

## 복소 홀로그램 표현방식에 따른 압축 성능 분석

\*최승미 \*반현민 \*\*오관정 \*\*임용준 \*김휘용†

\*경희대학교 \*\*한국전자통신연구원

\*{2018102242, hmban1996, hykim.v}@khu.ac.kr

\*\*{kjoh, yongjun}@etri.re.kr

†: 교신저자 (Corresponding author)

## Compression Performance Evaluation of Full-Complex Hologram Representations

\*SeungMi Choi \*Hyunmin Ban \*\*Kwan-Jung Oh \*\*Yongjun Lim \*Hui Yong Kim†

\*Kyung Hee University \*\*ETRI

## 요약

홀로그램은 빛의 세기와 위상 정보를 모두 기록함으로써 3차원 영상 정보를 기록 및 재현할 수 있는 차세대 영상 시스템이다. 홀로그램은 부동 소수점의 복소 데이터로 실수, 허수 또는 진폭, 위상 신호로 분리되어 압축된다. 본 논문에서는 복소 홀로그램 영상의 표현방식에 따른 압축성능을 비교해보고, 진폭-위상 압축에 대해 압축 친화적인 복소 홀로그램 변환 방식을 제안한다. 이후, 각 표현방식의 압축에서 효율적인 비트량 할당 방법을 제시한다. 본 논문은 제안방식인 QS 진폭-위상 표현이 실수-허수 표현만큼 높은 압축성능을 갖는 것을 확인하였다.

## 1. 서론

홀로그램은 빛의 세기만을 기록하는 디지털 이미지와는 다르게 빛의 세기와 위상 정보를 모두 기록함으로써 3차원 공간에 실제와 같이 재현할 수 있는 차세대 3차원 영상 데이터이다. 홀로그램은 일종의 복소 데이터로 진폭(AM, amplitude)과 위상(PH, phase)의 조합 혹은 실수(RE, real)와 허수(IM, imaginary)의 조합으로 표현될 수 있다. 이때 위상 신호는 데이터 중 가장 잡음이 많은 특성을 가진다[1].

홀로그램 영상은 일반적인 2차원 이미지보다 공간적인 상관도가 낮아 압축이 쉽지 않다. 차세대 3차원 영상 시스템인 홀로그램의 사용화를 위해서는 홀로그램 압축 기술 연구가 필수적이며, 홀로그램 표현방식에 따른 특성 분석이 요구된다. 복소 홀로그램 데이터에 대한 다양한 표현 방법은 홀로그램 압축 코덱의 입력 데이터 포맷을 결정하는 일과 연관되어 있다. 홀로그램 데이터의 표현 방법에 따라 데이터의 중복성과 압축 특성이 달라질 수 있으므로 이는 코덱 디자인에 중요한 부분이다[2].

기존의 코덱은 자연 영상에 특화된 기술로 실수-허수 신호는 자연 영상과 비슷한 특성을 갖기 때문에 기존 코덱에서도 비교적 좋은 성능을 기대할 수 있다. 반면, 위상 신호는 압축에 있어 일반 자연 영상과는 달리 주기성과 무작위성을 가져 높은 성능을 얻기 어렵다. 그러나 미래 홀로그램 압축 연구 측면에서 실수-허수 표현의 압축은, 추가적인 성능향상을 얻기는 어렵다. 위상 신호의 압축은 현재 활발히 연구되고 있는 분야로 위상 신호를 위한 압축 기술을 사용한다면 높은 성능향상을 기대할 수 있다. 즉, 진폭-위상 압축이 실수-허수 압축성능을 따라잡는다면 향후의 연구에서 더 큰 전망이 있는 것으로 볼 수 있다.

본 논문은 복소 홀로그램 데이터의 실수-허수 표현방식이 아닌 진

폭-위상 표현방식을 사용하였을 때의 압축성능을 비교해보고, 진폭-위상 표현에서 더 높은 성능을 얻을 수 있는 방법론을 제시한다.

## 2. 복소 홀로그램 압축

## 2.1. 성능 평가 척도(Performance Metric)

이미지 및 동영상의 부호화 성능을 평가하기 위해선 비트율(bitrate)과 영상의 화질을 동시에 고려해야 한다. 본 논문에서는 홀로그램 데이터에 대한 객관적 화질 평가 척도로 RD-curve를 사용한다. RD-curve는 최종 압축된 비트스트림(bitstream)의 비트율과 원본 영상과 복호화된 영상의 에러 비율을 동시에 고려한 그래프이다. 같은 비트율에서 더 높은 화질 척도를 가질수록 압축성능이 더 좋은 코덱으로 볼 수 있다.

RD-curve의 비트율은 BPP (Bitrate per Pixel)을 사용하며 이는  $\frac{\text{total bitrate}}{N \times \text{frames} \times \text{channel}}$  의 식으로 계산한다. N은 각 채널의 화소수를 의미한다.

복소 홀로그램 데이터에 대한 화질 평가는 홀로그램 도메인과 수치적 복원 도메인에서 진행된다. 홀로그램 도메인에서는 아래 식과 같이 복소 홀로그램의 압축 전, 후의 SNR 값을 사용한다.  $\|\cdot\|_F$  는 Frobenius Norm,  $C$ 는 원본 복소 홀로그램,  $\hat{C}$  표현은 압축 복원된 신호의 데이터 표현을 의미한다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\|C\|_F}{\|C - \hat{C}\|_F}$$

$$\|C\|_F = \sqrt{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} |C(x,y)|^2},$$

$$\|C - \hat{C}\|_F = \sqrt{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} |C(x,y) - \hat{C}(x,y)|^2}$$

수치적 복원 도메인에서는 아래 식과 같이 복소 홀로그램의 압축 전, 후 데이터를 대표 거리와 시점에서 수치적 복원한 데이터들의 PSNR 평균 값을 사용한다.  $O$ 는 원본 복소 홀로그램을 수치적 복원한 데이터,  $\hat{O}$ 는 압축 복원된 복소 홀로그램을 수치적 복원한 데이터를 의미한다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(MAX_I)^2}{MSE}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} |O(x,y) - \hat{O}(x,y)|^2, N = m * n$$

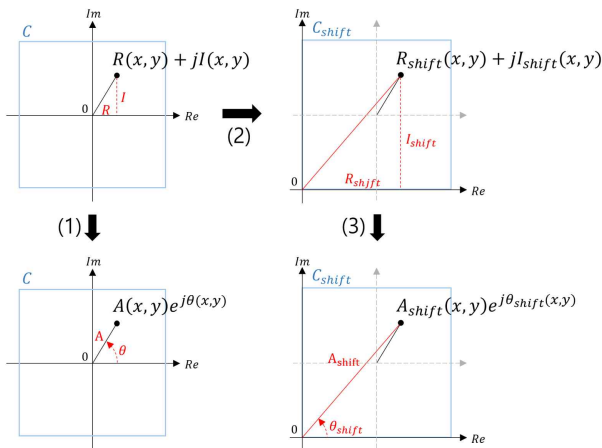
### 2.2 기존 복소 홀로그램의 압축

대표적인 홀로그램 압축 연구 동향으로 JPEG (Joint Photographic Experts Group) Pleno 홀로그래피에서는 홀로그램의 3차원 영상 정보 압축을 위한 새로운 표준화 연구를 진행하고 있다. 현재 복소 홀로그램의 압축 연구 동향은 진폭-위상 신호 표현의 낮은 압축성능으로 대부분 실수-허수 표현에서 진행되고 있으며, JPEG Pleno에서의 기존의 영상 압축 표준들을 이용한 실험도 실수-허수를 각각 16bit로 양자화한 이미지가 사용되었다. 기존 압축 표준 실험에는 JPEG XT, JPEG XS, JPEG 2000, HEVC (High Efficiency Video Codec) 표준을 사용하였다. 현존하는 영상 코덱 중에는 HEVC가 가장 좋은 성능을 보였다. 수치적 복원과정은 JPEG에서 배포한 수치적 복원 소프트웨어 NRSH (Numerical Reconstruction Software for Holography)를 사용했다.

실험 영상에 대한 화질 평가는 해당 홀로그램 자체에 대해 압축 전, 후의 SNR값과 SSIM값, 대표 깊이에서 수치적 복원된 영상에 대해 압축 전, 후의 PSNR값과 SSIM값을 비교했다. 현재 상용화 및 공인된 홀로그래피 디스플레이가 없으며, 3차원 공간을 표현하는 홀로그램에 대한 공인된 객관적 화질 평가 방법도 전무하다. 이에 JPEG에서는 수치적 복원 영상을 이용한 3D 공간화질 평가 방법을 고민하고 있다[2].

### 3. QS 진폭-위상 표현 압축

기존의 진폭-위상 표현 압축은 데이터의 분포를 고려하지 않았다. 본 논문에서는 진폭-위상 신호의 분포를 압축 친화적인 분포로 변환한다면 실수-허수 표현의 압축성능을 충분히 따라잡을 수 있다는 것을 확인하였다.



<Figure 1> Quadrant shifting

본 논문에서는 원본 복소 홀로그램 데이터를 하나의 사분면으로 이동하는 변환을 Quadrant Shifting (QS)이라고 정의한다. Figure 1은 QS의 하나의 예시를 보여준다. 기호  $R, I$ 는 각각 실수, 허수,  $A, \theta$ 는 각각 진폭, 허수를 의미한다.  $\cdot_{shift}$  표현은 각 신호에 대해 QS를 진행한 후의 신호를 의미한다. 복소 데이터는 일반적으로 수식 (1)과 같이 실수-허수 표현을 진폭-위상 표현으로 변환할 수 있다. (Figure 1(1))

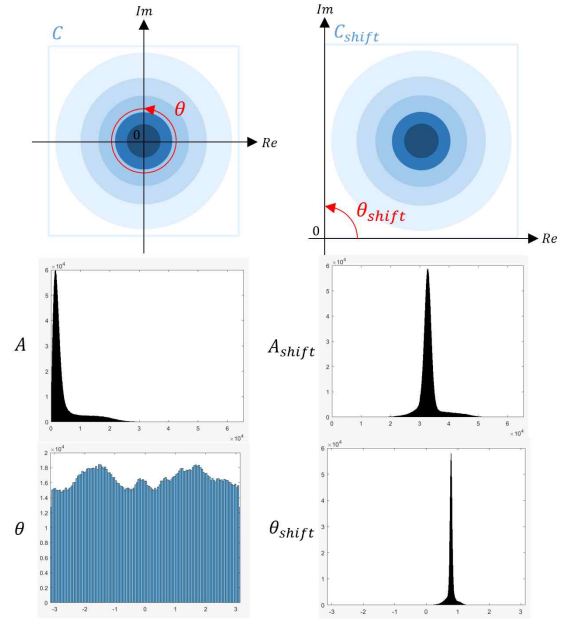
$$(1) A = \sqrt{R^2 + I^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{I}{R}$$

본 논문에서는 압축 코덱의 입력으로 복소 홀로그램을 표현함에 있어 QS(Figure 1(2))을 거친 후, 진폭-위상 표현으로 변환(Figure 1(3))하여 압축하는 방식을 제안한다. 압축 이후, QS의 역변환인 QS<sup>-1</sup>과정을 수행한다. QS 변환 식은 다음과 같다.

$$(2) R_{shift} = R + 2^{bitdepth-1}, I_{shift} = I + 2^{bitdepth-1}$$

$$(3) A_{shift} = \sqrt{R_{shift}^2 + I_{shift}^2}, \theta_{shift} = \tan^{-1} \frac{I_{shift}}{R_{shift}}$$

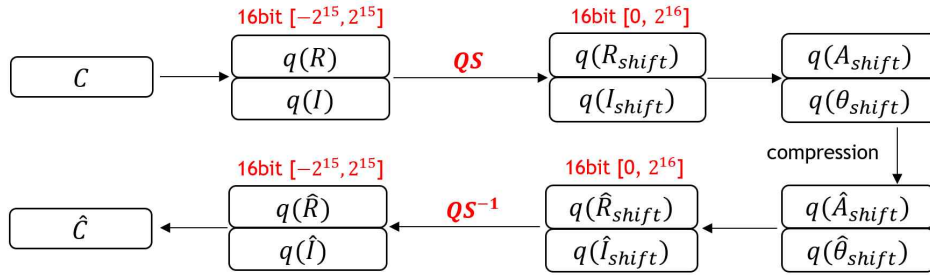
앞으로의 표현에서 Figure 1의 QS 과정을 거쳐 변환된 표현방식을 QS 진폭-위상으로 정의한다.



<Figure 2> Comparison of graphs

실수-허수 16bit를 기준으로 복소 데이터는 진폭 신호에 대해  $[0, C_{max} \sqrt{2})$ 의 범위를, 위상 신호에 대해  $[-\pi, \pi]$ 의 범위를 갖는다. 이때  $C_{max}$ 는 실수, 허수의 절댓값의 최댓값을 의미한다. 반면 QS 복소 데이터 신호는 진폭 신호에 대해  $[0, C_{max} 2\sqrt{2})$ 의 범위를, 위상 신호에 대해  $[0, \frac{\pi}{2})$ 의 범위를 갖는다.

Figure 2는 각 진폭-위상 표현에서의 그래프를 보여준다. 대부분의 자연 영상에 대해 복소 홀로그램 데이터는 저주파수 영역에 밀집되어 있다. 따라서 진폭 신호도 마찬가지로 저주파수 영역에 밀집된 분포를 갖는다. 위상 신호는 모든 방향에 대해 비슷한 데이터 분포를 두기 때문에  $[-\pi, \pi]$  범위 내에서 퍼져있는 형태로 나타난다. QS를 수행한 QS 복소 데이터의 경우, 진폭 신호는 이동한 만큼의 특정 값에 밀집하고, 위상 신



<Figure 3> Compression process of amplitude-phase signal

호는  $[0, \frac{\pi}{2}]$ 의 범위 내에서 중앙에 밀집되는 분포가 된다. 데이터의 발생 확률 분포의 모양이 좁을수록 압축이 잘 되기 때문에 이와 같은 데이터 분포는 압축 측면에서 더 효율적이다.

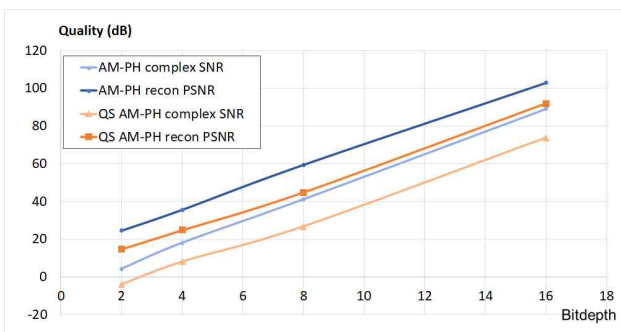
Figure 3는 본 논문에서 제안하는 QS 진폭-위상 신호의 압축 파이프라인을 보여준다.  $q$  표현은 16bit로 양자화된 데이터 표현을 의미한다.

### 4. 실험 결과

#### 4.1. 실험조건

Common Test Condition (CTC)는 앞으로의 실험에 기준이 되는 조건이다. 데이터셋은 JPEG Pleno Holography CTC software 5.0 문서의 낮은 해상도의 복소 홀로그램 sequence들을 사용한다[3]. 압축의 total bitrate는 회색조 영상에 대해서는 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, RGB 영상에 대해서는 0.3, 0.75, 1.5, 3, 6, 12의 조건에서 실험한다. 압축을 위한 소프트웨어는 HEVC reference software인 HM (HEVC Test Model) 16.20을 사용한다. 기존 코덱 성능은 JPEG Pleno Holography CTC Software 5.0 (wg1n92043) 소프트웨어를 사용한다. 수치적 복원 과정은 JPEG에서 배포한 수치적 복원 소프트웨어 NRSR (Numerical Reconstruction Software for Holography)를 사용한다.

#### 4.2. 표현방식에 따른 변환 오차



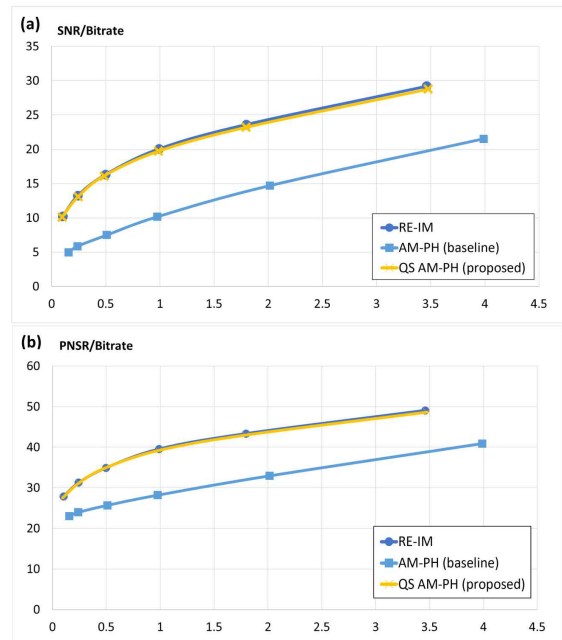
<Figure 4> Comparison of conversion errors

Figure 4는 무압축 상황에서 회색조 영상에 대한 QS 진폭-위상 홀로그램의 변환 오차를 보여준다. complex SNR은 hologram domain에서의 변환 전, 후 SNR 값, recon PSNR은 object domain에서의 변환 전, 후 PSNR값을 의미한다. SNR과 PSNR 값이 작을수록 변환 오차가 큰 것을 의미한다. QS 진폭-위상 표현방식이 hologram domain, object domain 모두 일반적인 표현방식과 비교하여 변환 오차가 더 큰 것을 확인할 수 있다.

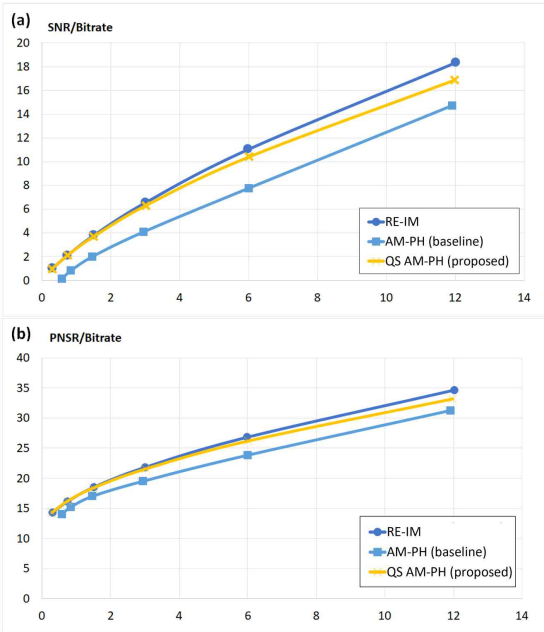
#### 4.3. 표현방식에 따른 압축성능

CTC Software에서 실수-허수, 진폭-위상, QS 진폭-위상 표현방식의 압축성능은 Figure 5, 6과 같다. 일반적인 진폭-위상 압축은 실수-허수 표현과 비교하여 큰 성능저하가 발생한다. 반면 QS 진폭-위상 압축의 성능은 회색조 데이터에서 실수-허수 표현방식에서의 성능과 거의 대등하며, RGB 데이터에서도 기존에 방식보다 좋은 성능을 보였다. 이는 QS 진폭-위상 표현방식이 압축 관점에서 기존의 진폭-위상 방식보다 유리함을 보여준다.

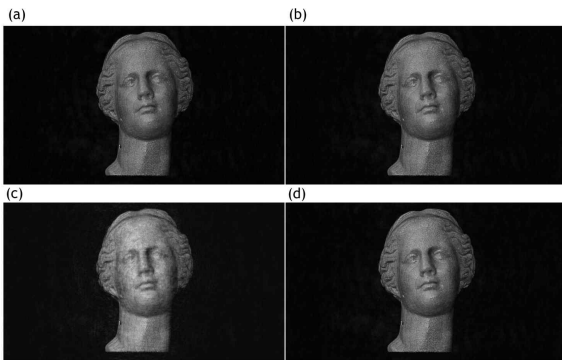
Figure 4에서 QS 진폭-위상 홀로그램은 기존의 방식보다 더 큰 변환 오차를 가졌지만, Figure 5, 6에서는 압축에 있어 훨씬 뛰어난 성능을 보였다. 이를 통해 변환 오차가 더 크더라도 QS 진폭-위상과 같은 위상 신호의 분포가 압축 측면에서 더 유리할 수 있음을 알 수 있다.



<Figure 5> RD-curve of average of gray sequences (a) hologram domain, (b) object domain.



<Figure 6> RD-curve of average of rgb sequences (a) hologram domain, (b) object domain.



<Figure 7> Subjective image quality evaluation of Venus sequence (a) original, (b) RE-IM (c) AM-PH, (d) QS AM-PH

Figure 7은 Venus sequence에 대해 본 논문이 제안하는 방식과 기존의 방식과의 주관적 화질 차이를 보여준다. 1 BPP 압축 조건에서 수치적 복원한 데이터의 PSNR은 각각 (b) 37.88, (c) 23.67, (d) 36.98db값을 가진다. 제안방식인 (d)의 주관적 화질은 (c)와 비교하여 매우 좋은 화질을 가지며, (b)와도 비슷한 화질을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

4.4. 비트할당 방식

Table 1은 여러 표현방식에 대해 비트할당 비율에 따른 압축 성능을 보여준다. 실수-허수, 진폭-위상, QS 진폭-위상 압축에서 각 신호에 대해 1:1 QP, 1:1 BPP, 2:8 BPP, 8:2 BPP 비율로 압축하였을 때의 결과이다. 기존 CTC Software에서는 실수-허수 신호에 대해 같은 QP를 사용하여 압축을 진행하였다. 실수-허수 표현방식 압축은 실수와 허수 신호의 성질이 비슷하여 1:1 QP와 1:1 BPP에서 거의 비슷한 화질 성능을 갖는다. 또한 BPP 비율이 한쪽으로 치우쳐진 경우보다 비슷한 비율로 압축한 것이 좋은 성능을 보였다. QS 진폭-위상 압축의 경우도 제안된 변환 방식에 의해 실수-허수 압축의 결과와 비슷한 양상을 보였다. 그러나 기존의 진폭-위상 표현방식에서의 압축은 두 신호의 분포가 매우 다르므로 각각의 복원 화질 차이가 클 수 있다. 실험 결과, 2:8 BPP의 결과

가 가장 좋은 성능을 보였다. 이는 넓고 고른 분포를 가진 위상 신호에 더 많은 BPP를 할당하는 것이 압축 측면에서 더 좋다는 것을 의미한다.

<Table 1> performance at various bitrate ratios for a total of 1 BPP in gray sequences

		RE-IM	QS AM-PH	AM-PH
1:1 QP	hol	20.0539	19.6857	10.1679
	obj	39.5760	39.0297	28.1896
1:1 BPP	hol	20.1156	19.7171	7.6052
	obj	39.6507	39.1946	26.2719
2:8 BPP	hol	17.5428	17.4784	10.3894
	obj	36.7916	36.4341	28.5930
8:2 BPP	hol	17.5022	17.1279	9.4250
	obj	36.3306	36.4897	28.0329

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 복소 홀로그램의 실수-허수 표현과 진폭-위상 표현의 압축성능을 비교하였다. 일반적인 진폭-위상 변환 방식을 사용하면 실수-허수 압축과 비교하여 크게 성능이 감소하였다. 이는 위상 신호의 불규칙성이 압축에 훨씬 불리한 조건이기 때문이다. 그러나 제안방식인 QS 변환을 수행하여 압축하면 실수-허수 표현방식의 성능을 충분히 따라잡을 수 있는 것을 확인하였다. 추후 위상 신호를 위한 압축 코덱을 사용한다면 실수-허수 표현보다 큰 성능향상을 기대할 수 있다.

QS 진폭-위상 표현은 일반적인 진폭-위상 표현보다 더 많은 변환 오차를 가지지만 위상 신호의 압축 친화적 분포로 압축 시에는 더 좋은 성능을 보였다. 향후의 연구에서 변환 오차와 변환 강도를 최적화한다면 추가적인 압축성능을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

또한, 비트할당 실험을 통해 실수-허수, QS 진폭-위상과 같은 분포에서는 압축되는 두 신호의 BPP가 비슷할수록 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 일반적인 진폭-위상 압축에서는 위상 신호에 더 많은 BPP를 할당한 경우가 더 좋은 성능을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00981, (세부 2)홀로그램 기반의 위상 검출용 디지털 홀로그래피 메트롤로지 기술 개발) : 50%

이 논문은 삼성전자미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-IT2201-03) : 50%

참고문헌

[1] Oh, K. J., and J. Park. "Research and Standardization Trends of Digital Hologram Compression." Electronics and Telecommunications Trends 34.6 (2019): 145-155.  
 [2] 오관정. "JPEG Pleno 홀로그래피 표준화 기술 동향." 방송과 미디어 24.2 (2019): 73-82.  
 [3] <https://jpeg.org/jpegpleno/plenodb.html>.