

SAD 정보를 이용한 효율적인 DCT 계산 방식

정회원 문 용 호*

An Efficient DCT Calculation Method Based on SAD

Yong-Ho Moon* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 고속 동영상 압축을 위한 효율적인 DCT 계산 방식을 제안한다. 본 논문은 먼저 기존 움직임 추정 및 보상 과정에서 얻어지는 SAD가 양수 항과 음수 항의 합으로 분해됨을 유도한다. 그리고 이론적 분석을 통하여 기존 DCT 계산이 양수 항의 합과 음수 항의 합에 따라 DCT 생략, Reduced_DCT1, Reduced_DCT2, 그리고 DCT의 4가지 경우들로 분류될 수 있음을 보인다. 이러한 사실에 기초하여 제안 알고리즘에서는 효율적인 DCT 계산을 위하여 4가지 유형중에 하나가 선택되어 사용되어진다. 모의 실험 결과는 복원 화질의 저하와 부가 계산량 없이 평균 25.2% 정도의 계산량 감소가 이루어짐을 보여준다.

Key Words : DCT, SAD, Quantization, Computational Complexity

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient DCT calculation method for fast video encoding. We show that the SAD obtained in the motion estimation and compensation process is decomposed into the positive and negative terms. Based on a theoretical analysis, it is shown that the DCT calculation is classified into 4 cases - DCT Skip, Reduced_DCT1, Reduced_DCT2, and original DCT- according to the positive and negative terms. In the proposed algorithm, one of 4 cases is used for DCT in order to reduce the computational complexity. The simulation results show that the proposed algorithm achieves computational saving approximately 25.2% without image degradation and computational overhead.

I. 서 론

오늘날 다양한 디지털 비디오 응용분야에 대하여 여러 가지 동영상 압축 표준안들이 제정되어 왔다. 기존 동영상 압축방식은 이산여현변환(DCT), 움직임 추정 및 보상(motion estimation and compensation), 양자화(quantization), 가변길이 부호화(variable length coding) 등으로 구성되어 있다. 이 중 움직임 추정 및 보상, DCT, 역이산여현변환(IDCT)은 실제 구현 시 많은 메모리와 계산량이 요구된다고 알려져 있다[1-3].

지금까지 고속 동영상 압축을 위한 계산량 감소에 관한 연구는 주로 고속 움직임 추정 및 보상 부분에 대하여 다양하게 수행되어 왔다 [4-7]. 그리하여, 움직임 추정 및 보상 부분은 매우 효율적으로 구현되고 있다. 그런데 이것은 부호화기내의 다른 부분에서 소요되는 계산량 비중을 상대적으로 증가시켰다. 즉, 예전에는 작은 계산량으로 인식되었던 부분이 현재에는 그 비중이 점차 증가하게 되었다. 따라서 이것은 부호화기내의 다른 부분에서 소요되는 계산량 감소에 관한 연구가 필요하다. 이러한 추세 속에서 DCT 및 양자화 과정에서의 계산량 감

* 부산외국어대학교 정보과학대학 디지털정보공학부(yhmoon5@taejo.pufs.ac.kr)

논문번호 : 020527-1209, 접수일자 : 2002년 12월 9일

※본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:R05-2002-000-00991-0)지원으로 수행되었습니다.

소에 관한 연구가 진행되어지고 있다[8-13]. 일반적인 동영상 압축 부호화기에서는 예측 오차 블록의 DCT 주파수 성분들 모두가 '0'으로 양자화 될 때, 이러한 특정 상태를 나타내는 신호만을 복호화기로 전송한다. 이것은 각 계수 대신에 예측 오차 블록 상태에 대한 특정 부호만을 전송하기 때문에 압축 효율을 보다 향상시킬 수 있다. 그러나 이 같은 특정 상태는 DCT 및 양자화 과정을 거친 후에야 비로소 판정할 수 있다. 따라서, DCT 및 양자화 과정 이전에 미리 이러한 상태를 예측할 수 있다면 압축 효율의 향상과 더불어 생략된 블록 수만큼의 계산량 감소를 가져 올 수 있을 것이다. 이에 관한 연구 결과들이 최근에 발표되었다.

Xuan은 움직임 추정 과정에서 얻어지는 SAD(Sum of Absolute Difference)를 이용하여 모든 DCT 계수값들이 '0'으로 양자화되는 충분 조건을 이론적으로 유도하였다[9]. 그리고 이를 바탕으로 DCT 및 양자화 과정을 생략하여 계산량을 감소시켰다. Sousa는 Xuan의 조건에 비하여 보다 더 정확한 충분 조건을 이론적으로 유도하여 성능을 더욱 향상시켰다[10]. 그리고 실험 결과를 토대로 한 효율적인 계산량 감소 알고리즘들이 제안되었다[11-12]. 한편 [13]은 각각의 주파수 성분들에 대하여 '0'으로 양자화되는 조건을 이론적으로 조사하였다. 그리하여 몇몇 특정 주파수만이 '0'으로 양자화되지 않는 경우에 대하여 효율적인 DCT 계산 방식을 제안하였다. 즉, 기존 방식에서 수행하는 DCT 과정 대신 일부 계수들만을 계산할 수 있는 새로운 DCT 계산 방식을 적용하였다. 이러한 방식들은 별도의 부가 계산량을 사용하지 않는 특징을 지니고 있다.

본 논문에서는 기존 방식에 대한 이론적 분석을 통하여 일반적인 SAD 계산이 양수항의 합과 음수항의 합으로 표현될 수 있음을 유도한다. 아울러 이때 DC 값이 DCT 과정을 거치지 않고 효율적으로 계산됨을 보인다. 그리고, 기존 DCT 계산이 양수항의 합과 음수항의 합에 따라 4가지 유형으로 분류될 수 있음을 보인다. 이러한 사실에 근거하여 본 논문에서는 [13]의 방식을 보다 일반화한 효율적인 DCT 계산 방식을 제안한다. 제안 알고리즘에서는 4가지 유형에 대한 효율적인 DCT 계산 방식을 정의한다. H.264 방식에 의하여 수행된 모의 실험

은 제안 방식의 우수성을 객관적으로 입증한다.

II. 기존의 계산량 감소 방식

일반적인 동영상 압축 방식에서 부호화 과정은 그림 1과 같이 블록-기반의 움직임 예측 및 보상에 그 토대를 두고 있다.

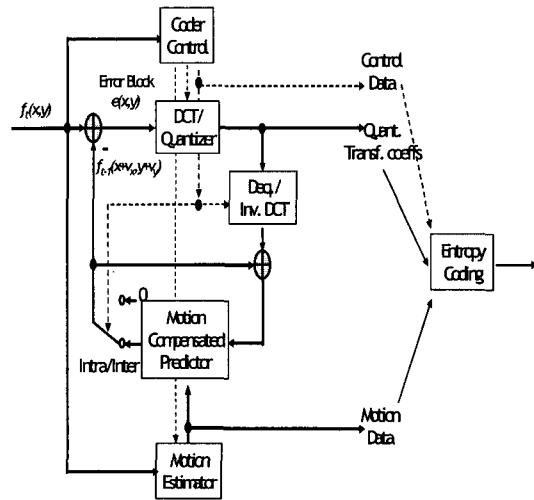


그림 1. 일반적인 동영상 부호화 과정

현재 프레임과 이전 프레임에서 $N \times N$ 블록에 대한 SAD 및 예측 오차 블록 $e(x,y)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$SAD = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} |e(x,y)| = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} |f_i(x,y) - f_{i-1}(x+v_x, y+v_y)| \quad (1)$$

여기서, $f_i(x,y)$ 와 $f_{i-1}(x+v_x, y+v_y)$ 는 현재 프레임과 이전 프레임을 나타낸다. H.264에서는 예측 오차 블록에 대하여 정수형 DCT 과정을 적용한다. 식 (2)는 이를 보여준다.

$$E_i(u,v) = \frac{2}{N} \cdot 26^2 \cdot k_u k_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} e(x,y) \cos\left(\frac{2x+1}{2N} u\pi\right) \cos\left(\frac{2y+1}{2N} v\pi\right) \quad (2)$$

$$\text{where } k_u, k_v = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{for } u, v=0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

그리고, 식 (3)은 각 계수들에 대한 양자화 방식을 나타낸다.

$$|E_s(u,v)| = \left\lfloor \frac{|E_i(u,v) \cdot A(Q_p)|}{2^{20}} + |f| \right\rfloor \quad 0 \leq u,v \leq 3, 0 \leq Q_p \leq 31 \quad (3)$$

여기서, $A(Q_p)$ 는 양자화 변수 (Q_p)에 따라 정해지는 양자화 스텝 크기이다.

기존의 계산량 감소 방식들은 부가적인 계산량을 이용하지 않으면서 DCT 및 양자화 과정 자체를 생략할 수 있는 충분 조건을 구하고자 하였다. 그리하여 모든 DCT 계수들이 동시에 '0'으로 양자화되는 조건이 이론적으로 제시되었다. 그리고 [13]에서는 각각의 주파수 성분들에 대하여 '0'으로 양자화되는 조건을 조사하였다. 식 (4)와 식 (5)는 이를 보여준다[13].

$$|E_i(u_m, v_n)| \leq C_{\max}(u_m, v_n) \cdot SAD \quad 0 \leq u_m, v_n \leq 3 \quad (4)$$

$$C_{\max}(u_m, v_n) = \frac{26^2}{2} \left| k_m \cos\left(\frac{2x+1}{8} u_m \pi\right) k_n \cos\left(\frac{2y+1}{8} v_n \pi\right) \right|_{\max} \quad (5)$$

여기서, (u_m, v_n) 는 특정 주파수를 나타낸다. 그리고, $C_{\max}(u_m, v_n)$ 는 특정 주파수에 따라 결정되는 상수 값으로서 주파수마다 '0'으로 양자화되는 조건이 다르다는 것을 암시한다. 즉, 식 (4)의 우변 항이 '0'으로 양자화될 경우 대응하는 DCT 계수는 '0'으로 양자화된다. 이상의 사실로부터 특정 주파수에 대하여 DCT 및 양자화 과정이 생략될 조건은 다음과 같다[13].

$$SAD < \frac{(1-f)2^{21}}{A(Q_p)} \cdot \frac{1}{C_{\max}} = \frac{\alpha(Q_p)}{C_{\max}(u_m, v_n)} = Th(u_m, v_n) \quad (6)$$

여기서, $Th(u_m, v_n)$ 는 각각의 DCT 계수들이 '0'으로 양자화되는 임계값을 나타낸다. 즉, 주어진 SAD 가 임계값보다 작을 경우, (u_m, v_n) 주파수 성분에 대한 DCT 계수는 '0'으로 양자화되

므로 이 주파수 성분에 대한 DCT 및 양자화 과정은 생략될 수 있다. [13]은 이러한 이론적 토대하에 모든 DCT 계수들이 동시에 '0'으로 양자화되지 않는 경우에도 계산량 감소가 이루어질 수 있다는 사실을 제시하였다. 각각의 주파수 성분들에 대한 DCT 생략 조건을 정리하면 몇몇 특정 주파수 성분들만이 '0'으로 양자화되지 않는 경우가 존재함을 알 수 있다. 그런데 기존 방식들은 이러한 경우에 DCT 과정을 적용하였다. 이는 불필요한 계산량이 소모됨을 의미한다. [13]에서는 이러한 경우에 대하여 '0'으로 양자화되지 않는 주파수 성분들만을 계산하는 효과적인 DCT 계산 방식을 제안하였다.

III. 제안 알고리즘

본 논문에서는 2개의 새로운 파라메타 S_p , S_m 을 정의함으로써 추가적인 계산량 없이 SAD 를 구할 수 있음을 보인다. 그리고 이를 바탕으로 기존에 제안된 [13]의 방식을 일반화함으로써 개선된 DCT 계산 방식을 제안한다.

앞의 식 (1)에 알 수 있듯이 SAD 는 예측 오차 블록내의 각 화소에 대한 절대치 합으로 정의된다. 그런데, 절대치 합을 구하는 과정을 양수 값을 가지는 화소들의 합과 음수 값을 가지는 화소들로 분리할 경우, SAD 는 식 (7)과 같이 재정의 될 수 있다.

$$SAD = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} |e(x,y)| = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^+(x,y) + \left| \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^-(x,y) \right| \quad (7)$$

$$S_p = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^+(x,y), \quad S_m = \left| \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^-(x,y) \right|$$

여기서, $e^+(x,y)$ 와 $e^-(x,y)$ 는 예측 오차 블록에서 양수 값과 음수 값을 가지는 화소를 각각 나타낸다. 이것은 움직임 추정 및 보상 과정에서 양수 항과 음수 항 각각에 대한 합을 구함으로써 SAD 를 새롭게 정의할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 식 (7)은 부가적인 계산 없이 SAD 가 얻어질 수 있다는 장점을 지닌다. 식 (7)의 표현 방식을 식 (4)와 식 (6)에 적용할 경우, 다음과 같은 수식들이 얻어진다.

$$|E_t(u_m, v_n)| \leq C_{\max}(u_m, v_n) \cdot (S_p + S_m), \quad 0 \leq u_m, v_n \leq 3 \quad (8)$$

$$S_p + S_m < \frac{(1-f)2^{21}}{A(Q_p)} \cdot \frac{1}{C_{\max}} = \frac{\alpha(Q_p)}{C_{\max}(u_m, v_n)} = Th(u_m, v_n) \quad (9)$$

본 논문에서는 이러한 사실들에 기초하여 예측 오차 블록을 S_p , S_m , 그리고 $Th(u_m, v_n)$ 관점에서 분석하였다. 그림 2는 이를 나타낸다. 그림 2로부터 주어진 오차 블록이 S_p , S_m , 그리고 $Th(u_m, v_n)$ 값에 따라 4가지 영역으로 분류됨을 쉽게 알 수 있다.

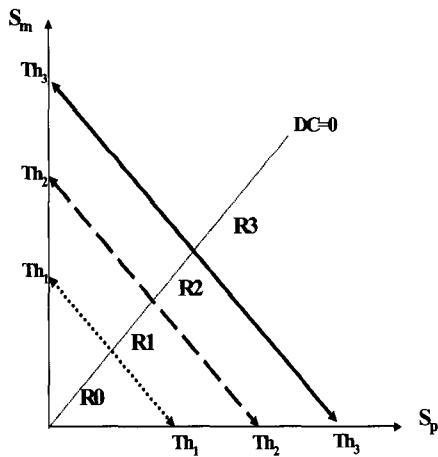


그림 2. S_p , S_m 에 따른 블록들의 분포

그림 2에서 R0은 모든 주파수 성분들이 '0'으로 양자화되어 DCT 및 양자화 과정을 생략할 수 있는 영역이다. 즉, 어떤 예측 오차 블록에 대한 S_p , S_m 이 R0 영역내에 존재할 경우 모든 주파수 성분들이 '0'으로 양자화되므로 DCT 및 양자화 과정이 생략될 수 있다. 한편, 주어진 S_p , S_m 이 R1 또는 R2 영역에 속할 경우는 몇몇 주파수 성분들만이 '0'으로 양자화되지 않는다. 즉, 이 경우에 4x4 블록 전체에 대하여 DCT를 수행하는 것은 무의미한 일이다. 따라서 '0'으로 양자화되지 않는 주파수 성분들에 대하여 DCT 계산을 수행하는 것이 타당할

것이다. 끝으로, 예측 오차 블록에 대한 S_p , S_m 이 R3 영역에 속할 경우에는 모든 주파수 성분들이 '0'으로 양자화되지 않는다. 즉, 이 경우에는 기존의 DCT 과정을 적용하여야 할 것이다. 표 1은 이상의 내용을 요약 정리한 것이다.

표 1. SAD 값에 따른 '0'이 아닌 주파수 성분 분포

영역	범위조건	'0'이 아닌 주파수 성분	DCT 계산 방식
R0	$(S_p + S_m) \times \alpha(Q) / 280$	없음	Skip
R1	$\alpha(Q) / 280 < (S_p + S_m) \times \alpha(Q) / 221$	(1,1), (1,3), (3,1), (3,3)	Reduced_DCT1
R2	$\alpha(Q) / 221 < (S_p + S_m) \times \alpha(Q) / 168$	(1,1), (1,3), (3,1), (3,3), (1,0), (0,1), (1,0), (0,1), (2,1), (2,3), (3,0), (3,2)	Reduced_DCT2
R3	$\alpha(Q) / 168 < (S_p + S_m)$	모든 주파수 성분	DCT

일반적으로 H.264에서 2차원 DCT은 수평, 수직의 2차원 행렬(matrix) 연산으로 구현된다. 그림 3은 식 (4)에 기반한 4x4 블록에 대한 2차원 정수형 DCT 행렬을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} 13 & 13 & 13 & 13 \\ 17 & 7 & -7 & -17 \\ 13 & -13 & -13 & 13 \\ 7 & -17 & 17 & -7 \end{bmatrix}$$

그림 3. 4x4 정수형 DCT 행렬

표 1에서 R1 영역에 대한 Reduced_DCT1은 그림 3의 점선 부분, 즉 4x2 행렬을 이용하여 '0'이 되지 않는 주파수 성분들만 계산하는 방식이다[13]. 따라서 Reduced_DCT1은 H/W의 추가 없이 효과적으로 DCT 과정을 수행한다. 그리고, R2 영역에 대한 Reduced_DCT2는 수평의 경우에는 기존 방식에서와 같이 그림 3의 DCT행렬을 적용한다. 그러나 수직의 경우, {13,13,13,13}과 {13,-13,-13,13}에 대한 행렬 연산은 수평 변환된 영상의 홀수 열에 대해서만 적용된다. 따라서 기존 DCT에 비하여 작은 계산량이 사용된다. 그림 4는 제안 알고리즘에 대한 전체 흐름도이다.

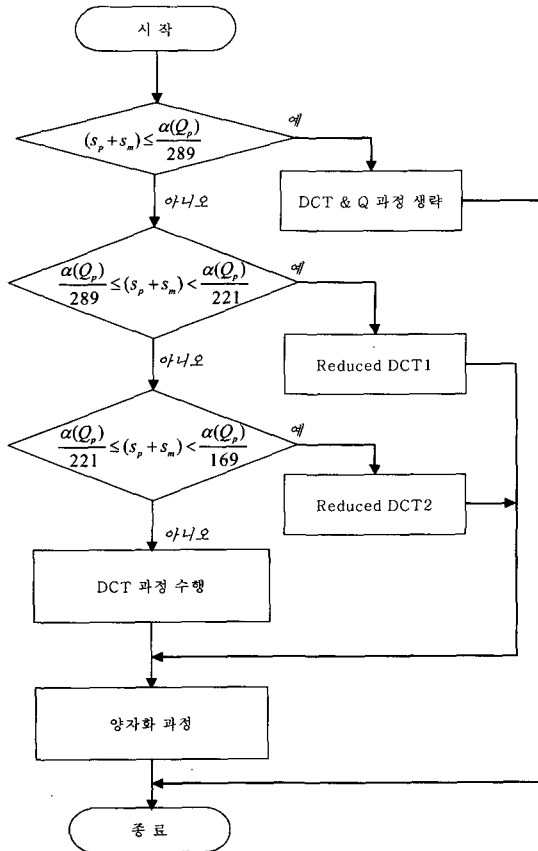


그림 4. 제안 알고리즘의 순서도

IV. 실험 결과 및 고찰

제안 방식의 우수성을 확인하기 위하여 본 논문에서는 H.264의 압축 방식에 있어서 기존 방식과 제안 방식간의 성능을 비교, 평가하였다. 모의 실험은 H.264의 TML-9를 이용하여 QCIF형식의 'Miss America', 'foreman', 'Claire', 그리고 'container' 시퀀스에 대하여 수행되었다. 실험에서 사용된 양자화 변수 (Q_p)는 16, 20, 24, 28로 선택하였다. 그리고, 움직임 추정 및 보상에서 참조 프레임은 5 프레임을 사용하였으며 프레임 비율은 30Hz로 하였다.

H.264에서 정수형 DCT 계산을 수행하는 데 있어서 '+' 연산 80번, '-' 연산 48번이 소요된다[1]. 그러나, R0은 모든 주파수 성분들이 '0'으로 양자화되기 때문에 계산이 수행되지 않는다.

즉, 기존 방식과 같이 DCT 및 양자화 과정이 생략된다. 그리고 '0'이 되지 않는 특정 주파수 부분만을 DCT 변환하는 R1은 '+' 연산 24번, '-' 연산 24번의 연산만이 이용된다. 이는 62.5%의 계산량 이득을 가져온다. 또한, R2의 경우에는 '+' 연산 56번, '-' 연산 44번이 소요되어 총 21.88%의 계산량 이득이 얻어진다.

[13]에서는 식 (12)와 같이 계산량 이득을 정의하여 성능평가를 수행하였다.

$$Gain1(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Reduced_DCT1 방식에 의한 DCT 및 양자화 계산량}}{(R1 + R2 + R3) \text{ 영역에 대한 DCT 및 양자화 계산량}} \right) \quad (12)$$

한편, 본 논문에서는 제안 알고리즘의 성능을 평가를 위하여 식 (13)과 같이 계산량 이득을 정의하였다.

$$Gain2(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Reduced_DCT1,2 방식에 의한 DCT 및 양자화 계산량}}{(R1 + R2 + R3) \text{ 영역에 대한 DCT 및 양자화 계산량}} \right) \quad (13)$$

식 (13)은 식 (12)를 보다 확장한 형태이다. 표 2는 각 sequence들에 대한 실험 결과를 보여준다.

표. 2 실험 결과.

Qp	Number of Block				Gain1	Gain2
	R0	R1	R2	R3		
16	31207	24299	28060	71986	12.21%	17.15%
20	53054	25475	28204	48371	15.60%	21.65%
24	76166	26222	24322	28234	20.80%	27.56%
28	98972	23378	17693	14789	26.16%	33.09%

(a) Foreman.

Qp	Number of Block				Gain1	Gain2
	R0	R1	R2	R3		
16	36877	25683	27879	65753	13.45%	18.56%
20	60276	23990	25989	45729	15.67%	21.61%
24	79156	20947	22559	33274	17.05%	23.48%
28	96049	18345	20361	21165	19.15%	26.59%

(b) Container.

Qp	Number of Block				Gain1	Gain2
	R0	R1	R2	R3		
16	152882	29328	21668	32042	22.07%	27.78%
20	166905	26384	21284	21267	23.92%	30.68%
24	185874	21035	15678	13189	26.35%	33.22%
28	199952	16680	11612	7676	28.98%	36.05%

(c) Miss America.

Qp	Number of Block				Gain1	Gain2
	R0	R1	R2	R3		
16	108439	17230	13527	17620	22.26%	28.38%
20	119083	14051	12259	11423	23.27%	30.38%
24	130764	11465	8206	6381	27.51%	34.40%
28	138363	8782	6141	3530	29.70%	37.02%

(d) Claire.

표 2는 기존 DCT 적용 방식에 비하여 제안 방식이 평균 25.2%의 계산량 이득을 가져옴을 보여준다. 그리고 제안 방식과 [13]의 방식을 비교해 볼 때 평균 7% 정도의 개선 효과가 얻어짐을 알 수 있다. 특히, 양자화 값이 증가할수록 성능 개선 비율이 좋아지는 실험 결과로 볼 때, 저 전송률일수록 제안 방식이 기존 방식보다 우수하다는 것을 예상할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 고속 동영상 압축을 위한 효율적인 DCT 계산 알고리즘을 제안하였다. 이론적 분석을 통하여 기존 DCT 계산이 S_p 와 S_n 의 값에 따라 DCT 생략, Reduced_DCT1, Reduced_DCT2, 그리고 DCT의 4가지 유형으로 분류될 수 있음을 보였다. 그리고 Reduced_DCT1과 Reduced_DCT2에 대하여 효율적인 계산 방식을 제안하였다. 본 논문은 제안 방식의 우수성을 검증하기 위하여 다양한 Test Sequences에 대하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험 결과로부터 4가지 Test Sequences 모두에서 계산량이 감소됨을 알 수 있다. 기존 방식에 비하여 평균 25.2% 정도의 계산량이 제안 방식에서 감소되었다.

한편, 제안 방식은 부가적인 계산량을 요구하지 않는다. 또한, 8x8 블록 기반의 다른 동영상 압축 방식에 대해서도 적용 가능한 장점을 지니고 있다.

참고 문헌

- [1] ISO/IEC13818-2, "MPEG-2 video," *ITU-T Recommendation H.262*, Jan.1995
- [2] ITU-T, "Video Coding for Low Bitrate Communication," *Draft Recommendation H.263*, Dec. 1995
- [3] ITU-T, "H.26L Test Model Long-Term Number 9(TML-9)," Dec. 2001
- [4] J.R. Jain and A.K. Jain, "Displacement measurement and its application in interframe image coding", *IEEE Journal on Selected Articles in Communications*, Vol. 29, pp.1799-1808, 1981.
- [5] W. Li and E. Salari, "Successive elimination algorithm for motion estimation", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 4, No. 1, pp.105-107, 1995.
- [6] H.S. Wang and R.M. Mersereau, "Fast algorithm for the estimation of motion vectors", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 8, pp.435-438, 1999.
- [7] S. Zhu and K. Ma, "A new diamond search algorithm for fast block matching motion estimation," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 9, pp. 287-290, Feb. 2000.
- [8] S.D Chen, Abd. Rahman Ramli, M.R. Mukerjee, "All-Zero-AC block detection using energy preservation theorem for H.263 video coding", *TENCON 2000*, Vol. II, pp.425-430, 2000
- [9] Zhou Xuan, Yu Zhenghua and Yu Songyu, "Method for detecting all-zero DCT coefficients ahead of discrete cosine transformation and quantisation", *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 19, pp.1839-1840, Sept. 1998
- [10] L.A Sousa, "General method for eliminating redundant computations in vi-

- deo coding", *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 4, pp.306-307, Feb. 2000
- [11] Shi Jun and Songyu Yu, "Efficient method for early detection of all-zero DCT coefficients", *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 3, pp.160-161, Feb. 2001
- [12] S.K.Jang, S.D.Kim, J.Lee, G.Y.Choi, and J.b.Ra, "Hardware-software coimplementation of a H.263 video codec", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 46, No. 1, pp. 191-200, Feb. 2000
- [13] 문용호, "고속 비디오 코딩을 위한 효율적인 DCT 계산 방식" 한국 통신 학회 논문지, Vol 27, No. 9A, pp.908-915, Sept. 2002

문 용 호(Yong-Ho Moon)

정회원

한국통신학회 논문지, 제 28권, 제 5C호 참조