

## 렌즈의 위상 패턴에 따른 무아레렌즈의 초점거리 설계

박성웅, 김영록, 민성욱  
 경희대학교 정보디스플레이학과  
 \*mins@khu.ac.kr

### Design of focal length of Moiré lens according to lens phase pattern

Sungwoong Park, Youngrok Kim, Sung-wook Min  
 Department of Information Display, Kyung Hee University

#### Abstract

Variable range of focal length of Moiré lens is designed to change the phase pattern, which is varifocal lens system using two thin layers with Moiré pattern and suitable to applied to AR/VR system because of the relatively simple structure, large aperture size, and wide variable range. We analyze the change of focal length region according to the phase pattern and verify the design to make the prototype patterns using DOE.

#### 1. 서론

가변 초점 렌즈는 렌즈의 초점이 하나로 결정되는 기존의 렌즈와는 다르게 초점거리를 특정 요인으로 변화 시켜 정량적 조절이 되는 렌즈이다. 가장 대표적인 가변 초점 렌즈는 카메라 줌 렌즈가 있다. 렌즈 사이의 OPL(optical path length)를 물리적으로 조절하는 방법으로 초점을 조절하여, 초점거리의 가용 범위에 따라 시스템의 사이즈가 증가하여, 작은 시스템이 요구되는 곳에서는 사용하기 어렵다. 렌즈 사이의 거리를 극복한 가변 초점 렌즈는 Alvarez 렌즈가 있다. Alvarez 렌즈는 광축과 수직인 면으로의 렌즈의 이동을 통해 기계적으로 오목렌즈와 볼록렌즈를 만들어 주는 형식으로 초점거리의 가용 범위가 제한적이며, 렌즈 사이의 거리는 줄였지만, 결과적으로는 시스템의 크기가 증가하게 된다. 차세대 렌즈로 주목받고 있는 액체 렌즈는 이러한 극성과 무극성 액체를 사용하여, 전기를 인가하여 굴절률을 바꾸는 방식으로 시스템이 작은 크기를 갖지만 어쩌려 크기의 제한이 있다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 무아레 렌즈를 제시한다.

무아레 렌즈는 무아레 현상을 이용한 렌즈로, 무아레 현상이란 두가지 이상의 패턴들이 서로 상호 작용을 하며 새로운

패턴을 만들어내는 현상을 의미한다. 이를 광학적으로 분석하여 특정 위상 패턴을 서로 상호 작용시킨다면, 회전각에 따라 초점거리가 달라지는 FZP(Fresnel Zone Plate)를 형성할 수 있다. FZP 는 고리모양의 원형이 방사되는 패턴으로 한점에서 파동의 회절이 일어날 때, 그 위상을 기록한 것이다. 이때 고리 모양의 간격들로 FZP 의 초점 거리를 역으로 알아 낼 수 있으며, 이는 일반적인 초점을 하나를 같은 렌즈와 일치한 역할을 한다. 이를 Fresnel lens 라고도 부르며 회절 현상으로 광학 소자를 만드는 DOE(Diffractive optic element)의 대표적인 예이다.

본 논문에서는 무아레 렌즈를 DOE 소자로 활용하는 MDOE(Moiré Diffractive optic elements)를 제작하고, 제작을 하기 앞서 MDOE 의 성능을 주는 여러가지 요소 중에서 초점거리의 조절 방법에 대하여 다뤄보도록 한다.

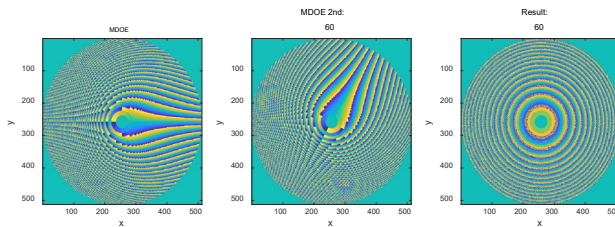
#### 2. 시뮬레이션

본 논문에서 제작하려고 하는 MDOE 에서 사용될 phase 정보를 해석하기 위해서 FZP 패턴이 렌즈의 위상 패턴과 동일하기 때문에, thin lens 의 phase Transformation 을 이용한다.

$$T_{FZP} = \exp(i \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)) = \exp(i \frac{\pi r^2}{\lambda f}) = \exp(i a r^2)$$

$$k = \frac{\lambda}{2\pi} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad a = \frac{\pi}{f\lambda}$$

위의 식은 파수  $k$ 를 파장  $\lambda$ 에 대한 식으로 바꿔주고 중심부로부터의 거리를 반지름  $r$ 로 표현 한 뒤 고정된 상수를  $a$ 로 표현한 식이다.  $T_{FZP}$ 에서 FZP의 초점거리  $f$ 는 하나로 고정되어 정해진 다는 것을 알 수 있다.



$$T_{FZP} = T_1 T_2 = \exp[i a r^2 \phi] \exp[-i a r^2 (\phi - \theta)] = \exp[i a \theta r^2] = \exp[i a' r^2]$$

$$T_1 = \exp(i a r^2 \phi), \quad T_2 = \exp[-i a r^2 (\phi - \theta)]$$

$$f' = \frac{\pi}{a \theta \lambda} = \frac{f}{\theta}$$

이때,  $T_{FZP}$ 의 식에 FZP의 중심에서의 각도에 따른 phase term  $\phi$ 를 추가한 패턴은 Fig 1의 첫번째 패턴과 같으며, 과 같으며 해당 패턴은  $T_1$ 으로 표현이 가능하다.

$T_1$ 의 켈레복소수에 회전각  $\theta$ 만큼 회전시킨 두번째 패턴은  $T_2$ 로 표현한다.  $T_1$ 과  $T_2$ 를 결합하면 회전각  $\theta$ 에 따라 초점거리가 달라지는 새로운  $T_{FZP}$ 를 얻어 낼 수 있다. 이때 새로운 FZP의 초점거리  $f'$ 는  $\phi$ 를 추가 전 FZP의 초점 거리인  $f$ 의 값이 회전각에 따라 반비례하는 꼴로 변화하며 회전각이 선형적으로 증가한다고 가정할 때, 초점거리는 그 역수 꼴로 변한다.

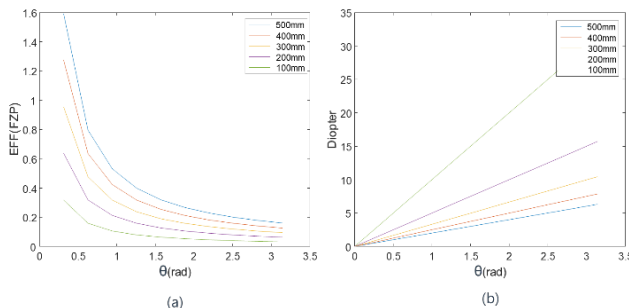


Fig 2 초점거리에 따른 회전 각도에 대한 FZP 변화 왼쪽 (초점거리), 오른쪽(Diopter)

의 값에 따라 Fig 2의 그래프처럼 초점거리가 변하게 된다. 회전 각도를 선형 각도로 움직임 따라 초점거리의 역수 값인 Diopter 단위를 사용하는 것이 결과 값의 선형적 변화에 유리할 것이라고 결론 지을 수 있다. 또한, 초점거리 가용 범위가 연속적이며, 넓어 기존의 가변 초점 렌즈가 갖는 짧은 가용 범위를 극복하는 렌즈가 될 수 있다. 하지만 주로 사용될 초점거리의 영역을 선택하고 각도에 따른 Diopter의 변화가 뚜렷한 초점 거리를 선택하여 제작하는 것이 유리하다.

### 3. 결론

본 논문은 기존의 가변 초점 렌즈의 단점 중, 제한된 초점거리의 가용 범위를 극복하기 위한 방안으로써 무아레 렌즈를 제시하고 FZP를 무아레 패턴을 활용하여 생성한 후, 시뮬레이션을 통하여 초점 거리에 대한 특성을 분석하였다. 무아레 렌즈의 초점거리는 가용 범위가 넓고, 연속적이라는 장점이 있으나 초기 설정하는 FZP의 초점거리에 따라 회전 각도에 따른 초점거리 변화가 다르니 제작 전, 이를 고려하는 것이 중요하다.

이러한 특성들을 이용하여, 무아레 렌즈를 회전형 피에조 모터와 결합하여 사용하여 향후 projection type의 3차원 디스플레이 장치로서 활용도 가능하다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1A049714).

#### 참고문헌

[1] Bernet, S., & Ritsch-Martel, M. (2008). Adjustable refractive power from diffractive moiré elements. Applied Optics, 47(21), 3722-3730. <https://doi.org/10.1364/AO.47.003722>

[2] Guoqiang, L. (2010). Adaptive lens. In Progress in Optics (Vol. 55, Issue C). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53705-8.00004-7>

[3] Bernet, S., Harm, W., & Ritsch-Martel, M. (2013). Demonstration of focus-tunable diffractive Moiré-lenses. 21(6), 4317-4322.