

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제25권 제6호, 2020년 11월 (JBE Vol. 25, No. 6, November 2020)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2020.25.6.836>

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

오목 렌즈 함수를 이용한 초 고해상도 Computer generated hologram 생성 기법

이 창 주^{a)}, 최 우 영^{a)}, 오 관 정^{b)}, 홍 기 훈^{b)}, 최 기 흥^{b)}, 전 상 훈^{b)}, 박 중 기^{b)}, 이 승 열^{a)†}

Extremely High-Definition Computer Generated Hologram Calculation Algorithm with Concave Lens Function

Chang-Joo Lee^{a)}, Woo-Young Choi^{a)}, Kwan-Jung Oh^{b)}, Keehoon Hong^{b)}, Kihong Choi^{b)},
Sang-Hoon Cheon^{b)}, Joongki Park^{b)}, and Seung-Yeol Lee^{a)†}

요 약

아날로그 휠로그램과 동등 이상의 대면적과 넓은 시야각을 가진 Computer generated hologram(CGH)을 생성하기 위해서는 매우 많은 픽셀 수가 요구된다. 이로 인해 고해상도의 CGH를 생성하기 위해서는 높은 성능의 연산장치를 바탕으로도 오랜 연산 시간이 필요한 문제점이 존재한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 미리 계산된 저해상도 CGH를 배열한 후 평행이동된 오목 렌즈 함수를 곱해주는 것을 통하여 고해상도 CGH를 생성하는 기법을 제안한다. Point cloud 방식으로 기록된 0.1기가픽셀의 CGH를 계산하고, 여기에 제안된 기법을 도입하여 2.5기가픽셀의 CGH를 매우 빠른 속도로 생성할 수 있었으며, 이렇게 생성된 CGH를 실험을 통하여 기록한 이미지상이 정상적으로 복원되는 것을 확인하였다.

Abstract

A very large number of pixels is required to generate a computer generated hologram (CGH) with a large-size and wide viewing angle equivalent to that of an analog hologram, which incurs a very large amount of computation. For this reason, a high-performance computing device and long computation time were required to generate high-definition CGH. To solve these problems, in this paper, we propose a technique for generating high-definition CGH by arraying the pre-calculated low-definition CGH and multiplying the appropriately-shifted concave lens function. Using the proposed technique, 0.1 Gigapixel CGH recorded by the point cloud method can be used to calculate 2.5 Gigapixels CGH at a very high speed, and the recorded hologram image was successfully reconstructed through the experiment.

Keyword : Digital Holography, Computer generated hologram, Fourier optics, Hologram algorithm, Optical imaging

I. 서 론

홀로그램은 3차원 디스플레이, 홀로그램 문화재 전시 및 홀로그램을 이용한 공연, 차세대 반도체 공정과 협미경 기술, 차량 네비게이션과 같은 다양한 분야에서 응용되고 있다. 홀로그램의 종류로는 아날로그 홀로그램과 디지털 홀로그램이 있으며, 아날로그 홀로그램은 넓은 공간 면적 및 작은 픽셀 크기로 인하여 넓은 시야각과 선명한 이미지를 보여줄 수 있지만, 홀로그램을 기록하기 위해서는 잘 결맞은 레이저가 필요하며 정지된 이미지만을 기록할 수 있다. 디지털 홀로그램은 원하는 이미지를 임의로 생성하여 기록할 수 있는 장점이 있지만, 아날로그 홀로그램 수준의 공간 면적 및 시야각을 가진 해상도의 CGH를 만들어내기 위해서는 매우 많은 양의 연산량이 필요하며 이것은 높은 성능의 연산장치와 오랜 연산 시간을 요구하게 된다.

CGH를 생성하는데 필요한 많은 연산량과 오랜 연산 시간은 그동안 디지털 홀로그램을 산업화시키는데 큰 걸림돌이 되고 있었으며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 시야각을 개선시키기 위하여 non-periodic 팬홀 어레이를 부착시키거나^[1], 랜덤 페이즈 마스크를 부착시킴으로서 시야각을 개선하는 연구 등이 진행되었다^[2]. 또한 CGH의 연산 시간을 줄이기 위한 연구로서, 과장 필드의 효율적인 수치 전파를 위한 알고리즘을 개선하거나^[3], 포인트 대신 폴리곤 기반 연산방식을 이용하여 연산속도를 줄이거나^[4], GPU를 이용하여 계산 속도를 가속시키는 등^[5-7], 다양한 방식들이 제안되었다.

a) 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

b) 한국전자통신연구원 디지털홀로그래피연구실(Electronics and Telecommunication Research Institute (ETRI))

‡ Corresponding Author : 이승열(Seung-Yeol Lee)
E-mail: seungyeol@knu.ac.kr
Tel: +82-53-950-6608

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8987-9749>

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

* This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2019-0-00001, Development of Holo-TV Core Technologies for Hologram Media Services)

· Manuscript received August 28, 2020; Revised October 26, 2020; Accepted October 26, 2020.

하지만 10억 기가픽셀이 넘어가는 초고해상도 CGH를 생성하기 위해서는 아무리 개선된 연산 알고리즘을 사용하더라도 매우 높은 성능의 연산장치가 요구되거나 연산 과정에서의 메모리 부족 등으로 인한 문제들이 발생할 수 있다. 고연산량이 요구되는 알고리즘 과정들을 부분적으로 회피하거나 개선하는 방식을 통해 표준 데스크탑에서도 고해상도 CGH를 생성하기 위한 방법들이 제안되었지만^[3,8], 여전히 많은 메모리 사용량과 오랜 연산 시간은 해결되어야 할 문제이다.

또한 CGH를 저해상도로 계산한 후 그 자체를 2D 이미지의 해상도를 늘리는 일반적인 보간법을 이용하여 해상도를 늘리는 방법들이 시도된 바 있으나, 일반적인 디지털 이미지와는 달리 CGH는 위상정보를 포함하고 있기 때문에 CGH 자체를 확대 및 축소할 경우 물체의 주변에 잔상이 생기거나 깊이 방향 왜곡이 일어나는 문제점들이 있음이 알려져 있어 일반적인 2차원 이미지에 적용되는 보간법을 CGH에 바로 적용하기는 어려운 것으로 알려져 있다^[9].

본 논문에서는, 표준 데스크탑에서도 초고해상도 CGH를 생성할 수 있도록 저해상도 CGH를 계산한 후 오목 렌즈 함수를 이용하여 고해상도 CGH를 생성하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 일반적인 방법으로 계산하는 CGH의 크기는 표준 데스크탑에서도 계산 가능한 저해상도로도 충분하며 복원되는 홀로그램 이미지의 퀄리티를 trade-off하는 것으로서 CGH의 연산 시간을 매우 크게 줄일 수 있다.

II. 오목 렌즈를 이용한 고해상도 CGH 생성 기법

Integral imaging 기반 방식 또는 hogel 기반 방식으로 기록된 CGH는 기록하고자 하는 물체를 임의의 각도에서 바라본 직교 뷰로 이루어져 있으며, 각 영역만을 복원할 시 임의의 각도로 바라본 물체를 재생할 수 있다^[10,11]. 이 방식들은 각 영역에 기록되는 정보가 물체를 서로 다른 각도에서 바라본 정보들로 구성된다. 따라서 매번 다른 각도의 정보를 계산해야 하는 단점이 있으나, 본 논문에서 제안하는 방식은 이러한 기록 방식을 응용하여, 저해상도로 기록한 CGH를 원하는 해상도의 배율만큼 바둑판 형식으로 동

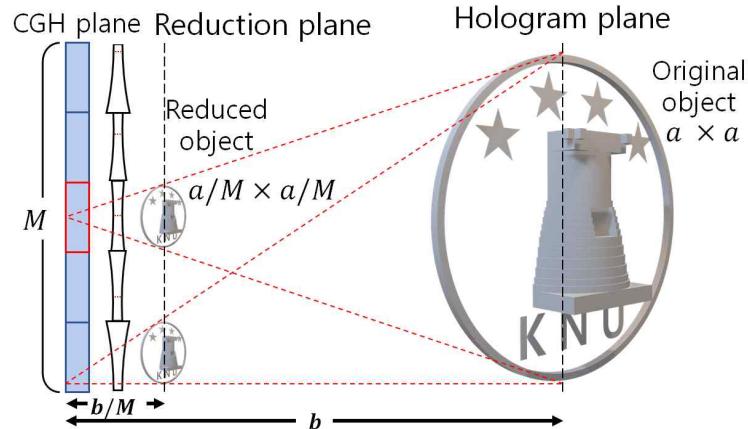


그림 1. 제안하는 기법의 도식도
Fig. 1. Schematic of Proposed method

일 패턴을 배열하여 각도 뷰에 따른 계산을 수행하지 않는다는 장점을 지닌다. 이렇게 배열된 각각의 CGH들이 복원하고자 하는 물체를 임의의 각도를 가진 채로 기록한 CGH와 동등한 역할을 할 수 있도록 각 CGH에 임의의 오목 렌즈 함수를 곱함으로서, 배열된 모든 CGH가 기록하고자 하였던 하나의 물체를 복원시킬 수 있도록 하였다.

그림 1은 제안하는 오목 렌즈 함수를 이용한 초고해상도 CGH 기록 기법의 도식도이다. 제안하는 방법은 총 세 단계 순서를 따른다.

첫 번째로, 기록하고자 하는 물체의 Point cloud 데이터 사이즈를 CGH를 확대시키고자 하는 배율 M만큼 축소시킨다. 이때, 깊이 방향으로는 오목 렌즈 함수를 이용하여 물체를 다시 확대하였을 때 발생하는 깊이 방향 왜곡을 미리 보정하기 위하여 아래와 같은 렌즈 초점 거리 공식을 이용한다.

$$\frac{1}{(-z_1)} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

먼저 렌즈함수의 초점거리 f 를 구하기 위해 z_1 에는 CGH plane과 Hologram plane과의 거리(b)를 대입하고, z_2 에는 CGH Plane에서 Reduction plane까지의 거리(b/M)을 대입한다. 여기서 Hologram plane이란 Point cloud 데이터의 깊이 정보의 평균치로 가정한다. 그 결과로 f 를 계산하면 다음과 같다.

$$f = \frac{b}{1 - M} \quad (2)$$

이제 식 (2)를 이용하여 구해낸 f 값을 식 (1)에 대입하고, 각 개별 포인트 데이터의 기록 거리를 식 (1)의 z_1 에 대입하여 축소 보정된 깊이 방향 거리 z_2 를 구해낼 수 있다. x 및 y 방향으로의 점 크기는 단순히 M배만큼을 축소한다.

두 번째로는, 이렇게 축소된 Point cloud 데이터를 이용하여 저해상도 CGH를 생성한 후, 그림 1과 같이 확대하고자 하는 배율만큼 CGH를 배열한다.

세 번째로는 배열된 CGH들이 본래 기록하고자 했던 하나의 물체를 형성할 수 있도록, 배열된 각 CGH들에 아래와 같은 식을 곱해준다.

$$h_{i,j}(x,y) = h(x,y) e^{i\pi \left(\frac{\left(x - \frac{N_x p_x k_i}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{N_y p_y k_j}{2} \right)^2}{\lambda f} \right)} \quad (3)$$

여기서 h 는 배열된 각 CGH패턴들을 나타낸다. λ 는 CGH를 기록하는데 이용한 파장의 길이이며, N_x, N_y 는 각각 x, y 방향의 픽셀 수이고, p_x, p_y 는 각각 x, y 방향의 픽셀 피치의 크기이다. i, j 는 배열된 CGH 패턴의 블록 번호로 1부터 M까지의 정수값을 가지게 되며, k_i, k_j 는 오목 렌즈의 평행 이동 보정값으로, i, j 값을 -1과 1 사이의 등간격으로 매핑한 값이며 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$(k_i, k_j) = \left((i, j) - \frac{M+1}{2} \right) \frac{2}{M-1} \quad (4)$$

이렇게 해상도가 늘어난 CGH 전체를 이용하여 홀로그램을 재구성할 시 본래 기록하고자 하였던 물체를 재구성 할 수 있다.

다만 두 번째 단계에서 CGH를 기록할 시 물체가 지나치게 가깝거나 기록하고자 하는 CGH의 픽셀 퍼치의 크기가 커서 물체로부터 회절되어 나오는 광파가 CGH plane 전체에 기록되지 못하고 빈 공간이 생기게 될 경우, 제안한 방법으로 물체를 기록하여 얻어낸 고해상도 CGH를 복원하였을 시 잔상이 나타나거나 복원되는 홀로그램의 퀄리티가 떨어질 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

그림 2는 CPU AMD Ryzen Threadripper 1950X 16-core processor 3.40GHz, 메모리 128GB의 성능을 가진 컴퓨터의 MATLAB 환경 하에서 CPU만을 이용하여 총 해상도 $50k \times 50k$, 픽셀 크기 $1 \mu\text{m}$ 기록 파장 627 nm, 초점 거리 30 cm의 조건 하에서 진행한 시뮬레이션 결과이다. 2(a)는 대조군으로서 $50k \times 50k$ 해상도의 CGH를 일반적인 Point cloud 기반 CGH 형성 기법으로 한 번에 계산해낸 후 복원한 이미지상이며, 2(b)는 $10k \times 10k$ 해상도의 CGH를 먼저 계산한 후, 본 논문에서 제안한 방식으로 $50k \times 50k$ 의 해상도로 확대한 후 복원한 이미지상이다. 그림 2(a)를 얻어내

는데 걸린 시간은 1435초이며 2(b)를 얻어내는데 걸린 시간은 167초로서 $50k \times 50k$ 해상도의 CGH를 한 번에 계산하는 것에 비해서 계산 속도가 약 8.6배 빠른 것을 확인할 수 있었다. 그림 2의 두 복원 이미지상의 아랫부분을 확대하여 비교해 보았을 때 약간의 연산 시간 단축의 trade-off로서 렌즈함수를 이용한 상의 확대로 인해 약간의 퍼짐(blur) 현상이 발생하는 것 외에는 정상적으로 복원되는 것을 확인할 수 있었다.

구해내고자 하는 CGH의 총 픽셀 수에 따른 CGH를 전체적으로 계산하였을 시의 연산 시간과 본 논문에서 제안한 방법으로 계산하였을 시 걸리는 연산 시간의 차이가 그림 3(a)에 나타나 있다. 그래프의 가로축은 N_x 이며, $N_y = N_x$ 이다. 세로축은 CGH를 계산하는데 걸린 연산 시간을 나타낸다. 해당 연산 시간은 기록하고자 하는 물체의 포인트 클라우드 데이터에서부터 CGH를 계산해낸 후 제안하는 방식을 이용하여 CGH를 확대하는 과정까지의 시간으로서, 사용하는 포인트 클라우드 데이터 기록 방식에 따라 절대적인 연산 시간은 변동이 있을 수 있기에 계산해내는데 소모된 총 시간이 아닌 연산 시간 단축률이 중요하다. 검은색 선은 원하는 해상도의 CGH를 한 번에 계산하였을 시 걸리는 시간이며, 빨간색 선은 본 논문에서 제안한 방식을 이용하여 2배 확대하여 원하는 해상도의 CGH를 계산할 시 걸리는 시간, 파란색 선은 5배, 밝은 보라색 선은 10배 확대할 시 걸리는 연산 시간을 나타낸다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통하여 고해상도 CGH를 계산해내는데 전체를 한 번에 계산해내는 일반적인 방식에 비해 극적인 연산 시간 단축

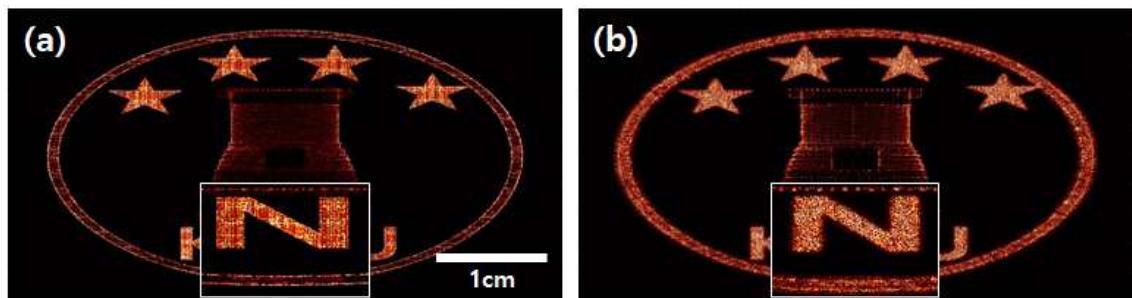


그림 2. (a) $50k \times 50k$ CGH 계산 후 복원한 홀로그램 이미지상 (b) $10k \times 10k$ CGH 계산 후 제안한 기법으로 $50k \times 50k$ 로 확대한 후 복원한 홀로그램 이미지상

Fig. 2. (a) Reconstructed hologram image after calculating $50k \times 50k$ CGH (b) Reconstructed hologram image after calculating $10k \times 10k$ CGH and magnifying it to $50k \times 50k$ using the proposed method

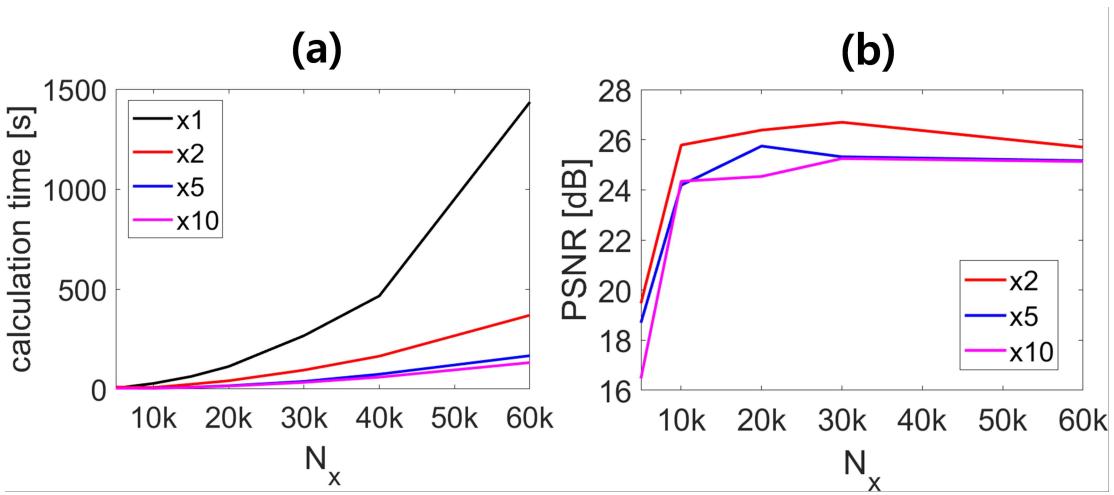


그림 3. (a) 연산 방식 및 픽셀 수에 따른 연산 시간 비교 그래프

Fig. 3. (a) Comparison graph of calculation method and number of pixels (b) Comparison graph of PSNR according to calculation method and number of pixels

을 이루어낼 수 있음을 확인하였다.

제안하는 방식으로 계산된 CGH를 복원하였을 시 나타나는 홀로그램 이미지의 화질 저하 정도를 정량적으로 분석하기 위해 최대 신호 대 잡음비(Peak Signal-to-noise ratio, PSNR)를 이용한 비교 그래프가 그림 3(b)에 나타나 있다. PSNR은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} PSNR &= 20 \times \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \\ &= 20 \times \log_{10}(MAX_I) - 10 \times \log_{10}(MSE) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 MAX_I는 해당 영상의 최댓값이며 MSE는 평균 제곱 오차이다.

5k 수준의 홀로그램에서는 2배, 5배, 10배 확대하였을 시 PSNR 수치가 낮게 나타났는데, 이것은 해당 홀로그램을 계산하는데 사용된 픽셀 피치의 크기 및 초점 거리에 비해 홀로그램을 기록하고자 한 CGH의 면적이 2배의 경우 2.5k, 5배의 경우 1k, 10배의 경우 0.5k 수준으로 너무 작아져서 계산해낸 저해상도 CGH에 홀로그램을 복원하기 위한 정보가 충분히 기록되지 않아 발생한 문제이다. 해상도가 증가함에 따라 24~26 dB 수준으로 안정되는 것을 볼 수 있었으며 제안한 방식을 이용하더라도 큰 화질 저하 없이 홀로그램을 정상적으로 복원시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 기록 방식은 먼저 기록하고자 하

는 물체 데이터를 축소시키고 초점 거리를 당겨서 기록한 후 오목 렌즈 함수를 이용하여 다시 확대 시킨다. 이 과정에서 물체의 point cloud 정보가 깊이 방향으로 너무 넓게 분포하거나, 기록하고자 하는 초점 거리가 너무 가깝거나, 확대하고자 하는 배율이 너무 큰 경우 기록하는 물체가 CGH plane에 지나치게 가까워진다는 문제점이 발생한다.

그림 4는 이러한 문제점을 보여주며 적정 수준의 확대 배율 설정의 필요성을 나타내고 있는 결과이다. 그림 4(a)는 제안하는 방식과의 대조를 위해 초점 거리 5 cm에 위치한 물체를 일반적인 방식으로 한 번에 계산해낸 결과이며 4(b)는 10 cm, 4(c)는 20 cm, 4(d)는 30 cm의 초점 거리를 가진 물체를 기록한 후 복원한 홀로그램 이미지상이다. 4(e)는 확대 배수 5배로 제안한 방법을 이용해 초점거리 5 cm에 위치한 물체를 기록한 후 복원한 홀로그램 이미지상이며 4(f)는 10 cm, 4(g)는 20 cm, 4(h)는 30 cm의 초점 거리를 가진 물체를 기록한 후 복원한 홀로그램 이미지상이다. 4(i), 4(j), 4(k), 4(l)은 각각 4(e), 4(f), 4(g), 4(h)의 CGH 패턴을 보여준다. 4(e), 4(f)의 경우 기록하고자 하는 물체와의 초점거리가 가까워 물체의 광파가 제대로 기록되지 않아 기록된 CGH에 빈 공간이 나타난 것을 4(i), 4(j)에서 볼 수 있으며, 이에 따라 4(a), 4(b)에 비해 4(e), 4(f)의 복원 홀로그램 이미지상의 퀄리티가 떨어지며 잔상이 생긴 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 초점거리가 멀어질수록

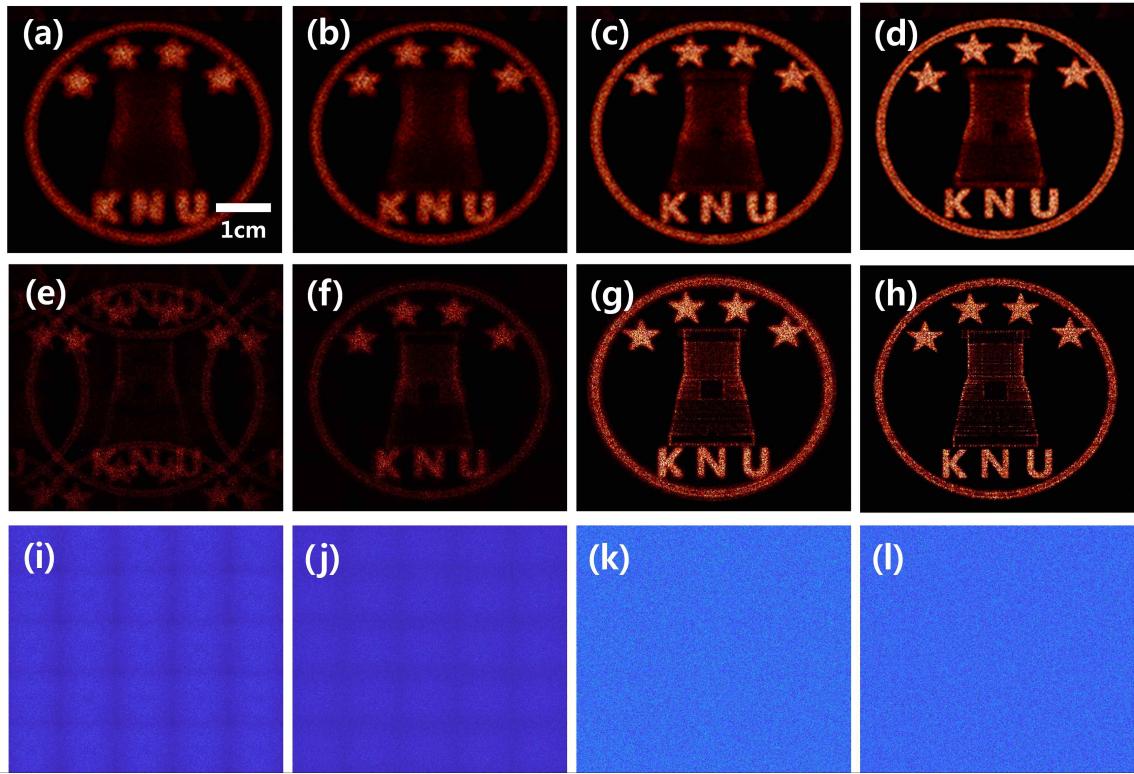


그림 4. 초점 거리에 따른 왜곡 비교도 (a-d) 기존 방법으로 물체와의 초점 거리 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm에서 기록한 후 복원한 훌로그램 이미지 (e-h) 제안한 방법으로 물체와의 초점 거리 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm에서 기록한 후 복원한 훌로그램 이미지 (i) (e)의 CGH 패턴 (j) (f)의 CGH 패턴 (k) (g)의 CGH 패턴 (l) (h)의 CGH 패턴

Fig. 4. Comparison of distortion according to focal length (a-d) Reconstructed hologram image by recorded 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30cm focal length using the conventional method (e-h) Reconstructed hologram image by recorded 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30cm focal length using the proposed method (i) CGH pattern of (e) (j) CGH pattern of (f) (k) CGH pattern of (g) (l) CGH pattern of (h)

개선되는 양상을 보여주었으며 20 cm, 30 cm의 초점 거리를 가지고 기록된 4(g), 4(h)는 4(c), 4(d)와 비교해 큰 화질 저하 및 잔상이 나타나지 않은 것을 확인할 수 있었다. 즉 제안하는 방법을 적용하기 위해서는 주어진 패턴의 경우 훌로그램 상이 30 cm 가량 떨어진 상태에서 기록해야만 왜곡 없는 상을 얻을 수 있다.

이와 같은 문제가 있지만, 가까운 거리에 재생되는 CGH 상을 계산할 수 있는 방법이 존재하는데, 제안하는 방법으로 상을 먼 위치에서 빠르게 기록한 뒤, 당기고자 하는 거리 만큼을 주파수 도메인에서 전달함수를 곱하는 Angular spectrum method(ASM)을 통해 계산한 뒤 기록하면 된다. 다만 이 경우 1회의 ASM연산으로 인한 연산 시간이 추가적으로 소요되는 trade-off 관계가 있다. 다음 장에서 시연

할 실험 결과 또한 초기 물체를 30 cm의 초점 거리에서 기록한 후 초점 거리를 10 cm로 당기는 방식으로 기록하여 CGH에서 10 cm 떨어진 가까운 거리에서 상을 재생하였다.

IV. 실험 결과

그림 5(a)는 그림 2(b)를 얻기 위해 사용한 CGH를 바이너리 인코딩한 후, 실제 제작한 샘플 사진이다. CGH의 전체 크기는 5 cm×5 cm이며, 5(b)는 샘플의 SEM사진이다. 5(c), 5(d)는 각각 그림 2(a), 2(b)를 얻기 위해 사용한 CGH를 바이너리 인코딩한 후, 실제 제작하여 복원한 훌로그램 이미지상이다. CGH를 계산할 시에는 이상적인 평면파를

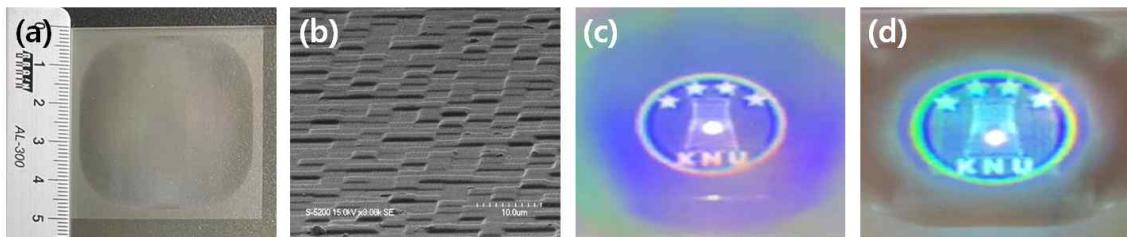


그림 5. (a) 그림 2.(b)의 CGH를 바이너리 인코딩 후 해당 데이터를 이용해 제작한 샘플 사진 (b) 제작된 샘플의 SEM 사진 (c) 그림 2. (a)를 바이너리 인코딩하여 제작한 후 백색광을 이용하여 복원시킨 홀로그램 이미지상 (d) 그림2. (b)를 바이너리 인코딩하여 제작한 후 백색광을 이용하여 복원시킨 홀로그램 이미지상

Fig. 5. (a) A sample produced using the data after binary encoding the CGH in Figure 2. (b) (b) SEM of the produced sample (a) (c) Reconstructed hologram image using white light after producing fig 2. (a) by binary encoding (d) Reconstructed hologram image using white light after producing fig 2. (b) by binary encoding

참조광으로 가정하여 기록하였고 재생시에는 백색 점광원을 30 cm 떨어진 위치에서 조사하였다. 5(c)에서 나타나는 배경 부분의 무지개색 산란과, 5(d)에서 관측되는 약간의 격자무늬는 계산 시 참조광 조건과 재생 시 조건의 차이에서 발생한 것으로 예상된다. 그 밖에 CGH 전체를 한 번에 계산한 5(c)와 제안한 방식으로 CGH를 기록한 5(d)를 비교하여 보았을 때 재생된 홀로그램 이미지상에서 눈에 띄는 노이즈나 잔상 등을 발견할 수 없었으며 제안하는 방법을 통해 홀로그램을 연산하더라도 실제 홀로그램이 정상적으로 재생되는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 오목 렌즈 함수를 이용한 초고해상도 CGH 생성 기법을 제안하였다. 확대하고자 하는 배율 M 을 고려하여 기록하고자 하는 포인트 데이터를 오목 렌즈 함수를 통해 확대하였을 시 발생하게 될 왜곡을 고려하여 축소시킨 후, 축소된 물체를 이용하여 저 해상도 CGH를 먼저 계산하였다. 이후 계산된 CGH를 확대하고자 하는 배율 M 배만큼 배열하는 것으로 해상도를 늘렸으며, 배열된 CGH들이 하나의 상을 맷을 수 있도록 각각의 CGH에 오목 렌즈 함수를 곱해줌으로서 본래 기록하고자 하였던 물체의 복원 이미지상을 얻어낼 수 있었다. 제안한 방법을 이용할 시 고해상도 CGH를 얻기 위해 실제로 계산하는 CGH의 크기는 1/5 이하 수준으로도 가능하기에 성능이 낮은 연산기기로

도 충분히 계산할 수 있으며, 기존 방식과 비교해 연산 시간을 극적으로 단축시킬 수 있었다.

참 고 문 현 (References)

- [1] J. Park, K. Lee, and Y. Park, "Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve," *Nat. Commun.* 10(1), 1304, Mar 2019.
- [2] E. Buckley, A. Cable, N. Lawrence, and T. Wilkinson, "Viewing angle enhancement for two-and three-dimensional holographic displays with random superresolution phase masks," *Appl. Opt.*, Vol 45, pp 7334 - 7341, Oct 2006.
- [3] D. Blinder, T. Shimobaba, "Efficient algorithms for the accurate propagation of extreme-resolution holograms," *Opt. Express*, Vol 27, pp 29905 - 29915, Oct 2019.
- [4] K. Matsushima, "Computer-generated holograms for three dimensional surface objects with shade and texture," *Appl. Opt.*, Vol 44, pp 4607 - 4614, Aug 2005.
- [5] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," *Opt. Express*, Vol 14, pp 603-608, Jan 2006.
- [6] N. Takada, et al. "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system," *Appl. Opt.*, Vol 51, pp 7303-7307, Oct 2012.
- [7] J. Song, J. Park, H. Park, and J.-I. Park, "Real-time generation of high-definition resolution digital holograms by using multiple graphic processing units," *Opt. Eng.* 52(1), 015803, Jan 2013.
- [8] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and J. E. Tohline, "Shifted fresnel diffraction for computational holography," *Opt. Express*, Vol 15(9), pp 5631 - 5640, Jul 2007.
- [9] 藤田, 有馬, 松島, 中原, "物体光波のデジタル拡大/縮小編集を用いた高解像度 CGH の作成", *HODIC Circular*, Vol 32, pp 10-15, May 2012.
- [10] T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Calculation of holograms from

elemental images captured by integral photography,” *Appl. Opt.*, Vol 45(17), pp 4026 – 4036, Jun 2006.

[11] L. Ai, H. Cao, H. Sun, and X. Shi, “Performance enhancement of in-

tegral imaging based Fresnel hologram capturing by the intermediate view reconstruction,” *Opt. Express*, Vol 27, pp 31942 – 31955, Oct 2019.

저자 소개

이 창 주



- 2019년 2월 : 부산대학교 물리학부 이학사
- 2019년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 전자공학부 석사
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5655-2742>
- 주관심분야 : Digital Hologram, Imaging, Wave Optics

최 우 영



- 2019년 2월 : 경북대학교 전자공학부 공학사
- 2019년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 전자전기공학부 석사
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-6335-0310>
- 주관심분야 : Digital Hologram, Imaging, Wave Optics

오 관 정



- 2002년 8월 : 전남대학교 정보통신공학부 공학사
- 2005년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
- 2010년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사
- 2010년 ~ 2013년 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2013년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 통신미디어연구소 선임연구원
- 주관심분야 : Digital Hologram, Hologram Compression, Holographic Metrology, Image Processing and Compression

홍 기 훈



- 2008년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 공학사
- 2014년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
- 2015년 1월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미디어연구본부 선임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7325-1036>
- 주관심분야 : Digital Holography, Three-dimensional Display

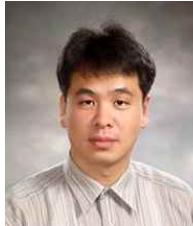
저자소개

최기홍



- 2013년 3월 : 경희대학교 정보디스플레이학과 이학사
- 2015년 8월 : 경희대학교 정보디스플레이학과 공학석사
- 2019년 8월 : 경희대학교 정보디스플레이학과 공학박사
- 2019년 11월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 디지털홀로그래피연구실 선임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0451-9083>
- 주관심분야 : Digital holography, Holographic camera, 3D display

전상훈



- 1993년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학사
- 2001년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
- 2001년 3월 ~ 2006년 6월 : (주)나리지온 파운드리 서비스 분부, Device Eng. Team 팀장
- 2006년 10월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9336-2961>
- 주관심분야 : Digital Hologram, AR/VR Display Devices

박중기



- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 디지털홀로그래피연구실 책임연구원, 실장
- 1997년 7월 ~ 현재 : 한국저작권위원회 소프트웨어 감정인
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-6106-5014>
- 주관심분야 : Hologram Camera, Hologram Transformation & Synthesis, Hologram Display

이승열



- 2009년 2월 : 서울대학교 전기정보공학부 공학사
- 2014년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
- 2014년 3월 ~ 2016년 11월 : 서울대학교 광공학연구실 Post Doc.
- 2016년 12월 ~ 2017년 8월 : 한국전자통신연구원 ICT소재부품연구소 연구원
- 2017년 9월 ~ 현재 : 경북대학교 전자공학부 조교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8987-9749>
- 주관심분야 : Digital Hologram, Spatial Light Modulator, Nanophotonics, Metasurfaces