

## 픽셀화된 랜덤 위상 마스크를 통해 컴퓨터 생성 홀로그램 시야각 확장에 관한 연구

\*최우영 \*이창주 \*김범수 \*\*오관정 \*\*홍기훈 \*\*추현곤 \*\*\*박지선 \*이승열  
\*경북대학교 \*\*한국전자통신연구원 \*\*\*제이랩  
\*seungyeol@knu.ac.kr

## Study on Increasing the Viewing Angle of the Computer Generated Hologram via Random Pixelated Phase Mask

\*Choi, Woo-Young \*Lee, Chang-Joo \*Kim, Bum-Su \*\*Oh, Kwan-Jung \*\*Hong, Keehoon \*\*Choo, Hyon-Gon \*\*\*Park, Jisun \*Lee, Seung-Yeol  
\*Kyungpook National University \*\*Electronics and Telecommunications Research Institute \*\*\*JLab

## 요약

컴퓨터 생성 홀로그램(CGH)에서 시야각은 매우 중요한 특성이다. 시야각에 따라 홀로그램을 볼 수 있는 영역이 결정되며 시야각을 넘어가게 되면 재구성된 오브젝트가 잘려 보이게 된다. CGH의 최대 시야각은 회절 격자 방식에 의해 결정이 되며, 해당 수식에 따르면 홀로그램 재생 장치인 공간 광 변조기(SLM)의 픽셀 피치에 반비례한다. SLM의 픽셀 피치를 줄이는 것은 어렵고 비용이 많이 들기 때문에 본 논문에서는 고해상도 랜덤 바이너리 위상 마스크를 SLM에 부착하여 CGH의 시야각을 확장하는 방법을 제안한다. CGH를 계산하는데 자주 사용되는 반복 푸리에 변환 알고리즘(IFTA)에 위상 평균화 단계를 도입하여 SLM과 위상 마스크간의 픽셀 크기 및 개수의 차이를 극복하였다. 또한 스칼라 회절 이론을 바탕으로 한 홀로그램 시뮬레이션에 제안한 방법을 적용 후 가상 눈 모델을 도입하여 두 개의 물체로 이루어진 홀로그램을 재구성하고 여러 각도에서 관찰하여 시야각이 향상되는 것을 검증하였다.

## 1. 서론

컴퓨터 생성 홀로그램(CGH)는 컴퓨터를 사용하여 물체와 기준파가 생성하는 간섭 패턴을 계산하는 것을 의미한다. 계산된 패턴을 공간 광 변조기(SLM)에 입력하게 되면, SLM은 들어오는 빛의 파면을 바꿔 우리가 보고자 하는 오브젝트를 재구성하게 된다. 하지만 현재의 SLM으로는 물체를 완벽하게 재현하기는 매우 힘들다 특히 시야각이 완벽한 물체를 재현하는데 있어서 가장 큰 걸림돌 중 한 개다.

홀로그램의 최대 시야각은 회절 격자 수식에 의해 결정이 된다. [1] 해당 수식에 따르면, 시야각은 SLM의 픽셀 피치에 의해 결정이 되며 픽셀 피치가 작아져야 시야각이 넓어지게 된다. 시야각을 확장시키기 위해서는 픽셀의 크기를 줄이면 되지만 픽셀 크기를 줄일수록 구동 회로 및 픽셀의 액티브 영역을 줄여야 하기 때문에 픽셀 크기를 줄이는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 많은 연구자들은 SLM 여러 개를 곡선으로 배열하거나 [2] 시간 다중화 방식 [3]을 사용하여 제한된 시야각을 개선하기 위해 노력하였다. 해당 방식들의 경우 여러 SLM 또는 광학 장비들이 필요하기 때문에 전반적인 시스템이 매우 커진다는 단점이 있다.

다른 방법으로는 산란하는 매질을 사용하여 시야각을 확장하는 연구들이 있다. 홀로그래픽 디퓨저 [4] 및 비주기적으로 배열되어 있는 핀홀을 [5] 이용하여 시야각을 확장한 연구들이 있다. 해당 방식들은 SLM에 부착하여 시야각을 확장시키므로 전반적인 시스템을 콤팩트하게 만들 수 있다는 장점이 있지만 홀로그래픽 디퓨저의 경우 매질에 대한 정

보가 전혀 없기 때문에 피드백 시스템이 들어가야 하는 단점이 있으며 핀홀의 경우 전반적인 홀로그램의 강도가 낮아지는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 픽셀화된 고해상도 랜덤 위상 마스크를 사용하여 시야각을 확장하고자 한다. 해당 방식은 위상 변조 방식으로 작동하기 때문에 강도가 높으며 각 픽셀의 위상은 랜덤으로 설정되어 있지만 각각의 값은 알려져 있으므로 홀로그램 계산을 빨리 할 수 있는 장점이 있다. SLM보다 고해상도 및 픽셀 크기가 작은 위상 마스크를 사용함으로써 이러한 해상도 차이를 극복하기 위하여 CGH를 계산하는데 일반 적으로 사용되는 알고리즘인 반복 푸리에 변환 알고리즘(IFTA)에 [6] 위상 평균화 과정을 추가하여 해상도 차이 문제를 극복하였다. 또한 우리가 제안한 방식이 실질적으로 시야각이 증가한다는 것을 검증하기 위해 스칼라 회절 이론을 바탕으로 한 홀로그램 시뮬레이션에 가상 눈 모델을 도입하였으며, 위치가 다른 2개 물체로 구성된 홀로그램을 재구성한 후 가상 눈의 [7] 관측 각도를 돌려가며 홀로그램을 관찰하여 어떤 관측 각도에서 물체가 잘리는지를 확인하였다.

## 2. 원리 및 계산 방법

홀로그램을 볼 수 있는 각도인 최대 시야각은 회절 격자 수식에 의해  $\theta = 2\sin^{-1}(\lambda/2p)$ 으로 표현이 되며  $\lambda$ 는 입사하는 빛의 파장,  $p$ 는 픽셀 피치를 의미한다. 해당 수식에 따르면, 파장이 고정 되어 있을

때 시야각을 늘리기 위해서는 픽셀 피치를 줄여야 한다. 하지만 디스플레이 장치인 SLM의 픽셀의 크기를 줄이기에는 비용이 많이 들고 어려운 일하기에 대안으로 SLM 앞에 픽셀화된 고해상도 랜덤 위상 마스크를 부착하여 시야각을 확장하였다. 랜덤 마스크를 부착하지 않은 상태에서는 시야각은 SLM의 픽셀 피치에 따라 결정되지만 랜덤 마스크를 앞에 부착하면 시야각은 마스크의 픽셀 피치를 따르게 된다.

랜덤 마스크의 위상은 초기제작 시 각각 임의로 정해지지만 각각의 위상은 알려져 있기에 바로 계산이 바로 가능하다. 하지만 문제는 SLM과 마스크와의 해상도 차이에 있다. 마스크의 픽셀의 크기가 SLM보다 매우 작기 때문에 SLM 한 픽셀 안에 여러 개의 랜덤 마스크 픽셀이 들어가게 된다. 이러한 해상도 차이로 인해 CGH 계산 과정이 복잡해지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 홀로그램 계산에 사용되는 알고리즘인 반복 푸리에 변환 알고리즘(IFTA)에 위상 평균화 단계를 추가하였다. 전반적인 CGH 계산 과정은 위상 마스크의 해상도로 진행을 하게 된다. 위상 마스크의 해상도를 갖는 오브젝트의 복소장(Complex Field)은 전파함수를 통해 랜덤 마스크를 통과 후 SLM이 위치한 평면까지 전파된다. 해상도 차이가 존재하기 때문에, 각각의 SLM 한 픽셀에 해당하는 전파된 복소장의 픽셀들의 위상들만 추출 후 평균화하여 해상도를 SLM의 해상도로 변환한다.

### 3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 그림 1.와 동일하게 진행하였다. 총 2개의 오브젝트로 진행을 하였으며, 첫 번째 오브젝트인 단어 "IPOD"는 SLM 평면으로부터  $d_{Obj1} = 1\text{ cm}$  떨어져 있으며, 두 번째 오브젝트인 단어 "LAB"는 SLM 평면으로부터  $d_{Obj2} = 1.5\text{ cm}$  떨어져 있다. SLM의 픽셀 피치와 해상도는 각각  $3.7\ \mu\text{m}$  그리고  $2048 \times 2048$ 이며 랜덤 마스크의 픽셀 피치와 해상도는 각각  $1.85\ \mu\text{m}$  그리고  $4096 \times 4096$ 으로 설정하고 파장은  $660\text{ nm}$ 로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 재구성 된 2개의 평면으로 이루어진 홀로그램의 시야각 향상을 검증하기 위해 그림 1.의 빨간색 상자로 도시 된 바와 같이, 시뮬레이션에 가상 눈 모델을 포함하였다. 가상 눈은 두 물체 평면의 중앙에서  $d_i = 10\text{ cm}$  떨어진 곳에 위치하며 렌즈와 망막으로 이루어져 있다. 눈 모형을 회전하고 망막 평면에 나타난 이미지를 관찰함으로써 관찰 각도에 따른 오브젝트의 모습을 렌더링할 수 있다. 가상 눈의 길이인  $d_i$ 와 가상 눈 모델의 렌즈의 초점길이는 오브젝트와 동일한 배율의 이미지를 제공하도록 설계하였다.

그림 2.는 랜덤 위상 마스크의 유무에 따라 관측 각도를 달리하였을 때 시뮬레이션 결과를 보여준다. 가상 눈 모델을  $-11^\circ$ 에서  $11^\circ$ 까지 회전하며 두 평면을 동시에 관찰하였다. 고해상도 마스크의 유무에 따라 시야각이 차이가 남을 확인 할 수 있다. 픽셀 피치가  $3.7\ \mu\text{m}$ 인 SLM만 사용하였을 때 약  $5^\circ$ 까지 오브젝트가 관찰되다가  $6^\circ$  이후 관측 각도가 커질수록 물체가 점점 잘려지는 것을 확인할 수 있다. 반면, 4K 해상도를 갖으며 픽셀 피치가  $1.85\ \mu\text{m}$ 인 랜덤 마스크를 부착함으로써 물체가  $11^\circ$ 까지 관찰이 되는 것을 확인 할 수 있다. 이외에도 회절 되지 않은 0차 성분의 빛이 사라진 것을 확인 할 수 있다. 단점으로는, 마스크가 없을 때 보다 강도가 약해지고 노이즈가 증가한다는 것인데 이는, 회절되지 않은 성분들이 랜덤 마스크를 만나 노이즈로 변화한 것으로 예상된다.

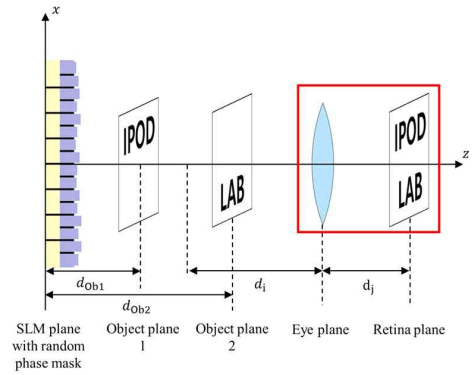


그림 1 . 가상 눈 모델을 적용한 시뮬레이션 모식도

Observation Angle	$-11^\circ$	$-6^\circ$	$0^\circ$	$6^\circ$	$11^\circ$
2K SLM ( $3.17\ \mu\text{m}$ )					
2K SLM ( $3.17\ \mu\text{m}$ ) + 4K Phase Mask ( $1.85\ \mu\text{m}$ )					

그림 2 . 랜덤 마스크 유무에 따라 관측각도를 달리하였을 때 시뮬레이션 결과

### 4. 결론

본 논문에서는 고해상도 픽셀화된 랜덤 바이너리 위상 마스크를 부착하여 CGH의 시야각을 확장하는 방법을 제안하였다. 랜덤 마스크와 SLM 해상도의 차이를 극복하기 위해서 CGH 계산에 사용되는 알고리즘인 IFTA에 위상 평균화 과정을 추가하였다. 이를 통해 재구성한 홀로그램의 시야각이 SLM만 있을 때 보다 증가함을 확인할 수 있었다. 제안한 방식은 컴팩트한 형태로 구현이 가능하기 때문에 모바일용 홀로그램 패널에 적용될 수 있을 것으로 기대가 된다.

### 사사

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019-0-00001, 홀로그램 영상 서비스를 위한 Holo-TV 핵심 기술 개발)

### 참고문헌

[1] T. Haist and W. Osten, "Holography using pixelated spatial light modulators—part 1: theory and basic considerations," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, Vol.14, No.4, pp.041310, September 2015.

[2] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators," *Optics Express*, Vol.16, No.16, pp.12372-12386, August 2008.

[3] Y.-Z. Liu, X.-N. Pang, S. Jiang, and J.-W. Dong, "Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling," *Optics Express*, Vol.21,

No.10, pp.12068-12076, May 2013.

[4] H. Yu, K. Lee, J. Park, and Y. Park, "Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields," *Nature Photonics*, Vol.11, No.3, pp.186-192, January 2017.

[5] J. Park, K. Lee, and Y. Park, "Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve," *Nature Communications*, Vol.10, No.1, pp.1304, March 2019.

[6] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.5, No.7, pp.1058-1065, July 1988.

[7] D. Im, E. Moon, Y. Park, D. Lee, J. Hahn, and H. Kim, "Phase-regularized polygon computer-generated holograms," *Optics Letter*, Vol.39, No.12, pp.3642-3645, June 2014.