

3차원 물체의 광선 분포 촬영과 이의 응용

박재형 (인하대학교 IT 공과대학 정보통신공학과 부교수)

1 서론

물체의 3차원 촬영 기법은 기존의 2차원 영상에서 얻을 수 없는 추가적인 정보의 획득을 가능하게 하여 다양한 분야에서 여러 가지 새로운 응용을 가능하게 한다. 물체의 3차원 정보를 촬영하기 위하여 홀로그래피, 구조광, TOF(Time of Flight), 다시점 카메라 등 다양한 기술을 사용할 수 있으나, 기존의 2차원 카메라와 같이 일상적인 조명 환경에서 일반인이 휴대하며 간편하게 촬영할 수 있는 기법으로 광선 분포 촬영 기술이 주목받고 있다.

광선 분포란 공간상에 존재하는 광선들의 위치별 방향별 세기 분포를 의미하며 보통 자유 공간상에서의 광선 세기의 전파 손실을 무시하고 특정한 기준면을 통과하는 광선의 분포로 나타낸다. 광선의 방향별 분포가 소실된 일반적인 사진과 달리 광선 분포는 방향별 분포를 그대로 지니고 있어 물체의 깊이 정보를 간접적으로 포함한다. 초기의 광선 분포 촬영 기법들은 다수의 카메라를 2차원 배열 형태로 배치하거나 외부의 렌즈 배열을 통해 형성된 상을 카메라로 촬영하는 방식이어서 시스템이 크고 휴대성이 있지 않았으나, 최근에는 마이크로 렌즈 어레이를 일반적인 카메라의 센서면에 부착하거나 일반적인 카메라의 구성 그대로 초점 거리만 변화시키며 여러 장의 사진을 촬영하는 등의 방식으로 구현되고 있어 일반 카메라와

동일한 편의성과 휴대성을 가지고 광선 분포를 촬영할 수 있다. 이와 같은 방법으로 촬영된 광선 분포에 대한 분석을 통하여 물체의 3차원 정보를 직/간접적인 방법으로 추출하거나 물체의 3차원 정보를 활용한 임의의 시점 영상 합성, 재초점 영상 합성, 깊이 필터링, 홀로그램 합성 등 다양한 응용을 할 수 있다.

본문에서는 광선 분포 촬영 기법들에 대하여 살펴보고, 촬영된 광선 분포를 이용한 응용 기법들에 대하여 소개하고자 한다.

2. 광선 분포 개념과 촬영

2.1 광선 분포 개념

그림 1은 광선 분포의 개념을 보여준다. 물체로부터의 광선들은 다양한 각도로 진행하며 공간을 채우고 있으며 이들의 공간상에서의 분포는 공간상에서의 위치, 진행각도, 파장, 편광에 따른 광선의 세기로 표현할 수 있다. 이 때, 파장과 편광을 생략하고, 광선이 자유 공간을 진행할 때의 회절과 손실을 무시한다면 광선 분포는 임의의 기준면에서의 위치 (x, y) 와 기준면을 통과하는 광선의 각도 (θ_x, θ_y) 를 이용하여 $L(x, y, \theta_x, \theta_y)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 간단한 모델에서 광선 분포는 $L(x, y, \theta_x, \theta_y)$ 의 4차원 분포로 표현할 수 있으며 이러한 광선 분포는 문

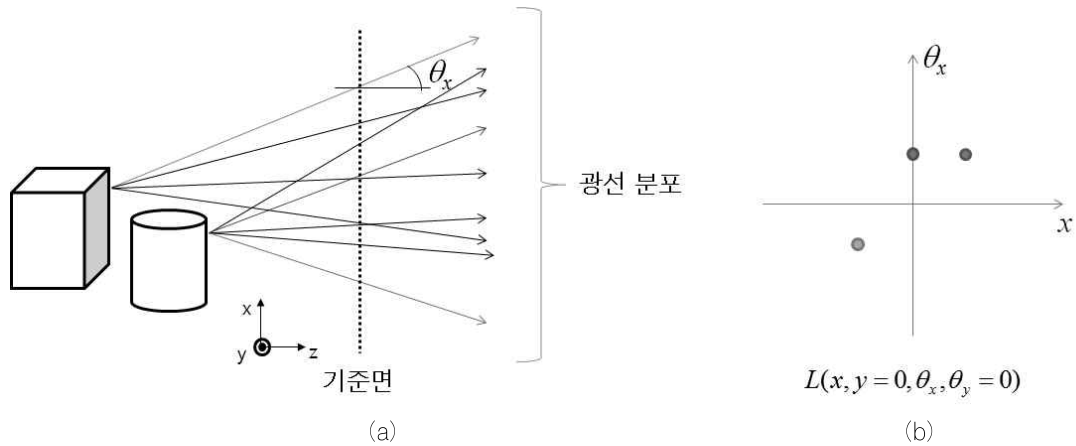


그림 1. 광선 분포의 개념

현들에서 Light ray field, Light field, Ray space, Ray field등 다양한 이름으로 불리우고 있다[1-11]. 그림 1에서 보는 바와 같이 광선 분포 $L(x, y, \theta_x, \theta_y)$ 에서 각 광선은 4차원 좌표계 $(x, y, \theta_x, \theta_y)$ 에서 하나의 점으로 표현되며, 3차원 물체의 깊이 정보는 광선분포에서 광선들간의 관계를 분석함으로써

직접적으로 추출하거나 혹은 간접적으로 활용할 수 있다.

그림 2는 실제 3차원 물체의 광선 분포의 예시를 보여준다. 하나의 3차원 물체에 대하여 4차원 광선 분포를 획득한 후 여러 방향에서의 2차원 단면들을 그림 2에서 표시하고 있다. 그림 2의 왼쪽은 광선분

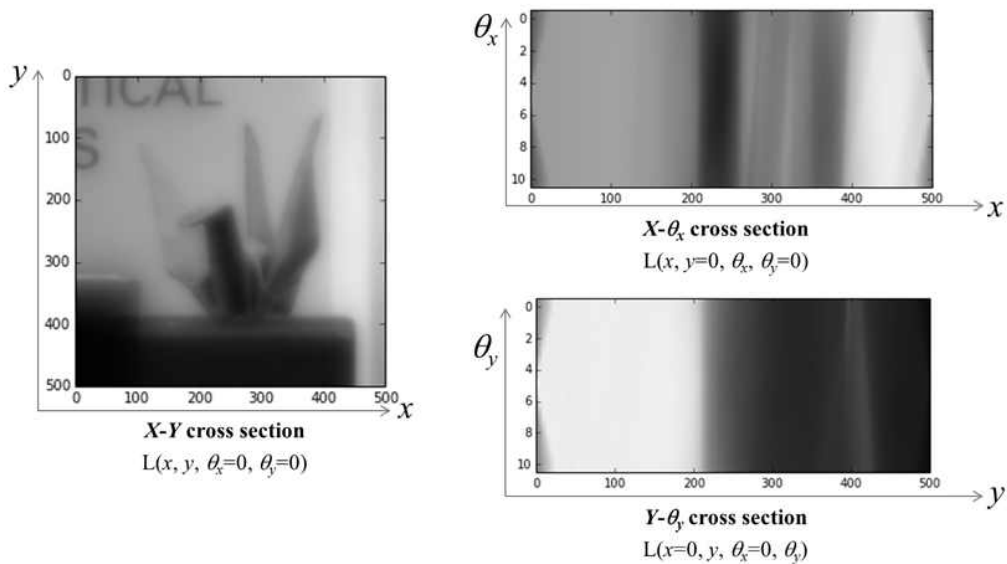


그림 2. 실제 물체의 광선 분포 예시(image from ref.[15])

포에서의 $(\theta_x=0, \theta_y=0)$ 단면을 보여주며 이는 기준면에 수직으로 들어오는 광선들의 위치 분포이므로 즉 기준면 수직 방향의 수직투사 영상(orthographic projection image)와 동일하다. 그림 2의 오른쪽은 광선분포에서의 $(y=0, \theta_y=0)$ 단면과 $(x=0, \theta_x=0)$ 단면을 보여주며 이는 각각 x 축과 y 축 방향으로의 광선의 위치와 각도 분포를 보여준다. 후술하는 바와 같이 Lambertian 반사 특성을 지닌 3차원 물체의 경우 $(y=0, \theta_y=0)$ 단면과 $(x=0, \theta_x=0)$ 단면은 특정한 기울기를 가진 사선들의 합으로 표현되며 이 때의 기울기가 물체점들의 깊이(기준면으로부터의 거리)에 연관된다.

이러한 광선 분포를 실제 촬영하기 위하여 광선의 위치별 분포뿐만 아니라 광선의 방향별 분포를 취득할 수 있는 광학적 기법을 사용해야 한다. 일반적

인 카메라를 핀홀 카메라로 근사하여 생각할 경우, 일반적인 카메라의 센서면에 생기는 영상은 카메라의 핀홀 위치를 통과하는 광선들의 방향별 분포를 나타낸 것으로 이해할 수 있다. 따라서 광선들의 방향별/위치별 분포인 광선 분포를 촬영하기 위하여는 이러한 일반적인 카메라를 2차원 어레이의 형태로 배열하여 광선들의 위치별 분포도 촬영하는 것을 생각할 수 있다. 그러나 이러한 카메라의 2차원 배열은 전체 시스템을 너무 크게 만들므로 일반적으로는 마이크로 렌즈 어레이를 사용한 광학계를 활용하여 광선 분포를 촬영한다. 그림 3은 다양한 광선 분포의 촬영 기법들의 개념을 보여준다. 이하에서는 일반적인 마이크로 렌즈 어레이 기법과 최근 제안된 방법은 초점면 이동 촬영 기법을 보다 자세히 살펴본다.

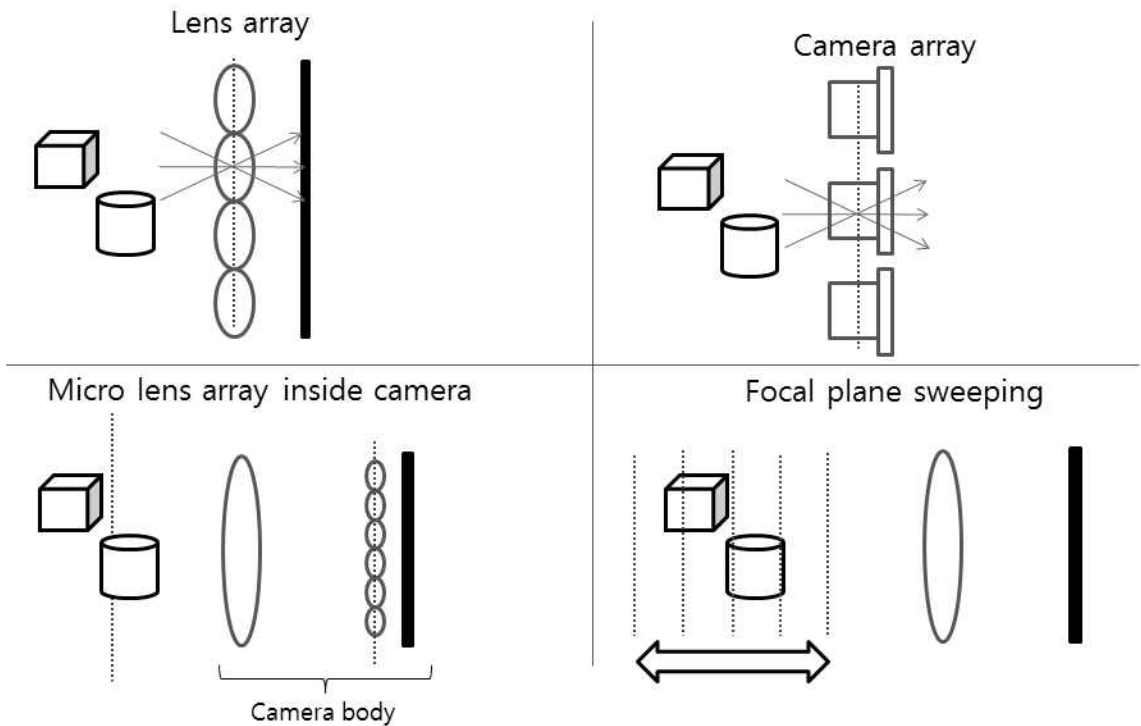


그림 3. 광선 분포의 촬영 방법

2.2 마이크로 렌즈 어레이 이용

광선 분포를 촬영하는 가장 일반적인 방법은 마이크로 렌즈 어레이를 이용하는 것이다 [2,4,6,7,11]. 그림 4에서 보는 바와 같이 마이크로 렌즈 어레이의 초점면에 CCD, CMOS 등 영상 센서를 위치시키고 촬영한다. 마이크로 렌즈 어레이를 핀홀 어레이로 근사하여 생각하면, 영상 센서에는 핀홀 중심들을 통과한 광선들의 방향별 분포들이 촬영되는 것으로 이해할 수 있다. 즉, 렌즈 어레이를 기준면으로 한 광선 분포를 한 번의 촬영으로 취득하게 된다. 그림 4에서 보듯이 실제 촬영된 영상은 렌즈 어레이의 각각의 렌즈가 형성한 작은 영상들의 2차원 배열의 형태이며, 이 때 각각의 작은 영상은 해당하는 렌즈의 중심을 통과한 광선들의 방향별 분포를 표현한다.

이와 같은 렌즈 어레이를 이용한 촬영 기법은 집적 영상 기법 (Integral imaging)으로도 불리우며 광선 분포를 촬영하는 가장 대표적인 방법으로 자리매김 하고 있다. 그러나 이러한 방법은 렌즈 어레이의 각 렌즈가 형성한 영상 간의 중첩, 촬영 가능한 3차원 물체의 렌즈 어레이의 크기와 비슷한 정도로 작아야 한다는 점등의 단점을 지닌다.

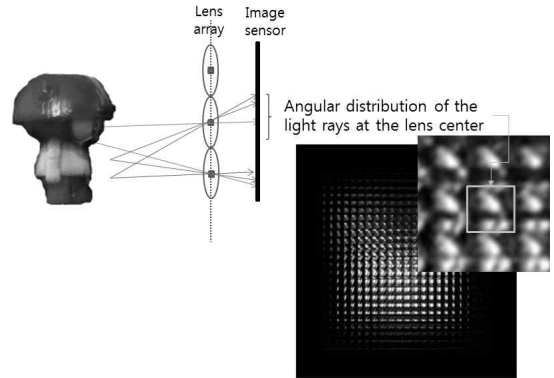


그림 4. 렌즈 어레이를 이용한 광선 분포의 촬영

이와 같은 단점을 해소하고자 최근 그림 3의 왼쪽 아래 및 그림 5와 같이 일반적인 카메라의 센서앞에 마이크로 렌즈 어레이를 삽입하는 기법이 제안되고 널리 활용되고 있다[12]. 3차원 물체의 광선 분포를 바로 렌즈 어레이를 통해 촬영하는 것이 아니라, 3차원 물체의 상을 카메라의 메인 렌즈를 이용하여 마이크로 렌즈 어레이 근처에 형성하고 이 상으로부터의 광선 분포를 마이크로 렌즈 어레이 면에서 촬영한다. 카메라의 메인 렌즈를 이용하여 3차원 물체의 축소된 상을 형성하므로 일반적인 카메라와 비슷한 FOV를 얻을 수 있으며, 메인 렌즈의 초점수(f-number) 조절을 통해 렌즈 어레이 영상간의 중첩도 방지할 수 있

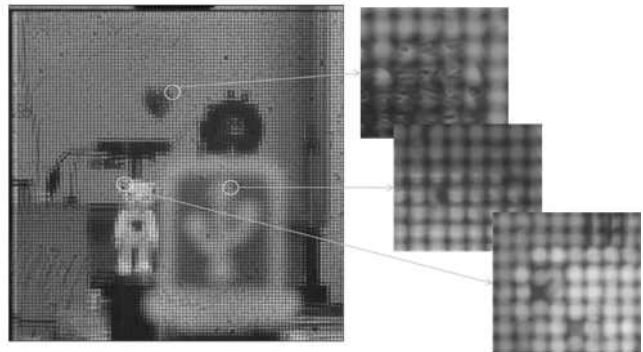
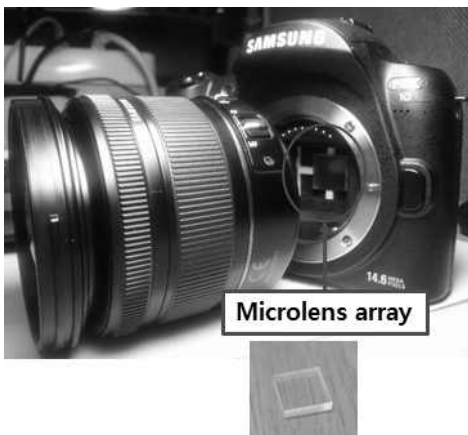


그림 5. 일반적인 카메라의 센서 앞에 마이크로 렌즈 어레이를 삽입

는 장점이 있다. 무엇보다 마이크로 렌즈 어레이가 카메라의 내부에 장착되어 있으므로 외경상 일반적인 카메라와 동일하여 매우 간편하게 광선 분포를 촬영할 수 있다. 최근 이러한 방식의 광선 분포 카메라가 Lytro, Raytrix 등의 이름으로 미국과 독일에서 출시된 바 있으며 그 응용예가 꾸준히 증가하고 있다 [13-14].

2.3 초점 이동 촬영 이용

광선 분포를 촬영하는 다른 방법은 초점면을 이동하며 다수의 영상을 촬영하는 것이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 마이크로 렌즈 어레이와 같은 부가적인 광학계 없이 일반적인 카메라를 그대로 사용하되 카메라의 초점면을 이동 시키며 다수의 영상을 촬영하고 촬영된 영상들로부터 광선 분포를 획득하는 기법이다[15-16].

초점 이동 촬영 기법의 원리는 그림 7과 같다. 광선 분포의 기준면을 임의로 상정하고 카메라의 초점면을 그 기준면에 위치시킨 후 촬영하면 그림 7의 위쪽과 같이 카메라 센서의 각 픽셀이 기록하는 것은 기준면의 해당 위치를 다른 각도로 통과하는 광선들의 합이다. 따라서 이 경우 촬영되는 영상은 4차원 광선

분포를 각도(θ_x, θ_y)축 방향으로 투사 적분한 2차원 데이터로 이해할 수 있다. 그림 7의 아래와 같이 카메라의 초점면이 광선 분포의 기준면에서 벗어나 있을 경우 카메라 센서의 각 픽셀은 광선 분포의 기준면의 다른 위치를 다른 각도로 통과하는 광선들의 합을 기록하며, 이 경우 촬영된 영상은 광선 분포의 기울어진 투사 적분으로 이해할 수 있다. 따라서 카메라의 초점면을 이동 시키며 여러 장의 영상을 촬영하면 4차원 광선 분포의 다양한 각도로의 2차원 투사 적분 데이터를 얻게 된다.

이와 같이 4차원 광선 분포의 다양한 각도로의 투사 적분 데이터를 얻은 후, 본래의 4차원 광선 분포를 복원하는 것은 역투사 기법을 이용하여 구현할 수 있다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 얻어진 2차원 투사 적분 데이터 (촬영 영상)들을 본래의 4차원 광선 분포 공간에 역투사하며 더해주고, 이를 다시 투사 적분하여 촬영된 영상과 비교하여 보정하는 과정을 반복적으로 수행하면 본래의 4차원 광선 분포를 근사적으로 얻을 수 있다.

그림 9는 이러한 방법으로 촬영한 영상들과 복원된 광선 분포로부터 후술하는 방법으로 임의의 시점 영상을 합성한 예를 보여준다. 카메라를 고정된 위치에

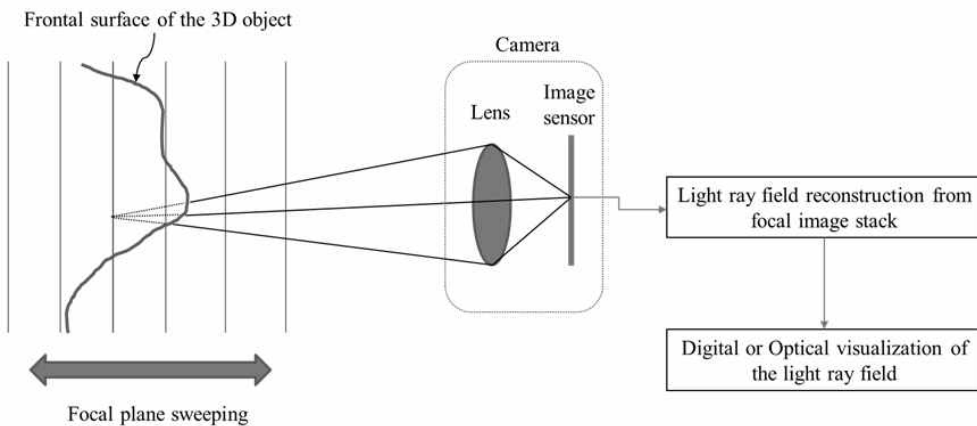


그림 6. 초점 이동 촬영을 통한 광선 분포 획득

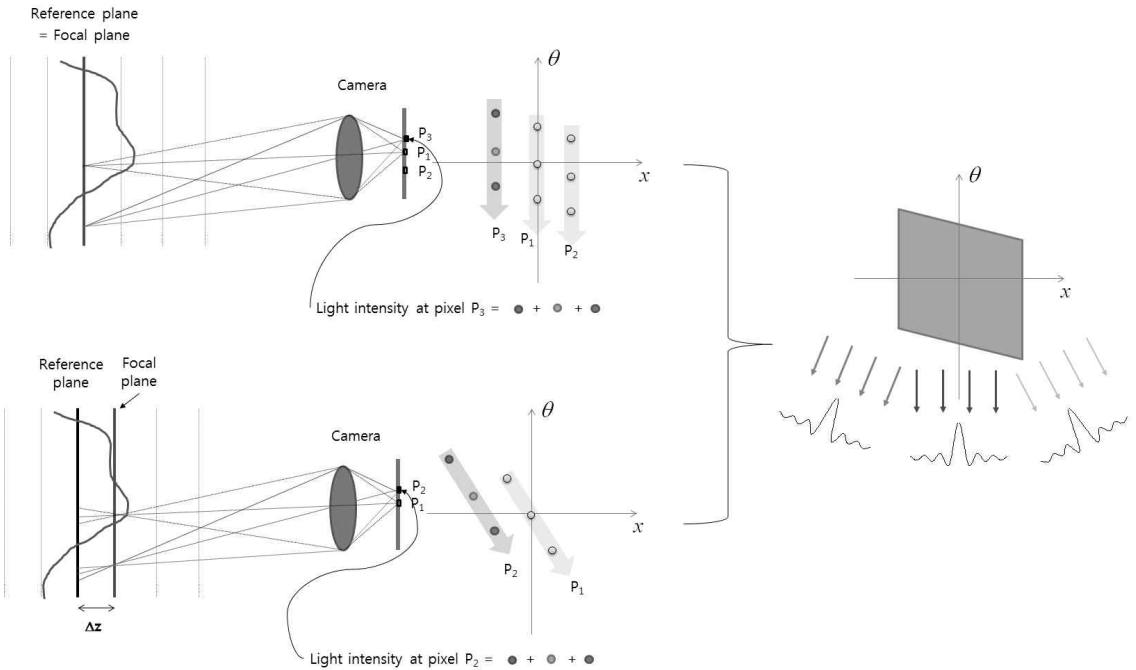


그림 7. 특정 초점면에서의 촬영 영상과 광선 분포의 관계

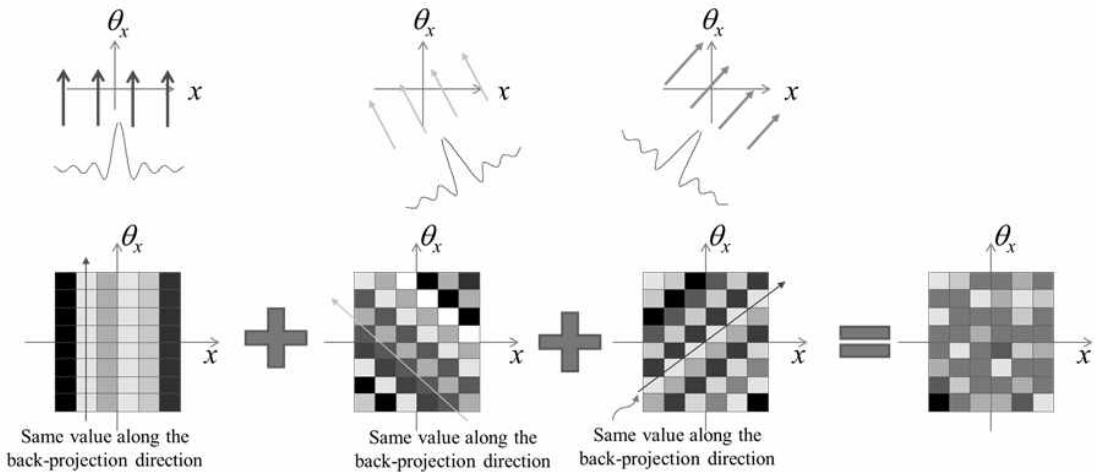


그림 8. 촬영 영상들로부터의 광선 분포 복원

서 초점 거리만 이동하며 촬영하였음에도 불구하고, 3차원 물체를 서로 다른 각도에서 바라본 시차(parallax)가 있는 시점 영상을 합성할 수 있음을 볼 수 있으며, 이는 복원된 광선 분포에 물체의 3차원 정

보가 올바르게 포함되어 있음을 보여준다.

이와 같은 초점 이동 촬영 기법은 일반적인 카메라를 그대로 사용한다는 점에서 큰 이점이 있으며, 또, 촬영된 광선 분포의 해상도가 카메라 자체의 해상도

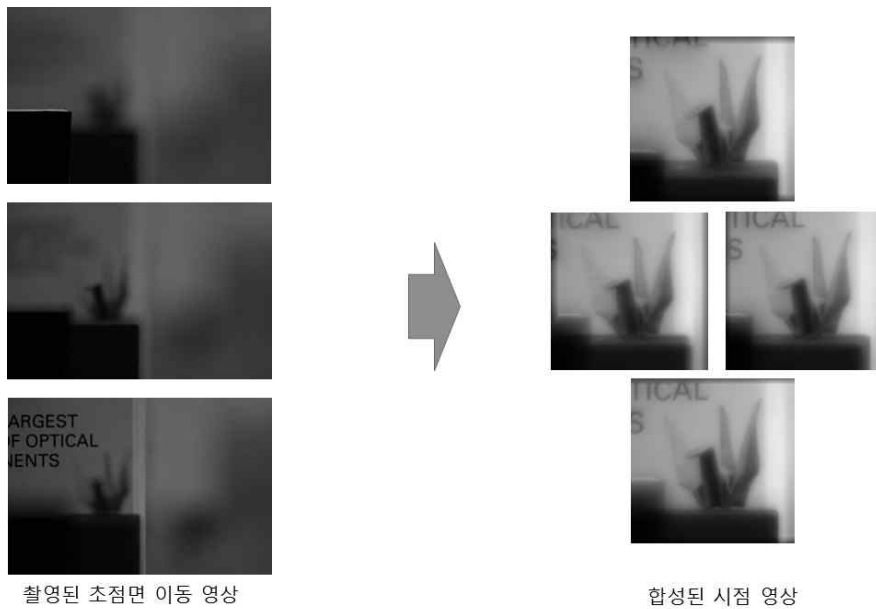


그림 9. 초점 이동 촬영 영상과 복원된 광선 분포를 이용하여 합성한 시점 영상의 예

와 버금갈 정도로 높다는 데 장점을 가지고 있다. 그러나 다수의 촬영을 필요로 하므로 움직이는 물체에 대한 광선 분포 촬영에는 어려움이 있고 얻을 수 있는 광선 분포의 각도 영역이 카메라의 물체 공간 초점수 (f-number)에 의하여 제한받는다는 것도 극복해야 할 이슈 중 하나이다.

3. 광선 분포의 응용

3.1 임의 시점 영상 및 재초점 영상 합성

획득한 광선 분포를 이용하는 대표적인 방법은 촬영한 3차원 물체를 임의의 위치에서 바라본 시점 영상이나 임의의 거리에 재초점시킨 영상을 합성하는 것이다. 그림 10은 시점 영상 합성의 원리를 보여준다. 그림 10의 가운데 그림과 같이 광선 분포에서 특정한 각도를 갖는 광선들만을 추출하면 3차원 물체를 해당 각도로 바라본 평행 투사 영상 (orthographic

projection image)를 얻을 수 있다. 또, 3차원 물체를 바라보는 시점의 위치로 수렴하는 광선들을 광선 분포로부터 추출할 경우 해당 시점 위치에서의 원근 영상 (perspective projection image)도 역시 합성 가능하다. 그림 11은 재초점 영상 합성 원리를 보여준다. 그림 11의 가운데와 같이 광선 분포를 특정한 각도로 투사 적분하면 투사 적분 각도에 해당하는 거리로 재초점이 된 영상을 합성할 수 있다. 이와 같은 시점 영상, 재초점 영상 합성 기법을 이용하면, 촬영한 광선 분포로부터 3차원 물체를 다양한 각도에서 바라본 모양이나 다양한 깊이면에 초점을 맞춘 모양을 합성해낼 수 있어, 3차원 물체의 구조를 판별하는데 도움이 될 수 있다.

전술한 바 있는 마이크로 렌즈 어레이를 이용하여 광선 분포를 촬영하는 상용화된 카메라 Lytro의 경우, 이와 같은 시점 영상 합성과 재초점 영상 합성을 카메라의 주요 기능으로 활용하고 있다. 그림 12는 이와 같은 기술을 현미경에 적용한 예를 보여준다. 현

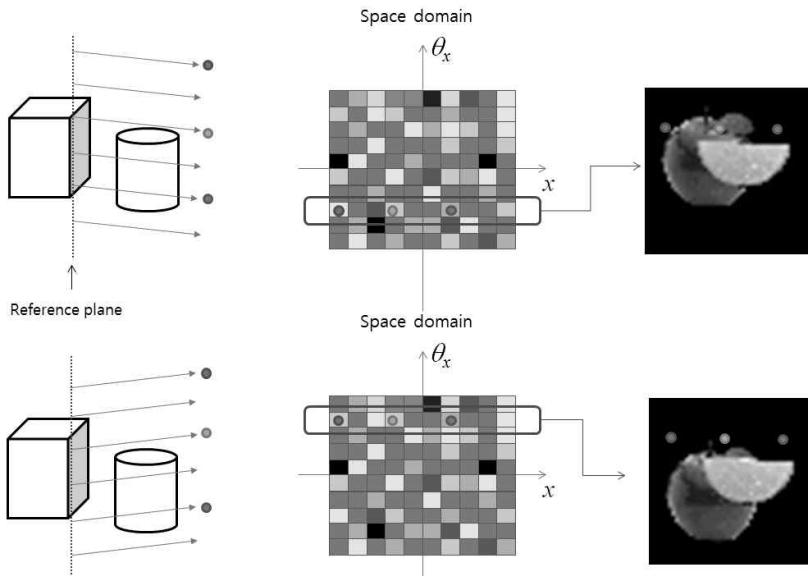


그림 10. 광선 분포로부터의 시점 영상 합성

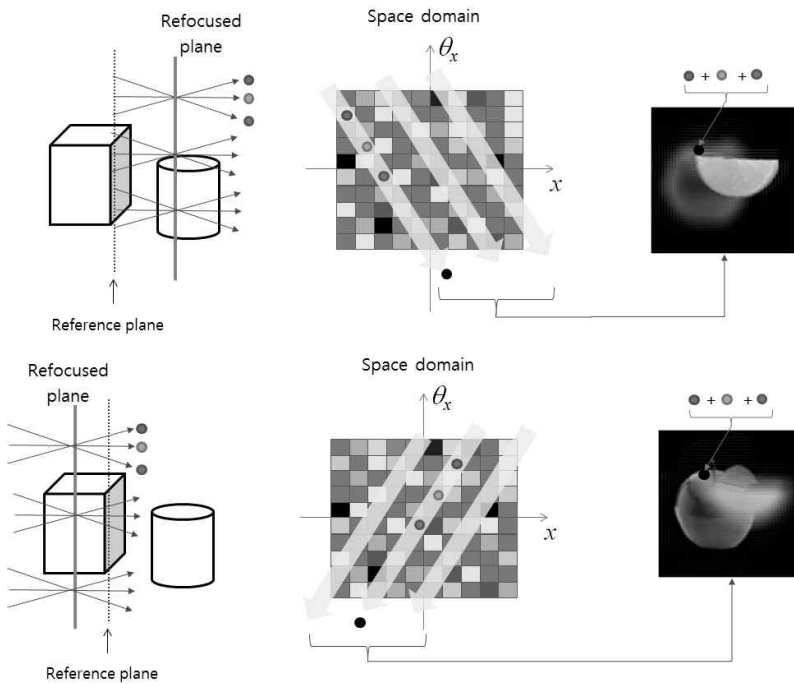


그림 11. 광선 분포로부터의 재초점 영상 합성

미경의 광학계에 마이크로 렌즈 어레이를 삽입하여 미세 시료의 intermediate image에 대한 광선 분포

를 촬영함으로써 미세 시료의 3차원적인 구조를 한번의 촬영으로 가시화 할 수 있다[17-21].

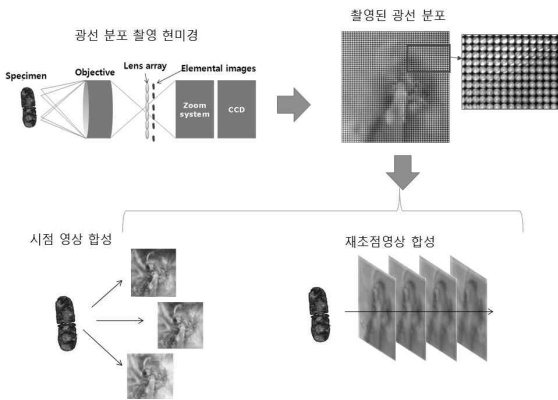


그림 12. 광선 분포 촬영 현미경으로의 응용

3.2 공간-각 주파수 특성을 이용한 깊이 영역 필터링

광선 분포의 다른 응용예로는 물체의 깊이 기반 필터링이 있다[22]. 그림 13은 물체의 깊이와 광선 분포의 공간-각 주파수 특성 사이의 관계를 보여준다. 그림 13의 왼쪽과 같이 편평한 lambertian 물체가 광선 분포의 기준면으로부터 z 만큼 떨어져 있다면 그에 해당하는 광선 분포의 (x, θ_x) 및 (y, θ_y) 방향의 단면은 그림 13의 가운데와 같이 기울어진 직선들의 집합의 형태로 나타난다. 이러한 광선 분포를 푸리에 변환하면 4차원 공간-각 주파수 공간의 (f_x, f_{θ_x}) 및

(f_y, f_{θ_y}) 방향의 단면은 그림 13의 오른쪽과 같이 원점을 지나는 직선의 형태로 표현되며 이 때 이 직선의 기울기는 물체의 깊이 z 에 의하여 결정된다[22-24]. 따라서 임의의 깊이 분포를 갖는 3차원 물체에 대한 광선 분포는 공간-각 주파수 공간에서 원점을 지나는 직선들의 합으로 표현된다.

깊이 필터링은 그림 14와 같이 광선 분포의 주파수 공간에서 원점을 지나는 스펙트럼 영역을 기울기별로 필터링하여 이루어진다. 예를 들어 그림 14과 같이 3개의 깊이면에 물체들이 존재할 경우 주파수 공간에서 세 개 중 하나의 깊이면에 해당하는 기울기를 지나는 직선 부분을 지움으로써, 두 개의 물체만을 포함하는 광선 분포를 만들어 낼 수 있다. 이와 같은 방법을 응용하면 촬영된 광선 분포에서 임의의 깊이 영역들만의 조합을 남기고 나머지 영역을 제거하는 등의 필터링을 할 수 있다.

이와 같은 광선 분포를 이용한 깊이 필터링은 물체의 깊이 정보를 적극적으로 추출할 필요 없이 이루어지므로 매우 안정적으로 동작하는 장점을 지닌다. 그러나 실제 구현에서는 필터링의 discrimination ratio가 높지 않은데 이것은 서로 다른 깊이 영역에 해당하는 광선 분포의 기울어진 직선 모양 스펙트럼이 주파수

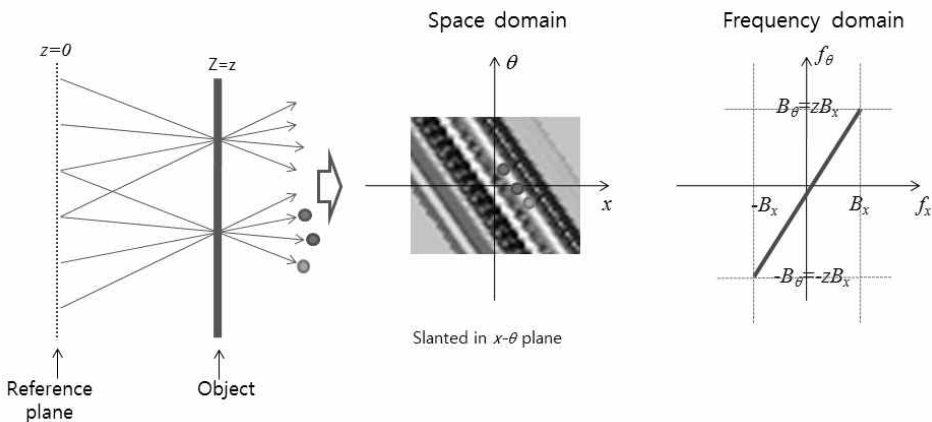


그림 13. 물체의 깊이와 광선 분포의 주파수 특성과의 관계

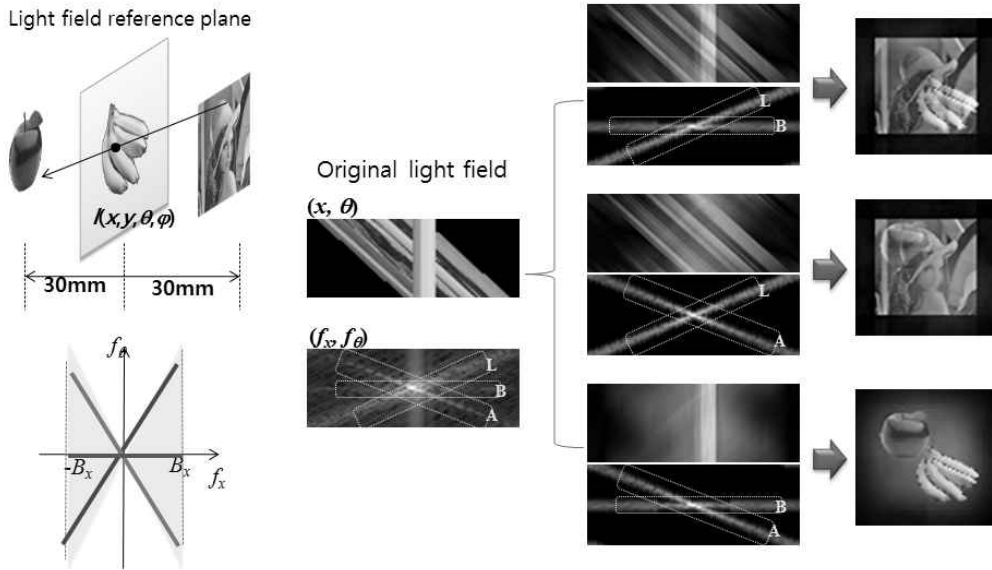


그림 14. 광선 분포의 주파수 특성을 이용한 물체의 깊이 기반 필터링

	f_x-f_θ plot* (at $f_y=f_\phi=0$)	f_y-f_ϕ plot* (at $f_x=f_\theta=0$)	$x-\theta$ plot (at $y=\phi=0$)	$y-\phi$ plot (at $x=\theta=0$)	Synthesized central view
Original					
Filtered for 'J'					
Filtered for 'K'					
Filtered for 'M'					
Filtered for 'J'					
Filtered for 'K'					
Filtered for 'M'					

그림 15. 격자(grating) 무늬 투사를 이용한 물체의 깊이 영역 필터링 향상

공간의 원점에서 서로 중첩되기 때문이다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 물체에 일정한 주기의 grating 패턴을 투사함으로써 광선 분포를 주파수 공간에서 이

동시켜 중첩된 스펙트랄 에너지를 감쇄시킴으로써 discrimination ratio를 높이는 기법도 제안된 바 있다. 그림 15는 이러한 방법의 결과를 보여준다.

3.3 홀로그램 합성

광선 분포는 3차원 물체의 홀로그램을 합성하는 데도 활용될 수 있다. 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 3차원 영상을 표시할 수 있는 이상적인 디스플레이 기술로서 생각되고 있어 최근 활발히 연구 개발이 이루어지고 있다. 그러나 홀로그래픽 3차원 디스플레이가 구현되더라도 그 콘텐츠로 쓰일 3차원 홀로그램 데이터의 취득이 쉽지 않다면 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 활용에 큰 제약이 따르게 된다. 이에 따라 일반 사용자가 실제 물체의 3차원 홀로그램 데이터를 손쉽게 촬영할 수 있는 기법에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 광선 분포를 이용한 홀로그램 합성은 그 후보 기술 중 하나로서 연구 되고 있다[25-31].

그림 16은 광선 분포를 이용한 홀로그램 합성의 원리를 보여준다. 실제 물체의 광선 분포를 촬영한 다음 그로부터 전술한 방법에 의하여 여러 방향의 평행 투사 영상(orthographic projection image)들을 합성한다. 합성된 평행 투사 영상들이 푸리에 홀로그램에서 광학적으로 재생된다고 생각하면 그림 16의 왼쪽과 같이 홀로그램면상의 하나의 점이 하나의 평행 투사 영상에 대응된다. 이를 이용하여 각각의 평행 투

사 영상에 평행 투사 각도에 해당하는 위상 함수를 곱하고 이를 적분하면 푸리에 홀로그램의 하나의 복소장 값을 얻는다. 이를 여러 개의 평행 투사 영상에 대하여 반복함으로써 푸리에 홀로그램을 합성할 수 있다. 이와 같은 방법으로 만들어지는 홀로그램은 3차원 물체 표면의 위상이 일정하다고 가정할 때, 물체의 복소장과 동일한 복소장을 표현하는 홀로그램이 된다. 그러나 만들어지는 홀로그램의 해상도가 광선 분포로부터 만들어지는 평행 투사 영상의 개수에 의하여 결정되므로 일반적으로 고해상도 영상을 표현하기에는 충분하지 않다. 따라서 그림 16의 오른쪽과 같이 각각의 평행 투사 영상들을 푸리에 홀로그램의 점이 아니라 국소 영역(patch)에 대응시키는 기법도 제안되었다.

그림 17은 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 광선 분포 획득 기법을 이용하여 3차원 물체의 광선 분포를 얻고 이로부터 전술한 방법으로 홀로그램을 합성한 예를 보여주며 그 광학적 복원 결과는 그림 18에 나타내었다.

그림 18은 광학적으로 재생된 홀로그래픽 영상을 초점면별로 촬영한 것으로써 카메라의 초점면에 따라 물체의 다른 부분이 초점이 맞는 것을 보여주며 이는

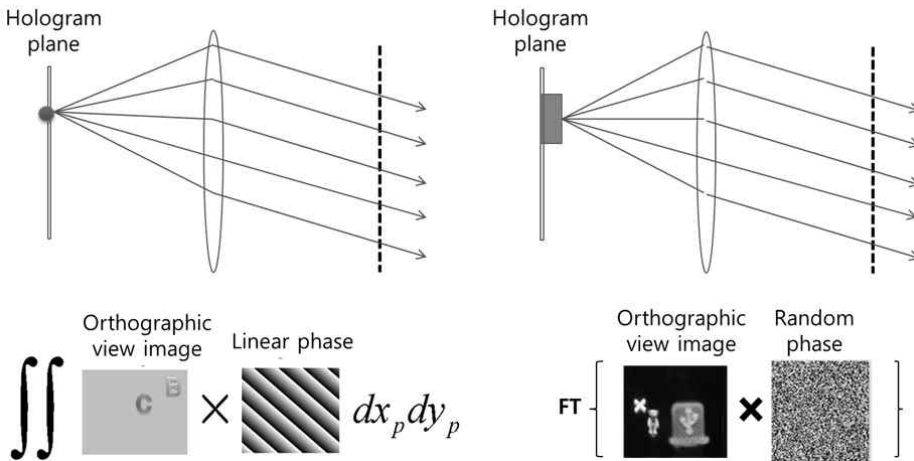


그림 16. 광선 분포를 이용한 홀로그램 합성 개념

특집 : 광기술분야의 최근동향

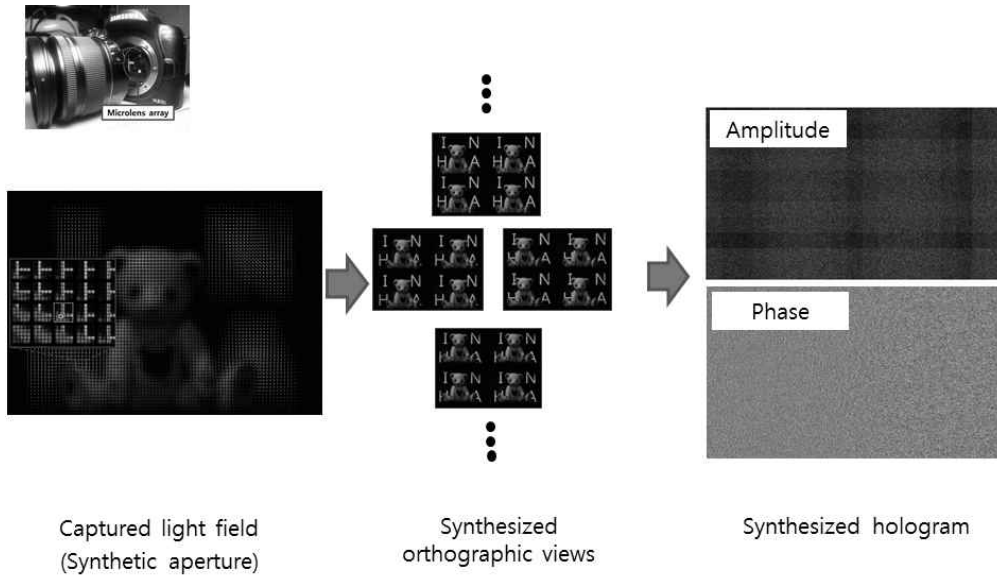


그림 17. 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 광선 분포 획득과 합성된 홀로그램의 예(image from ref.[26])

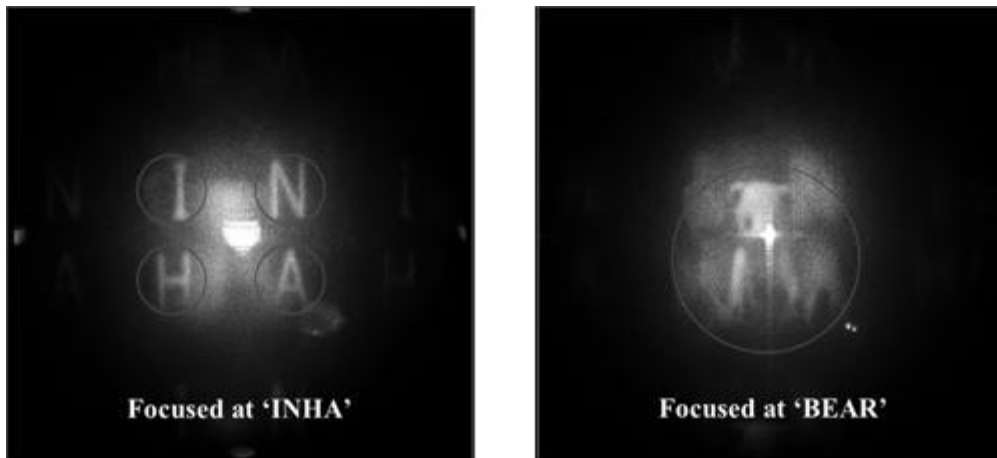


그림 18. 그림 17의 홀로그램을 광학적으로 복원한 결과(image from ref.[26])

재생된 홀로그래픽 영상이 3차원 영상임을 확인시켜 준다. 이와 같은 광선 분포를 이용한 홀로그램 합성 기법은 기존의 전통적인 간섭계 대신 간편한 광선 분포 획득 광학계를 활용하여 일반 조명하에서 홀로그램을 촬영/합성 할 수 있게 하여 홀로그래픽 3차원 콘텐츠를 손쉽게 확보하는 데 유용하게 활용될 것으로

기대된다.

3.4 기타 응용

광선 분포는 전술한 것 이외에도 다양한 응용에 활용될 수 있다. 촬영된 광선 분포로부터 장애물에 의해 부분적으로 가려져 있는 물체의 전체 모습을 복원하

거나[32], 3차원 물체에 대한 광상관기를 구현하거나[33] 3차원 생체 시료의 광학적 인식을 수행하는 것[34] 등이 그 예이며 이러한 광선 분포의 응용은 계속적으로 확대될 것으로 예측된다.

4. 결 론

광선 분포는 간단한 광학계를 이용하여 일반 조명 환경하에서 간편하게 획득 가능하면서도 물체의 3차원 정보를 포함하고 있어 3차원 정보에 기반 한 다양한 응용에 활용될 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지고 있다. 특히 다른 깊이 측정 기법과는 달리 물체에 특별한 빛을 투사하거나 촬영된 영상에 대한 깊이 추출 영상 처리를 하는 것이 필요하지 않은 패시브한 기법이므로 기존의 방법들이 갖고 있는 물체의 반사 특성 불균일 혹은 영상 처리에서 오는 오차에서 자유로운 것도 광선 분포 기반 기법의 활용성을 높여주는 요인이다. 그러나 광선 분포의 촬영 기법은 일반적으로 일정한 카메라 해상도를 나누어 광선의 위치별 각도별 분포를 획득하므로, 획득된 광선 분포의 해상도가 아직 충분히 높지 못한 한계도 지니고 있다. 향후 추가적인 연구 개발을 통하여 높은 해상도의 광선 분포를 간편하게 촬영하는 기술들이 개발되기를 기대한다.

참 고 문 헌

[1] G. Lippmann, "La Photographie Int'egrale," Academie des Sciences 146:446 - 451,(1908).
 [2] B. Lee, "Three-dimensional displays, past and present," Phys. Today 66(4), 36 - 41 (2013).
 [3] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szelinski, and M. Cohen, "The Lumigraph," Proc. ACM Siggraph, pp 43 - 54 (1996).
 [4] J.-H. Park, K. Hong, and B. Lee, "Recent progresses in three-dimensional information processing based on integral imaging," Appl. Opt. 48(34), H77-94 (2009).
 [5] J. Hong et al., "Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues," Appl. Opt. 50(34), H87 -H115 (2011).
 [6] X. Xiao, B. Javidi, M. Martinez-Corral, and A. Stern, "Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications," Appl. Opt. 52(4), 546-560 (2013).
 [7] J. Kim et al., "Real-time capturing and 3D visualization

method based on integral imaging," Opt. Express 21(16), 18742 - 18753 (2013).
 [8] E. Adelson and J. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14(02), 99-106 (1992).
 [9] S. Shroff and K. Berkner, "Image formation analysis and high resolution image reconstruction for plenoptic imaging systems," Appl. Opt. 52, D22-D31 (2013).
 [10] T. Bishop and P. Favaro, "The light field camera: extended depth of field, aliasing and super-resolution," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 34(5), 972 - 986 (2012).
 [11] J. Arai, T. Yamashita, M. Miura, H. Hiura, N. Okaichi, F. Okano, and R. Funatsu, "Integral three-dimensional image capture equipment with closely positioned lens array and image sensor," Opt. Lett. 38(12), 2044 - 2046 (2013).
 [12] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford Tech. Rep. CTSR 2005-02 (Stanford University, 2005).
 [13] <https://www.lytro.com/>
 [14] <http://www.raytrix.de/>
 [15] J.-H. Park, S.-K. Lee, N.-Y. Jo, H.-J. Kim, Y.-S. Kim, and H.-G. Lim, "Light ray field capture using focal plane sweeping and its optical reconstruction using 3D displays," Opt. Express 22(21), 25444-25454 (2014).
 [16] A. Levin, and F. Durand, "Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior," Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 1831-1838 (2010).
 [17] M. Levoy, Z. Zhang, and I. McDowall, "Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays," J. Microsc. 235(2), 144 - 162 (2009).
 [18] Y. T. Lim, J. H. Park, K. C. Kwon, and N. Kim, "Resolution-enhanced integral imaging microscopy that uses lens array shifting," Opt. Express 17(21), 19253 - 19263 (2009).
 [19] M. Broxton, L. Grosenick, S. Yang, N. Cohen, A. Andalman, K. Deisseroth, and M. Levoy, "Wave optics theory and 3-D deconvolution for the light field microscope," Opt. Express 21(21), 25418-25439 (2013).
 [20] J. Kim, J.-H. Jung, Y. Jeong, K. Hong, and B. Lee, "Real-time integral imaging system for light field microscopy," Opt. Express 22(9), 10210-10220 (2014).
 [21] A. Orth and K. Crozier, "Microscopy with microlens arrays: high throughput, high resolution and light-field imaging," Opt. Express 20(12), 13522 - 13531 (2012).
 [22] J.-H. Park, and K.-M. Jeong, "Frequency domain depth filtering of integral imaging," Opt. Express 19(19), 18729-18741 (2011).
 [23] T. Georgiev, C. Intwala, S. Babacan, and A. Lumsdaine, "Uni-fied Frequency Domain Analysis of Lightfield Cameras," Proc. ECCV, pp 224 - 237 (2008).
 [24] A. Levin, SW. Hasinoff, P. Green, F. Durand, and WT. Freeman, "4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension," ACM Trans Graph (Siggraph) 28(3) pp.97 (2009).
 [25] N.T. Shaked, B. Katz, and J. Rosen, "Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods," Appl. Opt. 48(34), H120-H136 (2009).
 [26] S.-K. Lee, S.-I. Hong, Y.-S. Kim, H.-G. Lim, N.-Y. Jo, and J.-H. Park, "Hologram synthesis of three-dimensional real

- objects using portable integral imaging camera,” Opt. Express 21(20), 23662-23670 (2013).
- [27] Y. Sando, M. Itoh, and T. Yatagai, “Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional fourier spectra of real existing objects,” Opt. Lett. 28(24), 2518-2520 (2003).
- [28] Y. Rivenson, A. Stern, and J. Rosen, “Compressive multiple view projection incoherent holography,” Opt. Express 19(7), 6109-6118 (2011).
- [29] J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, “Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images,” Opt. Express 17(8), 6320-6334 (2009).
- [30] T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, “Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography,” Appl. Opt. 45(17), 4026-4036 (2006).
- [31] K. Wakunami and M. Yamaguchi, “Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane,” Opt. Express 19(10), 9086-9101 (2011).
- [32] Y. Piao, and E.-S. Kim, “Performance-enhanced recognition of a far and partially occluded 3-D object by use of direct pixel-mapping in computational curving-effective integral imaging”, Optics Communications, 284(3) pp. 747-755, (2011).
- [33] J.-H. Park, J. Kim, and B. Lee, “Three-dimensional optical correlator using a sub-image array,” Opt. Express 13(13), 5116-5123 (2005).
- [34] B. Javidi, S. Yeom, I. Moon, and M. Daneshpanah, “Real-time automated 3D sensing, detection, and recognition of dynamic biological micro-organic events,” Opt. Express 14(9), 3806 - 3829 (2006).

◇ 저 자 소 개 ◇



박재형 (Jae-Hyeung Park)

2000년 2월 서울대학교 전기공학부 졸업.
2002년 2월 서울대학교 대학원 전기
컴퓨터공학부 졸업(석사). 2005년 8월
서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부
졸업(박사). 2005년 9월~2007년 8월
삼성전자 책임연구원. 2007년 9월~2013년 2월 충북
대학교 정보통신공학부 전임강사, 조교수, 부교수.
2013년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학과 부교수
재직.

주관심 분야 : 3차원 디스플레이, 홀로그래피