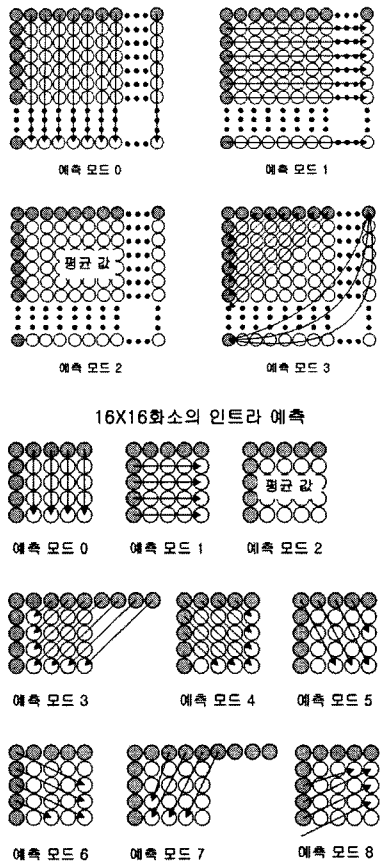


그림 1. H.264/AVC 인트라 부호화의 모드

$$\min_{M} D(X,M) \tag{1}$$

이 때 비트율은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R(X,M) \le R_C \tag{2}$$

$D(X_i, M)$은 GOB X를 부호화 하고 다시 복호한 후 계산되는 전체 왜곡이며, $R(X_i, M)$은 GOB X의 비트율을 뜻한다. 식 (1)은 다시 단순화 하여, X에 대한 다음과 같은 합으로 표현 가능하다.

$$\min_{M} \sum_{i=1}^{N} J(X_i,M) \tag{3}$$

여기에서 $J(X_i, M)$는 매크로블록 X_i에 대한 율-왜곡 값(rate-distortion cost)로 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$J(X_i,M) = D(X_i,M_i) + \lambda \cdot R(X_i,M_i) \tag{4}$$

식 (3)으로 단순화 하는 과정 중, 주어진 R_c에 대하여 식 (1)에 대한 최적 Lagrange multiplier λ를 찾는 것은 많은 해결책이 있다.

하지만, 식 (1)을 식 (3)과 같이 단순화하기 위해서는 $D(X_i, M)$과 $R(X_i, M)$ 항목을 구하는 과정에서 비트와 왜곡의 의존 관계가 명확해야 한다. 다른 가정이 없다면, GOB 안의 한 매크로블록의 왜곡과 비트는 같은 GOB 안의 다른 매크로 블록의 영향을 받는다. 이에 대한 최적의 해결 방법은 Viterbi 알고리듬이다. Viterbi 알고리듬은 trellis를 사용하여 앞선 블록들과의 영향뿐만 아니라 다음 블록들과의 영향까지 계산하여 최적 모드들을 결정한다. 하지만 Viterbi 알고리듬은 매우 많은 복잡도를 필요로 하기 때문에 대부분의 비디오 부호화 기에는 적합하지 않다.

이에 대한 가장 간단한 해결책은 한 매크로블록의 비트와 왜곡은 오직 현재 블록의 입력 값과 현재 모드의 영향만을 받는다고 가정하는 것이다. 이 가정을 통해 식 (3)은 다음과 같이 단순화 된다.

$$\min_{M} \sum_{i=1}^{N} J(X_i, M) = \sum_{i=1}^{N} \min_{M_i} J(X_i, M_i) \qquad (5)$$

이러한 이유로 JM에서 사용되는 RDO는 매크로블록간 독립성을 가정하고 있다[2] [3].

H.264의 예를 들자면, H.264 부호화기는 휘도 성분 인트라 부호화에 2가지 크기의 모드 (I16x16, I4x4)를 허용하며, 여기에 추가적으로 I16x16에는 네 가지 예측 모드를, I4x4에는 9가지 예측 모드를 허용한다. 만약 블록 간 독립이라는 가정이 없다면, RDO는 모두 $(4+9^{16})$가지 모드 집합에 대하여 고려를 해야 한다. 하지만 JM은 블록 간 독립이라는 가정 하에 총 (4+9x16)가지 모드 집합만을 고려한다. 이러한 블록 간 독립이라는 가정은 비디오 부호화 기에서는 불가피하지만, H.264의 인트라 부호화는 현저한 블록 간 종속적 요소를 가지고 있다. H.264는 인트라 부호화를 위하여 현재 프레임의 인접 화소 값을 사용한다. 이는 현재 블록의 부호화 효율은 인접 블록의 화소 값에 많은 영향을 받음을 의미한다. 때문에 인트라 모드 결정 과정에서는 블록 간 종속성이 고려되어야 하며, 특히 I4x4로 부호화 되는 복잡한 영역에서는 더욱더 그러하다.

최근 인트라 모드 결정에 관한 많은 논문이 발표되었다. 하지만 이들 논문은 허용된 블록 예측 모드의 수를 줄임으로써 부호화 시간을 줄이거나[4]-[6], 새로운 블록 매칭 기준을 사용하여 RDO를 사용하지 않는 부호화 기에서 (JM에서 low complexity mode decision method) 압축 효율을 높이는 것이었다[7]. 때문에 이들 알고리듬의 부호화 결과는 기존 RDO를 사용하여 부호화한 결과에 비해 낮은 부호화 성능을 보인다.

본 논문에서는 모드 결정 과정에서 블록 간 종속성을 고려함으로써 기존 RDO에 비하여 부호화 성능을 높이는 모드 결정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 I4x4 모드 결정에 대한 새로운 블록 정합 기준을 기존 RDO와 함께 사용하여 부호화 성능을 높인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 참조 소프트웨어에서의 매크로블록 모드 선택 기법에 대해서 설명하고 Ⅲ장에서는 제안하는 방법을 설명한다. Ⅳ장에서는 실험을 통하여 제안하는 모드 결정 방법의 성능을 평가하고, 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. H.264 부호화기의 인트라 블록 모드 결정 방법

H.264 부호화기는 Intra 블록에 대해 I16x16, I4x4 두 가지 모드를 허용하며 그림 1에서와 같이 I16x16 모드는 4가지 예측 모드를 I4x4 모드는 9가지 예측 모드를 허용한다. 이에 대한 예측 모드 결정과 최종 모드 결정은 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다.

단계 1. 가장 작은 식 (6)의 값을 갖는 인트라 4×4 예측모드를 선택한다.

$$J(s,c,IMODE|QP,\lambda_{MODE}) = SSD(s,c,IMODE|QP) + \lambda_{MODE} \cdot R(s,c,IMODE|QP) \qquad (6)$$

여기에서 QP는 양자화 계수, c는 복호된 블록, λ MODE는 모드 결정을 위한 Lagrange multiplier를 나타낸다. 또한 I4x4를 위한 예측 모드 IMODE와, SSD 는 다음과 같이 정의된다.

$$IMODE \in \begin{Bmatrix} DC, HOR, VER, DIAG, \\ DIAG_RL, DIAG_LR \end{Bmatrix} \qquad (7)$$

$$SSD = \sum_{x=1}^{4}\sum_{y=1}^{4}(s(x,y)-c(x,y))^2 \qquad (8)$$

단계 2. 가장 작은 식 (9) 값을 갖는 인트라 16×16 예측모드를 선택한다.

$$SATD = \sum_{x=1}^{16}\sum_{y=1}^{16}(H\cdot(|s(x,y)-p(x,y)|)\cdot H) \qquad (9)$$

p(x,y)는 현재 블록에 대한 예측을, H는 하다마드 트랜스폼 행렬을 나타낸다.

단계 3. 식(10)에서 가장 작은 J값을 갖는 모드를 현재 블록의 블록 모드로 선택한다.

$$J(s,c,MODE|QP,\lambda_{MODE})= SSD(s,c,MODE|QP)+\lambda_{MODE}\cdot R(s,c,MODE|QP) \quad (10)$$

MODE는 현재 블록에 대한 블록 모드를 나타낸다.

$$MODE \in \{INTRA\ 4x4,\ INTRA\ 16x16\} \quad (11)$$

Ⅲ. 제안하는 알고리듬

앞서 얘기 했듯이, 인트라 예측은 옆 블록과의 상관성을 이용한다. 하지만 기존 RDO는 모드 결정 과정에서 이를 고려하지 않기 때문에 현재 블록에 최적인 모드는 다음 블록의 예측에는 최적이 아닐 수도 있다. 때문에 모드 결정 과정에서 다음 블록의 예측 정확성을 고려한다면 부호화 성능 향상을 기대할 수 있다. 다음 블록에서 보다 높은 예측 결과를 얻기 위해서는 현재 블록의 화소 중 다음 블록의 예측에 사용되는 화소 값이 원래 값과 되도록 같아야 할 것이다.

이러한 가정을 바탕으로 우리는 I4x4 예측 모드 결정에 사용할 새로운 블록 정합 기준을 제안한다.

제안하는 식은 다음과 같다[8].

$$J_{proposed}(s,c,IMODE|QP,\lambda_{MODE})= J(s,c,IMODE|QP,\lambda_{MODE})+\alpha(QP)\cdot PBSSD \quad (12)$$

식 (12)는 식 (6)에 추가로 *PBSSD(s,c,MODE)* (Partial Boundary SSD)를 추가 한 것이다. *PBSSD*는 각 모드에 대하여 오리지널 블록 부분 블록 s와 복원된 블록에 대한 부분 블록의 SSD (Sum of Squared Difference) 를 뜻한다. 부분 블록은 한 매크로블록 내 4x4 블록의 위치에 따라 다르다. 부분 블록의 위치는 그림 2에 표현되어 있다. 4x4 블록이 매크로블록 내 가장 오른쪽 하단에 위치하면 (a), 하단이면 (b), 오른쪽이면 (c), 그리고 나머지 위치에서는 (d) 부분 블록을 사용한다. $\alpha(i,j)$의 값은 실험적으로 1로 하였다.

*PBSSD*를 사용하여 I4x4 예측 모드를 결정하는 것은 현재 블록의 왜곡이 더 큰 모드들이 선택될 수 있기 때문에 다음 블록의 부호화 효율에 많은 영향을 미치지 못한다면 전체 부호화 효율이 나빠질 수가 있다. 때문에 제안하는 방법은 기존 RDO

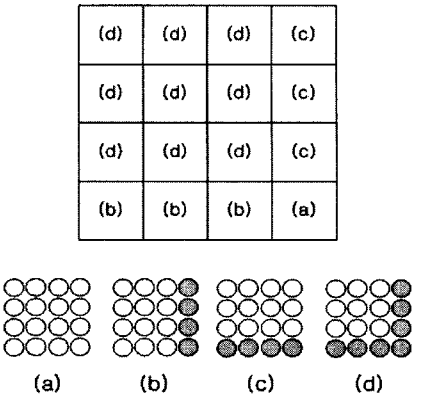


그림 2. 매크로블록 내 위치에 따른 부분 블록.

에 *PBSSD*를 사용하는 I4x4 예측 모드 결정 과정를 추가하여 최종적으로 부호화 효율이 기존 RDO에 의해 선택되는 것보다 좋을 경우에만 선택되도록 한다. 제안하는 방법의 전체 과정은 그림 3에 나타나있다.

제안하는 방법은 다음과 같이 진행된다.

1) 식 (6)을 사용하여 I4x4 예측 모드를 결정한다.
2) 식 (12)를 사용하여 I4x4 예측 모드를 결정한다.
3) 식 (9)를 사용하여 I16x16 예측 모드를 결정한다.
4) 식 (10)을 사용하여 가장 최적의 블록 모드를 결정한다.

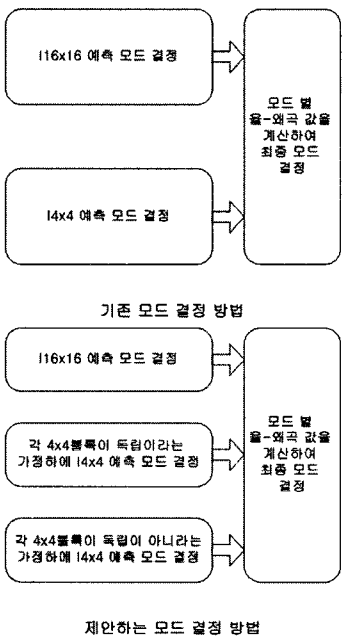


그림 3. 제안하는 방법의 순서도.

Ⅳ. 실험 및 결과

실험은 JM12.2를 사용하여 진행되었다. 테스트 시퀀스로는 QCIF(176x144), CIF(352x288), HD(1920x1080) 등 다양한 크기의 영상을 사용하였으며 다양한 움직임을 갖는 시퀀스들이 사용되었다. 실험 결과는 QCIF와 CIF 시퀀스에 대해서는 처음 100 프레임을 Intra 프레임으로 부호화하여 얻었으며 HD 시퀀스는 처음 30프레임을 Intra 프레임으로 부호화하여 얻었다. 또한 다양한 QP에서 실험하였다. 표 1은 다양한 시퀀스에 대해 QP = {28, 32, 38, 44}에서 부호화한 결과를 [9]의 방식에 따라 구한 PSNR과 Bit Rate의 이득을 나타낸다.

표 1 중 비트율의 음수는 비트율의 감소를 나타낸다. 표 1에서 볼 수 있듯이 제안하는 방법은 기존 RDO에 비하여 향상된 PSNR과 bit 율의 감소를 보인다. 가장 높은 비트율 감소를 보인 시퀀스는 Riverbed(HD)로 같은 PSNR 대비 1.65% 비트율 감소를 보였다. 또한 같은 비트율 대비 가장 높은 PSNR 향상을 보인 시퀀스는 foreman(CIF)로 0.104dB의 PSNR 향상을 보였다. 또한 가장 적은 RD 성능 향상을 보인 시퀀스는 stefan (QCIF)로 같은 bit율 대비 0.049dB, 같은 PSNR 대비 0.64%의 비트율 감소를 보였다.

그림 4-6은 foreman(QCIF), akiyo(CIF), stetion(HD) 시퀀스의 QP = {31, 33, 35, 37}에서 부호화한 결과의 Rate Distortion 곡선을 나타낸다. 그림 4-6에서 PSNR은 휘도성분의 PSNR을 사용하였다. 제안하는 방법은 모든 다양한 시퀀스와 다양한 QP에서 압축 성능 향상을 보임을 확인 할 수 있다.

표 1의 결과에서 특이한 점은 다른 크기의 같은 시퀀스는 비슷한 정도의 성능 향상을 보인다. 이는 제안하는 방법은 부호화 되는 블록 간 종속성에 의존하기 때문으로 생각된다.

표 1. 여러 시퀀스에 대하여 CAVLC로 부호화한 결과

Sequence	ΔPSNR(dB)	ΔBit Rate(%)
Foreman(QCIF)	0.101	-1.41
Stefan(QCIF)	0.049	-0.64
Silent(QCIF)	0.068	-1.22
Carphone(QCIF)	0.099	-1.43
Foreman(CIF)	0.093	-1.64
Akiyo(CIF)	0.104	-1.5
Coastguard(CIF)	0.049	-0.98
football (CIF)	0.055	-1.17
Riverbed(HD)	0.059	-1.31
Station(HD)	0.070	-1.65
평균	0.075	-1.30

그림 7은 foreman(CIF) 시퀀스의 24번째 프레임 내 부분 영상을 나타낸다. (b)와 (c)는 QP=35로 부호화 되었다. 제안하는 방법은 보다 정확한 예측을 제공하기 때문에 그림 7에서 볼 수 있듯이 많은 곳에서 눈으로 확인 할 수 있는 화질의 향상을 보인다.

기존의 RDO가 한 매크로블록의 휘도 성분 부호

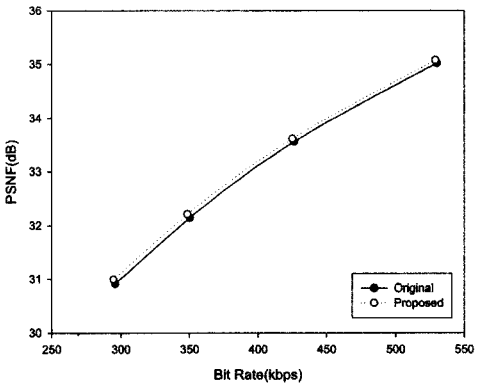


그림 4. foreman(QCIF)의 RD 곡선

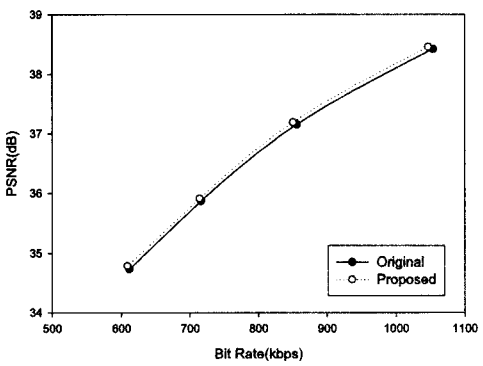


그림 5. akiyo(CIF)의 RD 곡선

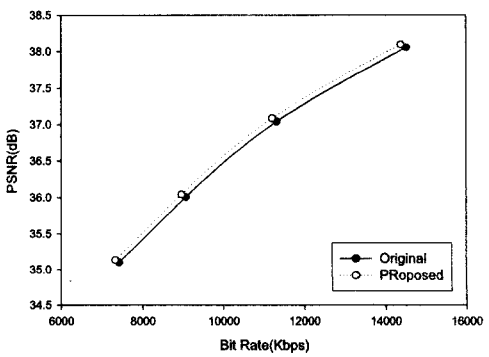


그림 6. station(HD)의 RD 곡선

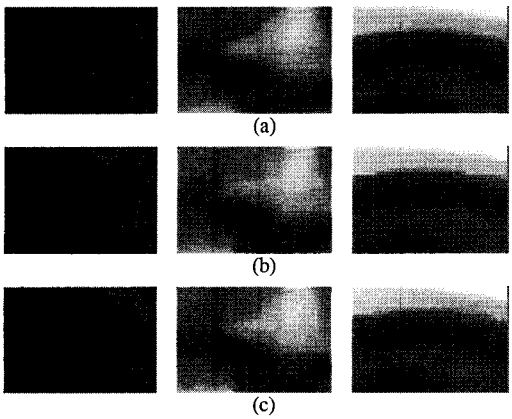


그림 7. foreman(CIF) 시퀀스의 24번째 프레임 내 부분 영상, (a) 원본 영상, (b) 기존 RDO로 부호화 된 영상, (c) 제안된 방법으로 부호화 된 영상

화를 위해 총 (4+9x16) 가지 모드 집합을 고려하는 데 비해 제안하는 방법은 모두 (4+9x16x2) 가지 모드 집합을 고려한다. 때문에 제안하는 방법은 기존 RDO에 비하여 약간의 연산을 더 필요로 하며 이는 JM 12.2에서 기존 RDO를 사용한 것에 비해 약 15%의 추가적인 부호화 시간으로 나타난다. 하지만 이는 적은 추가 연산으로 블록 간 종속성을 효율적으로 고려하는 것으로 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 H.264 인트라 프레임 부호화를 위한 향상된 모드 결정 기법을 제안하였다. 기존 RDO는 비디오 부호화에 적용되는 과정에서 복잡도를 현실적으로 낮추기 위해 인접 블록들의 부호화 결과들 간의 관계를 고려하지 않았었다. 하지만 H.264 인트라 부호화는 현저한 블록 간 종속적 요소를 가지고 있기 때문에, 이러한 점을 고려하는 요소를 기존 RDO에 추가하였다. 제안하는 방법은 I4x4 모드 내 4x4 블록 간 관계를 단순화하여 *PBSSD*를 정의 하였고 이를 기존 I4x4 예측 모드 결정 과정과 함께 모드 결정에 사용한다.

제안하는 방법은 같은 비트율 대비 0.049dB~0.101dB의 PSNR 향상을 얻을 수 있었으며, 같은 PSNR대비 0.64%~1.65%의 비트율 감소를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 H.264 인트라 프레임 모드 결정 기법은 기존 H.264 문법을 변경하지 않기 때문에 많은 H.264가 사용되는 응용에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] R. Schafer, T. Wiegand, and H. Schawarz, "The emerging H.264 standard EBU Technical Review," January 2003 at http://www.e-bu.ch/trev 293-contents.htm.

[2] T. Wiegand, M. Lightstone, D. Mukherjee, T. G. Campbell, and S. K. Mitra, "Rate-distortion optimized mode selection for very low bit rate video coding and the emerging H.263 standard," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.6, Issue 2, pp.182 - 190, April 1996.

[3] G. Sullivan, T. Wiegand, and K. P. Lim, "Joint Model Reference Encoding Methods and Decoding Concealment Methods," JVT-J049, *10th JVT Meeting*, Waikola, Hawaii, USA, December8-12, 2002.

[4] F. Pan, X. Lin, S. Rahardja, K. P. Lim, Z. G. Li, D. Wu, and S. Wu, "Fast mode decision algorithm for intra prediction in H.264/AVC video coding," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.15, No.7, pp.813-822.

[5] J. Wang, J. Wang, J. Chen, A. Tsai, and A. Paul, "A novel fast algorithm for intra mode decision in H.264/AVC encoders," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp.3498-3501, May. 2006.

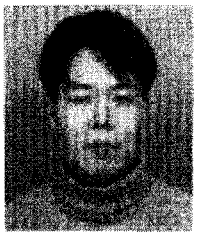
[6] Wonjae Lee, Yunho Jung, Seongjoo Lee, and Jaeseok Kim, "High Speed Intra Prediction Scheme for H.264/AVC," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol.53, 4, 2007, pp.1577 - 1582.

[7] C. H. Tseng, H. M. Wang, and J. F. Yang, "Improved and fast algorithms for intra 4/spl times/4 mode decision in H.264/AVC," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp.2128-2131, 23-26, May, 2005.

[8] Changryoul Choi and Jechang Jeong, "An improved intra prediction scheme of H.264/AVC," *ICSPCS*, 2007, Gold Coast, Australia.

[9] G. Bjontegaard, "Calculation of average PSNR differences between RD-Curves," *ITU-T VCEG*, VCEG-M33, April 2001

유 종 민 (Jong min You) 준회원



2003년 2월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
2005년 2월 한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터공학과 석사
2005년 3월~현재 한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 영상처리 및 영상압축, 트랜스코딩

최 창 렬 (Chang ryuol Choi) 준회원

1997년 2월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
1999년 2월 한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터공학과 석사
1999년 3월~현재 한양대학교 대학원 전자통신컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 데이터 은폐, 비디오 코딩, 채널 코딩

정 제 창 (Je chang Jeong) 정회원

1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업
1982년 2월 KAIST 전기전자 공학과 석사
1990년 미국 미시간대학 전기 공학과 공학박사
1980~1986 KBS 기술연구소연구원(디지털 TV 및 뉴미디어 연구)
1990~1991 미국 미시간대학 전기공학과 연구교수 (영상 및 신호처리 연구)
1991~1995 삼성전자 멀티미디어 연구소 (MPEG, HDTV, 멀티미디어 연구)
1995~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 교수 (영상통신 및 신호처리 연구실)
1998년 11월 27일 과학기술자상 수상
1998년 12월 31일 정보통신부장관상 표창
<관심분야> 영상처리 및 영상압축