

One-Chip JPEG 적용을 위한 영상 스크램블링

° 권정익 · 원치선 · 김재공
동국대학교 전자공학과

Image Scrambling for One-Chip JPEG Applications

° Jong Ik Kwon · Chee Sun Won · Jae Kong Kim
Dept. of Electronic Eng., Dongguk University

ABSTRACT

In this paper, we investigate possible scrambling methods for the JPEG(Joint Photographic Expert Group) still image compression standard. In particular, we compare the conventional line rotation and line permutation methods to the DCT block scrambling in terms of the number of bits to be increased and the easiness of buffer control. Computer simulation results show that the DCT block scrambling method is suitable for both data security and buffer control in one-chip JPEG applications.

1. 서론

디지털화 된 정지 영상을 암호화하여 전송하는 경우 종래의 의사 난수에 의한 가산 암호화 방식은 영상 데이터의 높은 중복성(Redundancy) 때문에 비화도가 낮다[1]. 그렇다고 주사선 교환(Line Permutation)이나 주사선 회전(Line Rotation)[2] 또는 Space-Filling-Curve[3]등을 이용한 디지털 정지 영상 암호화 기법은 영상을 압축하여 전송 또는 저장하는 경우에 압축의 방법에 따라 압축율이나 버퍼 통제 등에 악영향을 줄 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [4][5]에서는 영상 압축에 악영향을 끼치지 않고 오히려 버퍼 통제와 에러 감춤에 도움을 줄 수 있는 이중 DCT 블록 스크램블링 기법을 제안한 바 있다. 비록 이중 DCT 블록 스크램블링 방식이 특정 영상 데이터 저장·전송의 응용 분야(예를 들어 디지털 VCR 등)를 위한 영상 부호화 과정 중에 도입되어 사용될 수 있지만 세계적인 영상 압축 표준화 방식인 JPEG나 MPEG I·II에 응용되기 위해서는 영상 압축되는 중간에 어떤 새로운 기능(예를 들어, 이중 DCT 블록 스크램블링의 두번째 DCT 계수 스크램블링 단계)이 추가되어서는 안된다. 즉, JPEG나 MPEG I·II의 기능이 담긴 단일 칩을 사용하는 응용분야에서는 단일 칩 내부의 과정에 스크램블링 기능을 추가하는 것이 불가능할 수 있다.

본 논문에서는 정지 영상을 압축하는 JPEG 단일 칩을 사용하여 영상을 저장 또는 전송하는 경우에 적합한 스크램블링 기법을 제안한다. 물론 JPEG 칩으로 압축된 데이터에 직접 난수를 배타적 논리합(Exclusive-OR)하는 가산 암호화 방식을 사용할 수 있지만, 스크램블링 기능 외에 버퍼 통제 등에 도움을 주고 또한 가능한 한 영상 처리의 앞 부분(전송 및 저장 채널에서 가능한 멀리 떨어진)에서 스크램블링을 하는 것이 데이터의 보안성을 높일 수 있으므로 영상 데이터가 JPEG 칩으로 들어가기 전에 전처리 과정으로 스크램블링을 행

하는 방법에 대해 알아본다. JPEG 영상 압축은 DCT 변환 부호화를 기본으로 하는 영상 압축 방법이므로 JPEG 칩으로 입력되는 영상에 DCT 블록 스크램블링을 적용할 수 있다. 그러나 JPEG의 경우 DCT된 DC 계수들은 DCT 블록 래스터 스캔(Raster Scan) 방향으로 DPCM이 적용되어 데이터가 감축되므로 원 영상을 DCT 블록 단위로 스크램블링 하면 인접된(Raster Scan 방향의) 블록 사이의 평균 밝기 세기의 연속성이 깨져 DPCM에 의한 데이터량이 증가될 수 있다. 본 논문에서는 실제로 이와 같은 상황에 DC 계수의 데이터량의 증가율을 실험을 통하여 확인하고, 기존의 주사선 교환 및 주사선 회전 방식 등과 그 성능을 비교하였다. 또한, 정지 영상 내에 DCT 블록 스크램블링만을 적용하는 경우 영상 내 밝기의 세기에 대한 히스토그램(Histogram) 정보는 비화되지 않고 노출될 수 있으므로 영상의 종류가 밝혀질 수 있다. 이와 같은 경우 비화도를 향상시키기 위해 JPEG 칩에 입력되는 영상을 DCT 블록 단위로 평균 밝기의 세기를 뺀 나머지 값만을 가지고 스크램블링 및 JPEG 입력하고 평균값들은 따로 스칼라(Scalar) 혹은 벡터(Vector) 양자화 및 압축하여 전송하는 기법도 사용할 수 있다. 이때 JPEG의 허프만 테이블 등은 칩 외부에서 액세스할 수 있으므로 평균값으로부터 빠진 잔여 데이터 값에 적합한 테이블로 수정될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 JPEG 영상 압축을 블록 단위로 간단히 설명하고, 제 3 장에서는 JPEG의 전처리 스크램블링으로 적용 가능한 스크램블링 기법을 소개하며, 제 4 장에서는 이들 방법이 압축에 미치는 영향을 분석하며, 제 5 장에서는 비화도를 조절할 수 있는 Depth-Control 개념을 적용하고, 제 6 장에서는 비화도의 향상을 위해 평균값을 뺀 잔여 영상 데이터에 의한 스크램블링 방식을 소개하고, 제 7 장에 결론으로 마친다.

2. JPEG 영상 압축 블록

JPEG(Joint Photographic Expert Group)은 CCITT와 ISO가 공동으로 정지 영상의 디지털 압축에 관한 국제 표준화로 제정한 것으로, 그래프나 의료용 영상 등의 효율적인 전송 및 저장을 위해 활용될 수 있다. 그림 1에서와 같이 DCT와 허프만 코딩(즉, 손실과 무손실 부호화)으로 이루어진 비교적 간단한 압축 방법으로, 이미 실용화를 위해 단일 JPEG 칩이 시판되고 있다.

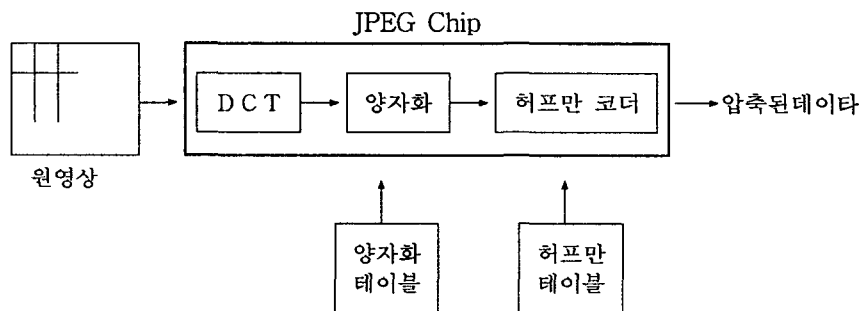


그림 1. JPEG의 블록도

정지 영상이 JPEG 압축기로 입력되면 우선 8×8의 DCT 블록으로 나누어지고 각 블록

에서 DCT 변환이 이루어진다. 8×8 DCT 계수들은 양자화 테이블에 의해 양자화되고 그 중에 DC 성분은 래스터 스캔 방향의 인접 DCT 블록들의 DC 값들과 DPCM 되고 나머지 AC 성분들은 RLC(Run Length Coding)이 적용된다. 부호화된 DC, AC 성분들은 다시 각각에 적합한 허프만 테이블을 참고로 허프만 부호화되어 최종 출력된다. JPEG 칩에서 사용되는 양자화 테이블이나 허프만 테이블 등은 기본(Default)으로 제공되며, 응용에 따라 사용자가 수정할 수 있도록 하였다.

3. 스크램블링 방법

단일 JPEG 칩을 사용하는 경우 JPEG 칩의 출력(즉, 압축된 데이터)에 직접 난수를 배타적 논리합(Exclusive-OR)하여 암호화할 수 있으나, 스크램블링 효과 이외에 압축 효과에도 도움을 주고, 또 암호화하는 시점이 빠를수록(즉, 채널에서 멀수록) 원 데이터의 노출 위험이 낮아지므로 영상 데이터가 JPEG 칩에 입력되기 전에 스크램블링되는 것이 바람직하다. 본 장에서는 압축전 디지털 영상 데이터에 적용될 수 있는 스크램블링 방식으로 기존의 주사선 교환 및 주사선 회전과 본 논문에서 제안하는 DCT 블록 스크램블링 방식을 살펴본다.

(1) 주사선 교환 방식

한 화면내의 주사선을 의사 난수에 의해 랜덤하게 뒤섞어 놓는 방식이다. 이 방식은 한 화면 분의, 비교적 대용량의 버퍼 메모리가 필요하다. 비화도의 손실은 있지만 소요 버퍼 메모리를 줄이는 방편으로 한 화면을 몇 개의 블록으로 나누어 블록 내의 주사선만을 교환함으로써 소요 메모리를 블록 크기로 줄일 수 있는 방법이 있다.

또한, 주사선 내에서도 화소의 위치를 랜덤하게 교환하고 각 주사선마다 다른 난수 초기치를 사용하는 방법도 있다. 이는 주사선을 교환하는 방법보다 오버헤드가 크지만 비화도는 높다. 이 방법도 소요 메모리를 줄이기 위해 교환 단위를 화소가 아닌 한 주사선을 몇개의 블록으로 나누거나, 연속되는 몇개의 화소를 블록으로 잡아 교환할 수 있다.

난수 초기치를 사용하여 난수 발생기로부터 교환에 필요한 데이터를 발생시키는 대신 교환에 필요한 데이터를 직접 전송할 수 있다. NTSC의 경우에 525 라인을 전송하지만 실제로 화면을 재생할 때에는 전체 525 라인이 사용되지 않는다. 이렇게 사용되지 않는 주사선에 필요한 데이터를 포함시켜 전송할 수 있다.

(2) 주사선 회전 방식

각 주사선마다 의사 난수로 절단점을 선택하여 주사선을 절단하고 전후를 바꾸어 주는 방식이다. 한 주사선을 의사 난수 발생기(Pseudo Random Number Generator)에서 발생시킨 주사선 내 화소의 주소만큼 이동(Shift)시킨다. 이때 의사 난수 발생기에서 발생시킨 주사선 내 화소의 주소를 절단점(Cut Point)이라고 한다. 이 방식은 한 주사선 분의 버퍼가 필요하며, 난수 발생기로부터 발생시킨 난수를 주사선당 화소의 수로 Modulo 연산시킴으로써 쉽게 절단점을 구할 수 있기 때문에 구현이 간편하고 속도가 빠르며 비화도가 높다. 이러한 장점으로 인해 위성이나 유선 방송의 유료 TV 시스템에 많이 적용되고 있다.

(3) 제안된 DCT 블록 스크램블링

그림 1과 같이 DCT를 근간으로 하는 JPEG 영상 압축에서는 그림 2와 같이 JPEG에 입력되는 데이터를 DCT 블록 단위로 스크램블링하여 블록내 데이터의 연속성을 유지하고 스크램블링 및 원활한 버퍼 통제의 효과를 얻을 수 있는 DCT 블록 단위 스크램블링을 사용할 수 있다. 그러나, 이 경우 JPEG 압축에서 DCT 계수 중에 DC 값들은 영상 DCT 블록의 래스터 스캔 방향으로 DPCM하여 즉, DCT 블록 내 평균 밝기 세기의 연속성을 이용하여 데이터를 압축하므로 스크램블링으로 뒤섞인 상태에서 평균 밝기 세기의 연속성이 깨져 DPCM의 데이터량이 증가할 수 있다. 이 현상과 버퍼 통제등 영상 압축에 미치는 영향은 제 4 장에서 다루도록 한다.

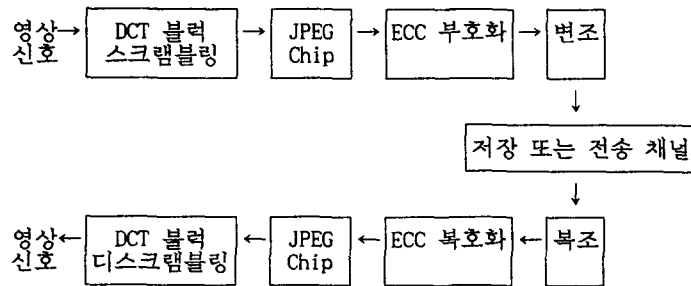


그림 2. DCT 블록 스크램블링 블록도

4. 스크램블링 방법들의 압축에 미치는 영향

본 장에서는 JPEG 압축 이전에 전처리 스크램블링 기법인 주사선 교환, 주사선 회전, DCT 블록 스크램블링의 방법이 압축 효과와 버퍼 제어에 미치는 영향을 정량적으로 비교 분석한다.

1) 버퍼 제어에 미치는 영향

정보 감축시 정보 자체의 손실을 최소화하기 위해 정보량에 따라 비트의 할당을 가변시키는 가변장 길이 부호화를 사용할 경우에 출력 데이터율이 일정하지 않다. 따라서, 가변율의 전송단과 고정율을 갖는 채널 혹은 기록 매체 사이에 완충 역할의 버퍼가 필요하다. 이러한 전송 환경하에서는 전송 대역이 제한되어 가변율의 출력을 고정율의 출력으로 바꾸는 버퍼 제어(buffer control)가 필요하다.

DCT를 기반으로 하는 영상 압축에서 몇 개의 DCT 블록으로 구성된 매크로 블록 단위로 버퍼 제어를 할 때, 매크로 블록의 정보량이 작은 변동을 갖으면 효율적으로 버퍼 제어를 할 수 있다. 즉, 정보량의 변화가 적으면 부호화에 소요되는 매크로 블록당 비트를 거의 일정하게 할당할 수 있다. 한편, 매크로 블록을 구성하는 DCT 블록의 갯수가 많을수록 매크로 블록당 발생하는 정보량의 편차가 작아져 효율적인 버퍼 제어가 가능하나 전송 에러

등으로 매크로 블록의 정보를 잃게 되면 해당 매크로 블록의 정보를 모두 잃게 될 수 있으므로 적절한 수준에서 매크로 블록의 크기를 설정하여야 한다. 본 논문에서는 한개의 매크로 블록을 32개의 DCT 블록으로 구성하여 원 영상과 주사선 교환, 주사선 회전 그리고 DCT 블록 스크램블링으로 스크램블링된 영상의 정보량의 변화를 비교하였다(그림 3 참조).

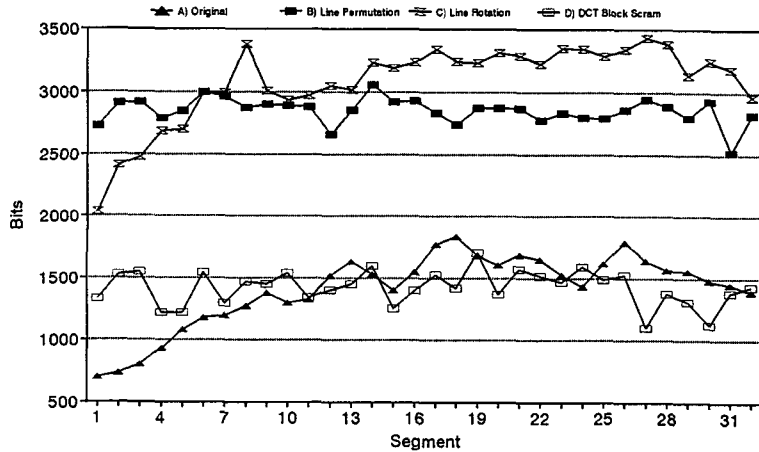


그림 3. 정보량의 변화(LENA)

그림 3에서 보듯이 B)의 주사선 교환된 영상과 C)의 주사선 회전된 영상은 정보량의 변동이 심하나 D)의 DCT 블록 스크램블링으로 스크램블링된 영상의 정보량은 원영상의 정보량보다 오히려 변화가 적고 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이 결과는 [6]과 일치하며, DCT 블록을 단위로 스크램블링을 적용하면 버퍼 제어를 원활히 할 수 있음을 알 수 있다.

2) 데이터량 비교

영상을 스크램블링하는 방법에 따라 압축에 미치는 영향을 알아보기 위해 JPEG에서의 DCT를 사용한 가변장 부호화와 허프만 부호화를 이용하여 영상을 압축하였을 경우(DC 계수는 9bit 스칼라 양자화) 압축전 주사선 교환, 주사선 회전 및 DCT 블록 스크램블링을 적용하였을 때 압축된 데이터의 비트수를 표 1에 제시하였다. 실험 결과에 의하면 DCT 블록을 기본 단위로 스크램블링하는 경우는 데이터의 증가가 없으나, 주사선 교환이나 주사선 회전의 경우는 데이터량이 원영상에 비해 약 200% 증가하였으며 복원된 영상도 원영상의 복원 영상에 비해 화질이 떨어진다.

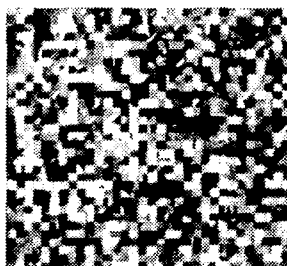
표 1. 데이터량 및 복원 화질(LENA)

비교 대상	데이터량(bits)	비트율(b.p.p.)	화질(PSNR:dB)
원 영상	45512 (100%)	0.694	30.07
주사선 교환	91230 (200%)	1.392	25.19
주사선 회전	98527 (216%)	1.503	24.82
DCT 블록 스크램블링	45512 (100%)	0.694	30.07

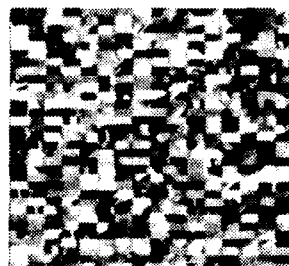
JPEG 압축을 사용하는 경우 주사선 교환이나 주사선 회전으로 스크램블링하면 DCT 블록 스크램블링때보다 데이터량이 훨씬 많이 증가한다. 표 1에서는 DC 계수가 각각 9 bit로 스칼라 양자화한 경우를 나타내었고, 실제 JPEG에서는 DCT의 DC 계수는 래스터 스캔 방향으로 인접 DCT 블록의 DC 계수와 DPCM 되어 더욱 데이터량이 감소된다. 그러나, DCT 블록을 스크램블링하면 인접된 블록들 사이에 평균 밝기 세기의 연속성이 깨져 데이터량이 증가될 수 있다. 증가되는 데이터량을 측정하기 위해 1개의 DCT 블록, 2개, 4개, ... 의 DCT 블록을 묶어 스크램블링의 기본 단위로 사용하는 경우의 DPCM된 DC의 데이터량의 변동을 표 2에 제시하였고 각각의 경우에 스크램블링된 해당 영상을 그림 4에 나타내었다. 표 2에서 보듯이 스크램블링 블록의 단위가 커질수록 DPCM된 DC의 데이터의 증가량이 작아지나 이 경우 스크램블링의 효과가 떨어지고 반대로 스크램블링의 단위가 작아질수록 DC 데이터량은 증가하나 스크램블링의 효과는 향상된다. 그러나 전체적으로 DCT 블록 스크램블링에 의한 DPCM된 DC 계수의 증가량은 전체(AC + DC) 정보량에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 데이터 증가량과 스크램블링 효과는 서로 상충되지만 DCT 블록 2개를 묶어 하나의 스크램블링 단위로 한 경우 양쪽의 조건을 어느 정도 만족시킬 수 있는 것으로 판단된다.

표 2. 계수별 데이터량 변동(LENA)

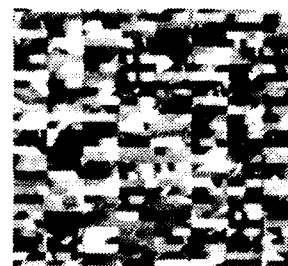
매크로 블록의 구성 (DCT 블록의 수)	DC 계수 데이터량 (bits)	AC 계수 데이터량 (bits)	전체 데이터량 (bits)
1	8297 (125 %)	36296 (100 %)	44593 (103.93 %)
2	7308 (110 %)	36296 (100 %)	43604 (101.63 %)
4	6955 (105 %)	36296 (100 %)	43251 (100.81 %)
8	6772 (102 %)	36296 (100 %)	43068 (100.38 %)
16	6689 (101 %)	36296 (100 %)	42985 (100.19 %)
32	6609 (100 %)	36296 (100 %)	42905 (100.00 %)



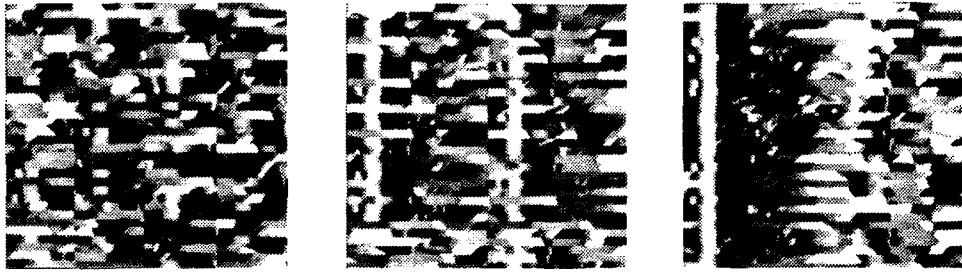
A) 1개의 DCT 블록



B) 2개의 DCT 블록



C) 4개의 DCT 블록



D) 8개의 DCT 블록 E) 16개의 DCT 블록 F) 32개의 DCT 블록

그림 4. 매크로 블록 구성에 따른 스크램블링 효과

5. 비화도 조절(Depth-control)

한정 수신 시스템을 위한 스크램블링 방법이 갖추어야 할 조건 중의 하나는 영상과 음성이 스크램블링된 한정 수신 모드와 스크램블링 없이 가입자뿐만이 아니라 미가입자도 원 신호를 수신할 수 있는 공개 모드도 갖추어야 한다는 점이다. 더 나아가 선전 효과를 위해 스크램블링의 강도(비화도)를 조절할 수 있어야 한다.

본 장에서는 난수의 발생 범위를 조절할 수 있는 난수 발생기를 사용하여 비화도를 조절하는 Depth-control의 개념을 도입한다. 즉, 스크램블링하려는 대상의 범위를 한정하여 비화도의 강도를 조절할 수 있다.

그림 5에 Depth-control이 가능한 난수 발생기를 나타내었다. 제안된 구조에서는 의사 난수 발생 초기치에 난수 발생 범위를 한정하는 비트를 첨가하여 스크램블링의 범위를 인식할 수 있고 Depth-control을 위한 부가 정보를 따로 전송할 필요가 없다. 사용한 난수 발생기는 10 bit길이의 LFSR(Linear Feedback Shift Register)로 난수 발생 초기치의 표시 비트에 의해 선택된 비트들의 배타적 논리합(Exclusive-OR)이 다시 최상위 비트로 되먹임된다. 이때 난수 발생 초기치의 최상위 위치의 최초 '1'이 나타나는 위치의 값은 무시하고 바로 다음 비트의 위치가 난수 발생의 최상위 비트가 되도록 정함으로써 최상위 비트쪽의 최초 '1'은 난수 발생의 범위를 나타내는 표시 비트로 작용하여 난수의 범위를 쉽게 조절할 수 있다(표 3 참조). 예를 들어, LFSR의 크기가 '6'일때(표 3에서 빗금 친 부분) 첫번째 비트와 여섯번째 비트가 배타적 논리합되며 그림 5에서 실선으로 나타내었다.

그림 4에서 매크로 블록내 DCT 블록을 묶어 스크램블링하여 데이터량의 증감 현상을 살펴보았으며, 그림 4의 F)의 32개의 DCT 블록으로 매크로 블록을 구성하여 스크램블링할 경우 그림 5에서 제안된 난수 발생기로 비화도를 조절하면 결국 그림 6와 같이 되어 스크램블링 범위가 감소할수록 영상의 내용을 대략 파악할 수 있음을 알 수 있다.

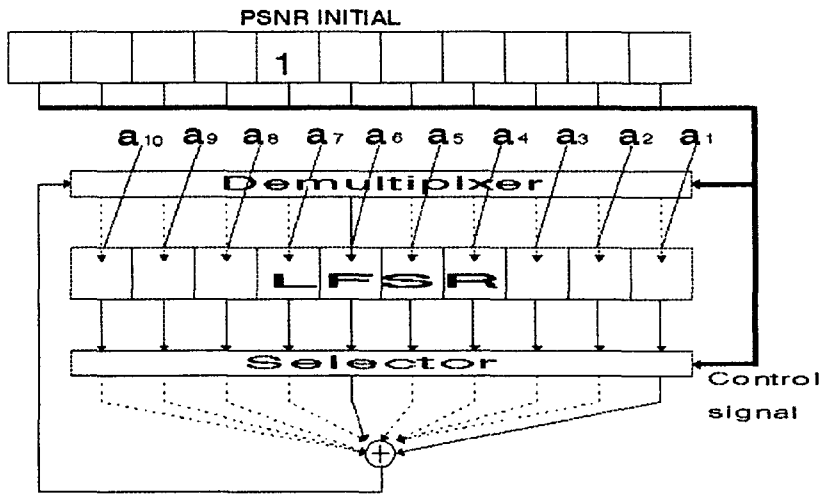
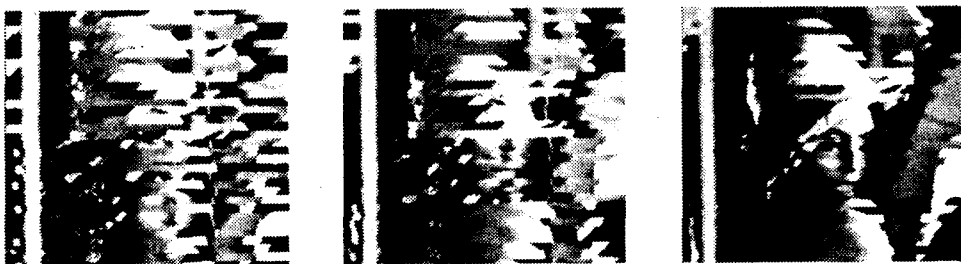


그림 5. Depth-control이 가능한 의사 난수 발생기

표 3. 의사 난수 발생기 논리합 비트 조합

LFSR 크기 (bits)	난수 발생 범위	제어 비트 위치	Feedback 되는 데이터
2	4	3	$a_1 \oplus a_2$
3	8	4	$a_1 \oplus a_3$
4	16	5	$a_1 \oplus a_4$
5	32	6	$a_1 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus a_5$
6	64	7	$a_1 \oplus a_6$
7	128	8	$a_1 \oplus a_7$
8	256	9	$a_1 \oplus a_2 \oplus a_8$
9	512	10	$a_1 \oplus a_2 \oplus a_9$
10	1024	11	$a_1 \oplus a_3 \oplus a_5 \oplus a_{10}$



A) 1/2 범위

B) 1/4 범위

C) 1/16 범위

그림 6. Depth-control에 따른 비화도의 변화

6. 잔여 데이터를 이용한 스크램블링

JPEG에 입력되는 영상에 DCT 블록 스크램블링을 하면 영상의 밝기 세기의 분포(즉, 히스토그램)에 대한 정보는 암호화 되지 않고 노출되므로 영상에 따라서는 그 종류를 판단할 수 있다. 이와 같은 것이 문제가 되는 경우는 그림 7에서와 같이 JPEG에 입력되는 영상 데이터를 DCT 블록 단위(혹은 전체 영상 크기)에서 구한 평균값으로 뺀 잔여 영상을 DCT 블록 스크램블링하여 JPEG 칩에 입력시킬 수 있다. 이 경우 평균값은 따로 암호화되어 스칼라 또는 벡터 양자화되어 전송되고, 잔여 데이터의 통계적 특성에 맞는 새로운 양자화 테이블과 허프만 테이블을 JPEG 칩의 단자를 통해 사용자가 외부에서 입력시킬 수 있다. 이는 평균값을 제거한 잔여 영상을 압축할 경우 전송에 소요되는 비트 수를 줄일 수 있고, 화질에도 거의 영향을 미치지 않으므로 평균값을 전송하기 위해 소요되는 비트를 감산하여도 원 영상을 압축한 경우와 비교하여 전체적인 비트율이 감소할 수 있으며 부가적인 기능을 기대할 수 있다.

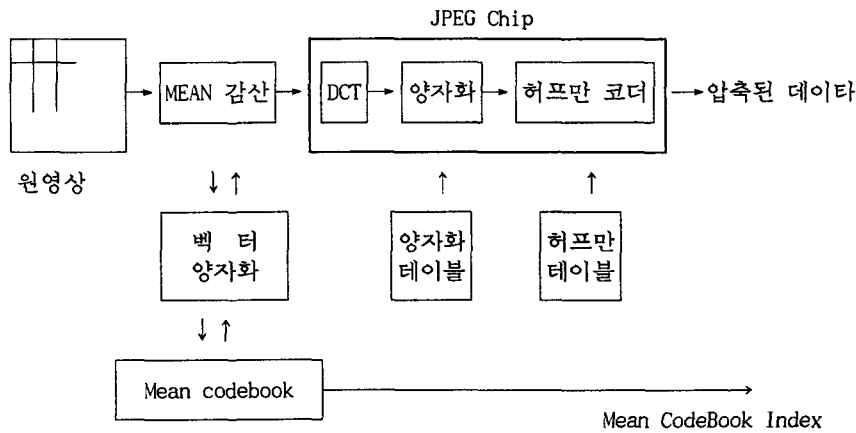


그림 7. 잔여 데이터를 이용한 스크램블링 블록도

7. 결론

정지 영상 압축을 위한 JPEG 단일 칩을 사용하는 경우에 영상을 암호화하기 위한 스크램블링 방법으로 JPEG 칩에 입력되는 영상을 DCT 블록 단위로 스크램블링하는 방법을 제안한다. DCT 블록 단위로 영상 내에서 스크램블링하면 충분한 스크램블링 효과 이외에 영상 내 정보량 분산으로 버퍼 제어가 쉬워진다. 그러나 JPEG에서는 DCT의 DC 계수를 DPCM하므로 DCT 블록 스크램블링에 의해 DPCM된 데이터의 정보량이 증가될 수 있다. 실험에 의하면 이 경우 데이터량의 증가는 무시할 수 있을 정도(32개의 DCT 블록으로 매크로 블록을 구성하였을 경우, 전체 데이터량의 약 3%)로 작았다.

비화도 조절이 가능한 Depth-Control의 기능은 스크램블링 블록을 주사선(혹은 Macro Block) 단위 또는 그것의 1/2, 1/4, ... 등의 단위로 하여 얻을 수 있다.

JPEG 칩에 입력되는 데이터를 DCT 블록 스크램블링만 하는 경우 영상 내 히스토그램에 의한 밝기의 세기 분포 정보는 암호화 되지 않고 노출되므로 영상의 종류가 판단될 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 JPEG 칩에 입력되는 데이터를 DCT 블록 단위로 계산된 평균값으로 뺀 잔여 데이터를 스크램블링하여 비화도를 높일 수 있다.

참고 문헌

- [1] 前田章, 古村文伸, 白石高義, “デジタル畫像に適したデータ暗號化の一方法”, 電子通信學會論文誌, vol.J69-B,no.11, pp.1385-1392, 1986.
- [2] 秋山英雄, “スクランブル方式”, テレビジョン學會誌, vol.46, no.1, pp.31-39, 1991.
- [3] Yossi Matias, Adi Shamir, “A Video Scrambling Technique Based On Space Filling Curve”, CRYPTO-87, 1987.
- [4] 권정익, 원치선, “디지털 VCR을 위한 비디오 스크램블링”, 제6회 신호처리 합동 학술 대회 논문집 제6권 1호, pp.189-192, 1993.
- [5] 권정익, 원치선, “다기능을 갖는 영상 스크램블링”, 제7회 신호처리 합동 학술 대회 논문집 제7권 1호, pp.638-641, 1994.
- [6] S.I.Kim, et al., “Bit Rate Reduction Algorithm for a Digital VCR,” IEEE Trans. CE, pp. 267-274, 1991.