

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제25권 제4호, 2020년 7월 (JBE Vol. 25, No. 4, July 2020)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2020.25.4.587>

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

JPEG Pleno 홀로그래프 데이터의 정규화를 위한 양자화

김 경 진^{a)}, 김 진 겸^{a)}, 오 관 정^{b)}, 김 진 웅^{b)}, 김 동 욱^{a)}, 서 영 호^{a)‡}

Quantization Method for Normalization of JPEG Pleno Hologram

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

요 약

본 논문에서는 디지털 홀로그래프를 처리하는 과정에서 필수적으로 발생하는 양자화 과정에 대해 분석하고 최적화된 양자화기를 제안한다. 홀로그래프의 압축 표준을 제정하고 있는 JPEG Pleno에서 full complex 홀로그래프는 32비트 혹은 64비트의 정밀도를 갖는 복소수로 정의되고, 값의 범위는 홀로그래프의 생성 방법 및 객체의 형태에 따라서 매우 다양하다. 이와 같은 높은 정밀도와 넓은 범위를 갖는 데이터는 신호 처리 및 압축 등의 이유로 인해 보다 낮은 정밀도를 갖는 고정소수점 데이터 혹은 정수형 데이터로 변환된다. 또한 다양한 신호처리 과정을 거친 홀로그래프 데이터를 SLM에 재생하기 위해서는 SLM의 화소가 표현할 수 있는 값의 정밀도로 근사화된다. 이러한 과정은 양자화를 통한 정규화 과정이라 할 수 있다. 본 논문에서는 높은 정밀도와 넓은 범위의 홀로그래프 데이터를 양자화 기법을 이용하여 정규화시키는 방법에 대해 소개하고 최적화된 방법을 제시한다.

Abstract

In this paper, we analyze the normalization that occurs when processing digital hologram and propose an optimized quantization method. In JPEG Pleno, which standardizes the compression of holograms, full complex holograms are defined as complex numbers with 32-bit or 64-bit precision, and the range of values varies greatly depending on the method of hologram generation and object type. Such data with high precision and wide dynamic range are converted to fixed-point or integer numbers with lower precision for signal processing and compression. In addition, in order to reconstruct the hologram to the SLM (spatial light modulator), it is approximated with a precision of a value that can be expressed by the pixels of the SLM. This process can be refereed as a normalization process using quantization. In this paper, we introduce a method for normalizing high precision and wide range hologram using quantization technique and propose an optimized method.

Keyword : hologram, compression, normalization, quantization, reconstruction

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

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education in 2020 (NRF-2020R1D1A1B07043220), This work was supported by Giga KOREA project, [GK20D0100, Development of Tele-communications Terminal with Digital Holographic Table-top Display].

· Manuscript received April 2, 2020; Revised June 3, 2020; Accepted June 16, 2020.

Copyright © 2020 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.”

1. 서론

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].

홀로그램을 멀티미디어로써 이용하기 위해서는 홀로그램을 처리하는 다양한 기술들의 개발이 필요하다. 우리는 이것을 디지털 홀로그램 신호처리(digital hologram signal processing)라고 한다^[4]. 홀로그램 신호처리는 크게 홀로그램의 압축과 렌더링으로 구분할 수 있다. 홀로그램 압축 기술에는 정지 홀로그램 압축^[5-7]과 비디오 홀로그램 압축^[8-11]이 포함된다. 현재 JPEG Pleno에서는 정지 홀로그램에 대한 압축의 표준화 과정을 진행 중에 있다^[12]. 홀로그램 렌더링 기술에는 홀로그램 생성, 편집, 보간 그리고 개선이 포함될 수 있다. 홀로그램은 광학적 시스템을 이용하여 촬영할 수도 있지만, 컴퓨터 모델링을 통해서 생성할 수도 있다. 홀로그램을 생성하는 기술은 대표적으로 레이어^[13,14], 포인터 클라우드^[15,16] 그리고 매쉬 기반^[17,18]의 방법이 있다. 홀로그램 렌더링 기술은 해상도 변환, 화면 비율 변환, 시정거리 변환, 그리고 프레임율 변환 등이 포함된다^[19-21]. 홀로그램 개선 기술에는 홀로그램 화질 개선^[22,23], 시야각 개선^[24,25] 그리고 스펙클 잡음의 제거^[26,27] 등이 포함된다^[28].

다양한 목적으로 홀로그램을 디지털 신호로써 처리하기 위해서는 가장 먼저 공간상에 분포된 데이터의 크기를 일정한 범위로 정규화하는 것이 필요하다. 특히 컴퓨터를 이용하여 생성된 복소 디지털 홀로그램은 생성 방식과 객체의 포인트 수에 따라서 다양한 분포를 갖는다^[28]. 디지털 홀로그램의 압축 방법에 대한 표준화를 진행하고 있는 JPEG Pleno에서는 현재 실험을 위한 몇 가지 홀로그램 데이터를 공개하고 있고^[12], 이들 데이터들의 분포는 매우 다양하다. 따라서 본 논문에서는 완전 복소 홀로그램을 이용하여 신호처리를 하기 위해서 정규화하는 기법에 대해 제안하고자 한다. 정규화는 방법으로는 양자화 기법을 이용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 논문에서 사용할 JPEG Pleno의 홀로그램 데이터 세트에 대해서 소개한다. 다음으로 3장에서는 홀로그램의 양자화 방법에 대해서 소개하고, 4장에서 실험결과를 보인다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 디지털 홀로그램 데이터 세트

본 장에서는 JPEG Pleno에서 정의하고 있는 고해상도

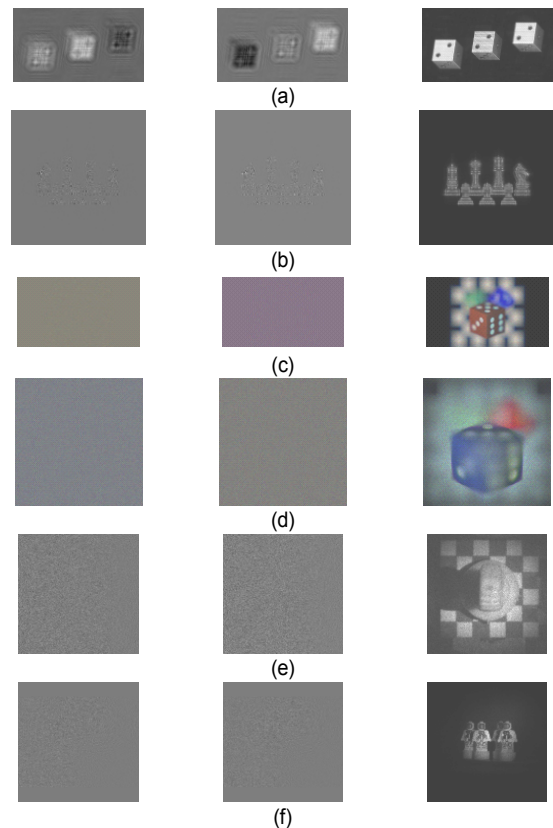


그림 1. 실험에 사용된 JPEG Pleno의 데이터 세트, 포인트 클라우드 기반의 홀로그램: (a) 2D Multi, (b) Chess 8K, Multiview-Depth 기반의 홀로그램: (c) Dices 4K2K, (d) Dices 8K, 위상 천이 기반의 홀로그램: (e) Horse, (f) Astronaut, (각 홀로그램 별로 가장 왼쪽부터 오른쪽까지 차례대로 실수부, 허수부 홀로그램, 복원 결과에 해당함)

Fig. 1. JPEG Pleno dataset used in our experiment, point cloud-based hologram: (a) 2D Multi, (b) Chess 8K, Multiview-Depth-based hologram: (c) Dices 4K2K, (d) Dices 8K, Phase-shift-based hologram: (e) Horse, (f) Astronaut, (real part, imaginary part, and reconstruction in order from left to right for each hologram)

홀로그래프 데이터를 소개한다. 홀로그래프는 생성 방법에 따라 데이터의 형태가 다르고, 서로 다른 데이터를 사용하여 홀로그래프 신호처리를 진행할 경우 동일한 경향성을 분석하기 어렵다. 또한 홀로그래프 표준 압축 코덱 제작을 위해서도 동일한 데이터의 사용이 권장되고 있다. JPEG Pleno에서는 ERC Interfere와 B-com 그리고 UBI EmergIMG의 홀로그래프 데이터를 제공한다^[13]. ERC Interfere에서는 Point Cloud 기반의 CGH(Computer Generated Hologram) 데이터를 제공하고, B-com Holograms에서는 Multiview-plus-Depth data 기반의 홀로그래프 데이터를 제공한다. UBI EmergIMG에서는 위상 천이 홀로그래프 데이터를 제공하고 있다. 그림 1(a)와 (b)는 Point-Cloud 기반의 홀로그래프이다. 2D Multi의 해상도는 1,920×1,080이고, SLM(Spatial Light Modulator)의 픽셀 크기는 8 μ m이다. 복원 거리는 왼쪽 주사위 순서대로 각각 49cm와 50cm, 그리고 51cm이다. 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8 nm이고 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 32 비트이다. Chess8K의 해상도는 8,192×8,192이다 SLM의 픽셀 크기는 1 μ m이고, 복원 거리는 1.3cm이

다. 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8nm이고 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 32 비트이다. 그림 1(c)와 (d)는 Multiview-plus-Depth 기반의 홀로그래프이다. Dices 4K2K의 해상도 3,840×2,160이고, SLM의 픽셀 크기는 3.74 μ m이다. 복원 거리는 0~0.766cm, 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8nm와 532nm, 473nm, 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 32비트이다. Dices8K의 해상도는 92×8,192, SLM의 픽셀 크기는 0.4 μ m, 그리고 복원 거리는 0.329~0.655 cm이다. 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8 nm과 532nm, 473nm이고 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 32 비트이다. 그림 1(e)와 (f)는 위상 천이기반의 홀로그래프이다. Horse의 해상도는 972×972, SLM의 픽셀 크기는 4.4 μ m, 그리고 복원 거리는 14 cm이다. 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8nm이고 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 64비트이다. Astronaut의 해상도는 2,588×2,588이다. SLM의 픽셀 크기는 2.2 μ m이고, 복원 거리는 17cm이다. 복원을 위한 참조파의 파장은 632.8nm이고, 제공되는 데이터의 픽셀 당 비트 수는 64비트이다.

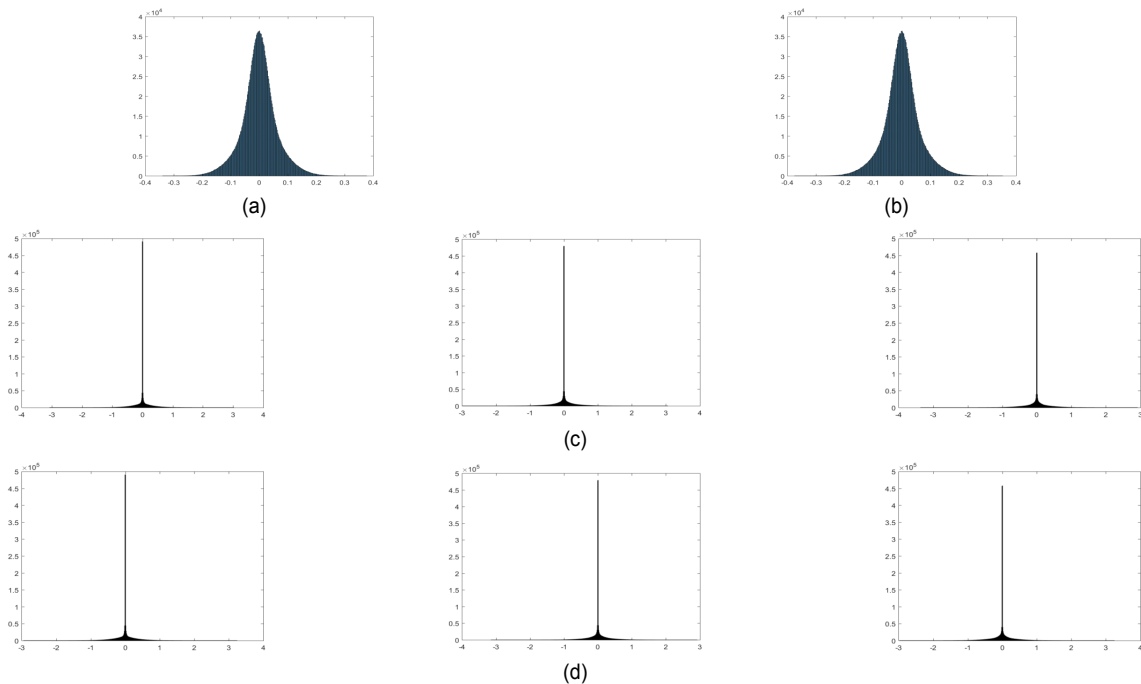


그림 2. 홀로그래프의 히스토그램 (a) 3D Multi의 실수, (b) 3D Multi의 허수, (c) Dice1080p R, G, B성분의 실수, (d) Dice1080p R, G, B성분의 허수
 Fig. 2. Histogram of hologram (a) Real of 3D Multi, (b) Imaginary of 3D Multi, (c) Dice1080p R, G, B component real, (d) Dice1080p R, G, B component imaginary

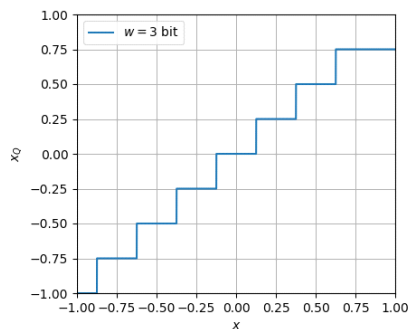
III. 양자화기의 설계

본 장에서는 실수 및 위상 홀로그래프 코덱의 전처리 기술인 양자화방법에 대해 설명한다. 그림 2는 JPEG Pleno에서 제공하는 대표적인 홀로그래프 데이터 세트인 3D Multi와 Dices1080p의 히스토그램 분포에 대한 그림이다^[13]. 3D 홀로그래프인 3D Multi는 대체로 가우시안 분포를 보이고 있고, 랜덤위상이 포함된 컬러 3D 홀로그래프인 Dices1080p는 매우 넓은 범위에 걸쳐서 분포하면서 많은 값들이 평균값 근처에 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 홀로그래프를 양자화하기 위해 모든 레벨을 균일하게 양자화 하는 균일 양자화기와 0근처에 대부분의 값들이 집중되어 있는 홀로그래프의 특성을 통해 0 근처에서 더 세밀하게 레벨을 나눠 주는 비균일 양자화기를 이용하여 실험을 진행했다.

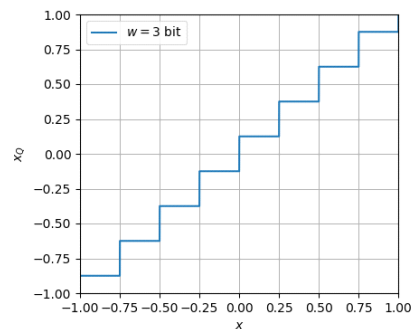
1. 균일 양자화기의 설계

본 논문에서는 균일 양자화기를 Mid-rise와 Mid-tread의 두 가지 방식으로 설계하여 실험을 수행하였다. Mid-tread 균일 스칼라 양자화는 양자화 레벨의 각각의 범위가 모두 균일하게 할당된 양자화이다. Mid-tread 양자화기는 0값을 가지며 홀수개의 레벨로 양자화 되기 때문에 clipping되는 부분이 생긴다. 식 (1)은 입력데이터(x)에 대한 균일 스칼라 양자화 결과(xQ)에 대한 식이다. 여기서 Q 는 입력데이터의 동적 범위(dynamic range)를 스텝크기로 나눈 값이다^[29].

$$xQ = Q \lfloor x/Q + 0.5 \rfloor \quad (1)$$



(a)



(b)

그림 3. 구현한 균일 양자화기 (a) Mid-tread, (b) Mid-rise 방식
Fig. 3. The implemented uniform quantizer (a) Mid-tread, (b) Mid-rise

그림 3의 그래프는 $-1 \sim 1$ 값을 갖는 데이터를 4bit 균일 양자화를 진행한 결과이다. 그림 3(a)는 Mid-tread 양자화기이고, 그림 2(b)는 Mid-rise 양자화기이다. Mid-rise 양자화기는 0값을 갖지 않고 짝수개의 레벨로 양자화 된다. 식 (3-6)은 입력데이터(x)에 대한 Mid-rise 균일 스칼라 양자화기를 이용한 3비트 양자화 결과(xQ)에 대한 식이다. 그래프에서 w 는 비트수를 의미한다.

2. 비균일 양자화기의 설계

식 (2)는 A-Law 비균일 스칼라 양자화 단계에서 압축기 (compressor)에 대한 수식이다^[30]. yQ 는 압축기 결과이고, x 는 입력 데이터, 그리고 A 는 A-Law 비균일 스칼라 양자화기 파라미터이다. A 는 일반적으로 사용되는 수치인 87.6으로 설정하였다^[31]. 또한 식 (3)은 A-Law 비균일 스칼라 양자화 단계에서 expander에 대한 수식이다.

$$yQ = \begin{cases} A|x|/(1+\log A) & \text{for } |x| < 1/A \\ (1+\log|x|)/(1+\log A) & \text{for } |x| \geq 1/A \end{cases} \quad (2)$$

$$xQ = \begin{cases} |yQ(1+\log A)/A & \text{for } |yQ| < 1/(1+\log A) \\ e^{|yQ(1+\log(A)-1)/A} & \end{cases} \quad (3)$$

양자화 과정에서 입력값에 절대값을 적용하여 계산하므로 결과 데이터의 부호는 입력 데이터와 일치시켜주어야 한다. 그림 3의 그래프는 $-1 \sim 1$ 값을 갖는 데이터를 4bit와

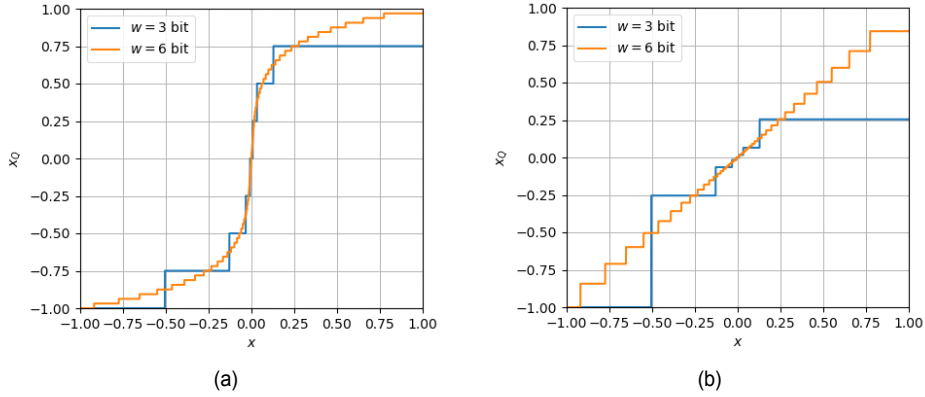


그림 4. A-Law 양자화 그래프 (a) 압축기 및 양자화기, (b) 확장기
 Fig. 4. A-Law quantization graph (a) compressor and quantizer, (b) expander

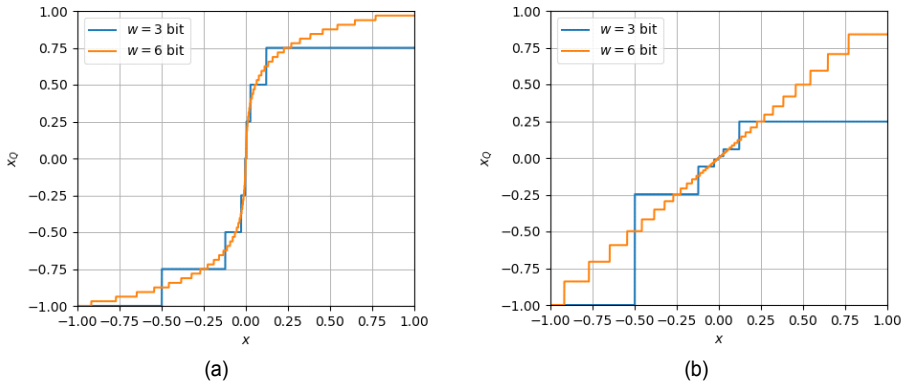


그림 5. μ -Law 비균일 양자화기 (a) 압축기 및 양자화기, (b) 확장기
 Fig. 5. μ -Law quantization graph (a) compressor and quantizer, (b) expander

8bit A-Law 비균일 양자화를 진행한 결과이다. 그림 4의 (a)는 신호를 압축하여 양자화 레벨을 나눠주는 압축기 및 양자화기이고, 그림 4의 (b)는 압축된 신호를 원래 신호 범위로 복원시켜주는 확장기에 대한 그래프이다. 그래프에서 w 는 비트수를 의미한다.

식 (4) 및 (5)는 μ -Law 비균일 스칼라 양자화 단계에서 압축기 및 확장기에 대한 수식이다^[32]. μ 는 μ -Law 비균일 스칼라 양자화기 파라미터로써, 일반적으로 사용되는 수치인 255로 설정하였다^[31]. 또한 그림 5는 양자화 레벨이 4비트와 8비트인 μ -Law 비균일 스칼라 양자화기 그래프이다. 그래프에서 w 는 비트수를 의미한다.

$$yQ = \log(1 + (\mu|x|)) / \log(1 + \mu) \quad (4)$$

$$xQ = e^{(yQ \log(1 + \mu)) - 1} / \mu \quad (5)$$

3. 분포 적응적 양자화기의 설계

본 절에서는 그림 6의 (b)와 같이 디지털 홀로그래프의 분포에 맞게 적응적인 형태를 갖는 분포 적응적 양자화기를 설계하고자 한다. 디지털 홀로그래프는 생성 시 사용된 알고리즘을 비롯하여 홀로그래프를 생성할 때 사용된 객체 포인트의 개수와 거리 등에 따라서 매우 다양한 동적 범위와 분포를 보인다. 또한 디지털 홀로그래프는 동적 범위가 매우 넓고, 객체의 형태에 따라서 매우 작은 분산의 가우시안 분포를 보이는 특성이 있다. 그림 6(b)와 같이 분산이 극도로 작을 경우에는 균일 양자화를 했을 경우에 데이터가 집중

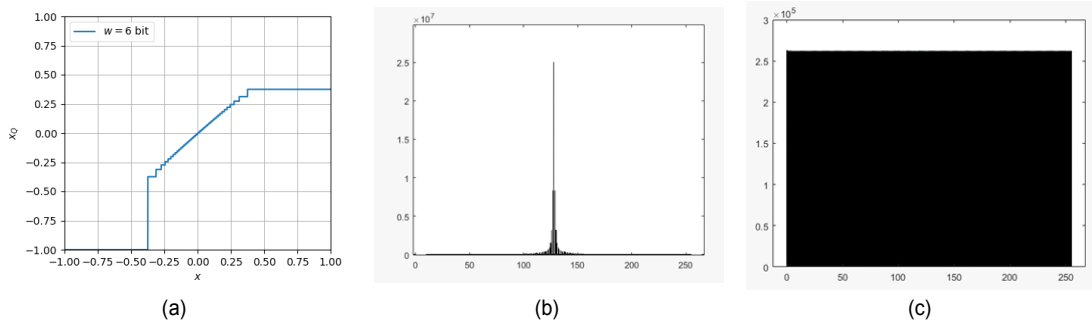


그림 6. 분포적응적 양자화 (a) 양자화기, (b) 입력 분포, (c) 양자화 결과 분포
 Fig. 6. Distribution-adaptive quantization (a) quantizer, (b) histogram before, (c) histogram after the quantization

된 영역의 많은 값들이 하나의 값들로 근사 되어 버리는 결과를 가져온다. 뿐만 아니라 비균일 양자화를 했을 경우에는 비균일 양자화의 강도에 따라서 양자화 결과가 M자 형태로 나타는 결과를 가져온다. 따라서 그림 6(a)와 같은 분포적응적 양자화기를 이용하여 그림 6(b)와 같은 분포를 그림 6(c)와 같은 평탄한 형태의 분포로 만들 수 있다. 그림 6(a)의 그래프에서 w 는 비트수를 의미한다.

다. 본 실험에서는 1비트를 제외한 대부분의 비트수에서 Mid-rise 방식이 더 좋은 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 홀로그래프는 0 근처에 값이 몰려 있는 히스토그램 분포를 갖는다. 따라서 1비트에서는 0 값을 갖는 Mid-tread가 더 높은 PSNR 결과를 보였다. 그 이상의 비트 수에서는 Mid-tread의 Clipping 되는 영역에 의해 큰 오차를 가지게 되어 Mid-rise가 더 높은 PSNR 결과를 보였다.

IV. 실험결과

실험은 그림 1에서 보인 6개의 데이터 세트를 사용하였다. 실험 진행은 먼저 균일양자화기, A-law 및 μ -law 방식의 비균일 양자화기, 그리고 분포적응적 양자화기를 이용하여 양자화를 수행하고, 홀로그래프에 가장 적합한 양자화 방식을 정량적으로 비교하고자 하였다. 다음으로 양자화된 결과를 압축하였을 때의 결과를 통해서 압축이 고려된 양자화의 특성을 분석한다. 마지막으로 양자화 지수가 일정한 분포를 갖도록 적응적 양자화를 적용한 후에 압축에 대한 특성을 분석한다.

1. 양자화 결과

두 가지 균일 양자화에 대한 양자화 결과를 표 1에 나타냈다. 두 가지 양자화기의 비트수를 1비트에서 8비트까지 증가시키면서 양자화를 수행하고, 다시 데이터로 역양자화를 수행하여 PSNR(peak signal to noise ratio)을 측정하였다.

표 1. Mid-rise와 Mid-tread 양자화 결과 및 복원영상의 평균 PSNR 결과
 Table 1. Average PSNR of the result images after Mid-rise and Mid-tread quantization and reconstruction

bit	Full Complex Hologram				Reconstruction	
	Real Part		Imaginary Part		Amplitude	
	MR	MT	MR	MT	MR	MT
1	19.22	22.21	19.86	22.70	21.63	6.56
2	27.03	24.64	27.04	25.32	24.79	14.99
3	34.20	29.74	33.94	29.95	29.77	22.36
4	41.10	34.58	41.32	35.04	35.08	29.76
5	47.46	40.99	47.56	40.54	41.51	35.97
6	53.54	46.33	53.79	46.77	47.31	41.96
7	58.58	53.24	59.55	53.34	54.28	47.03
8	64.94	58.79	65.19	58.78	59.78	53.79

다음으로 Mid-rise 양자화기와 비균일 양자화기인 A-Law와 μ -Law 양자화기에 대한 양자화 및 역양자화 이후 PSNR을 측정하였다. 이 실험에서는 완전 복소 홀로그래프는 Mid-rise가 3~4dB 정도 더 높았지만, 복원 영상에서는 3비

트부터 μ -Law의 비균일 양자화기가 가장 좋은 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

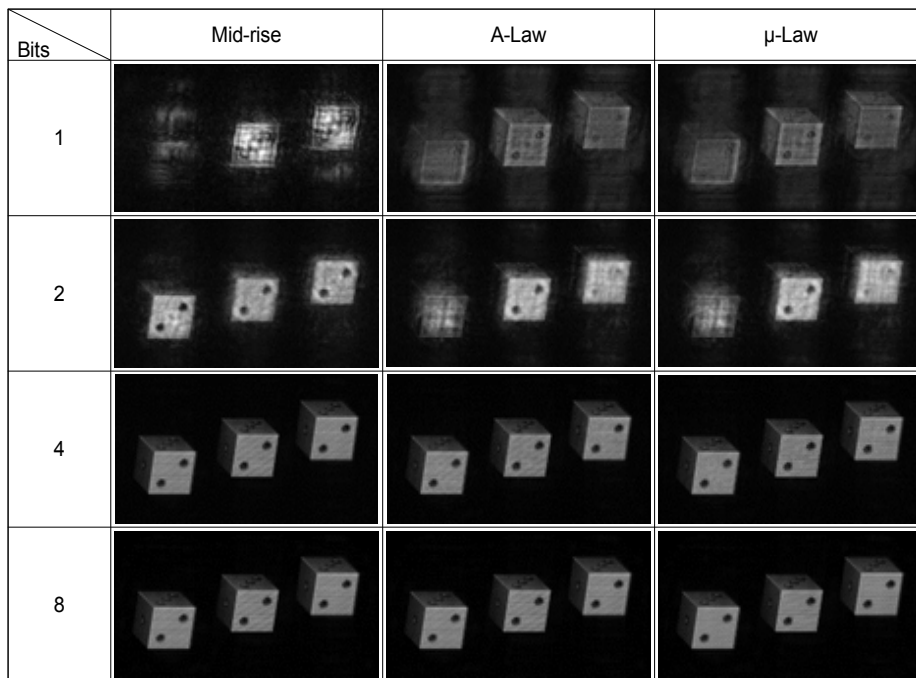
표 3에서는 각 방식에 대한 홀로그램의 양자화, 역양자화, 그리고 복원 이후의 결과영상들을 나타내었다. 4비트 이상의 경우에 모든 방식에서 홀로그램이 제대로 복원되는 것을 관찰할 수 있다. 1비트와 2비트에서 비균일 양자화기의 영상은 균일양자화기보다 배경에 노이즈 성분이 많이

포함되어 있는 것을 확인할 수 있고 표 2에서 PSNR 수치 또한 1,2 비트에서는 Mid-rise의 결과가 좋은 것을 볼 수 있다. 1비트 양자화에서 0근처의 특정 값 범위가 1 또는 -1로 양자화 되는데 이 과정에서 큰 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Mid-rise 결과영상을 관찰하면 PSNR과 복원 결과의 시각적인 특성이 정확히 일치하지 않는 것도 확인할 수 있다.

표 2. 홀로그램의 양자화 및 복원영상의 평균 PSNR 결과
 Table 2. Average PSNR result after quantization and reconstruction of holograms

bit	Full Complex Hologram						Reconstruction		
	Real Part			Imaginary Part			Amplitude		
	MR	A-Law	μ -Law	MR	A-Law	μ -Law	MR	A-Law	μ -Law
1	19.22	13.71	15.06	19.86	13.86	15.14	21.63	11.97	13.46
2	27.03	22.03	24.56	27.04	21.86	24.40	24.79	21.48	24.40
3	34.20	30.88	32.07	33.94	30.79	32.02	29.77	30.79	31.99
4	41.10	36.84	38.13	41.32	36.89	38.16	35.08	37.30	38.77
5	47.46	42.95	44.23	47.56	42.96	44.25	41.51	43.96	45.30
6	53.54	49.01	50.27	53.79	49.02	50.29	47.31	50.16	51.45
7	58.58	55.04	56.29	59.55	55.05	56.32	54.28	56.25	57.53
8	64.94	61.05	62.32	65.19	61.07	62.34	59.78	62.33	63.61

표 3. 양자화에 대한 홀로그램 복원 영상(2D Multi에 대한 예시)
 Table 3. Reconstruction result images after quantization (an example of 2D Multi)



2. 압축 결과

앞 절에서는 양자화 및 역양자화에 대한 효과를 살펴보았고, 본 절에서는 양자화 효과가 압축에 미치는 영향은 어떠한지 살펴본다. 표 4에는 양자화를 적용한 후에 JPEG2000을 이용하여 압축하고, 다시 복원 과정을 거친 결과에 대한

PSNR 결과를 나타냈다. 표 4의 결과에서는 양자화 결과와 달리 복원영상에서도 균일 양자화가 더 좋은 특성을 나타낸다는 것을 볼 수 있다. 즉, 양자화만 취했을 경우에는 비균일 양자화가 더 좋은 특성을 보였으나, 압축이 관여를 하게 되면 균일 양자화가 결국 더 좋은 결과를 보인다는 결과이다.

표 4. 양자화된 홀로그램의 압축 및 복원영상의 평균 PSNR 결과

Table 4. Average PSNR result after compression and reconstruction of quantized holograms

	Full Complex Hologram						Reconstruction		
	Real Part			Imaginary Part			Amplitude		
CR	MR	A-Law	μ -Law	MR	A-Law	μ -Law	MR	A-Law	μ -Law
80	31.65	24.68	25.46	30.13	20.94	21.75	35.54	28.18	29.00
160	29.62	24.18	24.65	28.37	20.66	21.18	33.33	27.75	28.25
240	28.70	24.20	24.76	27.56	20.93	21.53	32.29	27.68	28.30
320	28.12	24.21	24.72	27.05	21.16	21.71	31.62	27.58	28.11
400	27.74	24.23	24.63	26.69	21.31	21.77	31.18	27.53	27.94

표 5. 압축에 대한 홀로그램 복원 영상(2D Multi에 대한 예시)

Table 5. Reconstruction result images after quantization and compression (an example of 2D Multi)

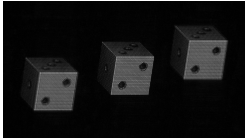

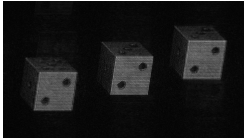
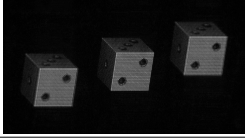
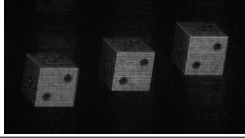
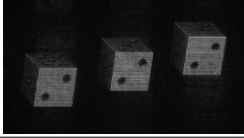
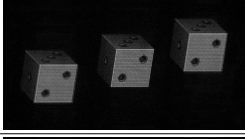


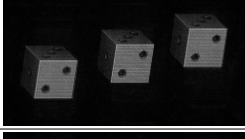
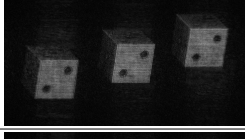
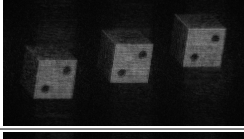
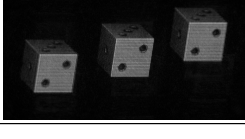
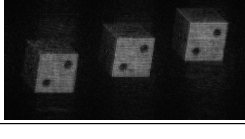
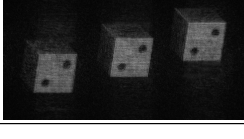
CR	Uniform	A-Law	μ -Law
80			
160			
240			
320			
400			

표 5에는 8비트로 양자화를 수행한 후에 JPEG2000으로 압축하고 다시 복원 과정을 거친 홀로그래프 복원 결과 영상이다. CR(compression ratio)은 압축율을 나타낸다. 원래 홀로그래프 원본이 하나의 화소당 64비트로 표현되어 있기 때문에 CR이 매우 높게 나타나고 있음을 주의해야 한다.

3. 분포 적응적 양자화

분포적응적 양자화의 경우에도 양자화 이후에 JPEG2000을 이용하여 압축하고, 복원과정을 거친 결과에 대한 PSNR을 측정하였다. 표 6은 분포 적응적 양자화기를 이용한 압축 및 복원영상의 평균 PSNR 결과이다. 분포적응적 양자화를 진행함으로써 압축률 증가에 따른 PSNR 감소 추이가 다른 양자화기에 비해 적은 것을 확인할 수 있다. 하지만 양자화 자체의 성능이 매우 낮기 때문에 결과적으로 균일 양자화에 비해 좋은 성능을 보이지 못한 것을 확인할 수 있다.

표 6. 분포 적응적 양자화기를 이용한 압축 및 복원영상의 평균 PSNR 결과
Table 6. Average PSNR result of reconstruction after distribution-adaptive quantization and compression

	Full Complex Hologram		Reconstruction
	Real	Imaginary	Amplitude
CR	Uniform	Uniform	Uniform
10	24.59	24.63	24.99
20	23.44	23.36	23.81
30	23.09	22.94	23.53
40	22.99	22.83	23.47
50	22.96	22.81	23.45
60	22.99	22.81	23.44
70	23.03	22.88	23.44
80	23.08	22.93	23.43
90	23.09	22.94	23.38
100	23.08	22.92	23.30

V. 결론

본 논문에서는 홀로그래프를 다양한 신호처리 분야에 이용하기 위한 정규화 방법으로 사용될 수 있는 최적의 양자화

기 형태를 분석하였다. 먼저 균일 양자화기를 설계한 후에 비트에 따른 특성을 살펴보았다. 이 중에서 특성이 우수한 Mid-rise 방식과 비균일 양자화기들을 비교하였다. 비균일 양자화시 균일 양자화보다 데이터 표현 정확도가 증가하여 복원영상에 대해 더 좋은 수치의 PSNR을 보였지만, 데이터가 복잡해짐에 따라 비트율 증가가 크고, 데이터 표현 정확도 향상이 화질 개선에 미치는 영향이 미비하여 압축시 비균일 양자화로 인한 성능 개선이 크지 않은 것으로 보였다. 즉, μ -Law 방식이 우수한 양자화 결과를 보였지만, 압축이라는 과정을 도입할 경우에는 균일 양자화기가 더 우수한 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 손실이 다소 적은 신호처리를 수행할 경우에는 μ -Law 방식의 양자화를 적용한 후에 홀로그래프를 사용하는 것이 좋고, 압축과 같은 고주파 영역의 손실이 높은 분야에서 사용할 경우에는 균일 양자화를 사용하는 것이 더 좋다는 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌 (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] 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.
- [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] Y.H. Seo, Hyun-Jun Choi, and Dong-Wook Kim, "Lossy Coding Technique for Digital Holographic Signal", SPIE Optical Engineering, Vol. 45, No. 6, pp. 065802-1~065802-10, Jun. 2006.
- [6] Y.H. Seo, H. J. Choi, J. S. Yoo, G. S. Lee, C. H. Kim, S. H. Lee, S. H. Lee, and D. W. Kim, "Digital hologram compression technique by eliminating spatial correlations based on MCTF." Optics Communications, vol. 283, no. 21, pp. 4261-4270, Nov. 2010.
- [7] F. Dufaux, Y. Xing, Y. B. P. Popescu, and P. Schelkens, "Compression of digital holographic data: an overview." In Applications of Digital Image Processing XXXVIII. International Society for Optics and Photonics. vol. 9599, no. 95990I, pp. 1-11, Sep. 2015.
- [8] 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

- [9] 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.
- [10] E. Darakis and T. J. Naughton, "Compression of digital hologram sequences using MPEG-4", *SPIE Proc.*, vol. 7358, pp. 735811-1, May 2009.
- [11] P. Tsang, K. W. K. Cheung, T. C. Poon, and C. Zhou, "Demonstration of compression ratio of over 4000 times for each digital hologram in a sequence of 25 frames in a holographic video." *Journal of Optics*, vol. 14, no. 12, pp. 1-7, Dec. 2012.
- [12] Y.H. Seo, Y. H. Lee, J. S. Yoo, and D. W. Kim, "Scalable hologram video coding for adaptive transmitting service." *Applied optics*, vol. 52, no. 1, pp. A254-A268, Jan. 2013.
- [13] JPEG Pleno <https://jpeg.org/jpegpleno/>
- [14] H. Gu Kim and Y. M. Ro, "Ultrafast layer based computer-generated hologram calculation with sparse template holographic fringe pattern for 3-D object," *Opt. Express* 25, 30418-30427, 2017.
- [15] H. Zhang, L. Cao, and G. Jin, "Computer-generated hologram with occlusion effect using layer-based processing," *Appl. Opt.* 56, F138-F143, 2017.
- [16] P. Su, W. Cao, J. Ma, Bi. Cheng, X. Liang, L. Cao, and G. Jin, "Fast Computer-Generated Hologram Generation Method for Three-Dimensional Point Cloud Model," *J. Display Technol.* 12, 1688-1694, 2016.
- [17] P. W. M. Tsang, T.-C. Poon, and Y. M. Wu, "Review of fast methods for point-based computer-generated holography [Invited]," *Photon. Res.* 6, 837-846, 2018.
- [18] H. Yeom, Y. Ji, S. Kim, S. Ko, S. Kim, H. Zhang, B. Li, K. Shin, M. Askari, and J. Park, "Hologram synthesis with correct reflectance distribution in fully analytic mesh-based method," in *Imaging and Applied Optics 2016*, OSA Technical Digest (online), Optical Society of America, 2016.0
- [19] Y. Ju and J. Park, "Fast Generation of Mesh Based CGH in Head-Mounted Displays using Foveated Rendering Technique," in *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, OSA Technical Digest, Optical Society of America, 2018.
- [20] Logan A. Williams, Georges Nehmetallah, Rola Aylo, and Partha P. Banerjee, "Application of up-sampling and resolution scaling to Fresnel reconstruction of digital holograms," *Appl. Opt.* 54, 1443-1452. 2015.
- [21] S. Lee, H. Chang, H. Wey, and D. Nam, "Sampling and error analysis of radial symmetric interpolation for fast hologram generation," *Appl. Opt.* 55, A104-A110, 2016.
- [22] Chor Shen Tay, Ken Tanizawa, and Akira Hirose, "High-quality frame interpolation in computer generated holographic movies using coherent neural networks with a hybrid learning method," *Appl. Opt.* 47, 5221-5228, 2008.
- [23] P. W. M. Tsang, Y. T. Chow, and T.-C. Poon, "Enhancement on the generation of sampled phase-only holograms," *Chin. Opt. Lett.* 13, 060901, 2015.
- [24] Yuan Hong, Tielin Shi, Yichun Zhang, and Guanglan Liao, "Fringe contrast enhancement of digital off-axis hologram via sparse representation," *Chin. Opt. Lett.* 14, 060901, 2016.
- [25] Lingfeng Yu, Yingfei An, and Lilong Cai, "Numerical reconstruction of digital holograms with variable viewing angles," *Opt. Express* 10, 1250-1257, 2002.
- [26] Xin Li, Juan Liu, Tao Zhao, and Yongtian Wang, "Color dynamic holographic display with wide viewing angle by improved complex amplitude modulation," *Opt. Express* 26, 2349-2358, 2018.
- [27] P. Memmolo, V. Bianco, M. Paturzo, B. Javidi, P. A. Netti, and P. Ferraro, "Encoding multiple holograms for speckle-noise reduction in optical display," *Opt. Express* 22, 25768-25775, 2014.
- [28] D. Hincapie, J. H.-Ramirez, and J. G.-Sucerquia, "Single-shot speckle reduction in numerical reconstruction of digitally recorded holograms," *Opt. Lett.* 40, 1623-1626, 2015.
- [29] J. Kim, K. Kim, W. Kim, Y. Lee, K. Oh, J. Kim, D. Kim, Y. Seo, "Characteristic Analysis for Compression of Digital Hologram", *JBE*, Vol. 24, No. 1, pp.164 - 181, Jan. 2019.
- [30] [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_\(signal_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_(signal_processing))
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/A-law_algorithm
- [32] Gersho, Allen, and Robert M. Gray. *Vector quantization and signal compression*. Vol. 159. Springer Science & Business Media, 2012.
- [33] https://en.wikipedia.org/wiki/%CE%9C-law_algorithm

저 자 소 개



김 경 진

- 2015 3월 ~ 현재 광운대학교 전자재료공학과 재학
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0307-3454>
- 관심분야 : 포인트 클라우드, 디지털 홀로그래피, 2D/3D 영상 처리 및 압축

저 자 소 개



김진겸

- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 재학
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8526-2610>
- 주관심분야 : 디지털 홀로그래피, 2D/3D 영상 처리 및 압축



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



김진웅

- 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



김동욱

- 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



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