

1. 서론

최근 홀로그램 발전 전략의 수립과 함께 국가적으로 홀로그래픽 디스플레이가 중요한 연구 과제로 조명받고 있다. 이는 중요한 국가 산업인 디스플레이 기술의 최종 목표라 할 수 있는 홀로그래픽 디스플레이의 구현에 있어서 중요한 위치를 선점하여 디스플레이 중추국으로써의 위치를 확고히 하고자 하는 전략적 의도라 보인다. 또한 기하 광학에서 파동 광학으로 확장되어 가는 광학 연구의 위계를 보아도 당연한 흐름이라 할 수 있다. 완전한 3차원 영상을 보여줄 수 있는 홀로그래픽 디스플레이는 필름에 기록 및 재생을 하는 아날로그 홀로그램을 통해 기본적인 이론에 대해서는 이미 수십년 전에 거의 완성되었고, 그 이후는 디지털 홀로그래픽

가 있으나, 이에 대응하는 홀로그램 콘텐츠를 생성하기 위한 홀로그래픽 카메라의 경우 최근까지 그 윤곽조차 보이지 않았었다.

홀로그램은 물체광에 별도의 기준광을 간섭시켜 파동 광학 영역의 정보인 파면의 진폭과 위상 정보를 모두 기록함으로써 복원 과정을 통해 3차원 영상을 재구성하거나 세포 등 투명한 물체를 위상 정보를 이용하여 가시화 할 수 있는 기술이다. 하지만 명확한 간섭무늬를 얻기 위해서는 공간적 시간적 간섭성이 필요하고 이를 가능하게 하는 광원이 레이저와 같이 충분히 긴 가간섭 거리를 갖는 가간섭광원이다. 가벼운 홀로그램의 원리를 최초로 제안하였으나 [2] 가간섭 광원의 부재로 의미있는 홀로그램 영상을 획득할 수 없었다. 후에 레이저의 발명으로 Leith와 Upatnieks가 비로소 의미있

특집 ■ 홀로그래피

자연광 홀로그래픽 카메라 기술

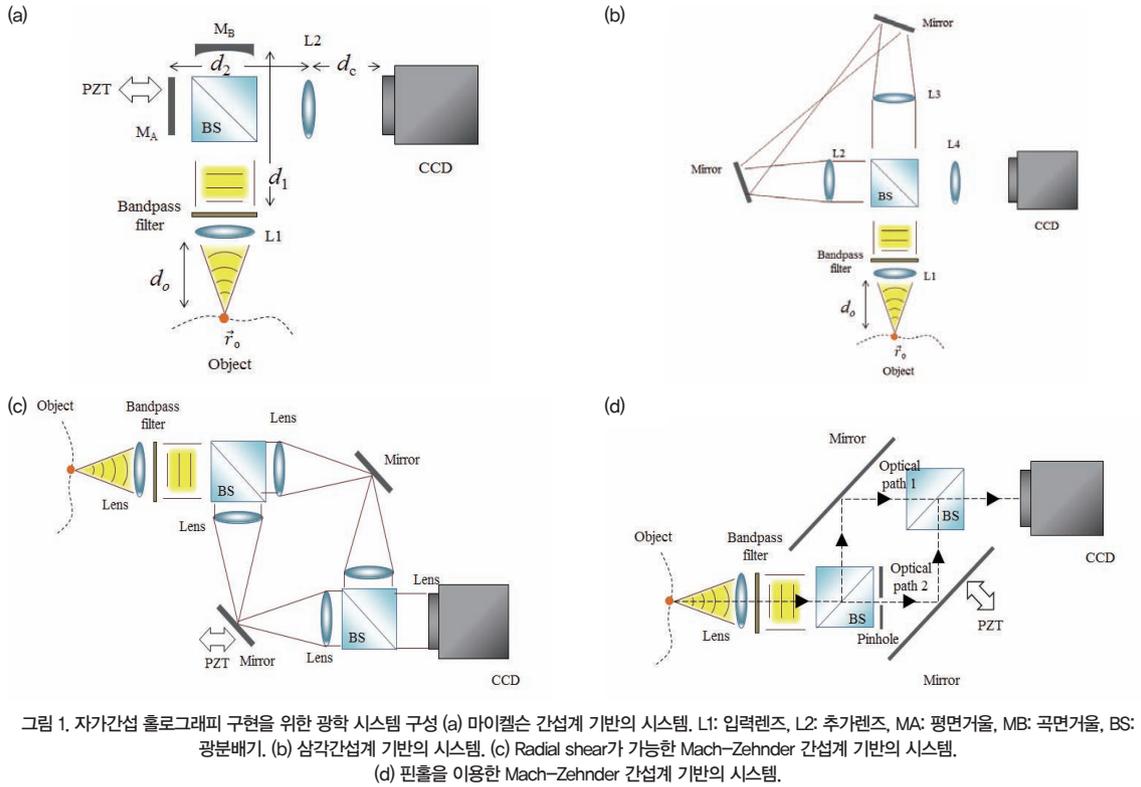
홍지수*

디스플레이를 통해 동영상을 보여주기 위한 연구가 진행되고 있다. 디지털 장치를 통해 아날로그 홀로그램에 필적하는 수준의 3차원 동영상을 보여주기 위해서는 아날로그 필름과 유사한 수준의 정보량을 처리해야하기 때문에 제반 기기들의 제한된 성능을 극복하기 위한 다양한 기술들이 개발되고 있으나, 디스플레이 기술 및 컴퓨터 처리 용량의 비약적인 발달로 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 통한 3차원 동영상의 재생도 최근 가시적인 성과를 보이고 있다 [1]. 이와 같이 홀로그래픽 디스플레이의 미래에 대해서는 어느정도 예상되는 바

는 아날로그 홀로그램의 기록 및 재생에 성공하였지만 [3], 레이저의 사용으로 홀로그램이 매우 제한된 분야에만 적용할 수 있게 되었다. 특히 일반적인 카메라라 하면 인물이나 풍경 등이 가장 많이 찍는 피사체일 터인데, 이를 기존의 레이저를 사용한 홀로그램으로 기록하고자 한다면 외부 광원을 차단하고 레이저를 조명으로 사용하여 기록이 가능하다. 하지만 사람에게 레이저를 조명으로 쓴다는 것은 안전성 측면에서 선호되지 않고, 일반적인 야외 풍경의 경우 외부 광원 차단이 불가능할뿐더러 단일 레이저를 풍경 전체에 투사하는 것

* 전자부품연구원

자연광 홀로그래픽 카메라 기술

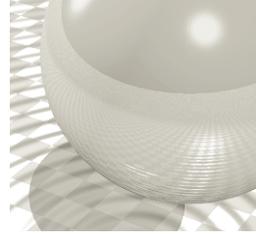


역시 불가능한 일이다. 따라서 일반적인 카메라로서의 사용성을 가지며 홀로그램 정보를 기록하기 위한 기술 개발에는 그동안 크게 두가지의 방향성이 있었다.

한가지는 일반적인 상황에서의 직접적으로 홀로그램 촬영하는 것을 포기하고 별도의 방법으로 3차원 데이터를 추출한 후 이로부터 간접적으로 홀로그램을 생성하는 방식이다. 컴퓨터 비전 분야에서는 다시점 카메라, Time-of-flight 카메라, Profilometry 등 다양한 방식으로 대상 물체에 대한 3차원 정보를 획득하는 기술이 오랫동안 개발되어 왔고, 3차원 정보가 일단 획득된 이후에는 이로부터 3차원 컴퓨터 그래픽 모델을 쉽게 구성할 수 있다. 3차원 그래픽스 모델로부터 계산적으로 그에 대응하는 홀로그램 데이터를 생성하는 기술 역시 광학 분야에서 오랫동안 연구되어 왔기 때문에 [4, 5] 이 두가지를 조합하면 일반적 물체의 홀로그램 정보를 생성할 수 있다 [6], 하지만 컴퓨터 비전 기술을 통해 얻어내는 3차원 정보는 정확성이 떨어지거나 오류가 있을 수 있는 가능성이 있으며, 얻어진 3차원 정보로부터 홀로그램을 계산하는 과정은 매우 큰 정보량

의 처리를 요구한다. 이와 별개로 다시점 영상에서 3차원 정보를 재구성하지 않고 스테레오그램 방식으로 홀로그램을 계산하는 방식은 3차원 정보 재구성을 통해 발생할 수 있는 오류를 피할 수 있고 계산이 상대적으로 간단하나 [7], 근본적으로 다시점 영상 방식의 낮은 공간 및 각해상도가 홀로그램 정보에도 반영되게 된다.

일반적인 상황에 대해 홀로그램을 기록하기 위한 또 한가지 접근 방법은 광스캐닝 홀로그래피 기술(optical scanning holography)과 같이 제어된 광원을 이용하여 대상 물체에 대한 홀로그램 정보를 얻는 방법이 있다 [8]. 광스캐닝 홀로그래피 기술은 시간적으로 변조되는 프레넬링 패턴을 광원으로서 대상 물체에 투사해주고 이로부터 산란된 영상의 시간적 세기변화를 필터링을 통해서 대상 물체의 특정 지점에 대한 정보를 얻는 방법이다. 이 때, 외부 광원이 있다 하더라도 필터링 과정에서 제거되기 때문에 비간섭 광원이 조명한 상황에서도 대상 물체의 홀로그램 정보를 기록할 수 있다. 하지만 대상 물체에 대한 스캐닝이 필요하여 전체 촬영 시간이 오래 걸린다는 단점이 있고, 또한 변조된



광원을 투사하여야하기 때문에, 원거리 야외에 대한 촬영이나 천체 망원경 등과 같이 변조된 광원을 투사해줄 수 없는 상황에는 광스캐닝 홀로그래피 기술을 적용할 수 없는 단점이 있다.

본고에서는 조명에 전혀 제약을 받지 않으면서도 직접적으로 홀로그램 정보를 기록할 수 있는 자가간섭(Self-Interference) 홀로그래피 기술에 대해 소개하고, 이를 이용하여 마치 일반적인 카메라와 같이 이용할 수 있는 홀로그래피 카메라의 구현 가능성에 대해 논해보고자 한다. 실제로 이 기술을 이용하여 작년에는 일반적 야외 풍경에 대해 홀로그램 정보를 기록하는 역사적인 연구가 이루어졌다. 이외에도 조명의 제약을 없앴으로써 형광 현미경, 천체망원경 등의 영역까지 홀로그래피 기술의 영역을 확장할 수 있었음을 살펴보고, 최근의 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

2. 자가간섭 홀로그래피(Self-Interference Digital Holography) 기술의 개념 및 구현 방법

앞서 살펴본 바와 같이 일반적인 환경은 주로 조명이 비간섭 광원이거나 촬영하고자 하는 대상 물체가 자체 발광하는 등 공간적 간섭성을 확보하지 못한 경우가 대부분이다. 이와 같은 경우에 대해서 홀로그램을 기록하고자 할 때 흥미로운 접근 방법 중의 하나는 자가간섭을 이용하여 간섭무늬를 생성하는 것이다. 점광원 하나로부터 발생한 구면파를 두개의 동일한 길이의 광경로로 나눈 후 이미지 센서 면에서 합쳐주면, 점광원의 시간적 간섭성이 보장되지 않더라도, 이미지 센서 면에서 두 개의 복사본이 서로 간섭하여 간섭 무늬를 생성하게 된다. 따라서 시간적 공간적 간섭성이 보장되지 않는 다수의 점광원들의 집합으로 이루어진 물체로부터 발생된 파면을 마찬가지로 두 개의 광경로로 나누어 이미지 센서면에서 합쳐주면, 이미지 센서면에 기록되는 이미지는 각 점광원의 자가간섭이 만들어낸 간섭무늬들의 합이 될 것임을 예상할 수 있다. 일찍이 홀로그래피 기술의 역사 초기인 1960년대부터 이미 이와같은 자가간섭을 이용한 홀로그램 기록에 대한 기본적인 아이디어가 제안되었으며 그 가능성에 대해서 몇몇 연구자들

이 검토한 바 있다 [9, 10]. 하지만 촬영 대상의 점광원의 밀도가 높아질수록 이미지 센서에 기록되는 간섭 무늬에 점광원간 공간적 비간섭성에서 기인한 강한 DC가 존재하게 되는데, 이로인해 중요한 간섭 무늬 정보가 희미해지고 3차원 영상 복원 후 심각한 노이즈를 발생시키게 된다. 따라서 실질적 활용성이 떨어져 자가간섭에 기반한 홀로그램 기록 기술에 대한 연구는 곧 중단되었다.

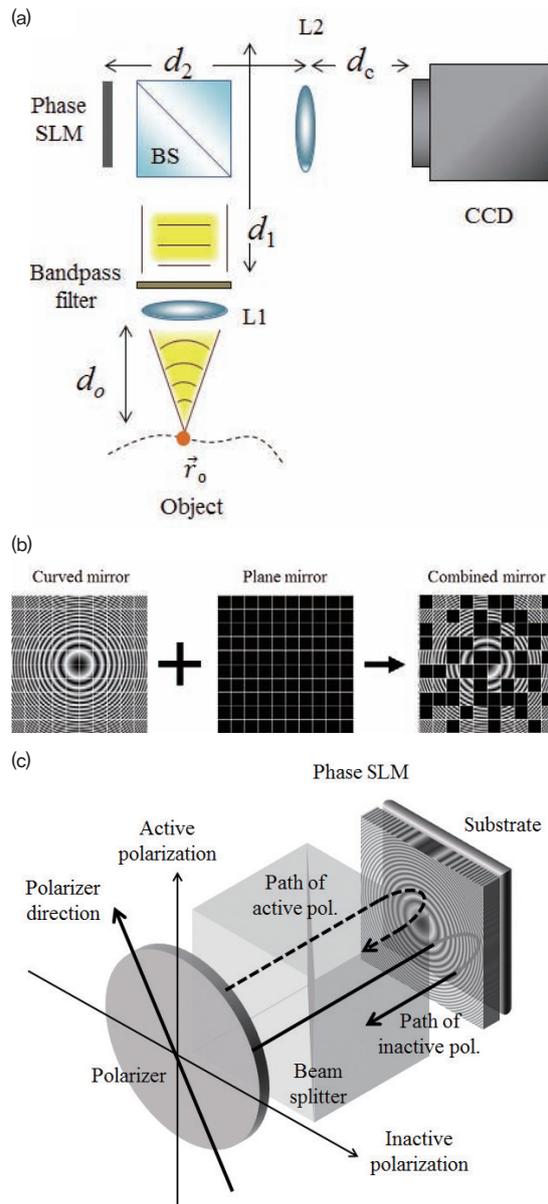


그림 2. Phase SLM을 이용한 자가간섭 홀로그래피 기술. (a) 시스템 구성도. (b) 해상도 분할 방식 병합 거울 구현. (c) 편광 분할 방식 병합 거울 구현.

자연광 홀로그래픽 카메라 기술

하지만 최근 디지털 홀로그래피 기술의 도입으로 자가간섭 홀로그래피 기술의 DC 항을 제거할 수 있게 되며 이에 대한 연구가 다시 활발히 진행되고 있다. 여러 가지 방법이 있지만 자가간섭 홀로그램 기록을 위한 가장 간단한 구성은 그림1(a)와 같이 마이켈슨 간섭계와 유사한 구조의 광학 시스템을 이용하여 구현하는 것이다 [11]. 이 때 마이켈슨 간섭계의 두 개의 arm에 해당하는 위치에는 서로 다른 곡률의 거울을 설치한다. 먼저 입력 렌즈의 초점 거리에 위치한 점광원에 대해서 일단 생각해 보면, 이 점광원에서 발생된 구면파는 입력 렌즈에 의해서 평면파가 되고, 대역통과필터에 의해서 특정 파장만이 선택되게 된다. 이후 광분배기에 의해 이 평면파는 두 개의 동일한 파면의 복사본으로 분리되게 되고, 두 개의 곡률이 다른 거울에 의해 반사가 되면서 서로 다른 곡률의 파면으로 반사된다. 이 때 각 거울에 의해 반사된 광경로가 가간섭길이 이내의 차이를 가지도록 정렬시키고, 두 복사본의 파면이 동일한 넓이로 겹치는 곳에 이미지 센서를 위치시키게 되면, 자가간섭에 의해서 프레넬 링 패턴의 간섭 무늬를 생성하게 된다. 이 때 이미지 센서 앞에 추가적으로 렌즈를 배치하게 되면 센서의 위치 설정에 좀 더 자유도를 가질 수 있다. 다수의 점광원으로 이루어진 물체의 경우 각 점광원에서 발생된 파면은 점광원의 위치에 따라 수평 이동 혹은 링의 간격이 변조된 프레넬 링 형태의 간섭 무늬들을 생성하며, 점광원간 공간적 간섭성이 없으므로 이들 간섭 무늬들이 더해지는 형태로 전체 물체의 간섭 무늬가 생성된다. 결과적으로 촬영하고자 하는 대상에 점광원의 수가 많을수록 각 프레넬 링 패턴의 DC가 계속 더해져서 매우 큰 DC를 가지게 되는데, phase-shifting의 도입으로 이러한 DC를 제거할 수 있게 되었다. 두 개의 거울 중 하나를 piezo등을 통해 움직여 3단계 혹은 4단계 phase-shifting된 영상을 얻을 수 있는데, 이들을 조합하면 DC 항이 제거된 복소 홀로그램을 얻을 수 있다. 일단 복소 홀로그램을 얻은 후에는 광학적 혹은 계산적 복원 과정을 통해서 원본 대상 물체로부터의 파면을 재구성할 수 있다. 그

외에 그림1(b), (c), (d)에 소개되어 있듯이 삼각 간섭계, radial shear가 가능한 Mach-Zehnder 간섭계, 핀홀을 이용한 Mach-Zehnder 간섭계 등 자가간섭 홀로그래피 기술의 구현을 위한 다양한 구성이 제안되었으나 [12-14] 기본적인 원리는 모두 동일하다.

자가간섭 홀로그래피 기술은 두 개의 광경로가 매우 정밀하게 정렬이 되어야 하기에 안정성 측면에서 단점이 있을 수 있으나 Rosen등은 곡률이 다른 두 개의 거울 혹은 두 개의 렌즈를 phase SLM을 이용하여 한 개의 병합 거울 소자로 구현하는 방법을 제안하였다. 이를 이용하여 그림2(a)와 같이 단일 광경로로 정렬 문제에서 자유로운 시스템을 구현할 수 있었다. 초기에는 그림2(b)와 같이 phase SLM의 전체 해상도 중 절반에 해당하는 픽셀을 임의로 골라 하나의 곡면 거울을 표시하고 나머지 반을 이용하여 다른 곡률의 거울을 표시하여 병합 거울을 구현하는 방법을 이용하였으나 [15], 이 경우 각 거울을 표시하기 위한 해상도가 절반으로 줄어든다는 단점이 있었다. 후에 phase SLM의 inactive 편광 성분이 SLM substrate에서 반사된다는 사실에 착안하여 보다 효율적으로 두 가지 거울을 하나의 소자로 표현하는 방법이 제안되었다 [16]. 그림2(c)와 같이 입사광을 active 편광과 inactive 편광 성분을 함께 가지도록 해주고 phase SLM의 전체 해상도를 사용하여 곡면 거울을 표시하면, active 편광 성분은 phase SLM에 의해 곡면거울에 의한 반사 효과를 가지고, inactive 편광 성분은 phase SLM의 substrate에 의해 평면거울에 의한 반사 효과를 가지게 된다. 따라서 두 개의 거울 중 한가지가 평면 거울로 고정된다는 단점이 있지만 phase SLM 전체 해상도를 이용하

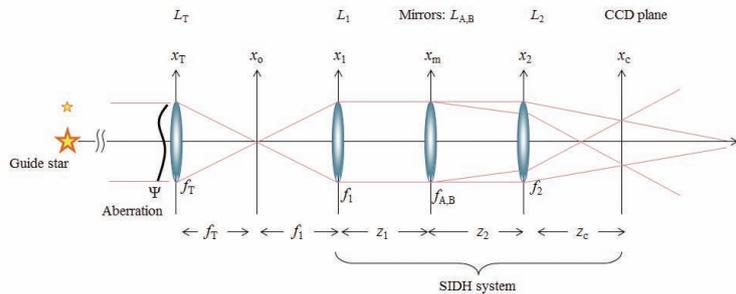
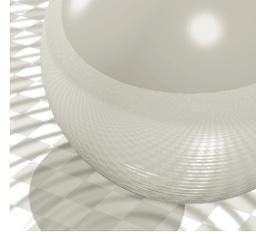


그림 3. 자가간섭 홀로그래피 기술을 이용한 적응광학 구현 개념도.



여 병합 거울을 표현함으로써 광효율 측면에서 이득을 갖는 시스템을 구현할 수 있다.

3. 자가간섭 홀로그래피의 응용

위에 소개된 구현 방법들을 통해서 자가간섭 방식으로 홀로그램 정보를 획득할 때에는 대역통과 필터의 중심 파장에 의해 결정되는 단일파장에 대해 복소 홀로그램을 얻을 수 있다. 따라서 풀컬러 홀로그램을 기록하고자 한다면 적색, 녹색, 청색 세 가지 파장에 대한 복소 홀로그램을 각각 얻은 후 이를 조합하여야 한다. 이때 일반적 컬러 이미지 센서를 이용하면 별도의 대역통과 필터를 사용할 필요 없이 센서 위에 부착된 Bayer 컬러 필터에 의해서 적색, 녹색, 청색 채널별로 분리된 영상을 쉽게 얻을 수 있다. 컬러 이미지 센서를 이용한 자가간섭 홀로그래피 이미징 기술은 광원에 대한 어떠한 제약도 없기 때문에 이를 이용하여 자연광 상태의 외부 풍경에 대한 풀컬러 홀로그램을 직접적으로 기록할 수 있는 홀로그래피 카메라를 구현할 수 있다 [17]. 이는 저자가 알고있는 한 역사적으로 일반적인 외부 풍경에 대한 풀컬러 홀로그램을 기록한 첫번째 사례이다.

또한 미소물체 관찰을 위한 현미경 기술중의 한가지인 형광 현미경은 살아있는 세포를 관찰하는데 있어 매우 중요한 기술로 평가받고 있는데, 형광 물질은 자체 발광을 하기 때문에 공간적 간섭성이 존재하지 않아 기존의 홀로그래피 기술로는 홀로그램 정보를 기록할 수 없었다. 하지만 자가간섭 홀로그램 기술을 형광 현미경 기술에 도입하여 형광 물체에 대해서도 홀로그램 정보를 기록할 수 있음이 보고되었다[18].

또한 홀로그래피 기술의 중요한 응용처 중의 하나는 적응광학(adaptive optics)이다. 기존의 적응광학 기술은 Shack-Hartmann 파면 센서 등을 이용하여 guide-star로부터의 파면이 진행되는 중 매질의 수차에 의해 왜곡되는 것을 측정하여 수차의 정보를 얻고, 이 정보를 이용하여 변형거울(deformable mirror) 등을 통해 수차에 의한 왜곡을 보상하여 대상 물체의 깨끗한 영상을 얻고자 하는 것이다. 하지만 렌즈 어레이를 이용한 수차 정보 측정은 근본적으로 얻어지는 수차 정보의 해상도가 떨어지는 단점이 있었다. 홀로그래피

적응광학은 guide-star로부터의 파면의 복소 홀로그램을 기록하여 이로부터 수차의 복소 홀로그램 정보를 얻는 것으로서, 이미지 센서 전체의 해상도를 이용하여 수차의 정보를 측정하기 때문에 더욱 정확한 수차 정보를 얻을 수 있으며, 결과적으로 수차에 의한 왜곡의 보상 후에 더욱 좋은 품질의 영상을 얻을 수 있다고 기대할 수 있다. 하지만 기존의 홀로그래피 적응광학의 경우 홀로그램 정보의 기록을 위해 레이저를 사용하여야 하기 때문에 적응광학의 시초가 되었던 천체망원경이나 형광 현미경 등 자체 발광하는 물체에 대한 이미징 기술에는 적용할 수 없었다. 하지만 자가간섭 홀로그래피 기술을 이용함으로써 비간섭 광원에 의한 물체나 자체 발광하는 물체에 대해서도 그림3과 같은 구성을 이용하여 홀로그래피 적응광학 기술을 적용할 수 있는 가능성이 확인되었다 [19]. 앞으로 이를 이용하여 천체망원경 등에서 더욱 좋은 품질의 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대가 되고 있다.

4. 단일 촬영 기반 자가간섭 홀로그래피 기술

자가간섭 홀로그래피 기술은 phase-shifting의 도입으로 공간적 비간섭성에서 기인한 DC 항을 제거하여 비로소 실용적 의미를 갖는 기술이 되었지만, 한장

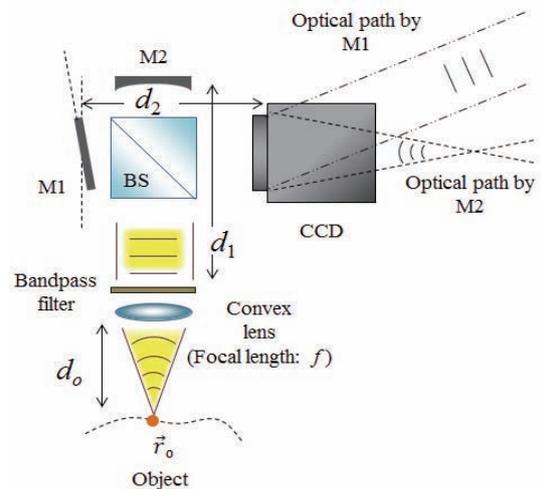


그림 4. 거울의 기울임을 통한 단일 촬영 기반 자가간섭 홀로그래피 기술을 위한 광학 시스템 구성도.

자연광 홀로그래픽 카메라 기술

의 단파장 복소 홀로그램을 얻기 위해서 최소 3장 이상의 phase-shifting된 영상을 촬영해야 한다는 단점이 있다. 특히 앞서 소개된 풀컬러 홀로그램 카메라를 구현하기 위해서는 한장의 컬러 복소 홀로그램을 얻기 위해 3가지 파장대역에 대한 홀로그램을 얻어야 하고, 파장대역마다 phase-shifting 값이 달라져야 하기 때문에 전체적으로 최소 9장의 이미지 촬영이 필요하다. 이로 인해 동적인 대상에 대한 촬영시에는 오류가 발생할 가능성이 있다. 따라서 최근에는 phase-shifting 기반의 자가간섭 홀로그래피 기술의 단점을 극복하기 위해 단일 영상으로부터 자가간섭 기반 홀로그램을 기록할 수 있는 기술들이 제안되고 있다.

그 중 한가지 방법은 그림4와 같이 홀로그래픽 디스플레이를 위한 off-axis 홀로그램의 아이디어에서 힌트를 얻어, 그림1(a)의 셋업에서 두 개의 거울 중 하나를 기울여줌으로써 각각의 거울에서 반사된 빛의 광경로가 서로 입사각의 차이를 가지고 이미지 센서면에서 간섭을 일으키도록 하는 것이다 [20]. 이 때 두개의 반사된 복사본 중 하나를 물체광 하나를 기준광으로 생각

하면 주파수 영역에서 DC와 +1, -1차 항으로 정보로 분리가 된다. 따라서 적절한 필터링을 통해 단일 간섭 무늬로부터 복소 홀로그램을 얻을 수 있다.

또 한가지 방법은 그림5와 같이 대상 물체로부터의 입사광을 두 개의 광경로로 나눈 후 한 개의 광경로만 4f 시스템과 유사한 구조를 통과하게 하여 파면의 진행 방향을 역전시킴으로써 역시 off-axis 홀로그램과 비슷한 효과를 얻을 수 있도록 하는 방법이다 [21]. Phase SLM을 이용하여 이를 구현하면 보다 간단히 구현할 수 있으며, 이렇게 구현된 시스템으로부터 얻어진 단일 간섭무늬로부터 Fourier 평면에서 DC 항과 +1, -1차 항을 분리함으로써 복소 홀로그램을 얻을 수 있음이 보고되었다.

5. 자가간섭을 이용한 단층 촬영 기술

홀로그래픽 이미징 기술은 대상 물체로부터의 파면의 진폭 뿐 아니라 위상까지 기록할 수 있는 기술로서 각광을 받아왔으나 측정 기술로서는 한계가 존재한다. 이는 대상 물체로부터 발생하는 파면을 복소 홀로그램으로부터 복원하여 임의의 평면에 대해 파면을 진행시키더라도 탈초점(out-of-focus) 영상을 제거할 수 없기 때문에 대상 물체의 단층별로 분리된 영상을 얻을 수는 없기 때문이다. 따라서 홀로그래픽 이미징 기술이 측정 기술로서 의미를 갖도록 하기 위해서는 대상 물체에 대한 단층 촬영을 할 수 있는 방법을 제공하여야 한다.

이에 Kelner 등은 위상핀홀(phase-pinhole)을 도입하여 자가간섭의 원리를 이용하여 단층 촬영을 할 수 있는 방법을 개발하였다 [22]. 이 때 위상 핀홀은 핀홀의 구멍에 위상차를 인가할 수 있는 핀홀을 의미하며, phase SLM을 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. 그

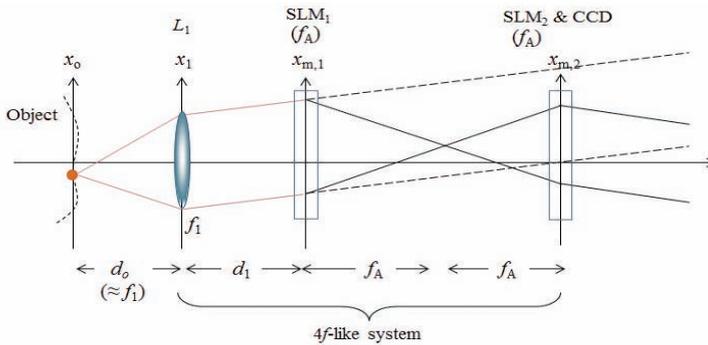


그림 5. 4f 유사 시스템을 이용한 단일 촬영 기반 자가간섭 홀로그래피 기술의 개념도.

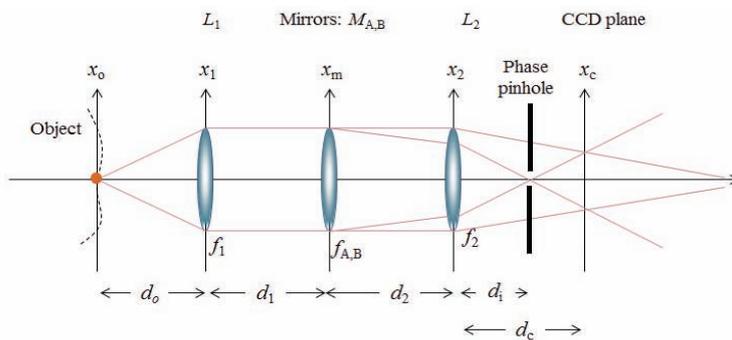
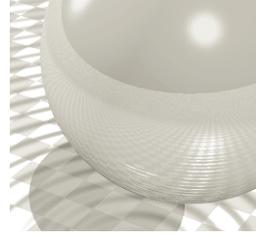


그림 6. 위상 핀홀을 이용한 자가간섭 기반 단층 촬영 기술의 개념도.



림6과 같은 구성을 이용하여 기존의 자가간섭 홀로그래피 시스템과 유사하게 대상 물체로부터의 파면을 두 개의 광경로로 나누고, 두 개의 광경로가 서로 다른 곡률을 가진 렌즈 (혹은 거울)에 의해서 반사된 후 두 개의 파면이 동일한 넓이로 겹치는 지점에 이미지 센서를 위치시킨다. 이 때 두 개의 광경로는 출력 렌즈로부터 서로 다른 거리에 대상 물체에 대한 초점을 맺게 되는데, 출력 렌즈에 가까운 초점면에 위상편향을 위치시키면, 이 편향에 초점을 맺는 성분만이 이미지 센서 상에서 편향의 phase-shifting에 따라 변화하는 간섭 무늬를 만들게 된다. 따라서 대상 물체의 3차원 공간상의 편향에 대응되는 한 점만이 phase-shifting에 의해서 유효한 값으로 측정이 되며, 이 위상편향의 위치를 xyz 방향으로 스캐닝함으로써 대상 물체에 대한 단층 영상을 얻을 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 단층 촬영을 위해 3차원 공간의 xyz 좌표별로 스캐닝을 해야하므로 촬영 시간을 줄일 수 있는 연구가 더 필요하다고 보인다.

6. 결론

본고에서는 자가간섭이라는 방법을 이용하여 홀로그래픽 카메라 연구에 있어서 중요한 첫발을 떤음을 살펴보았다. 특히 이를 통해 자연광을 조명으로 하는 야외 풍경에 대한 복소 홀로그램을 처음으로 기록한 매우 중요한 연구 결과가 보고되었다. 자가간섭 홀로그래피 기술은 조명에 아무런 제약이 없기 때문에 이를 이용하여 마치 일반적인 디지털 카메라처럼 이용할 수 있는 홀로그래픽 카메라의 실현 가능성을 엿볼 수 있다. 또한 홀로그래픽 카메라가 실현된다면 실사 홀로그램 콘텐트를 쉽게 확보할 수 있어 홀로그래픽 디스플레이 활성화에도 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 앞서 살펴본 바와 같이 홀로그래피를 도입할 수 없었던 다양한 분야에 홀로그래피 기술을 도입할 수 있는 길을 열었기에 앞으로 다양한 응용기술들이 개발될 것으로 예상된다. 하지만 자가간섭 홀로그래피 이미징 기술은 공간적 비간섭성으로 물체의 점광원 수가 많아질수록 이미지 센서 비트심도(Bit depth)의 대부분이 DC 항에 의해 사용되고 정작 중요한 간섭 무늬 정보는 매우 적은 비

트심도를 통해 표현되게 되는데, 이는 결과적으로 복원되는 영상의 대비(contrast)가 떨어지는 효과로 나타난다. 따라서 보통 좋은 품질의 영상을 촬영하기 위해서는 비트심도가 매우 높은 이미지 센서를 이용하게 되는데, 자가간섭 기반 홀로그래픽 카메라의 상용화를 위해서는 비트심도를 효율적으로 사용할 수 있는 방법에 대한 연구가 필수적이라 생각된다.

참고문헌

- [1] J. Hong, Y. Kim, H.-J. Choi, J. Hahn, J.-H. Park, H. Kim, S.-W. Min, N. Chen, and B. Lee, "Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues," *Appl. Opt.*, 50, H87-H115 (2011).
- [2] D. Gabor, "A new microscopy principle," *Nature*, 161, 777-778 (1948).
- [3] J. Upatnieks and E. N. Leith, "Lensless, three-dimensional photography by wavefront reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.*, 54A, 579-580 (1964).
- [4] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, "Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography," *Appl. Opt.*, 47, D117-D127 (2008).
- [5] H. Kang, T. Yamaguchi, and H. Yoshikawa, "Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram," *Appl. Opt.*, 47, D44-D54 (2008).
- [6] K. Matsushima, H. Nishi, and S. Nakahara, "Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography," *J. Electron. Imaging*, 21, 023002 (2012).
- [7] J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," *Opt. Express*, 17, 6320-6334 (2009).
- [8] T.-C. Poon, "Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis," *J. Opt. Soc. Am. A*, 2, 621-627 (1985).
- [9] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 1555-1556 (1965).
- [10] G. Cochran, "New method of making fresnel transforms with incoherent light," *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 1513-1517 (1966).
- [11] J. Hong and M. K. Kim, "Overview of techniques applicable to self-interference incoherent digital holography," *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.*, 8, 13077 (2013).
- [12] S.-G. Kim, B. Lee, and E.-S. Kim, "Removal of bias and

자연광 홀로그래픽 카메라 기술

the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram," *Appl. Opt.*, 36, 4784-4791 (1997).

[13] D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a Mach-Zehnder radial-shearing interferometer," *Opt. Lett.*, 39, 1857-1860 (2014).

[14] G. Pedrini, H. Li, A. Faridian, and W. Osten, "Digital holography of self-luminous objects by using a Mach-Zehnder setup," *Opt. Lett.*, 37, 713-715 (2012).

[15] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.*, 32, 912-914 (2007).

[16] G. Brooker, N. Siegel, V. Wang, and J. Rosen, "Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy," *Opt. Express*, 19, 5047-5062 (2011).

[17] M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," *Opt. Express*, 21, 9636-9642 (2013).

[18] J. Rosen and G. Brooker, "Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy," *Nat. Photonics*, 2, 190-195 (2008).

[19] M. K. Kim, "Incoherent digital holographic adaptive optics," *Appl. Opt.*, 52, A117-A130 (2013).

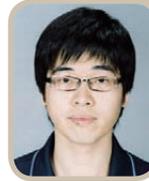
[20] J. Hong and M. K. Kim, "Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration," *Opt. Lett.*, 38, 5196-5199 (2013).

[21] R. Kelner, J. Rosen, and G. Brooker, "Enhanced resolution in Fourier incoherent single channel holography (FISCH) with reduced optical path difference," *Opt. Express*, 21, 20131-20144 (2013).

[22] R. Kelner, B. Katz, and J. Rosen, "Optical sectioning using a digital Fresnel incoherent-holography-based confocal imaging system," *Optica*, 1, 70-74 (2014).

약력

홍지수



- 2014년 6월 - 현재 전자부품연구원 선임연구원
- 2013년 1월 - 2014년 4월 University of South Florida 박사후 연구원
- 2012년 9월 - 2012년 12월 서울대학교 전기공학부 박사후 연구원
- 2012년 8월 서울대학교 전기공학부 공학박사
- 2004년 7월 - 2008년 8월 LG전자기술원 선임연구원
- 2004년 8월 서울대학교 전기공학부 공학석사
- 2002년 8월 서울대학교 전기공학부 공학사