

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제26권 제2호, 2021년 3월 (JBE Vol. 26, No. 2, March 2021)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2021.26.2.143>

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

홀로그램 압축을 위한 적응적 웨이블릿 변환

김진겸^{a)}, 오관정^{b)}, 김진웅^{b)}, 김동욱^{a)}, 서영호^{a)†}

Adaptive Wavelet Transform for Hologram Compression

Jin-Kyum Kim^{a)}, Kwan-Jung Oh^{b)}, Jin-Woong Kim^{b)}, Dong-Wook Kim^{a)}, and Young-Ho Seo^{a)†}

요약

본 논문에서는 JPEG Pleno에서 제공하는 디지털 홀로그램 표준화 데이터를 압축하는 방법을 제시한다. 디지털 홀로그램의 수치 복원에서 시각화를 위한 랜덤 위상의 추가는 간섭현상으로 인한 스펙클 노이즈와 더불어 홀로그램의 압축 효율을 떨어뜨린다. 홀로그램은 완전 복소의 부동소수점 형태의 데이터로 구성되며 초고해상도와 스펙클 노이즈로 인해 홀로그램 특성에 맞춘 압축기술 개발이 필수적이다. 먼저, 다양한 웨이블릿 필터를 이용하여 홀로그램 데이터에 대한 주파수 특성 분석을 진행하여 필터 종류에 따른 에너지 집중도를 분석한다. 두 번째로 에너지 집중도를 이용한 부대역 선택 알고리즘에 대해 소개한다. 마지막으로 JPEG2000의 웨이블릿 필터인 Daubechies 9/7을 이용한 JPEG2000, SPIHT, H.264 결과와 제안하는 방법을 이용하여 압축 및 복원하고 압축률 대비 정량적 화질 평가를 통해 그 효율을 분석한다.

Abstract

In this paper, we propose a method of compressing digital hologram standardized data provided by JPEG Pleno. In numerical reconstruction of digital holograms, the addition of random phases for visualization reduces speckle noise due to interference and doubles the compression efficiency of holograms. Holograms are composed of completely complex floating point data, and due to ultra-high resolution and speckle noise, it is essential to develop a compression technology tailored to the characteristics of the hologram. First, frequency characteristics of hologram data are analyzed using various wavelet filters to analyze energy concentration according to filter types. Second, we introduce the subband selection algorithm using energy concentration. Finally, the JPEG2000, SPIHT, H.264 results using the Daubechies 9/7 wavelet filter of JPEG2000 and the proposed method are used to compress and restore, and the efficiency is analyzed through quantitative quality evaluation compared to the compression rate.

Keyword : Hologram, Discrete Wavelete Transform, Signal Processing, Zero-tree, Compression

a) 광운대학교 전자재료공학과(Department of Electronic Material Engineering, Kwangwoon University)

b) 한국전자통신연구원(ETRI)

† Corresponding Author : 서영호(Young-Ho Seo)

E-mail: yhseo@kw.ac.kr

Tel: +82-2-940-8362

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

※ 이 논문의 연구 결과 중 일부는 한국방송·미디어공학회 “2020년 추계학술대회”에서 발표한 바 있음.

※ 이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 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(NRF-2018R1D1A1B07043220).

· Manuscript received January 12, 2021; Revised March 5, 2021; Accepted March 18, 2021.

Copyright © 2021 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

I. 서론

홀로그래피는 1948년 Gabor가 발명하였다. 일반적인 디지털 이미지는 카메라를 통해 진폭 정보만을 기록한다. 홀로그래피는 진폭 정보뿐만 아니라 물체의 3차원 정보인 위상 정보까지 기록하여 기록한 물체의 완벽한 3차원 정보를 재현할 수 있는 특징을 가진다. 위와 같은 특징으로 인해 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다^{[1][2]}.

홀로그램은 아날로그 홀로그램과 디지털 홀로그램으로 나눌 수 있으며 아날로그 홀로그램은 특수한 필름을 사용해야 하는 등 많이 제약이 있어 디지털 홀로그램을 널리 사용한다. 홀로그램을 생성하는 방법으로 CGH(Computer-Generated Hologram)를 통해 홀로그램을 획득하는 방법이 가장 많이 사용된다^[3].

CGH를 통해 획득한 홀로그램은 부동 소수 형태로 표현된 완전 복소 데이터로 표현된다. 높은 품질의 재현능력을 가진 홀로그램을 획득하기 위해서는 작은 픽셀 피치와 초고해상도가 필수적이다. CGH를 할 때 시야각 개선을 위해 랜덤 위상 정보는 필수적이다. 초고해상도와 랜덤 위상정보는 방대한 데이터뿐만 아니라 스펙클 노이즈 성분의 증가로 이어져 홀로그램 신호처리를 더욱 어렵게 한다. 따라서 홀로그램의 특성을 고려한 압축 기술이 필수적이다^[4].

홀로그램을 압축하는 연구는 크게 홀로그램 자체를 압축하는 방법과 홀로그램을 특정한 거리로 전파시킨 후에 그 위치에서 회절된(복원된) 면의 정보를 압축하는 방법^{[6][7][8]}으로 나눌 수 있다. 홀로그램은 2차원 영상과 달리 매우 복잡한 형태를 갖고 있고, 화소들 간에 공간적인 상관성을 찾기가 매우 어렵다. 따라서 주파수 변환을 수행하더라도 좋은 에너지 집중도를 보이기 어렵다. 이러한 특성을 극복하기 위해 홀로그램을 조금 더 공간적인 상관성이 높은 데이터의 형태로 변환한 후에 이를 압축하고자 하는 것이 복원 영역에서의 압축방식이다. 복원 영역에서의 방식은 홀로그램 자체를 압축하는 것보다는 더 높은 압축율을 달성할 수 있는 것으로 이해될 수 있으나 특정한 거리에서 회절된 데이터를 압축하는 것이기 때문에 특정 거리의 정보에 오차가 집중될 수도 있고, 거리에 따른 홀로그램의 복원 품질에 차등이 발생할 수도 있다.

복원영역이 아닌 홀로그램 자체를 압축하는 많은 연구도 있었다. 여기에는 무손실 압축 알고리즘을 이용한 방법^[9], compressive sensing을 이용한 방법^{[10][11][12]}, 양자화를 이용한 방법^[13], 웨이블릿 기반의 압축 방법^{[14][15]}, MPEG 코덱을 이용한 방법^{[16][17][18][19]}, 그리고 JPEG 코덱을 이용한 방법^[20] 등이 있었다. 최근에는 최신의 표준 코덱을 활용한 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. JPEG, JPEG2000, AVC, HEVC 등과 같은 표준 코덱들을 이용하여 홀로그램을 압축하고, 이들 사이의 압축 효율을 벤치마킹한 다양한 연구가 진행되었다^{[21][22]}.

본 논문에서는 JPEG Pleno에서 제공하는 홀로그램 데이터를 소개한다. 그리고 웨이블릿 변환을 통한 랜덤 위상 홀로그램의 주파수 특성을 분석한다 주파수 특성 분석을 토대로 코덱 구조를 제안하고, 적응적 웨이블릿 변환 방법을 소개한다. 마지막으로, 표준 코덱인 JPEG2000과 Mallat-tree 기반의 SPIHT 압축과 비교하여 제안하는 방법이 홀로그램 압축에 있어 우수함을 보인다.

II. 디지털 홀로그램 특성 분석

1. 디지털 홀로그램 데이터 세트

본 논문에서는 JPEG Pleno에서 제공하는 홀로그램 데이터를 사용한다. JPEG Pleno는 모든 연구자가 동일한 데이터를 사용하도록 유도하고 있다. 그중 b-COM에서 제공하는 랜덤 위상 홀로그램을 사용한다. 다음 그림 1(a), (b) 및 (c)은 Dices1080p와 Ballet1080p 그리고 Piano1080p의 실수부 및 허수부 그리고 수치 복원한 진폭 영상이다. 각 홀로그램의 해상도는 1920×1080 이며 홀로그램의 픽셀 크기는 $6.4 \mu\text{m}$ 이고, 각각 복원 거리는 $0 \sim 0.655 \text{ cm}$, $0 \sim 3.2 \text{ cm}$, $0 \sim 0.60 \text{ cm}$ 이다. 복원을 위한 참조파의 파장은 Red, Green, Blue 각각 640 nm , 532 nm , 473 nm 이다. 제공되는 데이터의 정밀도는 32 비트이다.

b-COM 홀로그램은 Multi-View Depth를 기반으로 랜덤 위상을 추가하여 생성한 홀로그램이다. 랜덤 위상은 디지털 홀로그램의 좁은 시야각을 극복 가능하게 하는 장점이 있지만, 신호처리의 측면에서는 홀로그램 생성 시 간섭패

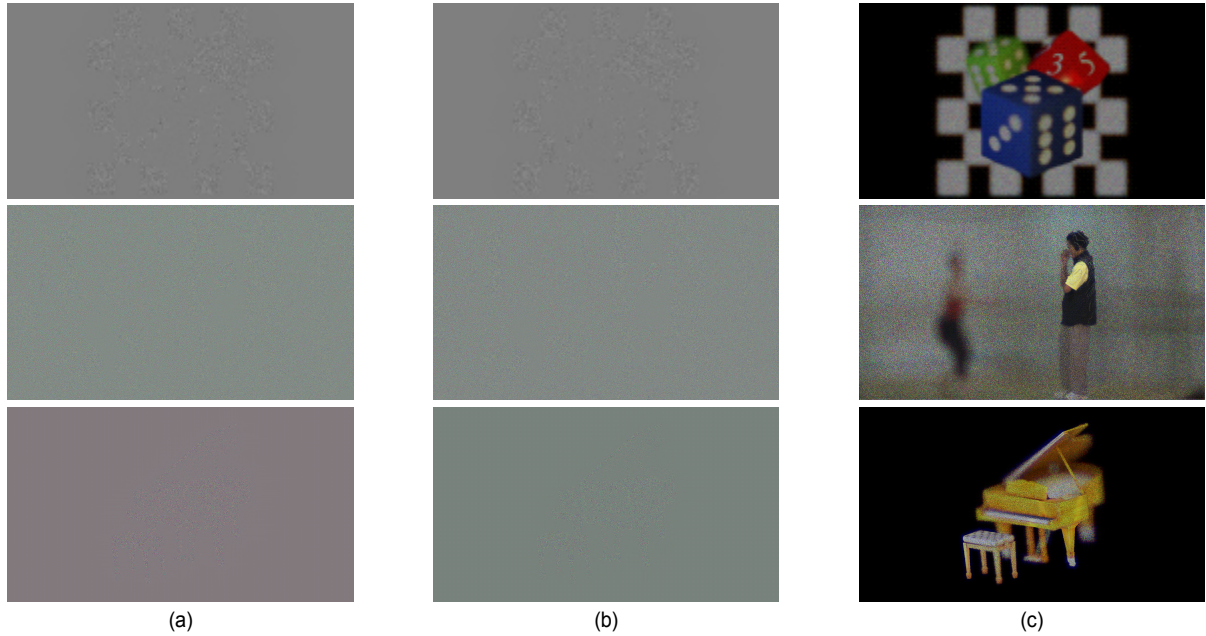


그림 1. JPEG Pleno 홀로그램, Dices1080p, Ballet1080p, Piano1080p: (a) 실수부, (b) 허수부, (c) 수치 복원(진폭)

Fig. 1. JPEG Pleno Hologram, Dices1080p, Ballet1080p, Piano1080p: (a) real and (b) imaginary hologram, (c) amplitude of the numerical reconstruction hologram

턴의 스펙트럼 노이즈 성분을 더욱 증가시켜 신호처리를 어렵게 한다. 이와 같은 특성은 홀로그램의 압축 효율을 감소시킨다.

2. 홀로그램 주파수 특성 분석

다음 그림 2는 웨이블릿 변환의 과정을 보여준다. 웨이블

릿 변환은 저주파 분해 필터와 고주파 분해 필터를 이용하여 진행한다. 원본에 저주파 대역 필터링과 고주파 대역 필터링을 각각 진행한 뒤 다운 샘플링을 진행한다. 다운 샘플링 된 결과에 다시 한번 각각 저주파 대역 필터링과 고주파 대역 필터링을 진행하고 다운 샘플링한다. 저주파 대역 필터링을 L로 고주파 대역 필터링을 H로 표기한다.

다음 그림 3은 Dices1080p 홀로그램의 실수부를 Quad-

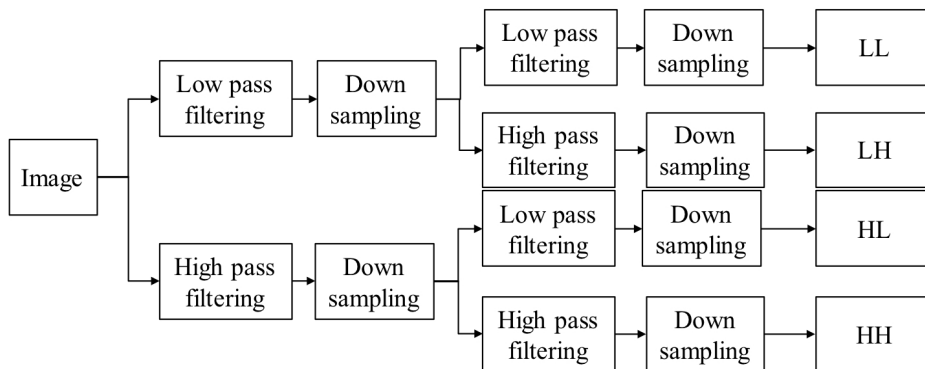


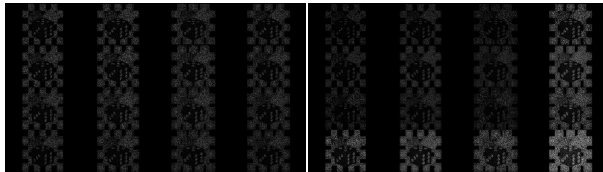
그림 2. 1 레벨 웨이블릿 변환 순서도

Fig. 2. Flowchart of 1 Level Discrete wavelet transform

$$\text{Band Energy} = \sum_{y=1}^Y \sum_{x=1}^X \text{pixel}_{(x,y)}^2 \quad (X, Y : \text{band's width and height}) \quad (1)$$

tree 방식으로 2 Level DWT 한 결과이다. 그림 3(a)는 JPEG2000에서 사용하는 Daubechies 9/7 필터를 이용하여 분해한 결과이며, 그림 3(b)는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터를 이용하여 분해한 결과이다. 일반적으로 에너지 집중도가 높은 변환은 압축 성능을 증가시킨다. 에너지의 계산은 각 픽셀 값의 제곱으로 한다. 그리고 부대역 에너지를 독립적으로 계산한다. 다음 수식 1은 에너지 집중도 계산 수식이다.

전체 에너지를 100%로 하였을 때 Daubechies 9/7 필터를 이용할 경우 최대 7.46%에서 최소 4.6%의 에너지를 부대역 하나에 집중시킬 수 있다. Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터를 사용할 경우 최대 47.13%에서 최소 0.65%의 에너지를 부대역 하나에 집중시킬 수 있다.



(a) (b)

그림 3. DWT를 이용한 Dices1080p 실수부 주파수 특성 분석 (a) Daubechies 9/7, (b) Reverse Bi-Orthogonal 3.9

Fig. 3. Dices1080p real part frequency characteristic analysis using DWT (a) Daubechies 9/7, (b) Reverse Bi-Orthogonal 3.9

III. 디지털 홀로그램 압축

1. 제안하는 코덱 구조

다음 그림 4는 위의 웨이블릿 필터가 가지는 에너지 집중도 특성을 고려하여 제안하는 코덱의 구조이다. 먼저 완전 복소 홀로그램의 실수부와 허수부를 일정한 크기의 데이터로 정규화(Normalization)하였다. 본 논문에서는 -128에서 127의 분포로 데이터를 정규화하며 양자화없이 32비트 그대로 사용한다. 홀로그램의 특성에 따라 정규화 분포를 자유롭게 결정할 수 있다. 다양한 필터를 이용하여 웨이블릿 변환을 수행한다. 이때, 각 레벨당 가장 에너지 집중도가 높은 부대역을 변환하며, 각 레벨마다 가장 에너지 집중도가 높게 변환시키는 필터를 사용한다. 이것을 적응적 웨이블릿 변환이라 한다. 다음으로 적응적 웨이블릿을 통해 나온 부대역을 SPIHT 인코더를 이용하여 압축하고 복원한다 [23].

2. 적응적 웨이블릿 변환

본 절에서는 적응적 웨이블릿 변환이 수행되는 과정을 소개하고, Dices1080p에 대한 1레벨 적응적 웨이블릿 변환 예시를 보여준다. 다음 그림 5는 적응적 웨이블릿 변환의

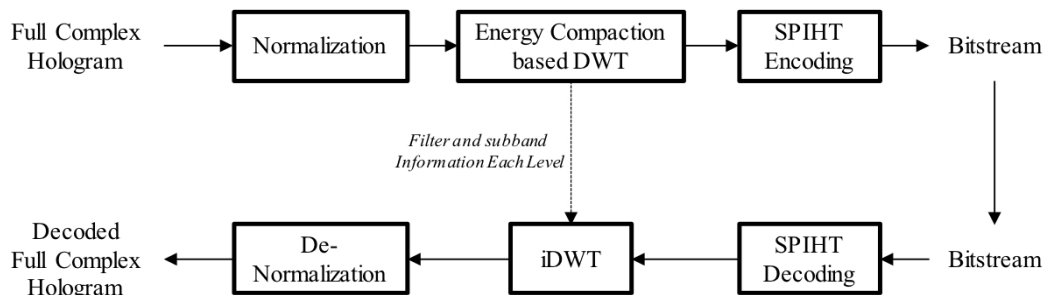


그림 4. 제안하는 압축 코덱의 구조

Fig. 4. Structure of Proposed Codec

알고리즘이며 그림 아래에 에너지 집중도를 분석하는 방법을 소개한다.

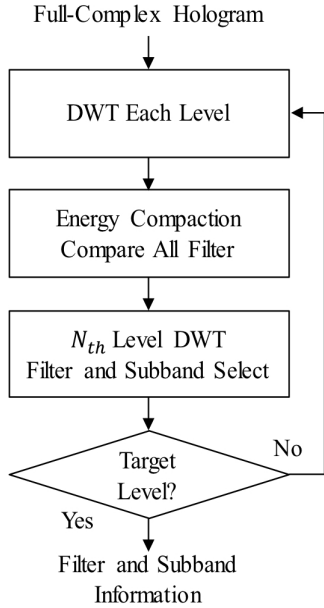


그림 5. 에너지 집중도를 고려한 적응적 웨이블릿 변환 알고리즘
Fig. 5. Process of Energy compaction based adaptive discrete wavelet transform algorithm

에너지 집중도를 고려한 적응적 웨이블릿 변환과정은 다음과 같다. 각 레벨의 웨이블릿 변환을 수행할 때 사용 가능한 모든 필터를 이용하여 진행한다. 모든 필터를 이용해 웨이블릿 변환을 수행한 후 4개의 부대역의 에너지 집중도를 계산한다. 에너지 집중도 계산이 완료되면 가장 에너지 집중도가 높은 필터를 선택한다. 해당 필터를 이용하여 웨이블릿 변환된 부대역 중 가장 에너지 집중도가 높은 부대역

에 대해 다음 레벨 웨이블릿 변환을 수행한다. 위 과정을 목표 레벨까지 진행하여 에너지 집중도를 최대화한다. 마지막으로, 각 레벨에서 사용한 필터와 분해된 부대역의 정보를 디코더에 전송한다.

다음 표 1은 Dices1080p 홀로그램의 1 Level DWT 결정되는 과정을 보여준다. 사용한 필터는 총 6가지다. 아래 결과에서 Reverse Bi-Orthogonal 3.9의 결과가 HH 부대역에 42.78%의 에너지를 집중시킴을 확인할 수 있다. 즉 1 Level DWT에 사용하는 필터는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9이며 다음 레벨에 변환되는 부대역은 HH 부대역으로 결정된다.

3. 제로트리 압축 및 구조

제로트리 압축은 웨이블릿 변환을 통해 나온 부대역에서 상위 레벨 부대역과 하위 레벨 부대역의 계수간의 상관도를 통해 압축한다. 상위 부대역의 계수 하나는 하위 부대역의 계수 4개와 매칭된다. 상위 부대역의 계수가 0이면 하위 부대역 4개의 계수도 0으로 제로트리 코딩을 실시한다. 다음 그림 6(a)는 Mallat-tree로 3-레벨 웨이블릿 변환을 진행한 후 제로트리 구조를 보여준다. 일반적인 이미지 압축에서는 저주파 성분이 많고 중요하기 때문에 (a)와 같은 구조를 통해 저주파 성분을 보존하고 고주파 성분을 버려 압축 효율을 높인다. 그림 6(b)는 제안하는 적응적 웨이블릿 변환을 통한 제로트리 구조다. 에너지 집중도를 고려하였을 때 HH 부대역의 에너지 집중도가 가장 높을 시 (b)와 같은 구조를 가질 수 있다. 다음과 같은 구조를 통해 고주파 부대역을 보존할 수 있다.

표 1. 레벨 적응적 웨이블릿 변환 결과 (%)

Table 1. Result of 1 Level Adaptive Wavelet Transform (%)

Level	Filter	LL	LH	HL	HH
1 Level	Daubechies 9/7	22.82	25.32	24.68	27.18
	Daubechies 6	23.43	25.37	24.77	26.43
	Bi-Orthogonal 3.9	39.36	23.78	23.09	13.76
	Bi-Orthogonal 5.5	17.93	24.71	24.15	33.19
	Reverse Bi-Orthogonal 3.9	11.86	22.92	22.44	42.78
	Reverse Bi-Orthogonal 5.5	30.00	25.17	24.48	20.34

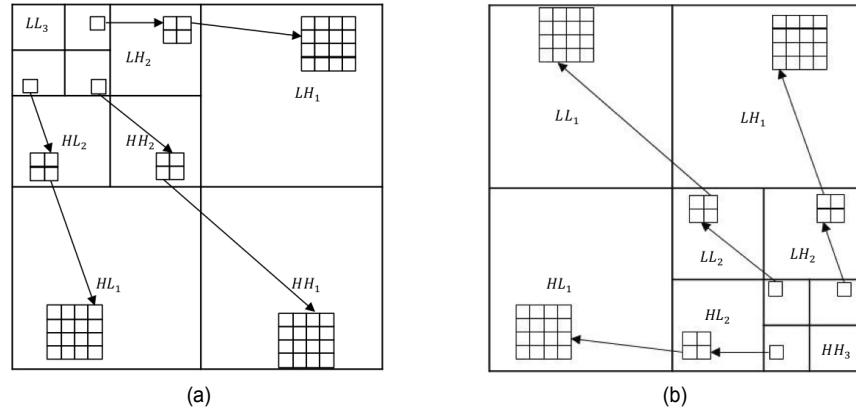


그림 6. 제로트리 구조 (a) Mallat-tree 구조 (b) 적응적 웨이블릿 변환 후 제로트리 구조

Fig. 6. Zerotree structure (a) Mallat-tree structure (b) Zerotree structure after adaptive wavelet transform

IV. 실험 결과

1. 실험 환경

제안한 알고리즘은 Intel I7-7700K CPU @3.6 GHz와 64GB RAM 그리고 64-bit Window10 환경에서 C/C++, OpenCV, OpenMP 및 CUDA를 이용하여 구현되었다. 실험에 사용된 완전 복소 홀로그램은 JPEG Pleno에서 공개하고 있는 Dices1080p, Piano1080p Breakdancers1080p, Ballet1080p이다^[5,25,26].

2. 적응적 웨이블릿 변환 결과

먼저 다양한 웨이블릿 필터를 이용해서 제안한 알고리즘을 수행하고 에너지 집중도를 분석한다. 웨이블릿 변환에서 사용되는 필터는 매우 많고, 부대역을 선택하는 과정 또

한 각 레벨당 4가지를 고려해야한다. 본 논문에서는 서로 특성이 비슷한 필터를 분류하였다. 대표적으로 에너지를 저주파 부대역에 집중시키는 필터와 에너지를 고르게 분포시키는 필터 그리고 고주파 부대역에 에너지를 집중시키는 필터 결과이다. 사용된 필터는 저주파 부대역 집중 필터로 Bi-Orthogonal 3.9와 고르게 분포시키는 Daubechies 6 그리고 고주파 영역에 집중시키는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9를 사용하였다. 그림 7은 위 3가지 필터를 이용하여 에너지 집중도를 고려하여 각 레벨별로 웨이블릿 변환을 에너지 집중도가 가장 높은 부대역을 선택한 결과이다. 그림 7(a)는 Bi-Orthogonal 3.9 (b)는 Daubechies 6 그리고 (c)는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9의 부대역 구조다.

다음 표 2에 3레벨까지 웨이블릿 변환을 수행할 때 레벨당 에너지 집중도를 정량적으로 확인한다. 저주파 집중 필터로 1 레벨 변환 할 경우 1레벨의 웨이블릿 변환에서는 저주파 영역으로 39.36%의 에너지를 집중시켰다. 2레벨의

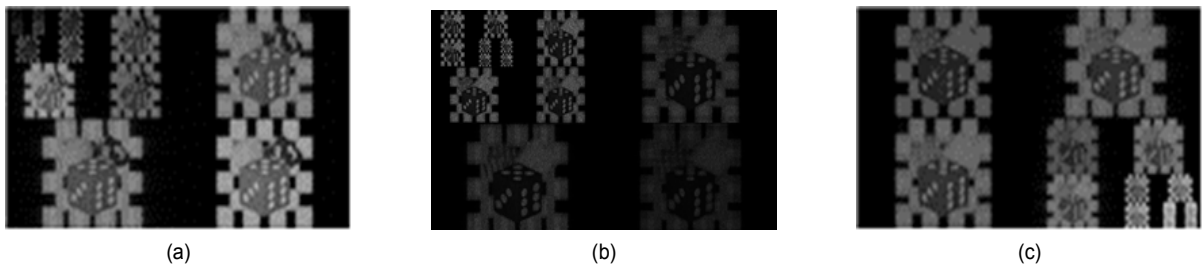


그림 7. 에너지 집중도를 고려한 적응적 웨이블릿 변환 결과 (a) Bi-Orthogonal 3.9 (b) Daubechies 6 (c) Reverse Bi-Orthogonal 3.9

Fig. 7. Results of energy compaction based adaptive wavelet transform structure (a) Bi-Orthogonal 3.9 (b) Daubechies 6 (c) Reverse Bi-Orthogonal 3.9

웨이블릿 변환에서 Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터로 LL 부대역을 분해해 HH 부대역으로 40.04%의 에너지 집중도를 보여주었다. 마지막으로 Bi Orthogonal 3.9 필터가 선택되어 31.54%의 집중도를 보였다. Daubechies 6 필터의 경우 1 레벨에서 에너지를 집중시키지 못하였다. 2 레벨에서 Bi Orthogonal 3.9 필터가 선택되어 42.02%의 집중도를 보였다. 3레벨에서 42.02%의 에너지 집중도를 보였다. 마지막으로 Reverse Bi-Orthogonal 3.9의 경우 1레벨 웨이블릿 변환에서 최대 42.78%의 에너지를 집중시켰으며, 2레벨에 HH 부대역에 대해 웨이블릿 변환한 결과 51.37%의 에너지를 집중시켰다. 동일하게 3레벨에서 HH부대역에 웨이블릿 변환한 결과 45.54%의 에너지를 집중시켰다. 이 실험에서 Dices1080p 홀로그램의 경우 각 레벨에 Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터가 가장 에너지 집중도가 높음을 확인할 수 있었다.

3. 압축 실험

제안한 압축기법을 이용한 결과를 그림 8부터 그림 10까지 나타냈다. 각 그림은 디코딩된 홀로그램의 실수와 허수부에 대한 평균 PSNR과 복원된 홀로그램의 PSNR을 나타

낸다. PSNR의 계산은 JPEG Pleno의 기준을 사용하였다. 다음 표 3은 Full HD 홀로그램에서 200:1기준 부가적인 데이터 비트로 인해 적응적 웨이블릿 레벨 단계에 따라 압축률의 변동이 일어나는 것을 정량적으로 보인다. 각 웨이블릿 필터와 부대역 정보는 인덱싱하여 디코더에 전송하고 필터는 레벨당 3 비트 부대역 정보는 2 비트가 부가적으로 발생한다. 결과적으로 부가 데이터에 의한 압축률 변동은 거의 없는 것으로 확인되었다.

그림 8은 필터 종류에 따른 결과이다. 제안하는 알고리즘에서는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터가 각 레벨별로 가장 높은 에너지 집중도를 보여주었으며, HH 부대역이 집중적으로 분해되었다. 반면에 Bi-Orthogonal 3.9의 결과는 Reverse Bi-Orthogonal 3.9에 비해 에너지 집중도가 낮았지만 LL 부대역을 집중적으로 분해하였다. 압축률 40:1 이상 홀로그램 실수부와 허수부 평균과 복원 진폭의 PSNR이 Reverse Bi-Orthogonal 3.9에서 1dB 이상 높은 PSNR 보인다. 에너지 집중도가 높은 필터를 사용하는 것이 고압축으로 갈수록 우수한 효율을 보임을 확인할 수 있다. 적응적 웨이블릿 변환은 JPEG2000과 같이 정해진 필터를 사용하지 않는다. 이는 디코더에 사용된 필터와 부대역 정보에 대해 부가적인 데이터 비트를 전송하게 된다.

표 2. 필터종류에 따른 적응적 웨이블릿 변환의 에너지 집중도 (%)

Table 2. Energy compaction of adaptive wavelet transform according to filter type (%)

Filter	Level	LL	LH	HL	HH
Bi-Orthogonal 3.9	1	39.36	23.78	23.09	13.76
Reverse Bi-Orthogonal 3.9	2	12.25	32.79	14.93	40.04
Bi-Orthogonal 3.9	3	7.28	14.76	25.99	24.4
Daubechies 6	1	26.43	25.37	24.77	23.43
Bi-Orthogonal 3.9	2	42.02	23.06	22.58	12.34
Reverse Bi-Orthogonal 3.9	3	7.94	20.43	19.91	51.73
Reverse Bi-Orthogonal 3.9	1	11.86	22.92	22.44	42.78
Reverse Bi-Orthogonal 3.9	2	7.98	20.16	20.49	51.37
Reverse Bi-Orthogonal 3.9	3	10.67	22.01	21.78	45.54

표 3. 적응적 웨이블릿 변환의 부가 데이터로 인한 압축률 변동

Table 3. Compression rate change due to overhead data of adaptive wavelet transform

compression ratio / bits	DWT Level	Overhead bits	Changed compression ratio / bits
200:1 / 331,776 bits	2	10 bits	199.99:1 / 331,786 bits
	3	15 bits	199.99:1 / 331,791 bits
	4	20 bits	199.98:1 / 331,796 bits

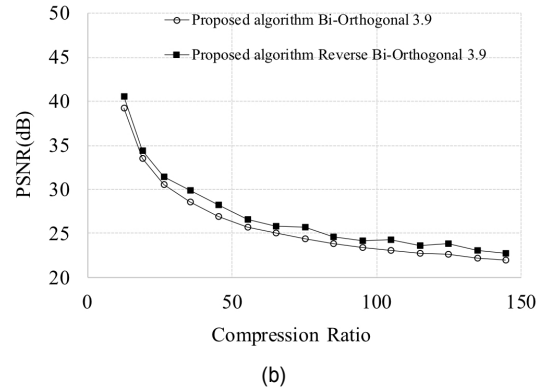
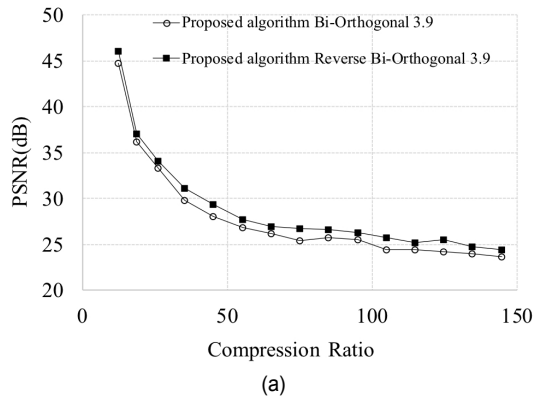


그림 8. 제안한 알고리즘에서 필터 종류에 따른 결과 (a) 실수부 허수부 평균 (b) 복원 진폭

Fig. 8. In the proposed algorithm, the result according to the filter (a) Average of real part and imaginary part (b) Reconstruction amplitude

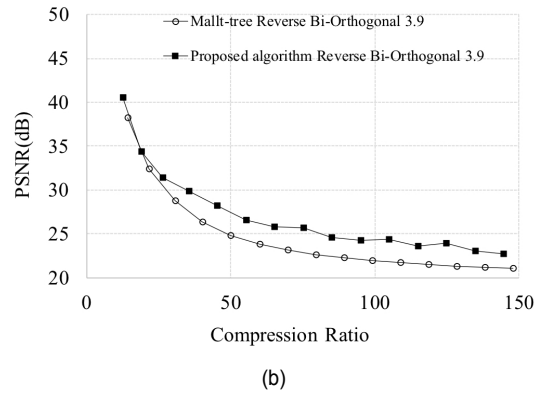
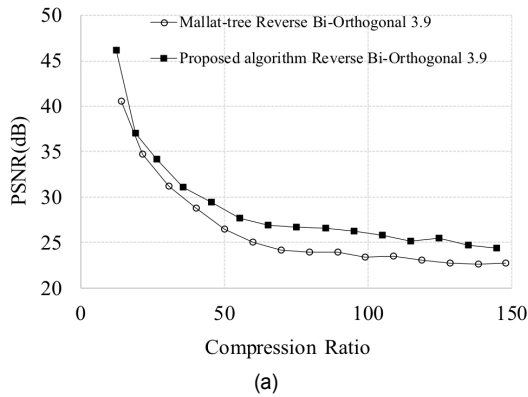


그림 9. 부대역 선택 유무에 따른 결과 (a) 실수부 허수부 평균 (b) 복원 진폭

Fig. 9. Results of subband selection (a) Average of real part and imaginary part (b) Reconstruction amplitude

다음 그림 9는 에너지 집중도가 높은 필터를 사용하되 부대역 선택의 기준을 달리하였을 결과다. Reverse Bi-Orthogonal 3.9 필터를 사용하되 Mallat-tree를 이용한 결과와 제안한 알고리즘의 결과를 비교한다^[24]. 분해되는 부대역 선정 알고리즘 유무에 따라 60:1에서 홀로그램의 실수부와 허수부 평균과 복원 진폭에서 최대 3dB 이상의 차이를 확인할 수 있으며, 필터 선정뿐만 아니라 부대역의 선택 또한 압축 성능에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

다음 그림 10은 Daubechies 9/7 필터를 이용한 JPEG2000과 H.264 그리고 Mallat-tree를 이용한 SPIHT 그리고 제안한 방법에서 가장 에너지 집중도가 높은 Reverse Bi-Orthogonal 3.9를 사용한 결과 비교이다. 홀로그램은 Dices1080p, Piano1080p, Ballet1080p, Breakdancers1080p이다. 홀로그

램 별 압축률 당 PSNR을 평균으로 계산하였다. 제안한 방법이 저압축과 고압축 모두 Daubechies 9/7기반의 Mallat-tree를 이용한 SPIHT에 비해 높은 수치를 보여주며, JPEG2000과 120:1 압축률에서 홀로그램의 실수부와 허수부 평균 2dB와 복원 진폭에서 1.5 dB 높은 성능을 보여주었다. H.264는 JPEG2000과 거의 비슷한 결과를 보여준다.

다음 그림 11은 100:1 압축률에서 H.264와 Daubechies 9/7 필터를 이용한 JPEG2000과 Mallat-tree를 이용한 SPIHT 그리고 제안한 방법에서 가장 에너지 집중도가 높은 Reverse Bi-Orthogonal 3.9를 사용한 방법으로 압축 및 복원하고 수치 복원한 이미지다. 그림 10은 원본, H. 264, JPEG2000, SPIHT, 제안한 방법을 세로 순서로 배치하였다.

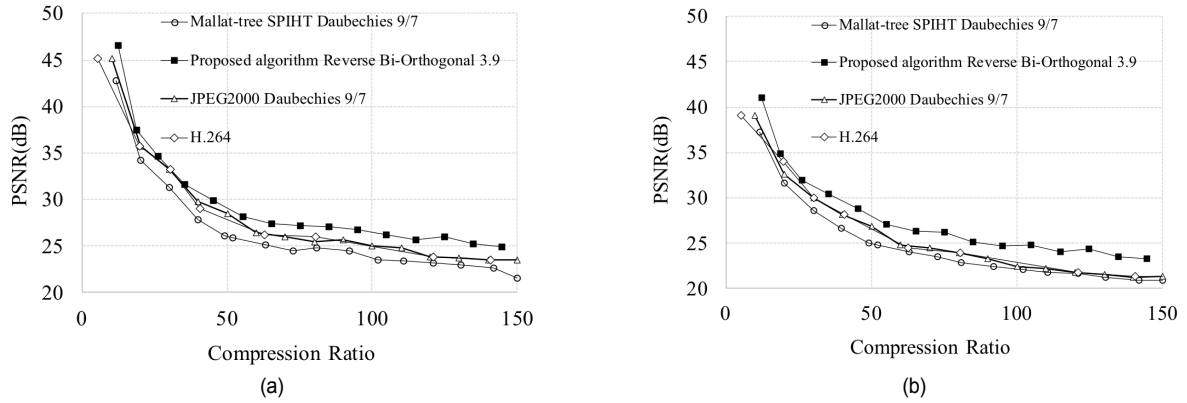


그림 10. H.264와 Daubechies 9/7 기반의 JPEG2000 및 Mallat-tree SPIHT와 제안한 알고리즘 Reverse Bi-Orthogonal 3.9 비교 (a) 실수부 허수부 평균 (b) 복원 진폭

Fig. 10. Comparison of H.264 and Daubechies 9/7 based JPEG2000 and SPIHT with the proposed algorithm (a) Average of real part and imaginary part (b) Reconstruction amplitude



그림 11. 100:1 압축률에서의 압축 및 수치 복원한 결과 원본, H.264, JPEG2000, SPIHT, 제안한 방법 순서 (a) Dices1080p, (b) Ballet1080p, (c) Breakdancers1080p, (d) Piano1080p

Fig. 11. Original, H.264, JPEG2000, SPIHT, the order of the proposed method from the top of the reproduction result after compression and numerical reconstruction at 100:1 compression rate (a) Dices1080p, (b) Ballet1080p, (c) Breakdancers1080p, (d) Piano1080p

V. 결 론

본 논문에서는 에너지 집중도를 고려한 적응적 웨이블릿 변환을 통해 실수부와 허수부로 구성된 완전 복소 홀로그래램을 압축하는 코덱을 제안하였다. 제안하는 알고리즘의 핵심은 랜덤 위상 홀로그래램은 특정 웨이블릿 필터를 통해 에너지를 효율적으로 집중시킬 수 있으며, 이를 통해 홀로그래램의 정보를 작은 부대역에 집중시키는 것이었다. 에너지 집중도가 가장 높은 필터를 선택하는 것이 다른 필터를 사용한 경우보다 좋은 성능을 보여주었으며, 그중에서도 에너지 집중도가 가장 높은 부대역을 선택하여 다음 레벨의 웨이블릿 변환을 수행하는 것이 고전적인 Mallat-tree 방식보다 우수함을 보였다. 마지막으로, 정지영상의 표준 압축방식인 JPEG2000과의 비교를 통해 제안하는 알고리즘이 랜덤위상 홀로그래램 압축 효율을 높이는데 기여함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] Dennis Gabor, "A new microscopic principle", *Nature*, 161, pp. 777 - 778, 1948.
- [2] P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, May 2002.
- [3] K. Matsushima and S. Nakahara, "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *Appl. Opt.* 48, H54-H63, 2009.
- [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.
- [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
- [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
- [9] T. J. Naughton, Y. Frauel, O. Matoba, N. Bertaux, E. Tajahuerce and B. Javidi, "Three-dimensional imaging, compression, and reconstruction of digital holograms", *SPIE Proc.* vol. 4877, Opp.104-114, Mar. 2003.
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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.
- [15] 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
- [16] H. Yoshikawa and J. Tamai "Holographic image compression by motion picture coding", *SPIE Proc.* vol. 2652, Practical Holography X, pp. 2-9, March. 1996.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] E. Darakis and T. J. Naughton, "Compression of digital hologram sequences using MPEG-4", *SPIE Proc.* vol. 7358, pp. 735811-1, May 2009.
- [20] 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
- [21] A. Ahar, D. Blinder, R. Bruylants, C. Schretter, A. Munteanu, and P. Schelkens, "Subjective quality assessment of numerically reconstructed compressed holograms." *In Applications of Digital Image Processing XXXVIII. International Society for Optics and Photonics*. vol. 9599, no. 95990K, pp. 1-15, Sep.2015
- [22] J. P. Peixeiro, C. Brites, J. Ascenso, and F. Pereira, "Holographic data coding: Benchmarking and extending hevc with adapted transforms." *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 20, no. 2, pp. 282-297, Feb.2018
- [23] S. Nimalraj "SPIHT: A Set Partitioning in Hierarchical Trees Algorithm for Image Compression", *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 8, 2015, no. 6, 263-270
- [24] A. Skodras, C. Christopoulos, T. Ebrahimi "The JPEG 2000 still image

compression standard", *IEEE*, Vol. 18, pp. 36-58, September, 2011
[25] A. Gilles, P. Gioia, R. Cozot, and L. Morin, "Hybrid approach for fast occlusion processing in computer-generated hologram calculation," *Appl. Opt. AO*, vol. 55, no. 20, pp. 5459 - 5470, Jul. 2016.

[26] A. Gilles, P. Gioia, R. Cozot, and L. Morin, "Computer generated hologram from Multiview-plus-Depth data considering specular reflections," in *2016 IEEE International Conference on Multimedia Expo Workshops (ICMEW)*, 2016, pp. 1 - 6.

저 자 소 개



김 진 겸

- 2019년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 학사
- 2019년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 석박 통합과정 재학
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8526-2610>
- 주관심분야 : 디지털 홀로그래피, 2D/3D 영상 처리 및 압축, 실감미디어



오 관 정

- 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



김 진 웅

- 1981년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사
- 1993년 8월 : 미국 Texas A&M 대학교 전기공학과 박사
- 2004년 7월 ~ 2005년 6월 : 미국 Columbia 대학교 객원연구원
- 1983년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원 / 실감방송미디어연구부장
- 주관심분야 : 디지털 방송 기술, 3DTV 방송, UHDTV 방송, Audio 및 Video 압축부호화, 멀티미디어 시스템, 홀로그램 기술



김 동 욱

- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 공학석사
- 1991년 9월 : Georgia공과대학 전기공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 정교수
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0001-6106-9894>
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램, 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP설계, Wireless Communication

저 자 소 개



서 영 호

- 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 홀로그래프