

## 기하위상 렌즈의 개발 이슈 및 이의 광파 변조 응용

\*이태현 \*이수원 \*\*홍기훈 \*\*최기훈 \*김학린

\*경북대학교 전자공학부

\*\*디지털홀로그래피연구실, 한국전자통신연구원

\*rineey@knu.ac.kr

## Technological development issues on geometric phase lens and its application of optical modulation

\*Lee, Tae-Hyun \*Lee, Su-Won \*\*Hong, Keehoon \*\*Choi, Kihong \*Kim, Hak-Rin

\*School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

\*\* Digital Holography Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

## 요약

최근, 광소자에서 공간 변조되는 wavefront profile 특성을 광소자의 표면 단차 변화 없이 단일 두께 박막 상에서 자유로이 구현할 수 있는 기하위상 홀로그램 (geometric phase hologram) 기반의 optical component에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 이를 이용해 제작된 기하위상 렌즈 (geometric phase lens)는 dynamic phase의 공간적 차이에 의해 구현되던 기존 bulk optics 기반의 lens 대비 초박형으로 제작이 가능한 파장 선택적 flat optics 기술로써, 다초점 및 경량화를 요구하는 차세대 디스플레이 기술 (augmented reality 또는 AR, mixed reality 또는 MR) 및 광파변조 및 제어를 요구하는 홀로그래픽 카메라 분야에 대한 응용처로 많은 주목을 받고 있다. 이에 본 논문에서는 해당 기하 위상렌즈에 대한 원리 및 이에 따른 개발이슈 및 해결법에 대해 연구 하였으며, 이에 대한 응용처로 기하위상 렌즈의 편광에 따른 이중초점특성을 이용해, 기존 단일 초점 형성이 가능한 AR기기 대비, 다초점 형성이 가능한 switchable dual-depth 3D AR device를 compact한 모듈과 함께 구현하였다. 또한, 기하위상렌즈의 광파 변조 및 분리특성을 이용한 기하위상 렌즈기반의 자가간섭 홀로그래픽 시스템 (GP-self-interference incoherent digital holographic, GP-SIDH)에 편광 이미징센서 적용과 함께 맞춤형 설계/제작된 기하 위상렌즈를 적용함으로써, 기존 GP-SIDH 시스템대비 안정적으로 실시간 복소 홀로그램 획득이 가능한 실시간 공간영상정보 획득용 GP-SIDH을 동영상 프레임으로 구현하였다.

## 1. 서론

기하 위상 렌즈 (geometric phase lens)는 홀로그래픽 편광 간섭 패턴을 이용해 얇은 기록 매질상에 빛의 wavefront를 기록하는 광 소자로서, 기존 dynamic phase 차이에 의해 구현되는 두꺼운 광학소자 (Lens, Prism, Axicon)대비 초박형으로 제작 가능한 flat optics 기술이다.[1.2]. 기하 위상 렌즈는 소자 통과 시, 빔의 특성은 편광 간섭 패턴을 따라 공간적으로 정렬된 복굴절 소재의 광축 분포에 따라 발생하는 geometric phase 차이에 의해 빔이 변조되며, 특히 복굴절 소재층의 절대위상지연량이  $\lambda/2$  조건을 만족할 경우, 최대 광효율 (100%)로 위상제어가 가능하다는 장점을 가진다. 이러한 공간적인 광축 분포와 함

께, 절대 위상 지연량이  $\lambda/2$ 를 가지는 기하 위상렌즈를 통과 시, 입사된 모든 광파는 그 편광 방향 (좌원 또는 우원)에 따라, 광축의 각도 ( $\theta$ )의 2배 ( $+2\theta$  또는  $-2\theta$ )의 위상 지연을 가진 채 변조 되는 편광 선택적 특성을 가진다. 따라서 공간적 광축의 프로파일을 볼록 렌즈 파면 프로파일의 절반 ( $\theta = (\exp[-j\pi(\lambda f^{-1}(x^2+y^2))]/2)$ ) 형태로 형성할 경우, 해당 기하 위상 렌즈 소자는 입사된 원편광 상태에 따라 오목렌즈 ( $+2\theta = (\exp[-j\pi(\lambda f^{-1}(x^2+y^2))])$ ) 또는 볼록렌즈 ( $-2\theta = (\exp[j\pi(\lambda f^{-1}(x^2+y^2))])$ )로 편광선택적 렌즈 기능을 하게 된다. 즉, 기하위상 렌즈는 높은 광효율과 함께, 기존 bulk optics 기반의 렌즈 대비 초박형으로 구현이 가능함과 동시에, 광파 변조가 가능한 특성을 가진다. 이러한 기하 위상 렌즈는 augmented reality (AR), mixed reality (MR)와 같은 차세대 디스플레이

레이 시스템에서 bulk 형 광소자들을 대체 하는 기술 및 광파의 변조 및 편면 분리를 요구하는 홀로그래픽 카메라 분야에 적용되고 있다.

## 2. 기하위상렌즈의 원리 및 개발 이슈

### 2.-1 광학 원리

기하 위상 렌즈의 집광 효율은 광학적 이방성 특징을 가지는 복굴절 소재의 파장에 따른 위상 지연 정도에 따라 결정 나며, 복굴절 소재층의 절대 위상지연량이  $\lambda/2$  (half retarder) 조건을 만족할 시, 각각 우원 및 좌원 편광을 가지는 입사광에 대해 100%의 높은 집광 회절 효율을 나타내게 된다. 반대로, 제작된 기하위상렌즈의 위상 지연값이 half retarder 조건에서 벗어날 경우, 또는 광축 정렬도 저하에 따른 이상적 렌즈 파면 프로파일에서 벗어날 경우, 집광 효율은 1<sup>st</sup> order 이외의 0<sup>th</sup> order 회절 특성 (DC term)이 나타나 저하 된다. 임의의 입사 편광비에 대한 기하위상렌즈 투과 후, 편광 상태 및 효율 특성은 다음의 수식 (1) ~ 수식 (3)으로 기술할 수 있다.

$$e^{i\delta_m} |\chi_{in}\rangle \xrightarrow{GPH} \sqrt{\eta_+} e^{i(\delta_m+2\Phi)} |\chi_+\rangle + \sqrt{\eta_-} e^{i(\delta_m-2\Phi)} |\chi_-\rangle + \sqrt{\eta_0} e^{i\delta_m} |\chi_{in}\rangle. \quad (1)$$

$$\eta_0 = \cos^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (2)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1}{2} [1 \mp S'_3] \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \quad (3)$$

이때,  $x_{\pm}$  은 투과광의 편광 상태 (우원 또는 좌원 편광)를 나타내며,  $\eta_0$ 은 0<sup>th</sup> order 회절 효율을 나타낸다. 수식 (2)와 수식 (3)에서 볼 수 있듯이, 입사된 빔이 최대효율을 가지는 오목 또는 볼록 렌즈 형태로 이상적으로 동작하는 기하위상렌즈 구현을 위해서는 이상적 렌즈 광배향 프로파일 분포와 함께 제작된 광학적 이방 매질층의 retardation 양이 half retarder ( $\Gamma=\pi/2$ ) 조건을 만족하여,  $\eta_0 = 0$  그리고  $\eta_{\pm 1} = 1$  & 0 (or 0 & 1)이 되어야 함을 알 수 있다. 기하 위상 렌즈에서 광축 분포된 half retarder층을 형성함에 있어 쓰일 수 있는 복굴절 소재로는 액정 소재와 함께 광경화성 액정 (reactive mesogen, RM) 소재가 있다.

### 2.-2 기하위상렌즈 개발 이슈

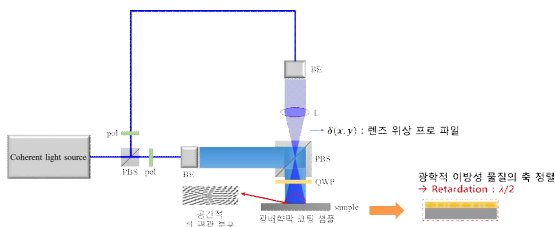


그림 1. 홀로그래픽 편광 간섭 기법을 통해 제작된 기하위상렌즈 광학계 모식도.

half retarder층의 공간적 광축 분포 제어를 위해 가장 대표적인 기하위상렌즈 제작 방식으로는 홀로그래픽 편광 간섭 (polarization interference) 광학계를 이용해 간섭 편광패턴을 광배향막이 도포된 얇은 기록 매질 상에 형성한 뒤 복굴절 특성을 가지는 액정 또는 광경화성 액정을 공간적 분포를 가지도록 배향하는 방식으로 이뤄진다. 그림 1.은

본연구실에 홀로그래픽 편광 간섭 기법을 이용해서 제작된 기하위상렌즈의 광학계 모식도를 보여준다. 그림1에서 볼 수 있듯이, coherent light source에서 나온 광파는 polarization-beam splitter (PBS) 단을 거친 뒤 P-polarization 과 S-polarization을 가지는 광파로 분리된다. 이때 분리된 광파 중 S-polarization에 해당하는 광파는 렌즈를 통과한 뒤 렌즈 위상 프로파일을 형성하게 되 된다. 이후 각 분리된 광파는 다시 PBS 와 quarter-wave plate (QWP)를 거치며, 광 배향막이 코팅된 샘플 상에 합쳐져 선편광 모듈레이션이 형성 및 기록 되게 된다. 이후, 기록 된 광 배향막 소자에 광경화성 액정 소재는 half retarder를 만족할 수 있는 두께 만큼 정렬/코팅 되며, 이후 정렬/코팅된 광경화성 액정 소재를 UV 빔조사를 통해 경화된다. 복굴절 소재의 축 정렬에 따라 제작되는 기하위상 렌즈 소자는 사용되는 해당 복굴절 소재의 공간적 광축 패턴을 위해서는 매우 높은 공간 해상도를 가지는 광 배향막과 함께, 광학적으로 배향축이 안정적으로 공간 패턴될 수 있는 액정 및 광경화성 액정 소재와 이의 정밀한 광 패턴 기술이 요구된다. 특히, 기하 위상렌즈의 렌즈 직경이 증가될 경우, 기존에 사용되는 홀로그래픽 간섭 기반의 광학계를 사용 시 고가의 고출력 레이저를 사용해야 하며, 기하 위상 렌즈 특성상 가장자리에서의 회절 격자 주기 또한 급격하게 감소된다. 짧은 회절 격자 주기는 가장자리에서의 불안정적인 배향 패턴이 형성되는 문제점을 유발하며, 이에 따라 대구경을 가지는 기하 위상 렌즈 제작을 위해선 소재 및 공정 최적화를 통한 액정 또는 광경화성 액정 층의 안정적 광 배향 기술이 요구되며, 저가의 저출력 레이저 사용을 위해, 시분할 기술을 통한 scanning 기법의 광학계가 필수적으로 연구되어야 한다. 그림 2는 본연구실에서 제안하는 rotation 기반의 scanning 광학계에 대한 이미지를 보여준다.

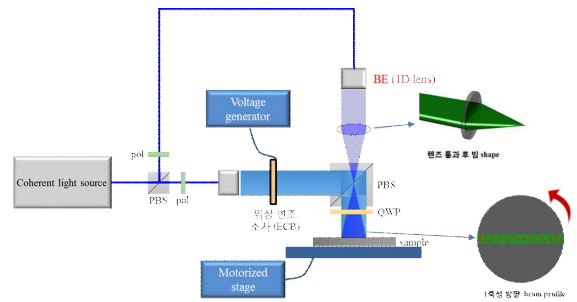


그림 2. 본 연구팀에서 제작하는 rotation 기반의 scanning 회전 광학계.

그림 2에서 제시된 바와 같이, 해당 광학계는 기존의 기록 광학계와 달리 1D 타입의 cylindrical lens를 beam expander (BE) 로 이용하여, line shape의 beam profile을 형성한다. 이후 2D lens를 통과한 뒤 sample 상에 편광 맵이 형성되어 기록되며, 이를 회전 광학계로 sample을 rotation 하며 scanning 하는 기록 광학계이다. 해당 기록 광학 방식은 제작되는 기하위상렌즈의 구경을 증가하더라도 단위면적당 입사되는 기록광 에너지 저하를 상대적으로 피할 수 있어, 고효율 대구경 기하위상렌즈 제작에 좀 더 최적화된 방식이라고 판단된다. 또한, 해당 광학계는 전압에 따라 입사되는 광파의 위상을 전환 할 수 있는 액정 기반의 위상 변조 소자 (ECB cell)가 추가 된다. 이는 rotation 전 기록된 광 배향 영역과 rotation 후, 기록된 광 배향 영역이 서로 겹치는 경계면 부근에서 비연속적인 광 배향 패턴이 형성되기 때문이며, sample

을 rotation 시킨 후 광배향할 때 위상 변조 소자에 전압을 가해 두광파의 광 경로를 정밀하게 조절시, 서로 겹치는 경계면에서 연속적인 광 배향 프로파일이 형성 되도록 조절이 가능하다. 또한 수식(2)와 수식(3)에서 확인 가능하듯이, 기하위상 렌즈는 특정 파장에 대해서만 최적의 효율을 가지는 파장 의존성 (wave-length dependence) 특성을 가지며, 일반적인 렌즈와 마찬가지로 파장에 따라 초점거리가 달라지는 chromatic 특성을 가진다. 따라서 가시광 대역의 범위를 요구하는 기술에 적용되기 위해서는 파장의존성 및 chromatic 특성이 없는 기하위상 렌즈에 대한 연구가 필수적이다.

### 3. 편광선택적 기하위상 렌즈 기반 switchable dual-depth 3D AR 시스템

본 연구실에서는 세종대 최희진 교수 팀과의 협업으로 기하위상 렌즈의 편광 선택적 특성을 이용해, 3D AR 영상의 depth 전환이 가능한 기하위상 렌즈 기반 switchable dual-depth 3D AR device를 구현하였다.[3] 앞서 설명하였듯이 기하위상 렌즈는 편광의 handedness (좌원 또는 우원)에 따라, 볼록렌즈 또는 오목렌즈로 동작하는 특성을 가진다.

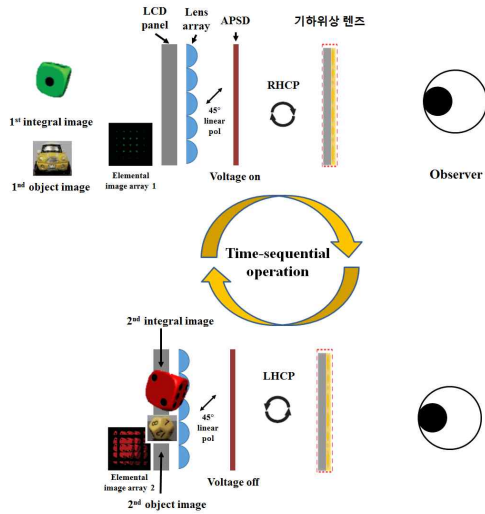


그림 3. Switchable dual-depth 3D AR device의 동작 원리

그림 3은 switchable dual-depth 3D AR 시스템의 동작원리 및 구조를 보여준다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 기하위상 렌즈를 AR 광학계에 적용 시, dual-depth를 가지는 3D AR image (그린, 레드 영상)를 구현할 수 있다. LCD panel과 앞단의 lens array는 순차적으로 그린용 이미지 (elemental image array 1)와 레드용 이미지 (elemental image array 2)를 형성한 뒤 이에 해당하는 적분 영상 (integral image)을 생성하며, 이때 생성된 적분 영상은 볼록렌즈 또는 오목렌즈로 작동하는 기하 위상 렌즈와 편광 전환 장치 (active polarization switching device, APSD) 의해, 설계된 depth 지점으로 전달된다. 또한 레드와 그린에 해당되는 적분영상을 각각 원하는 depth 지점에 겹침 없이 전달하기 위해, lens array와 기하 위상 렌즈 사이에 입사된 선편광 (linear pol : 45°)을 전압에 따라 우원편광 또는 좌원편광으로 전환할 수 있는 편광 전환 장치 소자가 LCD 패널과 동기화 되어 시분할 작동하며, 이에 따라 형성된 각각의 적분 영상은 기하 위상 렌즈에 의해 볼록렌

즈와 오목렌즈로 각각 이미징 된다. 그림 4(a)는 기하위상 렌즈 기반 switchable dual-depth 3D AR device 구현을 위한 실험 set-up을 보여준다. 해당 실험에서 1<sup>st</sup> integral image (그린 이미지)와 2<sup>nd</sup> integral image (레드 이미지)는 각각 실물체인 1<sup>st</sup> object (450mm)와 2<sup>st</sup> object (290mm)와 동일한 depth를 가지도록 설계되었다. 그림 4(b)는 1<sup>st</sup> object에 초점을 맞췄을 때 그리고 그림 4(c)는 2<sup>st</sup> object에 초점을 맞췄을 때 각각 캡처된 이미지이다. 각각의 물체에 초점을 맞췄을 때 그에 해당되는 depth 지점의 AR 영상 (1<sup>st</sup> integral image, 2<sup>st</sup> integral image)과 그 시차 영상이 명확하게 관찰됨을 확인할 수 있다. 반면에 촬영된 초점지점에 해당되지 않는 영상은 흐려지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)와 4(c)에서 각 형성된 AR 영상의 시야각은 각각 6° 그리고 20°로 형성되었다. 해당 실험에서 사용된 기하위상 렌즈의 편광 선택적 이중 초점 특성과 단일 박막위에 초박형으로 구현될 수 있는 flat optics 특성에 따라, 본 논문에서는 compact한 모듈을 가지는 switchable dual-depth 3D AR 시스템을 구현 하였으며, 기존 단일 depth를 가지는 AR 기기 대비 AR image의 depth를 160mm 까지 향상시킬 수 있었다. 해당 시스템은 compact한 모듈을 요구하는 다양한 AR 기기에 응용처로 사용될 것으로 기대 된다.

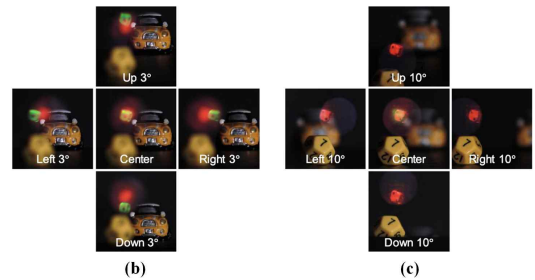
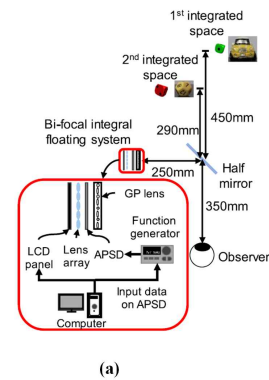


그림 4. (a) 기하위상 렌즈 기반 switchable dual-depth 3D AR device 구현을 위한 실험 셋업. 기하위상 렌즈 적용을 통해 형성된 AR 영상에 대한 초점 이미지 : (b) 1<sup>st</sup> object image 초점, (c) 2<sup>nd</sup> object image 초점.

### 4. 광파응용 기하위상 렌즈 기반 자가 간섭 홀로그래픽 카메라 시스템

자가 간섭 홀로그래픽 카메라 기술은 자연광원만을 이용해, 홀로그램 이미지를 취득할 수 있는 기술이다. 이때 자가 간섭계를 위해선 입사하는 파면을 분리 및 변조를 시킨 뒤 상호 간섭을 위해 다시 결합할 수 있는 장치를 필요로 한다. 하지만 해당 장치를 구현하기 위한 기존의 홀로그래픽 카메라 시스템은 복잡한 광학계 및 bulky한 광 모듈이 요구

되며, 이에 따라 간섭패턴의 안전성 또한 저하되는 문제점을 가진다. 기하 위상 기반의 홀로그래픽 카메라 시스템 (GP-SIDH)은 파면분리 및 간섭/변조, 그리고 공간적 위상변이가 모두 기하위상렌즈에 의해 이뤄지는 시스템으로써, 기존 광학계 대비 compact한 모듈 및 간섭 패턴의 안전성을 증가시킬 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 기존 홀로그래픽 카메라와 동일하게 GP-SIDH시스템은 복소 홀로그램을 획득하기 위해, 4번의 순차적 간섭무늬 이미지 획득이 요구되며 이에 따라 실시간 이미지 획득이 불가능하다는 단점을 가진다. 또한 순차적 간섭무늬 획득을 위해, 사용되는 motorized polarizer의 진동에 따른 노이즈가 발생하는 문제점을 가지며, 현재 GP-SIDH 시스템에 최적화되어 제공되는 기하위상 기반 렌즈가 시중에 전무하다. 따라서 본 연구실에서 GP-SIDH용 맞춤형 기하위상렌즈를 자체 제작하였으며, 이와 함께 경희대 민성욱 교수 연구팀과 협업으로 이미지 센서 화소 상에 metal-wire-grid polarizer 형태로 투과축이 패턴된 편광이미지 센서를 GP-SIDH 시스템에 적용하여 한번의 촬영 통해 획득된 단일 간섭 무늬만으로 하나의 복소 홀로그램 획득이 가능한 실시간 공간영상정보 획득용 GP-SIDH 시스템을 구현하였다. 그림 5은 본 연구실에서 편광간섭계를 이용하여 제작된 기하 위상 렌즈의 광경화성 액정층 배향 상태를 측정한 편광 현미경 이미지가 제시되어 있다. 기하 위상 렌즈의 공간적 광배향 축 방향에 따라 dark/bright 이미지가 잘 확인됨을 알 수 있으며, 이에 따라 이상적인 위상 프로파일이 형성되었음을 확인 할 수 있다. 그림 6는 본 연구팀에서 자체 제작한 기하 위상 렌즈와 함께 경희대 민성욱 교수 연구팀과 협업으로 개발한 GP-SIDH 시스템을 보여준다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이, 기존의 GP-SIDH 시스템에서 사용되는 motorized polarizer가 제거 되었으며, 이미지 센서 화소 상에 metal-wire-grid polarizer 형태로 투과축이 패턴된 편광이미지 센서 (polarized image sensor)를 장착하였다. 이에 따라, 각 편광 이미지 센서에 획득된 이미지는 기존의 방식으로 획득된 순차적 간섭무늬 이미지를 한번에 획득할 수 있으며, 획득된 간섭 무늬들을 이용해 하나의 복소 홀로그램 획득이 가능하다. 또한, 한번의 촬영만으로 하나의 복소홀로그램 획득이 가능하며, 기계적으로 움직이는 motorized polarizer 제거를 통해 높은 프레임의 영상을 일상적으로 존재하는 진동 조건에서도 홀로그램 촬영이 안정적으로 이루어 질 수 있다는 장점을 가진다. 그림 7은 해당 GP-SIDH 시스템을 이용해 촬영된 복소 홀로그램 이미지를 numerical reconstruction을 이용해 복원한 이미지이며, 한번의 촬영만으로 복원된 이미지가 잘 재생되었음을 확인 할 수 있다. 해당 연구에서 제안하는 GP-SIDH 시스템은 실시간 정보 획득을 요구하는 다양한 홀로그래픽 카메라에 대한 시스템에 적용 될 수 있을 것으로 기대 된다.



그림 5. 본 연구팀에서 제작된 GP lens의 편광 현미경 이미지 및 배향 특성 분석 이미지.

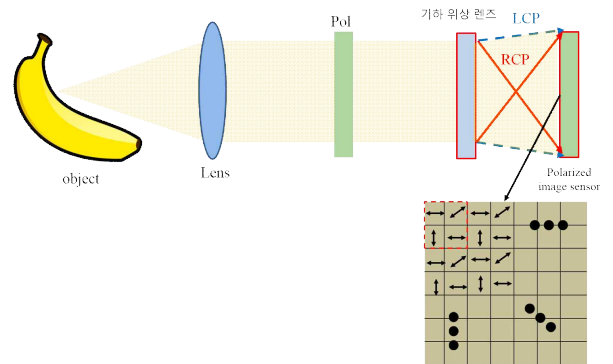


그림 6. 본 연구팀과 경희대 민성욱 교수팀이 compact module 형태로 공동 개발한 GP-SIDH 시스템.



그림 7. 해당 GP-SIDH 시스템을 이용해 복원한 홀로그램 이미지.

### 사사

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-2020-00019, 홀로그램 영상 서비스를 위한 Holo-TV 핵심 기술 개발)

### 참고문헌

- [1] J. Kim et al., "Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts," *Optica*, **2**, 958 (2015).
- [2] K. Gao et al., "High-efficiency large-angle Pancharatnam phase deflector based on dual-twist design," *Opt. Express*, **25**, 6283 (2017).
- [3] M. Park et al., "An Augmented-Reality Device With Switchable Integrated Spaces Using a Bi-Focal Integral Floating Display," *IEEE Photonics J.*, **11**, 8 (2019).
- [4] K. Choi et al., "Achromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens," *Opt. Express*, **26**, 16212 (2018).