

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제27권 제2호, 2022년 3월 (JBE Vol.27, No.2, March 2022)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2022.27.2.198>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

고해상도 영상 압축을 위한 SPIHT 기반의 부대역 분할 압축 방법

김 우 석^{a)}, 박 병 서^{a)}, 오 관 정^{b)}, 서 영 호^{a)†}

SPIHT-based Subband Division Compression Method for High-resolution Image Compression

Woosuk Kim^{a)}, Byung-Seo Park^{a)}, Kwan-Jung Oh^{b)}, and Young-Ho Seo^{a)†}

요 약

본 논문에서는 초고해상도를 갖는 복소 홀로그램을 압축하기 위한 전용 코덱에서 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees)를 사용할 경우에 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 방법을 제안한다. 복소 홀로그램을 위한 코덱의 개발은 크게 전용 압축 방법을 만드는 방법과 HEVC 및 JPEG2000과 같은 앵커 코덱을 이용하고 전후처리 기법을 추가하는 방법으로 구분될 수 있다. 전용 압축 방법을 만드는 경우에 복소 홀로그램의 공간적인 특성을 해석하기 위한 별도의 변환 도구가 필요하다. EZW와 SPIHT 같은 부대역 단위의 제로트리 기반의 알고리즘들은 고해상도의 영상에 대해서 코딩할 경우에 비트스트림 제어 시 온전한 부대역의 정보가 제대로 전송되지 못하는 문제점을 갖는다. 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위한 웨이블릿 부대역의 분할 방법을 제안한다. 분할한 부대역을 각각 압축하는 것으로 부대역 전역의 정보가 균일하게 유지하도록 한다. 제안하는 방법은 기존 방법에 비하여, PSNR 대비 더 좋은 복원 결과를 보여주었다.

Abstract

This paper proposes a method to solve problems that may occur when SPIHT(set partition in hierarchical trees) is used in a dedicated codec for compressing complex holograms with ultra-high resolution. The development of codecs for complex holograms can be largely divided into a method of creating dedicated compression methods and a method of using anchor codecs such as HEVC and JPEG2000 and adding post-processing techniques. In the case of creating a dedicated compression method, a separate conversion tool is required to analyze the spatial characteristics of complex holograms. Zero-tree-based algorithms in subband units such as EZW and SPIHT have a problem that when coding for high-resolution images, intact subband information is not properly transmitted during bitstream control. This paper proposes a method of dividing wavelet subbands to solve such a problem. By compressing each divided subbands, information throughout the subbands is kept uniform. The proposed method showed better restoration results than PSNR compared to the existing method.

Keyword : Digital hologram, Hologram compression, SPIHT, High-resolution image processing

I. 서 론

홀로그래피는 1948년 Gabor에 의해 최초로 제안되었고^[1], 3차원 정보를 기록할 수 있는 특징 때문에 많은 분야에서 연구와 개발이 이루어져 왔다. 아날로그 홀로그래피는 특수한 재료로 만들어진 홀로그램 필름에 3차원 정보를 기록하고, 필름을 현상하여 사용하는 것으로 현대의 멀티미디어 서비스를 위한 용도로는 다소 제한적인 기술이다^[2]. 최근 아날로그 방식의 단점은 극복하면서 홀로그램의 3차원 복원 능력을 충분히 활용하기 위한 디지털 방식의 홀로그램 기술에 대한 연구가 널리 이루어지고 있다^[3]. 디지털 홀로그램을 멀티미디어로써 이용하기 위해서는 디지털 홀로그램 신호처리(digital hologram signal processing) 기술이 필요하다^[4]. 홀로그램 신호처리는 크게 홀로그램의 랜더링과 압축으로 구성된다. 홀로그램 랜더링 기술에는 홀로그램 생성, 편집, 디스플레이, 보간 그리고 개선이 포함될 수 있다. 홀로그램 압축 기술에는 정지 홀로그램 압축과 비디오 홀로그램 압축이 포함된다. 현재 JPEG Pleno에서는 정지 홀로그램에 대한 압축의 표준화 과정을 진행 중에 있다^[5].

홀로그램의 특성상 주변 화소와의 상관도가 매우 낮고, 주파수 영역에서의 에너지 집중도가 낮아 일반적인 이미지 프로세싱에서 좋은 성능을 보이는 주파수 영역에 대한 압축 방법을 그대로 사용하기엔 비효율적이다. 이러한 이유로 복소 홀로그램을 압축하는 많은 연구들 중에는 홀로그램 자체를 압축하는 방법 외에도 공간적 상관도가 높은 특정한 거리로 희석된 데이터를 압축하는 방법을 사용하기도

a) 광운대학교 전자재료공학과(Kwangwoon university Electronic Materials Engineering)

b) 한국전자통신연구원(ETRI)

† Corresponding Author : 서영호(Young-Ho Seo)

E-mail: yhseo@kw.ac.kr

Tel: +82-2-940-8362

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1046-395X>

※ 이 논문의 결과 중 일부는 한국방송·미디어공학회 “2021년 추계학술대회”에서 발표한 바 있음.

※ 이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2018R1D1A1B07043220).

* This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education in 2022 (2018R1D1A1B07043220).

· Manuscript received January 21, 2022; Revised March 7, 2022; Accepted March 7, 2022.

한다^[6-8]. 하지만, 모든 거리에 대한 최적의 압축 방법을 찾는 것은 어려우며, 특정 거리에서의 성능에 편향될 가능성 이 높은 문제가 있다.

홀로그램 자체를 압축하는 연구 중에는 다양한 압축 방법들을 응용한 사례가 있다^[9-14]. 더불어 MPEG, JPEG 처럼 영상 코덱 자체를 응용하는 방법도 있다^[15-19]. 홀로그램을 위한 코덱을 개발하는 연구에는 크게 전용 압축 방법을 새롭게 만드는 방법과 HEVC 및 JPEG2000과 같은 앵커 코덱을 이용하고 전후처리 기법을 추가하는 방법으로 구분될 수 있다. 전용 압축 방법을 만드는 경우에 복소 홀로그램의 공간적인 특성이 매우 독특하기 때문에 이를 위한 별도의 변환 도구가 필요하다. 이러한 점에서 웨이블릿 변환이 많은 연구들에서 좋은 결과를 보이며 좋은 대안이 될 수 있다는 것을 증명해왔다^[13-14]. 웨이블릿 변환을 사용할 경우에 압축을 위해서 대표적으로 EZW, EBCOT 그리고 SPIHT 등을 사용할 수 있다. 다만 EBCOT의 경우에 복잡도가 너무 높고, EZW의 경우에는 성능이 좋지 않다. 따라서 SPIHT는 좋은 대안이 될 수 있을 것이다. 그러나 EZW와 SPIHT 같은 부대역 단위의 제로트리 기반의 알고리즘들은 고해상도의 영상에 대해서 고압축으로 코딩할 경우에 비트스트림 제어 시 온전한 부대역의 정보가 제대로 전송되지 못하는 문제점을 갖는다. 본 논문에서는 웨이블릿 부대역의 분할 방법을 이용하여 이와 같은 문제를 해결하기 위한 시도를 하였다. 2장에서는 사용된 복소 홀로그램을 소개하고 DWT를 사용하여 생성한 부대역 구조를 SPIHT 압축하였을 때 발생할 수 있는 문제를 보인다. 앞서 언급된 불균형의 결과를 보이고, 3장에서는 그 문제점을 해결하기 위하여 제안하는 압축 방법을 소개한다. 4장에서 실험 조건을 소개하고, 제안한 방법이 문제점을 해결할 수 있는지를 실험 결과로 보인다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 완전 복소 홀로그램 (Full Complex Hologram)

1. 복소 홀로그램

완전 복소 홀로그램은 실수와 허수 성분의 복소수로 구

성된다. 우리는 그림 1에 full-complex hologram을 나타냈다. 그림 1(a)는 왼쪽부터 RGB 채널의 실수 성분이며, 그림 1(b)는 허수 성분이다. 그림 1(a)와 (b)를 사용한 홀로그램 회절 결과의 진폭이 그림 1(c)이다. 복소 홀로그램은 실수와 허수 또는 진폭과 위상으로 표현이 가능하다. 압축을 할 경우에 실수와 허수 성분이 더욱 좋은 압축 효율을 보이는 것이 사실이다. 그러나 실수와 허수 성분을 각각 독립적으로 압축할 경우에 홀로그램이 갖는 위상 정보가 고려되지 않는 문제가 발생할 수 있고, 홀로그램의 복원 결과의 품질

이 홀로그램이 품질에 비례하지 않을 수도 있다.

2. DWT 기반의 홀로그램 압축

실수와 허수 성분을 각각 압축하기 위하여 웨이블릿 변환을 수행하고, 압축한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)와 (b)는 각각 실수와 허수 성분의 웨이블릿 변환을 통해 생성한 부대역 구조이며, 이를 SPIHT 알고리즘을 통하여 3.0 BPP(Bit per Pixel)에 대하여 압축하고 복원한 결과

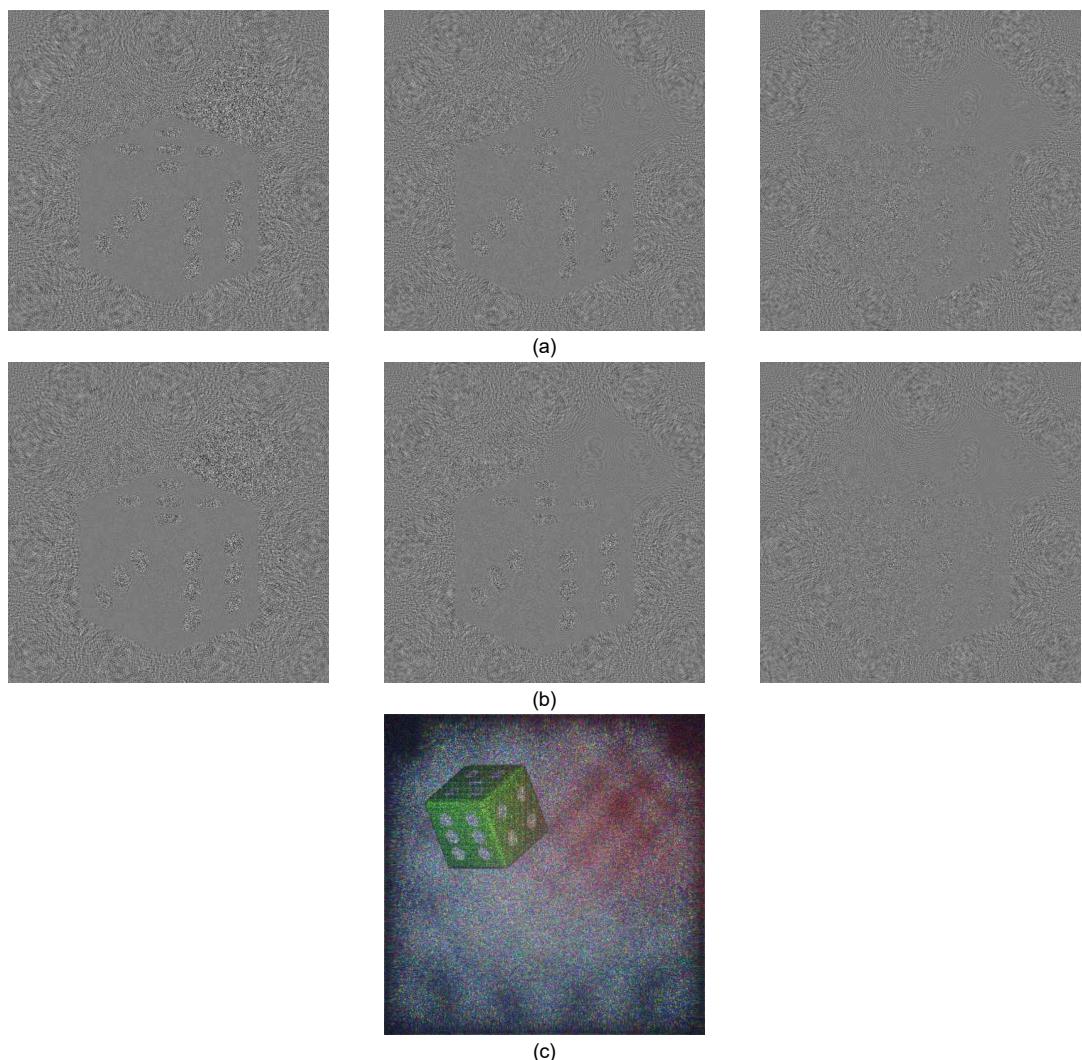


그림 1. 완전 복소 컬러 홀로그램의 각 성분 (a) 실수부, (b) 허수부, (c) 복원 진폭
Fig. 1. Components of complex holograms (a) real, (b) imaginary, and (c) reconstructed amplitude

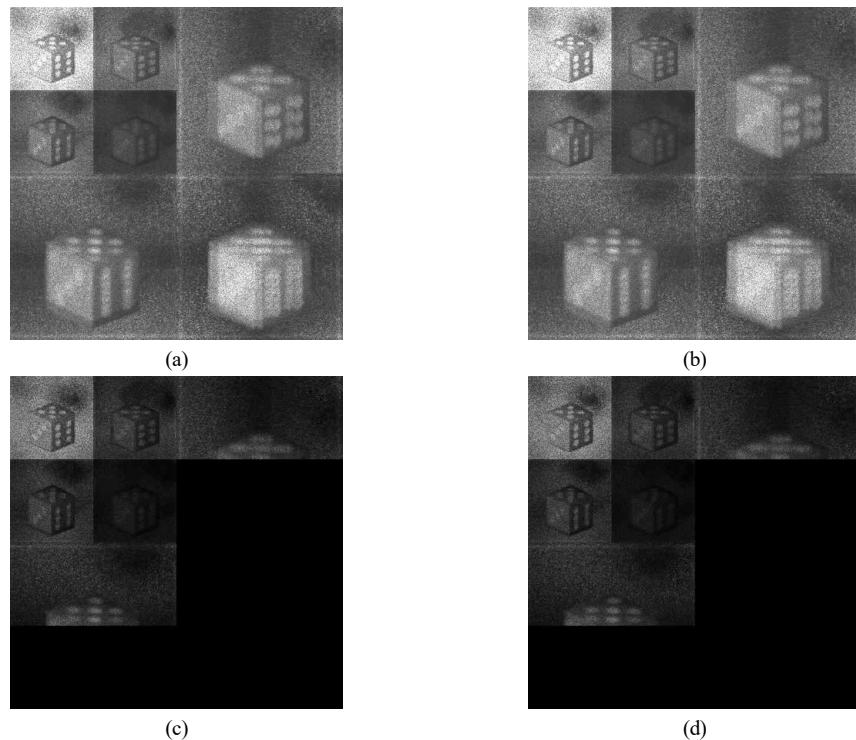


그림 2. SPIHT 압축 결과 (a) 실수부, (b) 허수부, (c) 복원된 실수부, (d) 복원된 허수부

Fig. 2. SPIHT compression results (a) real, (b) imaginary, (c) reconstructed real, and (d) reconstructed imaginary

가 그림 2(c)와 (d)이다. 보이는 결과와 같이, 부대역의 일정 정보가 온전하지 못하게 전송된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 복원 시에 원본에 가까운 영역들로 인해 PSNR 등의 지표는 비교적 높게 나타날 수 있다. 하지만, 그림 2(c)와 (d)를 사용하여 복원한 결과인 그림 3처럼 전송된 정보의 편향으로 복원 결과에 문제가 발생한다.

III. 제안하는 압축 방법

본 논문에서 사용하는 헤로그램을 위한 전용 코덱의 구조를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 윗 부분은 인코더에 해당하고, 아래 부분은 디코더에 해당한다. 인코더와 디코더 사이에 전달되는 값은 중간에 표시하였다. 그림 4의 코

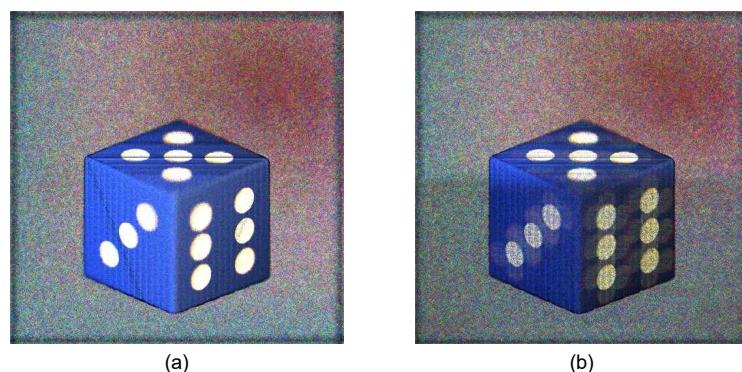


그림 3. 복원 결과 (a) 원본, (b) SPIHT 압축

Fig. 3. Reconstruction results (a) Original, (b) SPIHT-based compression

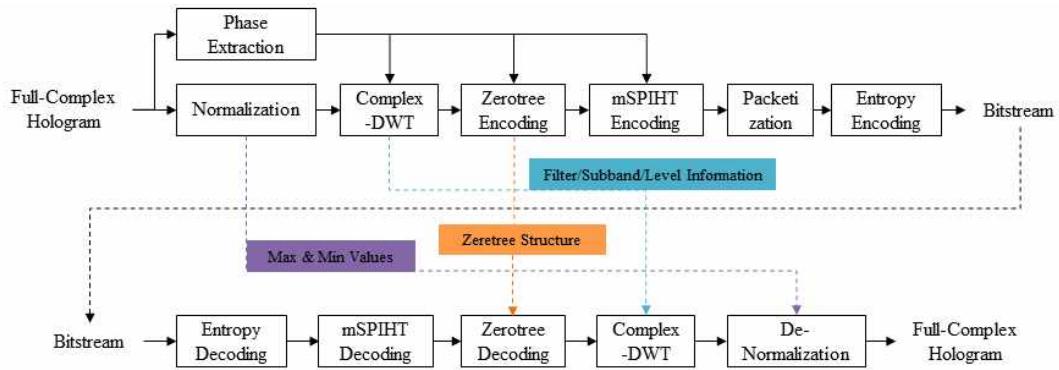


그림 4. 본 논문에서 사용된 휴로그램 코덱의 구조

Fig. 4. The structure of the holographic codec used in this paper

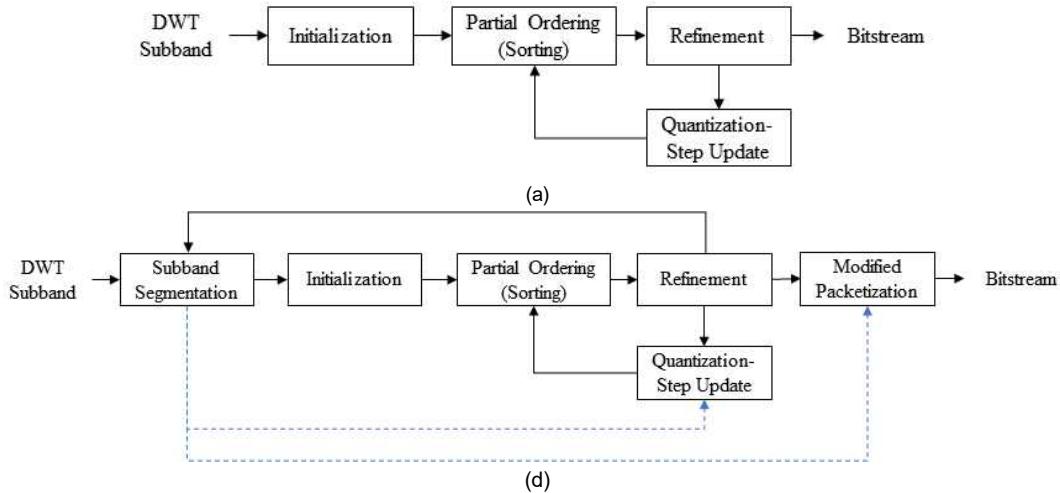


그림 5. 제안된 새로운 SPIHT 구조

Fig. 5. The proposed new SPIHT structure

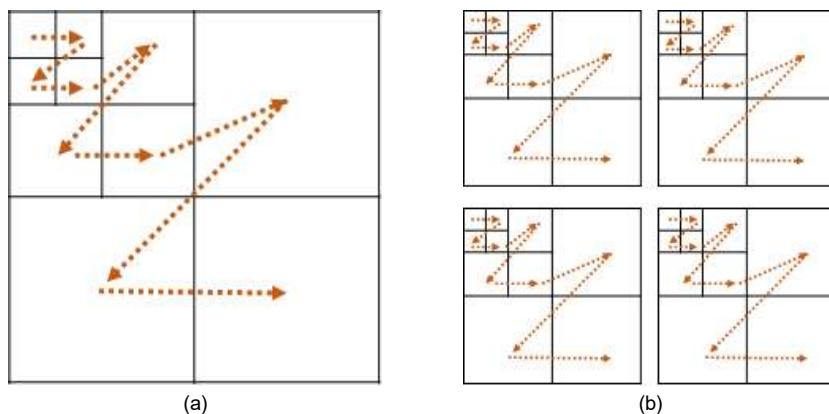


그림 6. 제안한 코딩 방식 (a) 기본 방식, (b) 부대역 분할 방식

Fig. 6. The proposed coding method (a) the default method, and (b) the subband division method.

데온 홀로그램을 위한 전용 DWT를 사용하고 있고, 제로트리 코딩과 변형된 SPIHT 알고리즘을 사용한다.

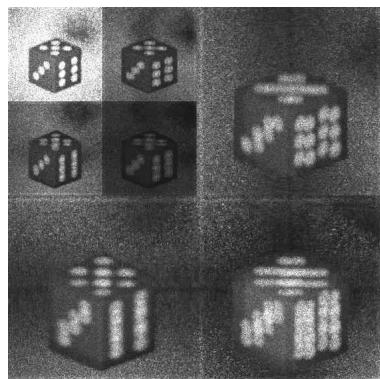
변형된 SPIHT의 구조를 그림 5(a)에 나타내었고, 본 논문에서 제안하고 있는 개선된 SPIHT의 구조를 그림 5(b)에 나타내었다. 개선된 성능의 SPIHT에는 DWT 부대역을 분할하는 과정과 분할된 부대역의 패킷과 BPP(bit per pixel) 비율을 조절하는 과정이 추가되었다.

그림 6에 제안한 방법을 간단히 도식적으로 표현하였다. 그림 6(a)가 원래의 DWT 부대역의 구조이고, 화살표로 표시된 방법으로 SPIHT 코딩이 진행된다. 초고해상도 홀로그램의 경우에 한 부대역이 온전히 전송되지 못하여 복원된 영상에 영역 기반의 큰 왜곡이 발생할 수 있다. 따라서 그림 6(b)와 같이 부대역을 분할한 후에 코딩을 수행하고 패킷 전송을 분할된 부대역 단위로 수행한다면 영역 기반의 큰 왜곡의 발생에 대한 효과를 최소화할 수 있다.

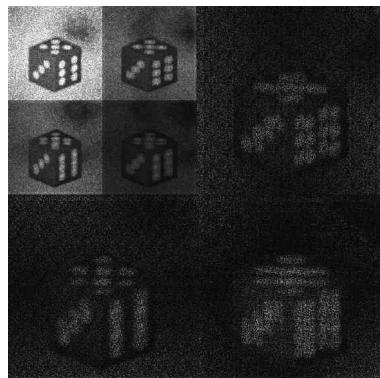
IV. 실험 및 결과

우리는 제안한 SPIHT 알고리즘을 검증하기 위해서 전체 코덱에 제안한 SPIHT를 삽입한 후에 초고해상도 홀로그램의 압축과 복원을 수행하였다. 실험에 사용된 홀로그램은 JPEG Pleno의 표준안을 위해 공개된 것을 사용하였다^[5]. 부대역 분할 수는 가로와 세로를 동일하게 하였으며 64×64 , 128×128 개의 분할된 부대역을 각각 동일한 압축률로 압축하였다. 그림 7(a)는 완전 복소 홀로그램의 DWT 결과이며, 그림 7(b)는 부대역의 분할없이 압축한 결과이다. 그림 7(c)와 (d)는 각각 4096, 16384개의 분할된 부대역을 압축한 결과이다. 분할된 부대역을 압축한 결과에서, 웨이블릿 계수가 특정 구간에 집중되지 않고 각 부대역에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

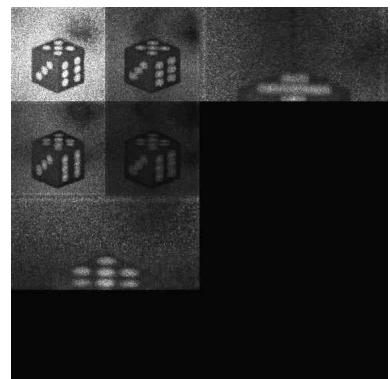
그림 8은 그림 7의 결과를 디코딩한 홀로그램의 복원 결



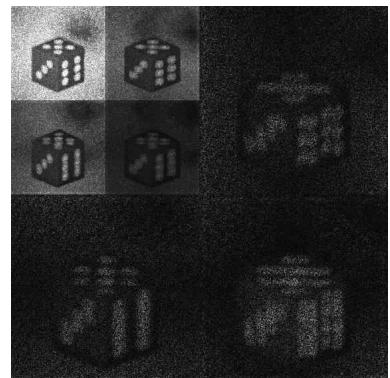
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 압축 결과 (a) 원본 (b) 분할하지 않은 부대역, (c) 분할 subband (4096), (d) 분할 subband (16384).

Fig. 7. Compression result, (a) original, (b) non-divided subband, (c) divided subband (4096), and (d) divided subband (16384).

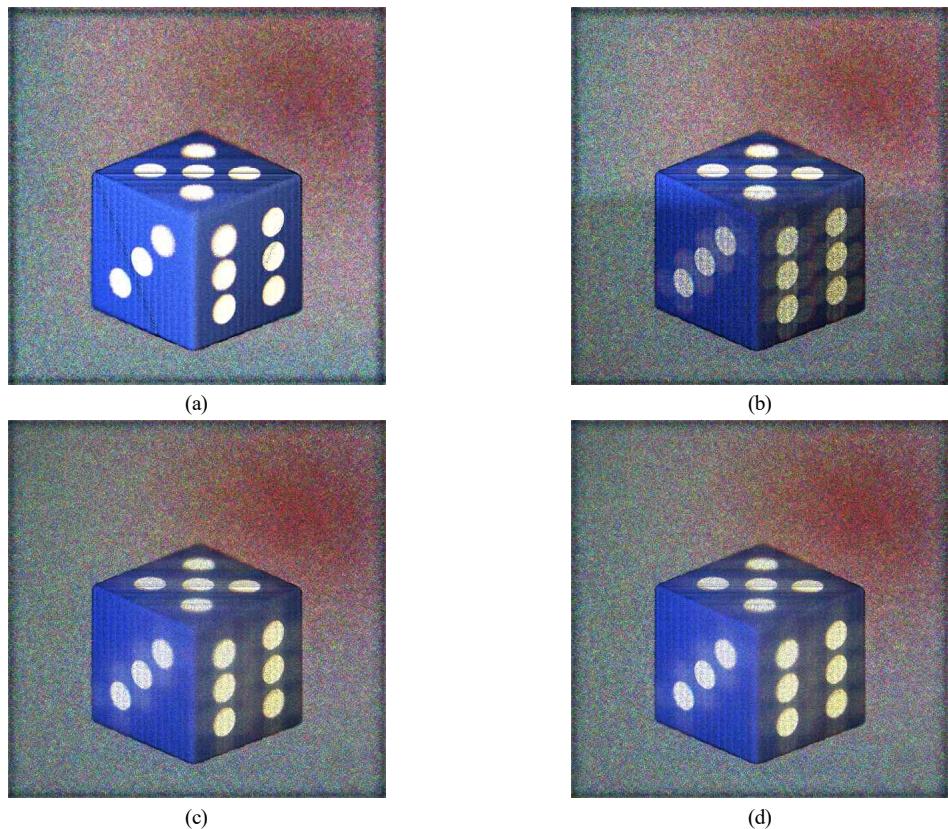


그림 8. 복원 결과 (a) 원본 (b) 분할하지 않은 subband, (c) 분할 subband (4096), (d) 분할 subband (16384).

Fig. 8. Reconstructed result, (a) original, (b) non-divided subband, (c) divided subband (4096), and (d) divided subband (16384).

과이다. 부대역을 분할한 방법의 결과가 분할하지 않은 것 보다 밝기 및 색상이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

표 1은 그림 8의 실험들에 대한 수치적 평가 결과를 보인다. 홀로그램에 대한 평가에는 SNR(Signal-to-Noise Ratio)과 SSIM(Structural Similarity Index Measure)이 사용되었

다. 복원 결과에 대한 평가에는 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)과 SSIM이 사용되었다. 분할하지 않은 부대역을 사용한 압축방법은 복원 결과에 문제가 있음에도, 분할된 부대역을 사용한 결과보다 평가 지표의 수치에서 전반적으로 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 단순한 수치적 성능 평가에서

표1. 홀로그램 및 복원 결과의 평가

Table 1. Evaluation for hologram and reconstruction

Hologram	SNR			SSIM		
	Blue	Green	Red	Blue	Green	Red
1	4.881	4.420	3.596	0.746	0.751	0.733
4096	4.607	4.576	3.953	0.749	0.754	0.726
16384	4.595	4.572	3.958	0.749	0.754	0.727
Reconstruction	PSNR			SSIM		
	Blue	Green	Red	Blue	Green	Red
1	19.501	17.901	15.474	0.721	0.686	0.632
4096	18.702	17.973	15.780	0.675	0.664	0.618
16384	18.677	17.970	15.793	0.674	0.665	0.619

는 납득할 수 없는 문제점이며, 제안하는 압축 방법이 이를 해결할 수 있는 방법 중에 한 가지가 될 수 있음을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 웨이블릿 변환이 사용된 홀로그램 전용 코덱에서 SPIHT가 발생시킬 수 있는 영역 기반의 왜곡을 해소할 수 있는 코딩 기법을 제안하고 검증하였다. 제안하는 방법은 분할된 부대역에 동등한 압축을 수행하는 것으로, 웨이블릿 계수가 특정 영역에만 편향되는 것을 방지하고, 복원된 부대역 전역에 균등한 분포를 가지도록 할 수 있는 것을 보였다. 더불어 PSNR, SSIM 등이 오히려 낮음에도 불구하고, 실제 복원 결과에서 영역이 왜곡되지 않는 결과를 보였다. 이를 통해 단순한 수치적인 성능 평가로는 납득할 수 없는 문제에 대한 해결 방법으로써 그 효과를 보였다. 본 연구만으로는 홀로그램을 위한 압축 방법으로써 좋은 효과를 보일 수 없지만, 이후에 진행될 많은 웨이블릿 기반의 홀로그램 압축 방법에서 수치적으로 납득할 수 없는 왜곡 문제를 해결하는데 많은 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] Dennis Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, 161, pp. 777 - 778, 1948.
doi: <https://doi.org/10.1038/161777a0>
- [2] P. Hariharan, "Basics of Holography," Cambridge University Press, May 2002.
- [3] W. Osten, A. Faridian, P. Gao, K. Körner, D. Naik, G. Pedrini, Al. Kumar Singh, M. Takeda, and M. Wilke, "Recent advances in digital holography [Invited]," *Appl. Opt.* 53, G44-G63, 2014.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.53.000G44>
- [4] H. Yoshikawa, "Digital holographic signal processing," *Proc. TAO First International Symposium on Three Dimensional Image Communication Technologies*, pp. S-4-2, Dec. 1993.
- [5] JPEG Pleno <https://jpeg.org/jpegpleno/>
- [6] E. Darakis, T. J. Naughton, and J. J. Soraghan, "Compression defects in different reconstructions from phase-shifting digital holographic data," *Appl. Opt.* vol. 46, no. 21, pp. 4579-4586, Mar. 2007.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.46.004579>
- [7] P. Memmolo, M. Paturzo, A. Pelagotti, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi, "New high compression method for digital hologram recorded in microscope configuration," In *Modeling Aspects in Optical Metrology III*. International Society for Optics and Photonics. vol. 8083, no. 80830W, pp. 1-7, May. 2011.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.889520>
- [8] J. Y. Sim, and C. S. Kim, "Reconstruction depth adaptive coding of digital holograms," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 95, no. 2, pp. 617-620, Feb. 2012.
doi: <https://doi.org/10.1587/transfun.E95.A.617>
- [9] T. J. Naughton, Y. Frauel, O. Matoba, N. Berta, E. Tajahuerce and B. Javidi, "Three-dimensional imaging, compression, and reconstruction of digital holograms," *SPIE Proc.* vol. 4877, pp. 104-114, Mar. 2003.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.463735>
- [10] Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi, "Overview of compressive sensing techniques applied in holography," *Applied optics*, vol. 52, no. 1, pp. A423-A432, Jan. 2013.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.52.00A423>
- [11] H. Zhang, W. Zhou, D. Leber, Z. Hu, X. Yang, P. W. Tsang, and T. C. Poon, "Development of lossy and near-lossless compression methods for wafer surface structure digital holograms," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 14, no. 4, pp. 1-8, Dec. 2015.
doi: <https://doi.org/10.1117/1.JMM.14.4.041304>
- [12] P. A. Cheremkhin, and E. A. Kurbatova, "Numerical comparison of scalar and vector methods of digital hologram compression," *Holography, Diffractive Optics, and Applications VII*. vol. 10022, no. 1002227, pp. 1-10, Oct. 2016.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.2246411>
- [13] E. Darakis and J. J. Soraghan, "Compression of interference patterns with application to phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* vol. 45, no. 11, pp. 2437-2443, April. 2006.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.45.002437>
- [14] P. A. Cheremkhin, and E. A. Kurbatova, "Quality of reconstruction of compressed off-axis digital holograms by frequency filtering and wavelets," *Applied optics*, vol. 57, no. 1, pp. A55-A64, Jan. 2018.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.57.000A55>
- [15] H. Yoshikawa and J. Tamai, "Holographic image compression by motion picture coding," *SPIE Proc.* vol. 2652, *Practical Holography X*, pp. 2-9, March. 1996.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.236045>
- [16] Y. H. Seo, H. J. Choi and D. W. Kim, "3D scanning-based compression technique for digital hologram video," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 22, no. 2, pp. 144-156, Nov. 2006.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.image.2006.11.007>
- [17] Y. H. Seo, H. J. Choi, J. W. Bae, H. J. Kang, S. H. Lee, J. S. Yoo and D. W. Kim, "A new coding technique for digital holographic video using multi-view prediction," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. E90-D, no. 1, pp. 118-125, Jan. 2007.
doi: <https://doi.org/10.1093/ietisy/e90-1.1.118>
- [18] E. Darakis and T. J. Naughton, "Compression of digital hologram sequences using MPEG-4," *SPIE Proc.* vol. 7358, pp. 735811-1, May 2009.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.820632>

- [19] K. Jaferzadeh, S. Gholami, and I. Moon, "Lossless and lossy compression of quantitative phase images of red blood cells obtained by digital holographic imaging," *Applied optics*, vol. 55, no. 36, pp. 10409-10416, Dec. 2016.
doi: <https://doi.org/10.1364/AO.55.010409>
- [20] W. S. Kim, D. W. Kim, and Y. H. Seo, "Hologram Super-Resolution Using a Single Reverse Inception based Deep Learning," In Proceedings of the Korean Society of Broadcast Engineers Conference, Kwangwoon Square & 80th Anniversary Hall, pp. 214-215, 2019.
- [21] W. S. Kim, B. S. Park, J. K. Kim, K. J. Oh, J. W. Kim, D. W. Kim, and Y. H. Seo, "Deep Learning-based Super Resolution for Phase-only Holograms," *Journal of Broadcast Engineering*, vol. 25, no. 6, pp. 935-943, 2020.
doi: <https://doi.org/10.5909/JBE.2020.25.6.935>

저자소개

김우석



- 2018년 8월 : 국립 한경대학교 전기전자제어공학과 졸업
- 2018년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 일반대학원(석박통합과정)
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2463-8987>
- 주관심분야 : 디지털 홀로그래피, 2D/3D 영상 처리 및 압축, 고해상도 영상처리

박병서



- 2019년 2월 : 광운대학교 경영학과 졸업
- 2019년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 일반대학원(석박통합과정)
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3396-8264>
- 주관심분야 : 포인트 클리우드, 딥러닝, 2D/3D 영상 처리

오관정



- 2002년 8월 : 전남대학교 정보통신공학과 학사
- 2005년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
- 2010년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
- 2010년 6월 ~ 2013년 2월 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송 미디어연구소 선임연구원
- 주관심분야 : 디지털 홀로그래피, 2D/3D 영상 처리 및 압축, 실감미디어

서영호



- 1999년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2008년 2월 : 한성대학교 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 교수
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0003-1046-395X>
- 주관심분야 : 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램