

자가간섭 디지털 홀로그래피 기술

□ 민성욱, 최기홍 / 경희대학교

요약

자가간섭 디지털 홀로그래피는 기존의 홀로그래피 기술과 달리 비간섭 광원을 이용해 홀로그래프를 취득할 수 있는 기술이다. 자가간섭계는 입사한 파면을 분리하고 변조시킨 뒤 다시 상호 간섭이 가능하게 합쳐주는 장치를 필요로 한다. 지금까지 발표된 관련 연구들은 모두 파면의 분리 방식, 즉 공간적 분리와 편광 상태에 따른 분리 방식으로 나눌 수 있다. 시스템의 원리와 대표적인 두 가지 시스템을 소개하고, 이어서 필자의 연구실에서 제안한 기하학적 위상을 이용한 자가간섭 디지털 홀로그래피 기술을 다룬다.

1. 서론

가상현실, 증강현실, 삼차원 텔레비전 등을 자주 즐기거나 관련 업계에 종사해서, 실감형 미디어 기술 혹은 콘텐츠에 친숙한 사람들은 아마도 동의할 것이다. 아무리 뛰어난 콘텐츠를 즐기고, 그 어떤

미디어 재생 장치를 만들어도, 시중에서도 구할 수 있는 충전연색의 아날로그 홀로그래프를 보고 있노라면 이것을 자연스럽게 움직이도록 만드는 게 궁극의 목표임을 말이다. 현재 기술로는 다소 무리가 있다 하더라도 아날로그 홀로그래프의 시청 성능에 근접하는 디지털 홀로그래프 재생장치 개발을 위해 지속적으로 많은 연구자들이 지금까지 그래 왔듯이 열정적으로 관련 기술 개발에 뛰어든 것이다.

디지털 홀로그래프 재생 장치의 발전을 위해, 이에 발맞춰 디지털 홀로그래프 콘텐츠 제작 및 생성 기술 역시 함께 주목을 받아야 할 필요가 있다. 많은 연구자들이 역시 이를 위해 힘을 쏟아왔다. 지금까지는 주로 스테레오 카메라, 직접 영상법, 또는 Time-of-flight 카메라 등 삼차원 정보 기록이 가능한 시스템들을 이용해 삼차원 장면을 찍고 이를 홀로그래프로 변환하거나, 처음부터 컴퓨터 모델링으로 만들어진 삼차원 정보를 홀로그래프로 변환하

는 등의 제작 방법을 이용했다. 물론, 홀로그래프 재생 장치에 적용 가능한 홀로그래프 촬영 시스템들도 많이 소개되었다. 하지만 지금까지 발표된 대부분의 홀로그래픽 촬영 기법은 한 가지 제약조건을 가지고 있다. 바로 광원으로 시간 및 공간 가간섭성이 있는 인공적인 광원인 레이저를 사용한다는 것이다. 우리가 일상적인 목적의 카메라를 방 안에서 특수한 조명만을 이용해 비춘 물체를 찍는데 사용하지 않듯, 미래 홀로그래프 영상 취득을 위해서는 레이저 같은 특수 조명을 전제로 하는 카메라를 벗어나 다양한 광원, 심지어 햇빛 아래에서도 삼차원 공간 광정보를 취득할 수 있는 홀로그래픽 카메라가 개발되어야 한다.

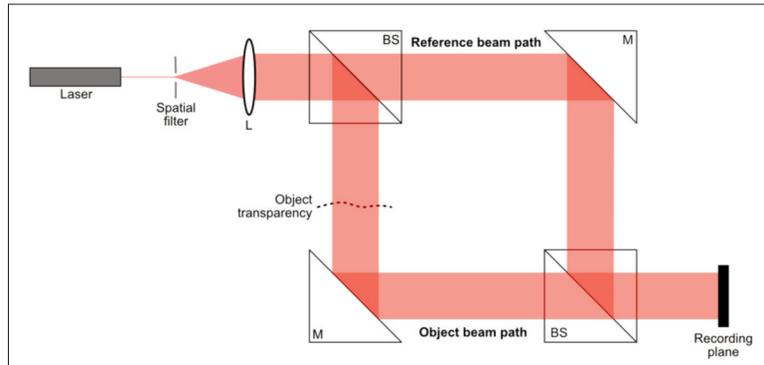
홀로그래프 데이터는 빛의 진폭과 위상을 함께 가지고 있으며, 홀로그래프 기록을 위해서는 이 두 광정보를 모두 기록하기 위해 빛의 간섭을 응용한다. 간섭은 입사각, 곡률 등의 서로 다른 정보를 가진 두 빛이 관찰면에서 만나 일어난다. 두 빛의 속성을 달리하기 위해 전통적인 간섭계는 두 개의 채널을 가지고 있다. 레이저의 경우 공간 및 시간 가간섭성이 높은 광원이기 때문에, 간섭계를 제작할 때 시스템 설계의 제약이 그리 크지 않지만, 가간섭성이 매우 낮은 일반 광원 조건에서는 두 개의 채널의 길이가 불과 수 마이크로미터 내로 일치해야 간섭이 가능하다. 이러한 설계 조건으로 인해 기존의 홀로그래픽 간섭계가 다양한 환경에서 안정된 성능을 내기가 매우 까다롭다. 이를 극복하고자 등장한 기술이 자가간섭이다. 그리고 이 자가간섭 기술을 응용해 홀로그래프 영상 취득을 하는 기술이 자가간섭 디지털 홀로그래피 기술이다. 이 글에서는 상기한 바와 같이 레이저를 사용할 수 없는 실험실 외부에서 홀로그래프 취득을 할 수 있는 자가간섭 디지털 홀로그래피 기술에 대해 소개한다.

이어지는 장에서는 기존 레이저 광원 기반 홀로그래픽 간섭계와 비교해 자가간섭을 통한 홀로그래프 기록이 어떻게 가능한지를 소개하고, 이를 위한 조건, 그리고 부수적으로 필요한 기술을 설명한다. 그리고 여러 연구자들로부터 소개된 다양한 자가간섭 디지털 홀로그래픽 기록 시스템을 소개한다. 마지막으로 필자의 연구실에서 중점적으로 다루고 있는 기하학적 위상을 이용한 자가간섭 디지털 홀로그래프 기록 시스템에 대해 설명한 뒤, 글을 요약하며 마무리한다.

II. 홀로그래프의 기록

1. 기존 방식

광파의 진폭과 위상 정보를 기록하는 것이 홀로그래프의 기록이며, 이를 이용해 다시 공간상에 광정보를 재생하는 것이 홀로그래프의 재생이다. 현 기술 수준에서는 가시광 영역대의 광파의 파장을 진폭과 위상을 구별해 기록하기가 힘들다. 따라서 간접적으로 이를 기록하기 위해 두 광파의 간섭을 이용한다. 알고 있는 광파의 정보를 찍고자 하는 물체로부터 발산된 광파와 함께 간섭을 일으키고, 이로 인해 얻어진 광파의 세기 분포, 즉 간섭무늬를 통해 물체의 광정보를 해석해 내는 것이다. 이때, 알고 있는 광파는 참조광, 그리고 알아내고자 하는 광파는 물체광으로 불린다. <그림 1>은 홀로그래프 기록을 위한 전통적인 마이켈슨 및 마하 켄더 간섭계를 기반으로 구축된 시스템의 도해이다. 광원에서 출발한 광파는 파면 분리기(BS, Beam splitter)에 의해 두 방향으로 나뉜다. 일반적으로 평행광 상태로 간섭계에 입사된다. 하나의 광파는 변조 없이 간섭계의



〈그림 1〉 마하젠더 간섭계 기반의 홀로그래프 기록 시스템 도해

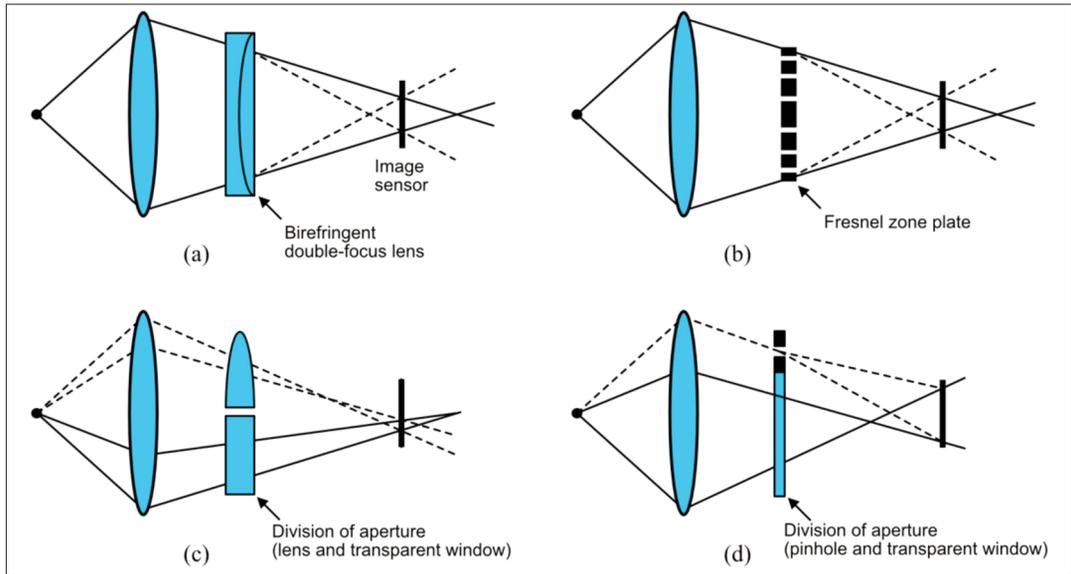
출력단까지 진행하는 반면, 다른 광파는 물체를 통과하면서 혹은 반사되면서 파면이 변조된다. 이후 출력단에서 두 광파가 다시 합쳐진 뒤 기록면에서 간섭을 일으켜 특유의 빛의 세기 정보가 담긴 무늬가 기록된다.

서론에서 언급했듯이, 가간섭 거리가 짧은 광원을 이용해 간섭무늬를 얻고자 한다면 구축된 간섭계의 각 채널이 거의 완벽하게 동일한 광 경로를 가져야 한다. 가간섭 거리는 광원의 중심 파장 제곱에 스펙트럼 폭을 나누어 계산한다. 일반적인 LED의 경우 가간섭 거리가 10~20 μm 임을 감안하면, 더욱 다양한 일반 광원의 가간섭 거리는 수 마이크로미터 미만일 것임을 짐작할 것이다. 투과형 현미경 샘플을 찍을 때는 두 채널의 광 경로를 동일하게 만드는데 무리가 없지만, 반사형 물체를 찍을 경우에는 물체광이 물체에 도달한 뒤 간섭계로 들어오는 경로를 참조광과 동일하게 맞춰줘야 간섭무늬를 얻을 수 있다. 이는 현실적으로 어려운 일이고, 다양한 조건에서의 활용이 제한된다. 이러한 제약 조건을 극복하기 위해 1960년대 레이저의 발명 이후 줄곧 홀로그래프 기록에는 가간섭 거리가 긴 레이저가 이

용되었다. 수 마이크로미터 단위의 물체, 혹은 그보다 큰 소품 등 촬영 범위가 크지 않을 경우 레이저의 이용이 큰 문제가 없지만, 방 안의 풍경, 야외 풍경 등 더 큰 범위를 찍고자 한다면 레이저로 해당 범위를 골고루 조사하기란 쉽지 않을 것이다. 또한 사람을 찍고자 할 때는 안구에 대한 레이저의 위험성이 크고 작게 문제가 된다. 따라서 홀로그래프 취득을 위한 범용 카메라가 개발되기 위해선 광원의 제약조건이 비교적 완화되는 구조를 택해야 한다.

2. 자가간섭

자가간섭(self-interference)은 입사된 물체광을 둘로 나누고, 서로 달리 변조시킨 뒤 간섭시키는 방법으로, 참조광을 위한 채널이 별도로 필요하지 않다. 물체광을 둘로 나눈 뒤 변조시키는 임의의 부품을 파면 분리/변조기라 칭하겠다. 물체는 스스로 발광하거나 반사 및 산란에 의해 각각의 구면파를 발산하는 물체점들의 집합으로 간주할 수 있다. 한 물체점에서 특정 시점에서 발산된 구면파는 자가간섭계로 조사된다. 이후 파면 분리/변조기에 의해 둘로



〈그림 2〉 다양한 자가간섭 디지털 홀로그래픽 시스템 개념도[1]

나뉘고 서로 다른 곡률로 변조된다. 이후 기록면까지 도달한 뒤 두 광파는 간섭을 일으킨다. 광원의 가간섭 거리가 짧아도 자가간섭의 경우 어느 한 시점의 특정 지점에서 출발한 광파와, 이 광파의 쌍둥이 광파가 거의 비슷한 시공간을 거쳐 기록면에 도달하기 때문에 상호 가간섭성이 존재한다. 〈그림 2〉는 이러한 자가간섭의 원리를 이용한 홀로그램 기록 시스템의 초기 개념도를 보여준다[1]. 〈그림 2〉는 다양한 파면 분리/변조 기법들을 보여준다. 제안된 당시에는 단지 콘셉트에 지나지 않았지만, 세월이 흐르고 다양한 광전자소자가 개발되면서 여러 자가간섭 홀로그래픽 취득 시스템들이 제안되었다.

자가간섭 홀로그래피 기술은 얻어진 홀로그램의 형태에 따라 프레넬(Fresnel)과 푸리에(Fourier) 형태로 구분할 수 있다. 여기에서는 두 구면파의 간섭으로 나타나는 프레넬 홀로그램에 대해 서술한다. 모든 소자가 평행하게 배치된 inline 혹은 on-axis

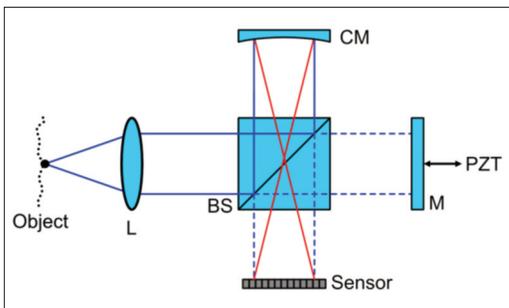
홀로그래픽 시스템은 과거 홀로그램 기술의 선구자였던 Gabor에 의해 제안된 Gabor hologram에서 나타나는 광원(bias) 및 쌍영상(twin-image) 문제를 고스란히 갖고 있다[2]. 이 문제는 두 파의 간섭에 의해 생성되는 부수적인 항들이 물체의 홀로그램 정보와 공간적으로 겹쳐져 나타나기 때문이며, 위상 변이 기법으로 해결할 수 있다[3]. 위상 변이 기법은 두 간섭하는 광파의 위상에 상대적인 차이를 부여해 다수의 간섭무늬를 촬영하고, 이를 합성해 광원 및 쌍영상 정보가 제거된 하나의 복소 홀로그램을 만드는 것이다. 대표적인 위상 변이 기법인 4단계 기법을 예로 들자면, 두 광파의 상대적 위상차를 0, 90, 180, 270도로 순차적으로 부여하면서 각각의 간섭무늬를 촬영한다. 이렇게 네 장의 빛의 세기 정보가 담긴 디지털 이미지들을 합성하면 최종적으로 물체의 홀로그램 정보만이 복소 데이터 형태로 남는다. 두 광파의 상대적인 위상을 여러 단

계로 조절하려면 실제 광 경로를 미세하게 조정하거나, 복굴절성 소자를 이용해 optical retardation을 준다거나, 기하학적 위상을 이용하는 방법이 있다. 자세한 시스템적 구현은 이어서 지금까지 발표된 자가간섭 디지털 홀로그래피 시스템들을 소개하면서 함께 언급하고자 한다.

III. 자가간섭 홀로그래피 기술

1. 공간적 파면 분리

자가간섭을 위한 가장 직관적인 시스템은 기존의 간섭계를 이용하는 것이다. 특히 샹냐(Sagnac) 간섭계를 이용한 자가간섭 기술은 일찌감치 발표된 바 있다[4]. 또한 마이켈슨(Micelson) 혹은 마하-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계를 이용한 자가간섭 디지털 홀로그래피 시스템 역시 발표되었다[5,6]. 기존의 간섭계 기술을 이용한 대표적인 연구사례로 마이켈슨 간섭계 기반의 자가간섭 디지털 홀로그래피(SIDH, Self-interference Incoherent Digital Holography)가 있다[6]. 시스템의 구성은 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 마이켈슨 간섭계 기반의 SIDH 시스템(L: lens, M: mirror, CM: concave mirror, BS: beam splitter, PZT: piezo-transducer)

물체를 이루고 있는 어느 한 점에서 구면파가 자발광 혹은 반사에 의해 시스템 방향으로 발산하는 상황을 가정하자. 이 점은 <그림 3>의 Lo로 표기된 렌즈의 초점거리에 위치해 있어, 이로부터 발산한 광파는 렌즈를 지나며 평행광이 된다. 평행광은 이어서 파면 분리기(BS, Beam Splitter)를 통해 절반의 반사 성분과, 나머지 절반의 투과 성분으로 나뉜다. 또한 반사 성분은 입사 방향의 직각 방향으로 꺾인다. 분리된 두 광파는 간섭계의 각 채널 끝에 위치한 거울을 겪고 다시 파면 분리기 쪽으로 되돌아온다. 이때, 거울의 곡률이 서로 다르면 두 광파의 파면은 서로 다른 곡률을 가지는 구면파가 된다. 다시 파면 분리를 통해 진행 방향이 같아진 두 광파는 이미지 센서로 마저 전파된다. 두 간섭 채널의 광 경로 차가 광원의 간섭 거리보다 짧을 때, 이미지 센서를 통해 두 광파의 간섭무늬를 관찰할 수 있다. 이때, 서로 다른 곡률을 가지는 두 구면파의 간섭이 일어났기 때문에, 기록되는 간섭무늬는 프레넬-존-플레이트(FZP, Fresnel Zone Plate)의 형태를 가진다.

이 간섭무늬는 물체의 홀로그램 정보를 가지고 있기 때문에 프레넬 역 재생 방법을 통해 복원할 수 있지만, 광원 정보가 강하게 남아있기 때문에 복원된 이미지의 대비가 매우 낮다. 또한 또렷하게 재생된 물체 주변으로 쌍영상의 광정보가 퍼져서 노이즈처럼 나타난다. 이러한 광원 및 쌍영상 정보를 제거하고 복소 홀로그램 정보만을 남기기 위해 위상 변이 기법을 이용함을 앞서 언급했다. 발표된 마이켈슨 간섭계 기반 SIDH 시스템에서는 위상 변이를 거울에 압전소자(Piezo-transducer)를 부착해 미세한 간격으로 움직이며 다수의 간섭무늬를 촬영, 이를 합성해 광원 및 쌍영상 정보를 제거했다. 압전소자는 전기장을 인가하면 결정의 기계적 변형이 일어남을 응용한 소자로, 아주 미세한 움직임을 제

어하거나 감지할 때 이용한다. 홀로그래피 시스템에서는 위상 변이를 위해 두 간섭 채널의 광 경로 차이를 입사광의 파장보다 짧게 발생시켜야 하기 때문에 압전소자가 널리 이용된다. 마이켈슨 간섭계의 한 채널 끝에 위치한 거울에 압전소자를 부착하고, 0, 90, 180, 270도에 해당하는 만큼 거울을 미세하게 움직여주며 네 장의 간섭무늬를 촬영한다. 이후 네 장의 간섭무늬를 합성해주면 광원 및 쌍영상 정보가 제거된 복소 홀로그램을 얻을 수 있다. 이 홀로그램을 프레넬 역재생 기법을 이용해 원하는 지점의 평면 광정보를 복원할 수 있다.

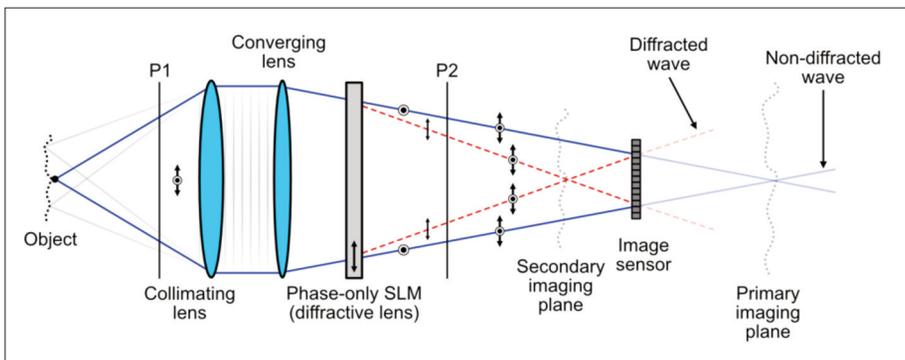
전통적인 간섭계와 압전소자를 이용한 SIDH 시스템은 공간적으로 광파를 나누고 다시 합치기 때문에 광효율이 좋고, 비교적 저렴한 기본 광학 소자로 시스템을 구축할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 두 채널의 간섭계를 이용하기 때문에 진동에 매우 취약하다.

2. 편광상태에 따른 파면 분리

FINCH는 Fresnel INcoherent Correlation

Holography의 약자로 원리적으로는 SIDH와 동일하지만, 파면 분리/변조 장치로 편광 선택성이 있는 소자를 사용한다는 점에서 차이가 있다. 비록 기술적으로 더 광범위한 서술어는 단연 SIDH이겠지만, 지난 10년간 FINCH를 제안한 Joseph Rosen 교수 및 그의 동료들로부터 왕성하게 누적되어 온 일련의 연구들 덕에 FINCH라는 별도의 이름을 언급하며 소개할 가치가 있는 시스템이다. 가장 초기의 FINCH에서는 파면 분리/변조 장치로 phase-only 공간광변조기(SLM, Spatial Light Modulator)를 이용하였으며[7], 동일한 원리에 복굴절성 렌즈나 액정 렌즈 같은 편광 선택성 소자를 이용한 시스템들도 존재한다[8,9]. 필자의 연구실에서 제안한 기하학적 위상 렌즈를 이용한 SIDH 시스템도 편광 선택성이 있는 소자를 이용했다는 점에서 FINCH의 일부로 언급될 수 있지만, 별도의 소개를 위해 후술하도록 하겠다.

〈그림 4〉는 FINCH 시스템의 개요도를 나타내는 것으로, 최근의 FINCH 시스템 구성을 반영한다. 앞서 마이켈슨 기반 SIDH 시스템과 마찬가지로 하나의 물체점에서 발산한 구면파가 렌즈를 통과하면



〈그림 4〉 FINCH 시스템 개요도(P1,P2: 편광판, 화살표는 편광축의 방향을 나타낸다.)

서 평행광인 상태로 자가간섭계에 입사된다. 이 평행광은 45도로 정렬된 편광판을 거치면서 수평 및 수직의 선편광 성분으로 바뀐다. 그리고 수렴 렌즈를 거치면서 수렴하는 구면파로 바뀐다. 이 수렴 렌즈에 의해 시스템의 뒤편에 결상면이 하나 생겨난다. 이후 광파는 phase-only SLM에 도달한다. 이 SLM은 편광 선택성이 존재한다. 예로, 수직으로 선형 편광 된 광파만을 변조시킨다고 가정하자. 이 SLM에 회절 렌즈 무늬를 재생시키면 SLM에 도달한 수평 및 수직 성분 중 수평 성분은 SLM과의 반응성이 없기 때문에 그저 거울처럼 반사된다. 한편 수직 성분은 SLM에 의해 변조되며, 특히 회절 렌즈에 의해 마치 렌즈를 하나 더 겪은 것처럼 더 큰 곡률을 갖는 구면파로 변한다. 이로 인해 앞서 수렴 렌즈에 의해 형성된 결상면의 앞에 새로운 결상면이 하나 더 생긴다. 이후 서로 다른 곡률을 가진 두 구면파는 이미지 센서를 향해 전파하며, 서로 직교하는 편광 상태를 간섭이 가능하도록 하기 위해 추가로 45도로 정렬된 편광판을 이미지 센서 전에 위치시킨다. SIDH 시스템에서와 마찬가지로 간섭무늬가 얻어지며, 이 역시 광원 및 쌍영상 정보를 함께 가지고 있다.

Phase-only SLM을 이용한 FINCH 시스템의 큰 장점은 위상 변이 소자가 별도로 필요 없다는 것이다. 앞서 SLM에 회절 렌즈 무늬를 재생시켜 파면 분리/변조기로 활용함을 언급했다. 한편, 회절 렌즈 무늬를 순차적으로 위상 변이 시킨 일련의 패턴을 얻고 각각을 SLM에 재생하며 촬영하면 위상 변이가 이뤄진 일련의 홀로그램을 얻는다. 이후 합성 절차를 거치고 나면 광원 및 쌍영상 정보가 제거된 복소 홀로그램이 생성되고, 이를 복원하면 깊이에 따라 초점이 변하는 영상을 얻을 수 있다. 한편, 복굴절성 렌즈나 액정 렌즈를 이용한 FINCH에서는

편광 선택성이 있는 가변 파장판을 이용해 위상 변이를 수행한다.

이 시스템에서는 간섭하는 두 광파가 편광에 의해서만 구분되고 동일한 공간을 전파하기 때문에 진동에 둔감하다는 장점이 있다. 또한 두 채널을 가진 간섭계와 달리 시스템 구축이 간편하다. 하지만 편광 선택성 파면 분리/변조기는 비교적 고가이며, 시스템 구축에 이미지 센서를 제외하고 최소한 하나 이상의 광전자 소자가 이용되기 때문에 전체적인 시스템 개발 비용과 운용 복잡도가 상승한다는 단점이 있다.

IV. 기하학적 위상을 이용한 자가 간섭 홀로그래피 기술

마지막으로 필자의 연구실에서 진행하고 있는 기하학적 위상을 이용한 SIDH 기술을 소개하겠다. 시스템을 소개하기에 앞서 기하학적 위상이 무엇인지, 그리고 이를 관찰하는 방법은 무엇인지에 대해 먼저 설명하고 이어서 기하학적 위상 소자와 제작 방법, 작동원리에 대해 서술한다. 그리고 이 모든 원리를 응용한 SIDH 기술 소개가 이어진다.

1. 기하학적 위상

광학에서 기하학적 위상은 선구자들의 이름을 따 Pancharatnam-Berry 위상, 혹은 짧게 PB 위상이라 불린다. 이는 광 경로나 위상 지연 값의 변화에 더해 편광 상태의 변화 과정이 추가적인 위상의 형태로 나타나는 것이다. 광파의 편광 상태는 푸앵카레 구의 표면에서 서술 가능하며, 광파가 여러 가지 편광 소자를 지나며 푸앵카레 구의 표면에 일련의

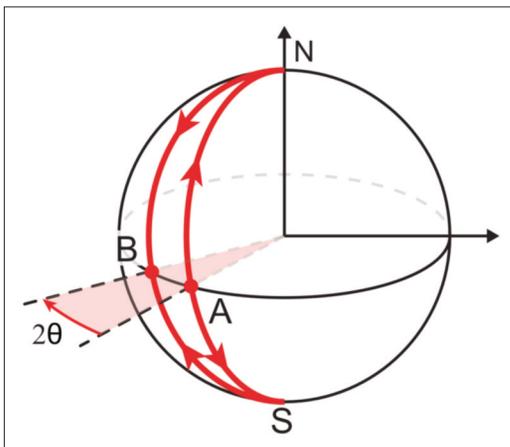
궤적을 남기면 PB위상은 이 궤적이 가지는 입체각의 절반만큼의 값으로 나타난다[10,11]. 푸앵카레 구의 입체각은 다른 요소의 고려 없이 순수하게 편광 상태의 기하적인 변화만이 반영되어 계산되므로, 이렇게 나타나는 위상은 광 경로의 변화나 retardation의 변화에 무관하며 따라서 파장 의존성이 없다는 특징이 있다.

PB 위상은 광 경로나 retardation의 변화가 억제될 때 쉽게 관찰된다. 마하-젠더 간섭계의 한 채널에 일련의 편광판, 파장판 조합을 추가하는데 그 순서는 P-QWP-HWP-QWP-P로 이뤄져 있다고 가정하자[12]. 이때, P는 편광판, QWP는 1/4 파장판, HWP는 1/2 파장판을 나타낸다. 간섭계가 동일한 광 경로 차이를 가지며, 외부 진동이 전혀 없다고 가정하면, 파 장판들에 의한 위상 지연 외에는 두 채널 사이에 상대적인 광 경로 차이나 추가적인 위상 지연이 발생할 여지가 없다. 이때, HWP가 회전함에 따라 간섭무늬에서 위상 변화가 관찰된다. HWP의 회전은 파 장판들의 조합으로 인한 절대적인 위상 지연에 영향을 주지 않는다. 따라서 이 위

상 변화는 흔히 관찰되는 광 경로 혹은 위상 지연에 의한 변화가 아님이 자명하다.

이렇게 관찰되는 위상 변화의 정도는 푸앵카레 구의 표면에서 편광 상태의 변화를 추적해 계산할 수 있다. 첫 번째 편광판을 통과하면서 편광 상태는 <그림 5>의 점 A로 나타낼 수 있다. 그리고 QWP를 통해 우원 편광이 되며 이는 점 N이다. HWP를 거치며 좌원 편광 상태가 되는데, 편광 변화의 궤적은 기준 평면에 대한 HWP의 상대적인 각도에 따라 푸앵카레 구의 표면에서 적도 상의 점 B와 반대편 극점 S를 잇는 경선으로 나타난다. 이후 QWP를 통과하면서 다시 선편광 상태인 점 A로 돌아온다.

달한 궤적 A-N-B-S-A가 가지는 입체각을 계산하면 그의 절반만큼 위상 변이 정도가 도출된다. 기준 평면에 대한 HWP의 상대적인 회전 각도가 θ 라고 하면, 점 A와 구의 원점을 잇는 선분과 점 B와 원점을 잇는 선분의 S1, S2 평면 상에서의 각도 차는 2θ 이다. 또한 구의 입체각은 $4\pi^2$ 이며, 푸앵카레 구의 반지름은 항상 1이기 때문에 입체각은 4π 이다. 따라서 쉽게 $4\pi \times 2\theta / 2\pi$ 로 달한 궤적 A-N-B-S-A의 입체각을 구할 수 있고 이는 4θ 이다. 따라서 HWP의 회전 θ 에 의해 발생하는 PB 위상의 변화 각도는 입체각의 절반인 2θ 로 나타난다.

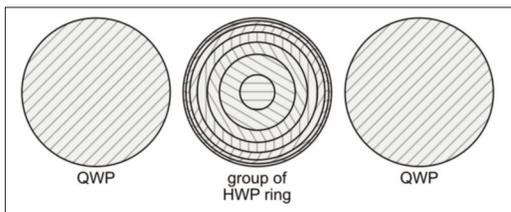


<그림 5> P-QWP-HWP-QWP-P를 거치는 광파의 푸앵카레 구 표현

2. 기하학적 위상 소자

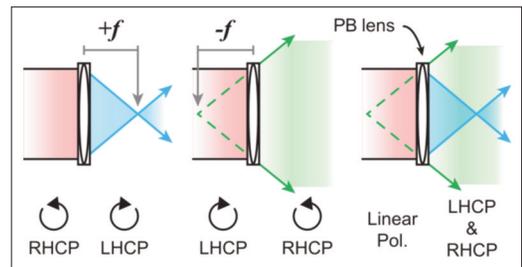
상기 특징을 가지고 있는 PB 위상 변이 시스템을 미세한 배열의 형태로 만들고, 각 미소 단위에서 HWP의 회전각을 공간적으로 다르게 만들어준다면 이는 입사광의 위상만을 변조시키는 광학소자로 작용할 수 있다. <그림 6>은 이러한 미소 배열을 가지는 PB 위상 소자의 개념도를 나타낸다[13]. 예를 들어 HWP배열의 각 회전각이 렌즈의 위상 프로파일

인 $\exp[-j^2\pi(\lambda f)^{-1}(x^2+y^2)]$. 에서 추출된 위상각 분포의 절반만큼 된다면 이 소자는 f 의 초점거리를 가지는 PB 위상 렌즈로 작용한다. 여기서 λ 는 입사광의 중심파장, x, y 는 공간 상의 좌표를 의미한다. 이러한 PB 위상 소자의 개념은 직관적이고 이미 수십 년 전에 제안되었지만 미소 파장판을 서로 회전각을 달리하며 이어 붙이기란 언뜻 생각해봐도 힘든 일이다. 따라서 PB 위상 소자의 실용적인 제작은 2015년부터 여러 연구를 통해 발표되고 주목을 받기 시작했다[14,15]. 최근 PB 위상 소자의 제작은 주로 광배향층을 형성하고 그 위에 액정을 도포하는 방식으로 이뤄진다. 액정은 복굴절 특징으로 인해 상기 PB 위상 변이 시스템에서 QWP, HWP의 역할을 대체할 수 있다. HWP의 공간적 회전각 분포는 광배향층의 형성으로 구현된다. 광배향은 편광 홀로그래피 기록을 방식을 응용해 진행된다. 편광 홀로그래피 기록 시 기록 물체를 렌즈로 하고 기록 면을 광배향 물질이 코팅된 유리기판으로 하면, 렌즈의 위상 값이 광배향 물질에 선형의 배향 분포로 기록된다. 배향막 위에 액정이 도포되면 액정이 각 구역의 배향 특성에 맞게 배치된다. 스위칭 소자로 만들고 싶다면 추가로 전극층을 형성해주면 되고, 영구적인 소자로 만들고 싶다면 고분자 액정을 도포해 마지막에 경화 과정을 거치면 된다.



(그림 6) PB 위상 렌즈의 개념도(원 내부의 실선은 광축의 방향을 의미한다.)

액정을 통해 만들어진 PB 위상 렌즈는 <그림 7>과 같은 특별한 광학적 성질을 가진다. PB 위상 렌즈가 $\exp[-j^2\pi(\lambda f)^{-1}(x^2+y^2)]$ 의 위상 값으로 기록되었다면, 우원 편광의 평행광이 입사할 때에는 초점거리 f 를 가지는 볼록렌즈로 작용하여 광파를 수렴시키고 이 광파는 좌원 편광 상태가 된다. 또한 좌원 편광의 경우 $-f$ 를 가지는 오목렌즈로 작용하여 우원 편광 상태의 광파를 시킨다. 선형 편광 상태로 입사될 경우 이는 좌/우원 편광의 벡터 합으로 간주할 수 있기에 절반은 수렴하며 좌원 편광의 광파가 되며, 절반은 발산하며 우원 편광의 광파가 된다.



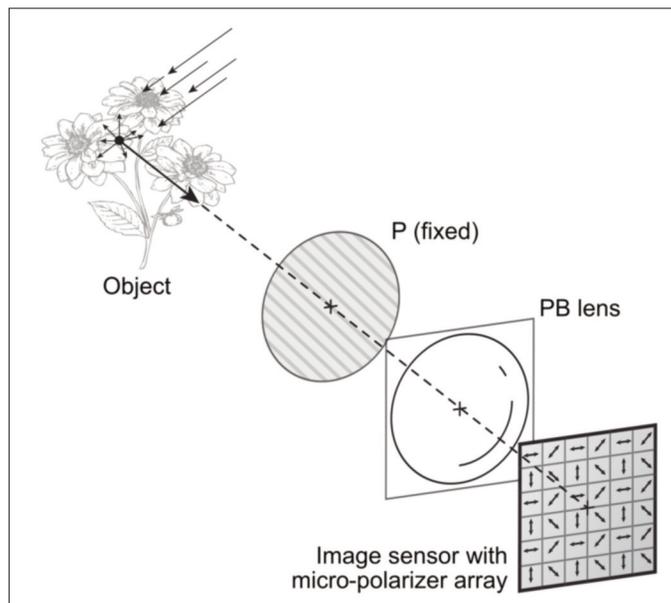
(그림 7) PB 위상 렌즈의 광학적 성질(RHCP: 우원 편광, LHCP: 좌원 편광)

3. 기하학적 위상 자가간섭 디지털 홀로그래피

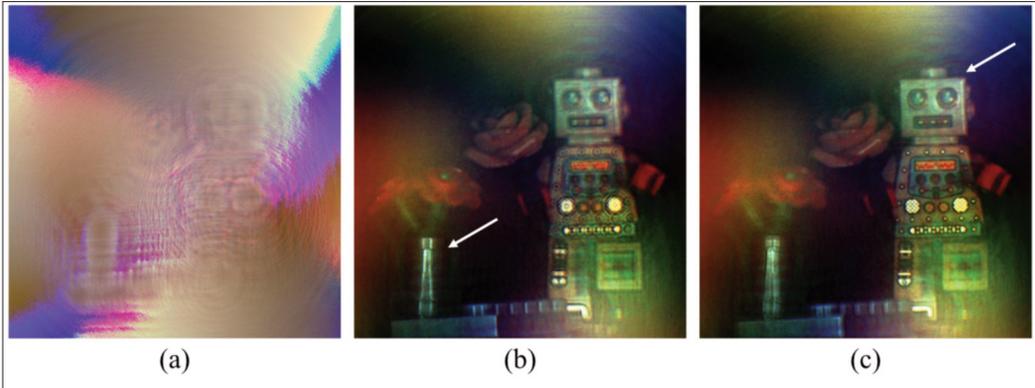
필자의 연구실에서는 상기의 PB 위상 소자, 특히 PB 위상 렌즈를 편광 선택성 파면 분리/변조 장치로 사용하여 자가간섭 디지털 홀로그래피를 발표하였다[16-18]. 현재 이를 간략하게 기하학적 위상 자가간섭 디지털 홀로그래피(geometric phase SIDH 혹은 GP-SIDH)로 부르고 있다. FINCH에서 phase-only SLM이 한 선편광 성분에 대해서만 렌즈로 작용하고 나머지 편광 상태에 대해서는 평면

거울로 작용한다. GP-SIDH에서는 PB 위상 렌즈는 두 원편광 상태 모두의 곡률을 변화시킨다. 따라서 자가간섭의 원리만을 보면 GP-SIDH가 FINCH와 크게 다른 점이 없다[16]. 하지만 이어지는 연구에서는 광원 및 쌍영상 제거를 위한 위상 변이를 FINCH에서 처럼 phase-only SLM이나 가변 파장판을 사용하지 않고, 회전하는 편광판과 PB 위상 렌즈와의 조합으로 구현했다[17]. 즉, 위상 지연이 아닌 기하학적 위상의 변화만으로 파면 분리/변조 및 위상 변이를 모두 구현한 것이다. 회전하는 편광판과 PB 위상 렌즈의 조합이 어떻게 위상 변이 소자로 작용하는지는 상기 PB 위상 변이 기법에 대한 소개를 참고하거나, 최근의 GP-SIDH 연구 결과에 수록되어 있다[17]. 한편, 시간에 따라 순차적으로 회전하는 편광판 대신 편광 이미지 센서를 사용하여 네 단계 위상 변이를 단일 촬영으로 구현하여 실

시간 홀로그래밍 기록이 가능한 비디오카메라를 구축한 연구를 발표하였다[18]. 편광 이미지 센서는 이미지 센서의 각 픽셀 앞에 2 x 2의 단위 구성을 가진 미소 편광판을 배열하여 부착한 것으로, 미소 편광판은 각각 0, 45, 90, 135도로 회전되어 있다. 따라서 이는 회전하는 편광판을 완벽히 대체하는 것으로 비록 홀로그래밍의 해상도는 전체 해상도의 절반만큼으로 줄어들지만, 시간 해상도가 증가한다는 장점이 있다. 또한 시스템의 핵심적인 구성은 마치 LCD 디스플레이와 같은 편광판-액정층-편광판-센서 순으로 이뤄지기 때문에, 지금까지 발표된 어떠한 간섭 기반의 홀로그래픽 기록 시스템과 비교해도 파격적으로 간단하고, 요구되는 광 경로도 매우 짧아질 수 있다. 실제로 가장 최근 연구에서는 4 cm 길이와 초당 25 프레임의 실시간 촬영이 가능한 시제품을 발표하였다[18]. 이렇게 매우 간단한



〈그림 8〉 홀로그래밍 비디오 기록이 가능한 GP-SIDH 시스템 구조 개요



〈그림 9〉 (a) 폴컬러 GP-SIDH 홀로그래프 기록 결과 (위상각 추출), (b,c) 모형 꽃과 로봇 사이의 초점 변화가 관찰된다. 이용한 시스템은 참고문헌 17에서의 시스템과 같으며, 노이즈 저감을 위해 총 20번의 노출이 이뤄졌다.

홀로그래프 촬영 기법을 바탕으로 향후 모바일용 홀로그래픽 카메라나 깊이 감지 모듈로 응용할 수 있도록 관련 연구를 지속하고 있다.

V. 결론

지금까지 자가간섭 디지털 홀로그래피 시스템들의 원리와 구성에 대해 알아보았다. 각 시스템들은 모두 고유의 장단점들을 갖고 있다. 대표적으로, 마이켈슨 간섭계를 이용한 시스템은 편광 분리 방식이 아니기 때문에 광효율이 좋다. 다만 두 개의 간섭 채널을 가지고 있어 외부 진동에 취약하다.

FINCH의 경우 관련 연구가 심도 있게 진행되었고 현미경 분야에서 우수한 수평 해상력을 입증했다. 하지만 우수한 수평 해상력 대신 수직 해상력이 희생되었고, 여러 가지 광전자 소자가 사용되기 때문에 제작 단가가 비싸지고 시스템 구성의 복잡도가 올라간다. GP-SIDH의 경우 시야각이 넓은 카메라용 애플리케이션으로 콤팩트하게 제작될 수 있고, 시스템 구성이 매우 단순하여 양산 시 제작 단가가 저렴해질 수 있다. 한편 편광 소자가 다수 사용되어 광효율 측면에서 개선해야 할 부분이 있고, 연구 개발의 초기단계이기 때문에 더욱 다양한 기하학적 위상 소자와 함께 많은 연구가 누적되어야 한다.

참고 문헌

- [1] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.*, 55(11):1555–1556 (1965).
- [2] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, 161:777–778 (1948).
- [3] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, 22(16):1268–1270 (1997).
- [4] G. Cochran, "New Method of Making Fresnel Transforms with Incoherent Light," *J. Opt. Soc. Am.*, 56(11):1513–1517 (1966).
- [5] G. Pedrini, H. Li, A. Faridian and W. Osten, "Digital holography of self-luminous objects by using a Mach–Zehnder setup," *Opt. Lett.*, 37(4):713–715 (2012).
- [6] M. K. Kim, "Incoherent digital holographic adaptive optics," *Appl. Opt.*, 52(1):A117–A130 (2013).
- [7] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.*, 32(8):912–914 (2007).
- [8] G. Brooker, N. Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara and A. Tanabe, "In-line finch super resolution digital holographic fluorescence microscopy using a high efficiency transmission liquid crystal GRIN lens," *Opt. Lett.*, 38(24):5264–5267 (2013).
- [9] N. Siegel, V. Lupashin, B. Storrie and Gary Brooker, "High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers," *Nat. Photon.*, 10:802 (2016).
- [10] S. Pancharatnam, "Generalized theory of interference, and its applications," *Proc. Indian Acad. Sci. - Sect. A* 44, 247–262 (1956).
- [11] M. V. Berry, "Quantal phase factors accompanying adiabatic changes," *Proc. Royal Soc. A*, 392(1802):45–57 (1984).
- [12] P. Hariharan and P.E. Ciddor, "An achromatic phase-shifter operating on the geometric phase," *Opt. Commun.*, 110(1):13–17 (1994).
- [13] R. Bhandari, "Polarization of light and topological phases," *Phys. Rep.*, 281(1):1–64 (1997).
- [14] J. Kim, Y. Li, M. N. Miskiewicz, C. Oh, M. W. Kudenov, and M. J. Escuti, "Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts," *Optica* 2, 958–964 (2015).
- [15] L. D. Sio, D. E. Roberts, Z. Liao, S. Nersisyan, O. Uskova, L. Wickboldt, N. Tabiryan, D. M. Steeves and Brian R. Kimball, "Digital polarization holography advancing geometrical phase optics," *Opt. Express* 24, 18297–18306 (2016).
- [16] K. Choi, J. Yim, S. Yoo and S.-W. Min, "Self-interference digital holography with a geometric-phase hologram lens," *Opt. Lett.*, 42(19):3940–3943 (2017).
- [17] K. Choi, J. Yim and S.-W. Min, "Achromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens," *Opt. Express*, 26(13):16212–16225 (2018).
- [18] K. Choi, K.-I. Joo, T.-H. Lee, H.-R. Kim, J. Yim, H. Do and S.-W. Min, "Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation," *Opt. Express*, 27(4):4818–4833 (2019).

필자소개



민성욱

- 1991년 ~ 1995년 : 서울대학교 전기공학부 (공학학사)
- 1995년 ~ 1997년 : 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
- 1997년 ~ 1998년 : 삼성전자 주임연구원
- 1997년 ~ 2004년 : 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
- 2005년 ~ 2007 Virginia Tech Post doctor
- 2007년 ~ 현재 : 경희대학교 정보디스플레이학과 부교수
- 주관심분야 : 3차원 광정보 재생/취득, 광학 시스템 개발



최기홍

- 2006년 ~ 2013년 : 경희대학교 정보디스플레이학과 (이학학사)
- 2013년 ~ 2015년 : 경희대학교 정보디스플레이 대학원 (공학석사)
- 2015년 ~ 현재 : 경희대학교 정보디스플레이 대학원 박사과정 재학 중
- 주관심분야 : 디지털 홀로그래피 취득기술, 3차원 디스플레이