

# RGB 3 채널에 대한 컬러 수차가 없는 호젤 라이트필드 기반 컴퓨터 생성 홀로그램 합성

민다빈, 민교식, 박재형\*  
 인하대학교 전기컴퓨터공학부  
 \*jh.park@inha.ac.kr

## 요 약

본 논문은 RGB 컬러 3 채널에 대해 공유되는 홀로그램 픽셀 피치를 사용하여 3 차원 장면의 라이트 필드 데이터에서 비호젤 기반 컴퓨터 생성 홀로그램(CGH)을 합성하는 방법을 제안한다. 비호젤 기반 CGH 기술은 라이트 필드의 광선 각도를 평면 파면의 공간 주파수로 해석하여 주어진 라이트 필드 데이터에서 임의의 반송파로 연속 파면을 생성한다. 그러나 광선 각도와 공간 주파수 관계는 파장에 따라 달라지므로 라이트 필드 데이터에서 공간 주파수 샘플링 그리드가 달라져서 홀로그램 재구성에서 색 수차가 발생한다. 제안하는 방법은 가장 작은 청색 회절각이 라이트 필드의 시야를 커버하도록 모든 색상 채널에 공통적인 홀로그램 픽셀 피치를 설정한다. 그런 다음 라이트 필드를 파란색 파장의 공간 주파수 범위와 빨간색 파장의 샘플링 간격으로 보간하여 모든 색상 채널에 공통적인 공간 주파수 샘플링 그리드를 설정한다. 공통 홀로그램 픽셀 피치 및 라이트 필드 공간 주파수 샘플링 그리드는 홀로그램 재구성에서 색상 수차 또는 라이트 필드에 포함된 정보 손실 없이 컬러 홀로그램 합성을 보장한다. 제안된 방법은 다양한 테스트와 리얼 3D 장면의 컬러 라이트 필드 데이터를 사용하여 검증되었다.

## 1. 서론

CGH 는 3 차원(3D) 홀로그램 디스플레이에서 중요한 역할을 한다 [1]. 홀로그램 합성을 위해 3D 객체는 다양한 형태로 표현되며 그 중 하나가 라이트 필드이다. 라이트 필드 데이터는 3D 객체에서 나오는 공간 및 각도 광선의 집합으로 표현된다 [2]. 이러한 광선의 표현은 다양한 방향에서 3D 개체를 보는 뷰 배열과 동일하다. 라이트 필드 데이터에서 홀로그램을 생성하면 라이트 필드 카메라로 실제 물체의 라이트 필드 획득을 쉽게 달성할 수 있다는 장점이 있다 [3]. 라이트 필드 CGH 의 또 다른 장점은 폐색 및 재료 반사 속성과 같은 장면 세부 정보가 라이트 필드 데이터에 이미 포함되어 있으며 적절한 처리를 통해 홀로그램에 그대로 반영될 수 있다.

라이트 필드 데이터에서 홀로그램을 합성하는 것은 수십 년 동안 연구되어 왔다 [4, 5]. 대부분의 기존 방법은 홀로그램 평면을 호젤이라고 하는 작은 영역으로 나누며 각 호젤을 해당 뷰로 처리하고 처리된 호젤이 함께 조립되어 홀로그램이 완성된다 [6]. 그러나 이러한 호젤 기반 방법은 일반적으로 주어진 홀로그램 해상도에서 호젤의 수와 각 호젤의 픽셀 수 사이의 트레이드오프 관계로 인해 호젤 수 제한이 되며, 이 호젤

수 제한은 재구성된 3D 이미지의 최대 공간 해상도를 줄인다. 호젤 기반 방법의 또 다른 한계는 위상 불일치인데, 각 호젤의 재구성은 인접 호젤의 재구성과 위상 불일치가 있기 때문에 홀로그램 평면의 연속 파면을 재현할 수 없다.

최근에는 비호젤 기반 CGH 방법이 도입되었다 [7]. 비호젤 기반 CGH 방식은 라이트 필드 데이터의 모든 뷰를 전역적으로 처리하여 호젤 기반 방식의 단점을 해결한다. 3D 물체 표면에 임의의 반송파 또는 위상 분포를 적용할 수 있다는 점도 각각의 특정 응용 분야에 대해 홀로그램을 최적화할 수 있는 또 다른 이점이다. 비호젤 기반 CGH 의 초기 제안에서는 조밀하게 샘플링된 많은 양의 라이트 필드 데이터에 대한 요구 사항이 문제가 되었지만 나중에 더 효율적인 계산 방식이 개발되어 계산 시간이 크게 단축되었다[8].

이러한 장점에도 불구하고 비호젤 기반 CGH 는 단일 색상에 대해서만 시연되었다. 비호젤 기반 CGH 방법은 공간 주파수 영역에서 라이트 필드 데이터의 샘플링 및 조작을 포함해야 하는데, 그 이유는 라이트 필드 데이터에서 각 뷰의 빨강, 녹색 및 파랑 색상 채널은 동일한 시야(FoV) 및 관찰 방향을 공유하지만 파장이 다르면 동일한 광선 방향에 대해 공간

주파수가 달라지므로 서로 다른 공간 주파수 샘플링 그리드를 갖게 된다. 이러한 서로 다른 공간 주파수 샘플링 그리드를 갖는 각 색상 채널을 공통 공간 주파수 샘플링 그리드를 갖도록 하는 처리는 간단하지 않고 효율적이지도 않았다.

본 논문에서는 컬러 비호겔 기반 CGH 를 계산하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 빨간색 채널의 샘플링 간격을 사용하여 녹색 및 파란색 채널의 2 차원 공간 주파수 그리드를 보간한다. 한편, 공간 주파수 범위는 파란색 채널에 의해 설정되고 빨간색과 녹색 채널은 범위에 맞게 제로 패딩된다. 제안된 공간 주파수 그리드 조작은 빨간색 샘플링 간격과 파란색 그리드 범위를 사용하여 정보 손실 없이 효율적인 처리를 보장한다. 제안된 방법을 사용하거나 사용하지 않고 합성된 컬러 CGH 의 재구성을 비교하여 제안된 방법을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 논호겔 기반 CGH 에 대해 살펴본 후, 3 절에서는 이러한 논호겔 기반 CGH 의 샘플링이 파장에 의해 의존된다는 것을 확인하고, 4 절에서는 본 논문에서 제안하는 각 색상 별 샘플링 기법을 설명하고, 5 절에서는 제안한 기법의 성능을 실험을 통해서 확인한다. 마지막으로 6 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

## 2. 논호겔 기반 CGH

논호겔 기반 CGH 기술은 3D 장면의 라이트필드 복소필드 데이터를 합성한다. 이 라이트필드 데이터는  $(t_x, t_y, \theta_x, \theta_y)$  4 차원의 변수를 가지며,  $(t_x, t_y)$ 는 공간적 위치,  $(\theta_x, \theta_y)$ 는 광선의 각도를 나타낸다. 이를 이용해 공간주파수  $(u, v)$ 를 나타내면, 식 (1)과 같이 파장( $\lambda$ )로 표현할 수 있다.

$$u = \frac{\sin \theta_x}{\lambda} \approx \frac{\theta_x}{\lambda}, \quad v = \frac{\sin \theta_y}{\lambda} \approx \frac{\theta_y}{\lambda}, \quad (1)$$

논호겔 기반 CGH 의 라이트필드 홀로그램 합성은 두 단계로 구성되는데, 첫 번째는 공간주파수  $(u, v)$  축에 따라 2 차원 푸리에 트랜스폼을 하여 트랜스폼 된  $(\tau_x, \tau_y)$ 를 나타낼 수 있고 홀로그램 평면의 위치  $(x_c, y_c)$ 와, 임의의 반송파  $W(x_c, y_c)$ 로 합성된 홀로그램  $H(x, y)$ 을 표현할 수 있다.

$$\tilde{L}(t_x, t_y, \tau_x, \tau_y) = \iint L(t_x, t_y, u, v) \exp[-j2\pi(\tau_x u + \tau_y v)] du dv, \quad (2)$$

$$H(x, y) = \iint \tilde{L}\left(\frac{x+x_c}{2}, \frac{y+y_c}{2}, x-x_c, y-y_c\right) W(x_c, y_c) dx_c dy_c,$$

이때, 공간주파수 슬라이스 처리 방법으로  $\tilde{L}(t_x, t_y, \tau_x, \tau_y)$ 의 각  $(\tau_x, \tau_y)$  슬라이스를 반송파  $W$ 와 같이 계산하여, 홀로그램 면에  $(\pm\tau_x/2, \pm\tau_y/2)$ 만큼 대응하여 쉬프트 축적되어 홀로그램을 합성한다.

$$H(x, y) = \iint H_{\tau_x, \tau_y}(x, y) d\tau_x d\tau_y, \quad (3)$$

$$H_{\tau_x, \tau_y}\left(t_x + \frac{\tau_x}{2}, t_y + \frac{\tau_y}{2}\right) = \tilde{L}(t_x, t_y, \tau_x, \tau_y) W\left(t_x - \frac{\tau_x}{2}, t_y - \frac{\tau_y}{2}\right).$$

## 3. 파장 의존성 샘플링 분석

라이트필드의 각 범위, FoV 는 뷰 개수  $(N_{\theta_x}, N_{\theta_y})$ 와 각 피치  $(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y)$ 로 표현될 수 있다  $(FoV_x = N_{\theta_x}\Delta\theta_x, FoV_y = N_{\theta_y}\Delta\theta_y)$ . 이를 라이트필드 전체 샘플 개수로 나타내면, 다음과 같이 표현할 수 있으며  $N_{tx} \times N_{ty} \times N_u (= N_{\theta_x} \times N_v (= N_{\theta_y}))$ , 샘플링 간격 또한  $\Delta u (= \Delta\theta_x / \lambda)$ ,  $\Delta v (= \Delta\theta_y / \lambda)$ 와 같이 표현할 수 있다. 이때, 식 (1)을 이용하여 홀로그램의 최대 회절 각도를 홀로그램 픽셀 피치와 파장으로 표현할 수 있는데,

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{FoV_x}, \quad \Delta y \leq \frac{\lambda}{FoV_y}, \quad (4)$$

이를 이용해 임의의 FoV 에서의 필요한 샘플링 피치와 개수가 파장에 따라 다르다는 것을 알 수 있다.

$$N_x \geq \frac{N_{tx}\Delta t_x}{\Delta x} \geq \frac{N_{tx}\Delta t_x FoV_x}{\lambda}, \quad N_y \geq \frac{N_{ty}\Delta t_y}{\Delta y} \geq \frac{N_{ty}\Delta t_y FoV_y}{\lambda}, \quad (5)$$

한편, 효율적인 계산을 위한 샘플링 조건인  $(\tau_x, \tau_y)$ 의 샘플링 간격을 살펴보면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \tau_x = \frac{1}{N_u \Delta u} = \frac{\lambda}{N_{\theta_x} \Delta \theta_x} = \frac{\lambda}{FoV_x}, \quad \Delta \tau_y = \frac{1}{N_v \Delta v} = \frac{\lambda}{N_{\theta_y} \Delta \theta_y} = \frac{\lambda}{FoV_y}, \quad (6)$$

## 4. 제안된 기법

식과 같이 각도-공간 주파수 관계의 파장 의존성 때문에, 서로 다른 컬러 채널의 라이트필드의 공간주파수  $(u, v)$  범위는 같은 FoV 상에서 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} |u_R| &\leq \frac{FoV_x}{2\lambda_R}, & |u_G| &\leq \frac{FoV_x}{2\lambda_G}, & |u_B| &\leq \frac{FoV_x}{2\lambda_B}, \\ |v_R| &\leq \frac{FoV_y}{2\lambda_R}, & |v_G| &\leq \frac{FoV_y}{2\lambda_G}, & |v_B| &\leq \frac{FoV_y}{2\lambda_B}, \end{aligned} \quad (7)$$

위 조건을 이용해 라이트필드의 데이터 손실없이 컬러 홀로그램을 합성하려면, 단일 공통 홀로그램 픽셀 피치를 설정하여 2 차원 조작을  $(u, v)$ 에 따라 진행해야 한다. 이때, 원래 없었던 영역의 데이터는 제로패딩 된다. 먼저, 홀로그램 픽셀 피치를 정해야 하는데, 서로 다른 컬러의 FoV 를 모두 커버할 수 있는 회절각도를 가진 것으로 해야 한다. 아래의 식을 보면  $\Delta x_B$ 의 값이 가장 작으므로 그림 2(a)와 같이, 공간주파수 도메인에서 가장 넓은 영역을 차지하기 때문에 홀로그램 픽셀 피치는 청색에 해당하는 것으로 기준이 되어야 한다.

$$\begin{aligned} \Delta x_R &\leq \frac{\lambda_R}{FoV_x}, & \Delta x_G &\leq \frac{\lambda_G}{FoV_x}, & \Delta x_B &\leq \frac{\lambda_B}{FoV_x}, \\ \Delta y_R &\leq \frac{\lambda_R}{FoV_y}, & \Delta y_G &\leq \frac{\lambda_G}{FoV_y}, & \Delta y_B &\leq \frac{\lambda_B}{FoV_y}, \\ \Delta x &= \frac{\lambda_B}{FoV_x}, & \Delta y &= \frac{\lambda_B}{FoV_y}, \end{aligned} \quad (8)$$

홀로그래ムの 픽셀피치 설정 후에는 그림 1(b)와 같이 각 컬러 채널에 확장된 제로패딩을 해주면 아래와 같은 식을 얻게 된다.

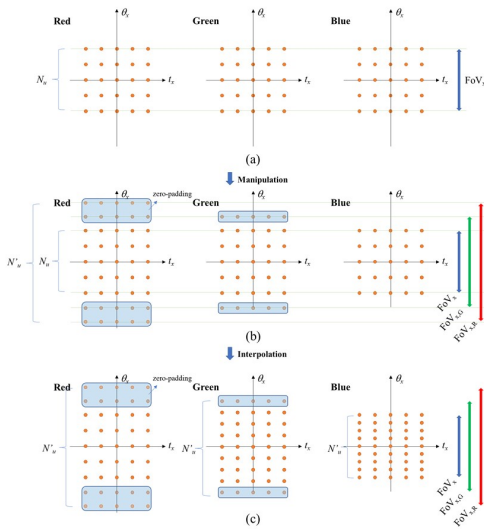


그림 1. 제안된 기법(광선의 각도를 수직 축으로 갖는): (a) 같은 FoV 를 갖는 기존 컬러 라이트필드 데이터, (b) 제로패딩을 적용한 재샘플링, (c) 공간주파수 샘플링 간격으로 보간한 재샘플링.

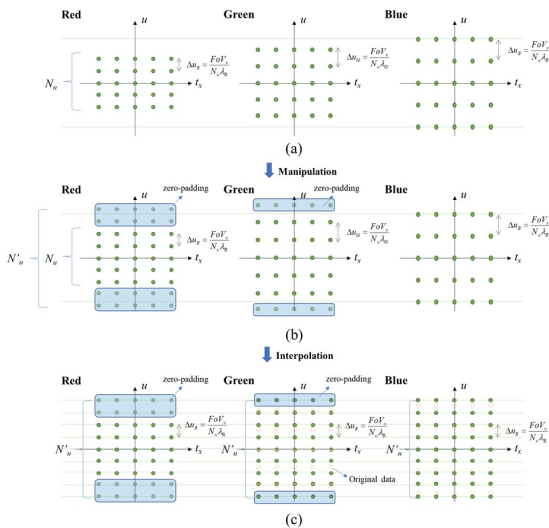


그림 2. 제안된 기법(공간주파수를 수직축으로 갖는): (a) 같은 FoV 를 갖는 기존 컬러 라이트필드 데이터, (b) 제로패딩을 적용한 재샘플링, (c) 공간주파수 샘플링 간격으로 보간한 재샘플링.

$$\begin{aligned} FoV_{x,R} &= \frac{\lambda_R}{\Delta x} = FoV_x \frac{\lambda_R}{\lambda_B}, & FoV_{x,G} &= \frac{\lambda_G}{\Delta x} = FoV_x \frac{\lambda_G}{\lambda_B}, \\ FoV_{y,R} &= \frac{\lambda_R}{\Delta y} = FoV_y \frac{\lambda_R}{\lambda_B}, & FoV_{y,G} &= \frac{\lambda_G}{\Delta y} = FoV_y \frac{\lambda_G}{\lambda_B}, \end{aligned} \quad (9)$$

마지막으로 각 컬러 채널의 라이트필드 데이터를 그림 2(a)와 같이 샘플링 간격이 가장 작은, 적색 컬러의  $\Delta u_R$  로 그림 2(c)와 같이 데이터를 보간해준다.

### 5. 검증 결과

제안된 방법은 다양한 3D 장면의 라이트필드에 대해 컬러 홀로그래మ్을 합성하여 입증하였다. 그림 3 은 서로 같은 크기, 같은 뎀스(-0.377mm)에 위치해 있는 십자가 타겟을 제안된 기법과 제안된 기법이 적용되지 않은 결과를 보여준다. 먼저, 그림 3 의 윗줄과 같이 제안된 기법이 적용되지 않았을 때는 같은 뎀스에 십자가가 있어도 컬러 수차에 의해 서로 다른 뎀스에서 적색, 녹색, 청색이 선명하게 보이며 흰색은 모든 뎀스에서 수차가 발생되는 것을 볼 수 있다. 반대로 그림 3 의 아랫줄과 같이 제안된 기법에서는 -0.377mm 에서 적색, 녹색, 청색, 흰색이 모두 선명하게 보이며, 나머지 뎀스에선 일정하게 흐릿하게 보이는 것을 확인할 수 있다.

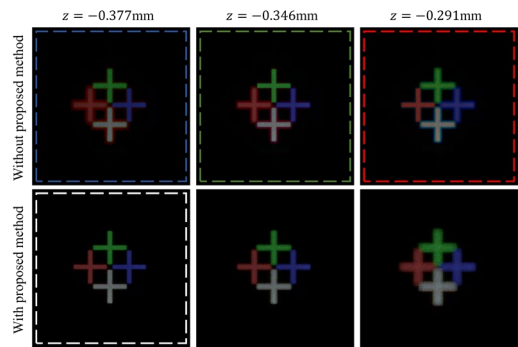


그림 3. 제안된 기법이 적용되지 않은(윗줄), 적용된(아랫줄) 합성된 홀로그래ムの 수치 재구성

### 6. 결론

본 논문은 3D 장면에 대한 라이트필드의 컬러 수차가 없는 논호겔 기반 CGH 합성에 대해 제안하였다. 모든 라이트필드의 컬러 채널은 공통적인 FoV 를 갖지만, 파장의존성에 의해 공간주파수 샘플링 컨디션이 달라져서 컬러 홀로그래మ్ 합성 시, 홀로그래మ్ 픽셀 피치를 공유하는 것이 복잡하게 된다. 제안된 기법은 라이트필드 데이터의 재샘플링을 통해 각 컬러 채널이 같은 샘플링 그리드를 갖게 하고 적절한 세팅을 통해 기존의 정보 손실 없이

컬러 홀로그램을 합성하였다. 제안된 기법은 다양한 3D 장면과 연속적인 3D 개체에 대해 검증이 되었으며 어떠한 수차도 없는 깔끔한 결과를 보여준다.

#### FUNDING

National Research Foundation of Korea (NRF-2017R1A2B2011084)

#### REFERENCES

1. J.-H. Park, "Recent progresses in computer generated holography for three-dimensional scene," *Journal of Information Display* 18, 1-12 (2017).
2. M. Yamaguchi, "Light-field and holographic three-dimensional displays [Invited]," *Journal of the Optical Society of America A* 33, 2348-2364 (2016).
3. R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a handheld plenoptic camera," *Stanford Tech. Rep. CTSR 2005-02* (Stanford University, 2005).
4. J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," *Optics Express* 17, 6320-6334 (2009).
5. N. Chen, Z. Ren, and E. Y. Lam, "High-resolution Fourier hologram synthesis from photographic images through computing the light field," *Applied Optics* 55, 1751-1756 (2016).
6. J. Geng, "Three-dimensional display technologies," *Advances in Optics and Photonics* 5, 456-535 (2013).
7. J.-H. Park and M. Askari, "Non-hogel-based computer generated hologram from light field using complex field recovery technique from Wigner distribution function," *Optics Express* 27, 2562-2574 (2019).
8. J.-H. Park, "Efficient calculation scheme for high pixel resolution non-hogel-based computer generated hologram from light field," *Optics Express* 28, 6663-6683 (2020).