

Fringe 영상의 주파수 특성 분석

정회원 서영호*, 최현준**, 종신회원 김동욱**

A FRINGE CHARACTER ANALYSIS OF FRINGE IMAGE

Young-Ho Seo*, Hyun-Jun Choi** *Regular Members*, Dong-Wook Kim** *Lifelong Members*

요약

컴퓨터 생성 홀로그램(CGH, Computer Generated Hologram)은 광 홀로그램의 간섭 패턴 대신 3차원 영상을 재생하는 데 필요한 정보만을 컴퓨터로 설계 및 제작하기 때문에 물리적으로 존재하지 않는 가상의 물체의 합성 및 생성이 가능하다. 하지만 CGH를 통해 생성된 fringe 영상은 그 데이터양이 방대하기 때문에 저장, 전송 및 처리를 위해서는 데이터양을 줄일 필요성이 있다. 하나의 객체를 나타내기 위한 Fringe 영상의 데이터양을 줄이는 가장 효율적인 방법은 부호화 과정이다.

본 논문에서는 효과적인 부호화를 위해 fringe 영상을 2차원 영상으로 가정한 후에 DCT(Discrete Cosine Transform)에 비해서 좋은 주파수 변환 특성을 보이는 DWT(Discrete Wavelet Transform)을 도입하여 Fringe 영상의 주파수 특성을 분석하였다. 그리고 분석된 주파수 특성을 기반으로 Fringe 영상을 웨이블릿 기반의 코덱들을 이용해 압축한 결과 Yoshikawa^[2]나 Thomas^[3]에 의한 방법에 비해 최대 약 2배의 압축율을 가질 수 있어 fringe 패턴을 압축하는 좋은 방법이 될 수 있다는 것을 확인하였다.

Key Words : Hologram, CGH(Computer Generated Hologram), Fringe, DWT, DCT.

ABSTRACT

The computer generated hologram (CGH) designs and produces digital information for generating 3-D (3-Dimension) image using computer and software instead of optically-sensed hologram of light interference, and it can synthesis a virtual object which is physically not in existence. Since digital hologram includes an amount of data as can be seen at the process of digitization, it is necessary that the data representing digital hologram is reduced for storing, transmission, and processing. As the efforts that are to handle hologram with a type of digital information have been increased, various methods to compress digital hologram called by fringe pattern are groped. Suitable proposal is encoding of hologram.

In this paper, we analyzed the properties of CGH using tools of frequency transform, assuming that a generated CGH is a 2D image by introducing DWT that is known as the better tool than DCT for frequency transform. The compression and reconstruction result which was extracted from the wavelet-based codecs illustrates that it has better properties for reconstruction at the maximum 2 times higher compression rate than the previous researches of Yoshikawa^[2] and Thomas^[3].

* 한성대학교 정보통신공학과 (www.hansung.ac.kr, yhseo@hansung.ac.kr)

** 광운대학교 전자재료공학과 Digital Design & Test Lab. ((ddntlab, chj, dwkim)@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-03-093, 접수일자 : 2005년 3월 3일

※본 논문은 정보통신부 정보통신연구진흥원에서 지원하고 있는 정보통신기초연구지원사업의 연구결과(과제번호 : 05-기초-012)입니다.

I. 서론

홀로그래피는 1948년 Gabor에 의해 최초로 제안된 이래 3차원 정보를 기록할 수 있다는 특징 때문에 많은 연구자들의 관심을 끌어들였다. 기존의 홀로그래피는 홀로그램 필름에 3차원 정보를 기록한 다음에 현상된 필름을 사용하여 3차원 물체를 복원하게 되므로 그 응용이 크게 제한되었다. 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위한 새로운 접근방법으로 1966년 이후 많은 연구자들이 컴퓨터에 의한 홀로그램의 제작을 연구해오고 있다^[1].

최근 세계 여러 연구기관에서 홀로그램 관련 연구를 진행중이지만, 대부분의 연구는 광학 홀로그램 영상의 획득과 이를 효과적으로 복원하는 기술들에 국한되어 있다. Yoshikawa^[2]는 JPEG과 같은 정지영상압축 표준 기술을 이용하여 hologram을 분석하고 압축하였다. 하지만 fringe 영상은 일반적인 2차원 영상과는 특성이 다르므로 큰 효과를 얻지는 못했다. Thomas^[3]는 DCT와 DFT 개념을 도입하여 fringe를 분석하고, 무손실 압축방식인 LZ77, LZW, huffman coding으로 압축하는 방법을 제안하였지만, 이 방법 역시 JPEG에 비해 향상된 성능을 얻지는 못하였다. Unser^[4]는 웨이블릿 기저함수의 조합으로 Fresnel의 위치정보와 연관한 다해상도 Fresnel 변환을 구현하여 fringe의 효과적인 분석과 처리를 위한 방법을 제안하였다. 위에서 언급한 몇 가지 방법들은 fringe 영상을 충분히 분석하지 못했기 때문에 괄목할 만한 결과를 얻지 못하였다.

본 논문에서는 DCT에 비해서 좋은 주파수 변환 특성을 보이는 DWT를 도입하여 CGH를 통해 생성한 fringe 영상의 주파수 특성을 분석하였다. 이를 통해 웨이블릿 기반의 주파수 변환기술과 압축방식이 디지털 홀로그램 즉, fringe 패턴에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 웨이블릿 변환을 기반으로 하고 있는 선형양자화와 엔트로피 코딩방식^[5], 부대역간의 상관도를 이용한 코딩^[6], 그리고 JPEG2000 국제표준압축 기술 등에 적용하여 그 특성을 확인하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 컴퓨터 생성 홀로그램의 Fringe 영상의 주파수 특성을 분석하고, 부호화 기법을 적용하는 방법을 설명하고, 3장에서는 압축을 수행한 결과를 보인다. 그리고 이를 토대로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 디지털 홀로그램 주파수 특성

본 장에서는 DCT와 DWT를 이용하여 컴퓨터

생성 홀로그램의 주파수 특성을 분석한다.

2.1 Fringe 패턴의 주파수 특성

디지털 홀로그램의 효율적인 압축을 위해 DWT 기반의 fringe 특성을 분석한다. fringe의 특성을 효율적으로 표현할 수 있는 부대역 구조를 탐색하고, 다해상도의 부대역이 fringe에 미치는 영향을 조사한다. 또한 전역DCT(Global DCT, GDCT) 계수와 비교를 통해서 DWT와 DCT 계수의 에너지 분포와 중요도를 분석한다. 이를 위해 계수를 영의 값으로 치환하는 방식의 양자화를 이용하고, 역 CGH를 거쳐 복원된 객체영상의 시각적인 효과를 관찰한다. 그림 1에 실험 절차를 도식적으로 보였다.

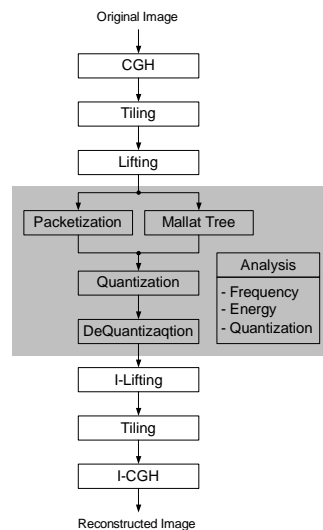


그림 1. DWT와 DCT의 변환영역 분석을 위한 절차
Fig. 1. Procedure for transform domain analysis of DWT and DCT

이차원 이산 웨이블릿 변환은 packetized DWT

(PDWT)와 mallat-tree DWT(MDWT) 방식을 사용하고, 결과에 따라 이들의 장점을 취하여 하이브리드 형태의 웨이블릿 변환을 사용한다. Mallat-tree DWT는 저주파 신호를 분해하여 에너지를 저주파 계수로 집중시키는 방식의 변환으로 JPEG2000과 MPEG-21 SVC에서 사용하고 있다. 그러나 fringe의 주파수 특성이 독특하므로, 임의의 부대역을 다해상도로 분해하는 packetized DWT 방식을 병행한다. 그림 2에 fringe에 대해 packetized DWT, mallat-tree DWT, 그리고 GDCT를 이용한 결과에 대해 나타냈다. 각각의 결과들은 시각적인 확인이 용이하도록 대비 및 밝기 조절을 하였고, 음의 값은

편의상 제외하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 fringe는 PDWT, MDWT, 그리고 DCT 모두 세로 및 대각선 성분의 주파수 계수를 많이 포함하고 있다.

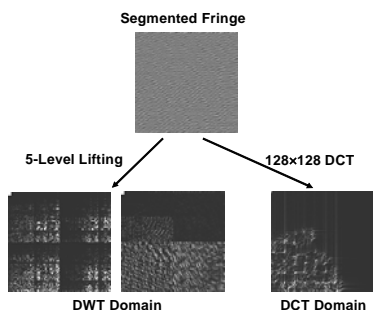


그림 2. Fringe 영상의 주파수 변환 방식
Fig. 2. Frequency transform method of fringe image

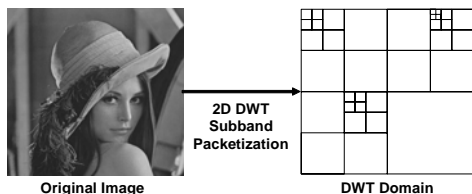


그림 3. 부대역의 임의분할 방식을 이용한 DWT
Fig. 3. DWT using optional partition method of subband

2.1.1 PDWT와 GDCT

DCT는 각 계수들이 독립적인 주파수 성분들을 나타내지만 DWT는 다해상도를 가지는 부대역 단위로 주파수 성분과 특성을 나타낸다. 또한 DWT는 기저함수의 특성 상 주파수 영역에서 공간 영역의 정보도 가진다. 이와 같이 DWT는 DCT와 상이한 특성을 가지는 변환도구이다. 그러나 주파수 영역으로 표현하는 방식에 차이는 있지만, 2차원 공간상에서 기저함수에 대한 계수가 유사한 주파수 방향성을 가진다면 유사한 에너지 특성을 보인다.

먼저 PDWT와 GDCT 계수들에 대한 에너지 특성을 분석하여 비교하였다. PDWT는 그림 3과 같이 다해상도의 부대역을 임의의 방식으로 생성시키는 것으로 일반적인 영상 압축을 위해서 사용하지는 않고, 특수한 영상이나 사용된 필터의 은닉을 통한 암호화 혹은 워터마킹 등을 위해 사용한다. 또한 PDWT를 통해 생성되는 부대역의 구조를 그림 4에 나타냈고 GDCT 계수와의 에너지 비교를 위해 영역을 구분지었다.

그림 4에서 L은 저주파 필터링을 뜻하고 H는 고주파 필터링을 뜻하므로 네 개의 첨자는 가로 및 세로 방향으로 두번씩 필터링을 거친 결과에 해당

한다. 각각의 부대역들은 고유한 주파수 성분을 나타내고 있고 DCT와 유사하게 가로방향으로 오른쪽에서 왼쪽으로 위치할수록 가로방향의 주파수 성분이 우세하다. 또한 세로방향의 경우에도 유사한 특성을 보이고 대각선의 경우에는 대각선 주파수 성분에 해당한다. 그림 5에 256x256 크기의 분할된 fringe에 대한 실제 3레벨 PDWT 결과를 나타냈다. 각 부대역들이 특정한 fringe 패턴의 일부를 표현하고 있는 것으로 볼 수 있다. 그림 6에는 그림 4에서 보인 fringe의 PDWT 계수에 대한 에너지 분포를 GDCT 계수들에 대한 것과 비교하여 나타냈다. DCT 계수들과 주파수에 따라서 일부 유사한 에너지 특성을 보이고 있지만 상이한 부분도 있다. 또한 그림 6에 볼 수 있듯이 DWT 계수들이 DCT 계수에 비해서 더욱 주파수 집중도를 보이고 있는 특성을 보인다.

이러한 결과들로부터 DWT로 생성된 fringe의 주파수 정보는 일부 주파수 성분, 즉 일부 부대역으로 집중되는 것을 관찰할 수 있고, 이러한 정보로부터 fringe 패턴을 표현하는데 있어서 중요 주파수 성분을 분리할 수 있다. 따라서 비교적 덜 중요한 주파수 성분을 제거하거나, 축소하는 방법을 통해서 fringe 패턴의 압축 효과를 기대할 수 있다.

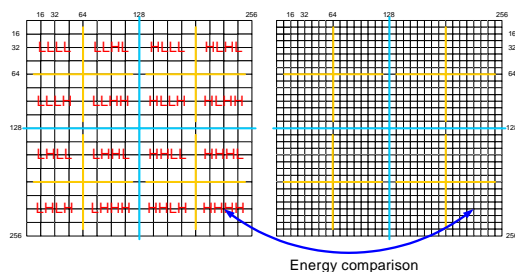


그림 4. PDWT와 DCT의 주파수 영역
Fig. 4. Frequency domain of PDWT and DCT



그림 5. 분할된 fringe영상에 대한 3-레벨 PDWT 결과
Fig. 5. Result of 3-level PDWT about partitioned fringe image

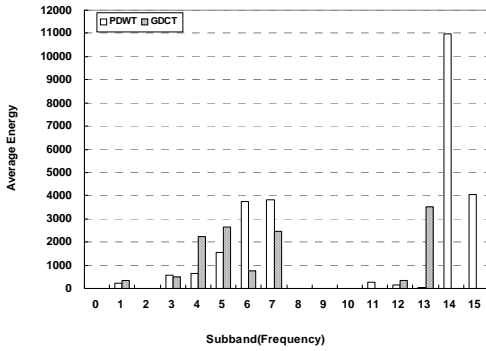


그림 6. DWT 영역에서 fringe의 에너지 분포 (최저주파 대역 제외)
 Fig. 6. energy distribution of fringe in DWT domain (with the exception of the lowest frequency subband)

다음에는 PDWT를 이용한 실험과 유사한 방법으로 MDWT를 이용하여 fringe 패턴의 특성을 분석한다.

2.1.2 MDWT와 GDCT

PDWT와 마찬가지로 MDWT를 이용하여 fringe 패턴에 대한 영상을 주파수 영역으로 변환하고 그 특성을 살펴본다. 그림 7에는 그림 4와 유사한 과정을 나타냈는데, PDWT와 부대역의 구조를 형성하는 방식에서 차이를 가진다. MDWT는 일반적인 신호의 부호화를 위해 사용되는 필터링 기법으로 다해상도로 저주파 성분을 분해하여 최저 주파수 대역으로 에너지를 집중시킨다. 여기에서도 계수들의 주파수 성분에 대한 방향성은 PDWT와 유사하고, DCT 계수들과 대칭되는 방식도 유사하다. 그림 8에 256×256 크기로 분할된 fringe영상에 대한 3-레벨 MDWT 결과를 나타냈다. 그림에서는 시각적인 구분이 용이하도록 3-레벨 변환을 나타냈지만, 실험에서는 6-레벨 DWT를 사용하고 있고 일반적인 응용에서도 5-레벨 이상을 사용한다. 그림 7에 fringe 패턴에 대한 MDWT 계수의 에너지 분포를 나타냈고, PDWT의 경우와 마찬가지로 GDCT 계수와 비교하였다. PDWT의 결과와 비교할 때 MDWT의 결과가 GDCT 계수와 더욱 유사한 주파수 특성을 보인다는 것을 관찰할 수 있다. 또한 앞 결과들에서 살펴보면 MDWT가 가장 좋은 주파수 집중도를 보이는 것을 알 수 있다. GDCT의 경우에 DC값이 지나치게 크기 때문에 비율상으로는 좋아 보이지만 최저주파수 대역의 값을 제외하면 MDWT가 가장 좋은 특성을 보인다. 즉, 이러한 집중된 에너지를 가지는 주파수 대역을 다시 세부적인 주파수 대역

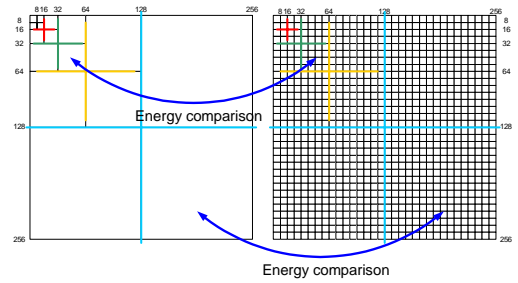


그림 7. MDWT와 GDCT의 주파수 영역
 Fig. 7. Frequency domain of MDWT and GDCT

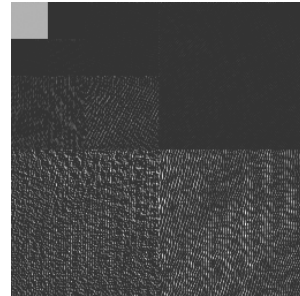


그림 8. 분할된 fringe영상에 대한 3-레벨 MDWT 결과
 Fig. 8. Result of 3-level MDWT about partitioned fringe image

으로 분할하고, 비교적 덜 중요한 주파수 계수를 제거한다면 효율적인 부호화를 이룰 수 있다.

2.1.3 주파수 계수의 양자화

본 절에서는 앞서 얻어진 DWT 영역에서의 주파수 정보를 이용하여 홀로그램을 압축하기 위한 양자화를 시도한다.

2.1.3.1 양자화 알고리즘

MDWT와 PDCT를 접목하여 영의 값으로 치환하는 극단적인 양자화를 수행하고 경향성을 보인다. 먼저, 좋은 주파수 특성을 보이는 Mallat-tree 방식의 DWT를 기본으로 하고, 여기에 선택된 중요 부대역에 대해서 다시 PDWT를 수행하여 주파수를 분할하는 하이브리드 형태의 DWT(HDWT)를 이용한다. PDWT를 수행할 부대역은 표 2의 에너지 특성을 이용한다. 즉, MDWT의 결과에서 insignificant subband(IS)와 significant subband(SS)를 찾고, 에너지가 포함되어있는 정도에 따라서 significance map(SM)을 생성한다. 여기에서 다시 SS를 PDWT하여 sub-IS와 sub-SS를 추출한 후에 SM을 갱신한다. 결과로 생성된 HDWT 부대역 구조를 그림 10에 나타냈다.

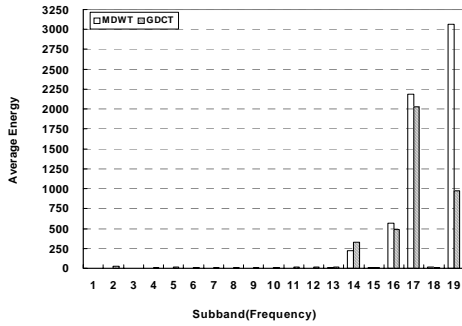


그림 9. DWT 영역에서 fringe의 에너지 분포 (최저주파 대역 제외)

Fig. 9. energy distribution of fringe in DWT domain (with the exception of the lowest frequency subband)

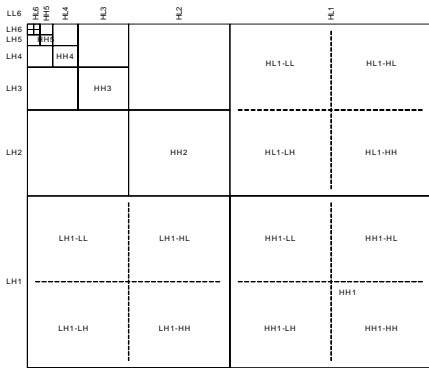


그림 10. 양자화를 위한 하이브리드 부대역 구조
Fig. 10. Hybrid subband structure for quantization

2.1.3.2 양자화 효과 및 분석

그림 10에 나타난 HDWT 부대역 구조를 기준으로 압축율을 적절하게 조절하면서 DWT에 의한 홀로그래프의 양자화 효과를 분석한다. 표 1에 이를 수행하기 위한 양자화 기준을 나타냈다. 양자화 방식은 그 효과를 극단적으로 관찰하기 위해 양자화될 계수들은 영으로 치환하였고, SS의 순서대로 부대역을 추가하며 실험하였다.

그림 11에서 보이듯이, 양자화, 즉 영으로 치환되지 않은 중요 부대역이 증가할 때마다 fringe의 정량적인 PSNR은 증가하는 결과를 얻었다. 또한 그와 함께 역 CGH 과정을 거친 다음에 얻어지는 깊이 정보를 가진 객체영상에 대한 NC값도 PSNR과 유사한 경향성을 보이는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 웨이블릿 변환을 이용한 fringe의 시각적인 열화 감소가 홀로그래프의 열화 감소와 비례함을 알 수 있다. 그리고 그림 11에서 보이듯이 Case 4에서 급격한 성능 향상을 가져오는데, 거기에 해당하는 LH1의 LH 주파수 성분이 중요 성분이라는 결론을 내

릴 수 있다. 이것은 DCT 계수 중에서 세로방향의 주파수 성분에 대한 에너지가 크다는 결과와 유사점을 보인다.

표 1. 양자화를 위한 부대역 조합 및 압축률
Table 1. subband combination and compression ratio for quantization

Case	Subband	CR
1	LL6	4096 : 1
2	+ HH1 - HH	16 : 1
3	+ LH1 - HH	8 : 1
4	+ LH1 - LH	5.3 : 1
5	+ HH1 - HL	4 : 1
6	+ LH1 - HL	3.2 : 1
7	+ LH1 - LL	2.7 : 1
8	+ HH1 - LL + HH1 - LH	2 : 1
9	+ HH2	1.8 : 1
10	+ HL1 - HH	1.6 : 1

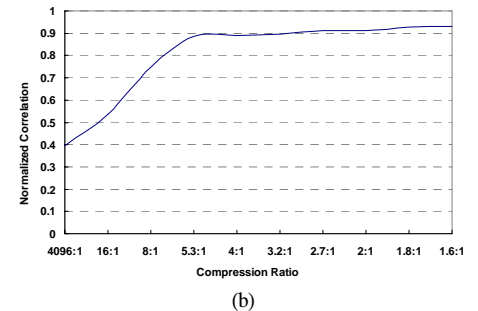
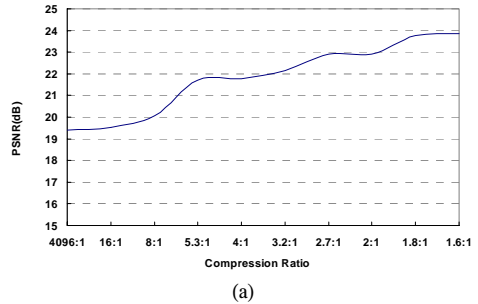


그림 11. 양자화 후 복원된 fringe의 (a) PSNR 결과, (b) 객체영상의 NC 결과
Fig. 11. (a) PSNR result, (b) NC result of object image for reconstructed fringe after quantization

III. 실험 및 결과

3.1 JPEG에 의한 부호화

그림 12는 CGH를 통해 생성된 1024×1024 크기의 fringe를 정지영상 국제 표준인 JPEG을 이용하여 최대로 압축한 후 복원한 객체 영상을 보이고 있다. 표준에서 제공하는 부호화기를 사용하여 압축

한 결과 최대 압축률은 6:1이었고, 이때 원본 객체 영상과의 NC는 0.927586으로 측정되었다.

3.2 선형 양자화 기반의 부호화

그림 13은 본 연구실에서 개발한 선형 양자화기 기반의 웨이블릿 부호화기를 이용하여 압축한 후 복원한 객체 영상을 보이고 있다. 30:1의 압축률에서 원본 영상과의 NC가 0.556922로 측정되었다.

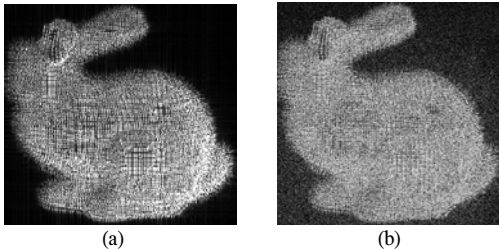


그림 12. 선형양자화기 기반의 부호화에 의한 객체영상의 복원 결과 (a) 원본 객체영상 (b) 6:1
Fig. 12. Reconstructed result of object image from encoding based linear quantization (a) original object image, (b) 6:1

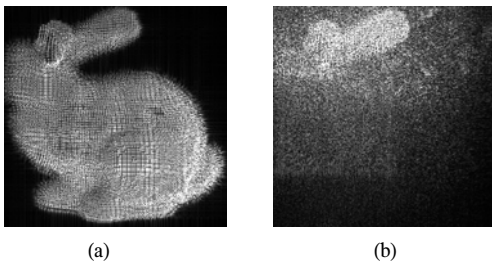


그림 13. 선형양자화기 기반의 부호화에 의한 객체영상의 복원 결과 (a) 원본 객체영상 (b) 30:1
Fig. 13. Reconstructed result of object image from encoding based linear quantization (a) original object image, (b) 30:1

3.3 MRME 기반의 부호화

웨이블릿 기반의 동영상 압축 코덱[6]을 이용하여 압축한 결과를 그림 15와 16에서 보이고 있다.

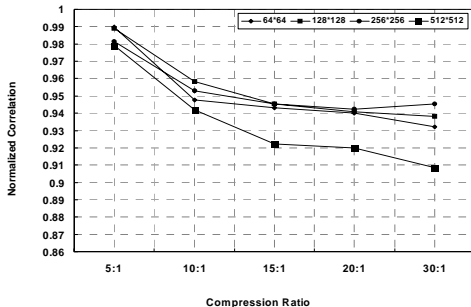


그림 14. MRME기반 부호화를 이용한 복원결과와 NC
Fig. 14. NC of reconstructed result using encoding based MRME

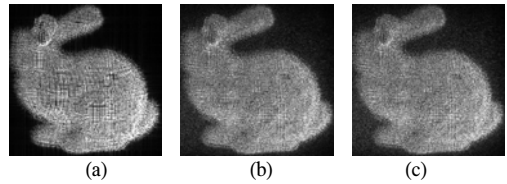


그림 15. MRME기반의 부호화에 의한 객체영상의 복원 결과 (a) 원본 객체영상 (b) 5:1 (c) 20:1
Fig. 15. Reconstructed result of object image from encoding based MRME (a) original object image, (b) 5:1 (c) 20:1

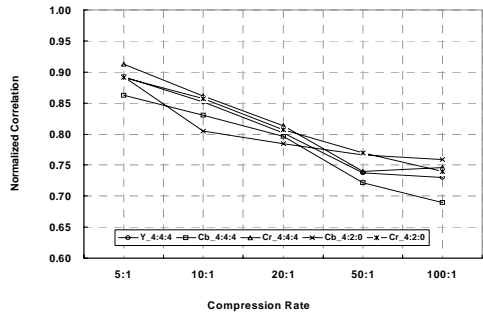


그림 16. JPEG2000을 이용한 복원 결과의 NC
Fig. 16. NC of reconstructed result using JPEG2000

3.4 JPEG2000을 이용한 부호화

차세대 정지영상 압축 표준인 JPEG2000을 이용하여 fringe를 압축하고 복원한 후에 다시 원래의 객체 영상을 재 생성하는 과정을 수행하였다. 부호화 결과를 그림 17에 나타냈는데 R 성분을 이용한 결과가 가장 좋은 효율을 보였다. 또한 그림 18에 복원된 객체영상의 결과를 나타냈는데 10:1 이상의 압축에서도 객체영상이 복원되는 것을 관찰할 수 있다.

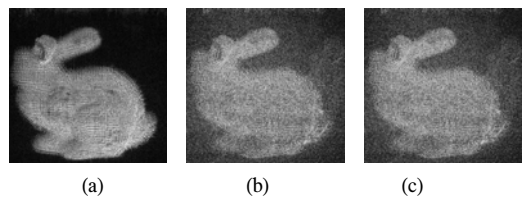


그림 17. JPEG2000 부호화에 의한 객체영상의 복원 결과 (a) 원본 객체영상 (b) 5:1 (c) 20:1
Fig. 17. Reconstructed result of object image from encoding based JPEG2000 (a) original object image, (b) 5:1 (c) 20:1

또한 무손실 압축의 경우에 평균 1.3:1의 압축률을 보였다.

IV. 결론

본 논문에서는 DCT에 비해서 좋은 주파수 변환

특성을 보이는 DWT를 도입하여 CGH를 통해 생성한 fringe 영상의 주파수 특성을 분석하여 압축하였다. DCT기반의 JPEG보다는 본 연구실에서 개발한 DWT 기반의 정지영상 압축 코덱^[5]과 새로운 양자화 방식인 EBCOT를 사용하는 JPEG2000이 압축 후 더 좋은 복원 결과를 보임을 실험을 통해 확인하였다. 그리고 웨이블릿 기반의 동영상 압축 코덱^[6]의 경우 MRME를 이용하기 때문에 부대역의 계수에 따라서 적응적인 동작을 하여 비교적 좋은 특성을 보였다. 이러한 웨이블릿 기반의 코덱을 통해서도 Yoshikawa^[2]나 Thomas^[3]의 방식에 비해 약 2배 이상의 압축율을 가질 수 있어 fringe 패턴을 압축하는데 좋은 방법이 될 수 있다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] P. Hariharan, Basics of Holography, Cambridge University Press, May 2002.
 [2] H. Yoshikawa and J. tamai, "Holographic image compression by motion picture coding," editor, SPIE Proc. vol 2652 Practical Holography ?, pp. 2652-01, Jan, 1996.
 [3] T. J. Naughton, Y. Frauel, B. Javidi and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object recognition," SPIE Proc. Vol 4471, pp. 280-289, 2001.
 [4] M. Liebling, T. Blu and M. Unser, "Fresnelets : New multiresolution wavelet bases for digital holography," IEEE Trans. Image Process. 12, pp. 29-43, 2003.
 [5] Y. H. Seo, W. H. Kim, J. S. Yoo, D. G. Kim and D. W. Kim, "A Real-Time Image Compression using 2-Dimensional DWT and its FPGA Implementation", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E87-A, No. 8, pp. 2110-2119, 2004.
 [6] J.W Bae, S. H. Lee and J. S. Yoo, "An efficient wavelet-based motion estimation algorithm", SPIE Annual meeting 2004, Denver, USA, Aug. 2004.

서 영 호 (Young-Ho Seo)

정회원



1999년 2월 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
 2001년 2월 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사).
 2000년 3월~2001년 12월 인터스닷컴(주) 연구원
 2004년 8월 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)

2003년 6월~2004년 6월 한국전기연구원 연구원
 2004년 12월~2005년 8월 유한대학 연구교수
 2005년 9월~현재 한성대학교 전임강사
 <관심분야> 2D/3D 영상 및 비디오 처리, 디지털 홀로그램, SoC 설계, 워터마킹/암호화
 e-mail : yhseo@hansung.ac.kr

최 현 준 (Hyun-Jun Choi)

정회원



2003년 2월 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
 2005년 2월 광운대학교 대학원 졸업(공학석사)
 2005년 3월~현재 광운대학교 일반대학원 박사과정
 <관심분야> 영상압축, 워터마킹,

암호학, FPGA/ASIC 설계, Design Methodology
 e-mail : chj@kw.ac.kr

김 동 옥 (Dong-Wook Kim)

정회원



1983년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1985년 2월 한양대학교 대학원 졸업(공학석사)
 1991년 9월 Georgia공과대학 전기공학과 졸업(공학박사)
 1992년 3월~현재 광운대학교

전자재료공학과 정교수
 광운대학교 신기술 연구소 연구원
 2000년 3월~2001년 12월 인터스닷컴(주) 연구원.
 <관심분야> 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP 설계, Wireless Communication
 e-mail : dwkim@kw.ac.kr