

액정 공간 광 변조기를 이용한 피사계 심도의 확장

Extending Depth of Field Using Spatial Light Modulator

홍덕화*, 박강민*, 조형석*

*한국과학기술원 기계공학과

dhhong@lca.kaist.ac.kr

기존 광학계가 지니고 있는 가장 큰 문제점 중의 하나는, 높은 광량으로 상을 얻기 위해 광학계의 구경을 증가시킬 경우 피사계의 심도가 점점 작아진다는 점이다. 피사계 심도를 늘리는 가장 손쉬운 방법은 광계통의 구경을 줄이는 것이다. 하지만 이 방법은 회절 한계를 낮춤으로써 초점 평면에 있는 물체의 해상도를 떨어뜨리는 문제가 있으며, 또한 이미 언급한 바와 같이 상평면에 집중되는 광량을 줄이므로 카메라를 이용하여 영상을 획득할 경우, 신호 대 잡음 비가 너무 작아지는 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 Dowski⁽¹⁾는 파면부호화 방법을 이용하였다. 이 방법의 기본 개념은 출사동에 위상 마스크를 두고 얻은 이미지를 디지털 영상처리 기법을 이용하여 복원함으로써 물체의 위치에 무관하게 선명한 영상을 얻는 것이다. 이 때, 위상 마스크는 그것을 통과하여 만들어지는 점퍼짐 함수가 물체의 위치와 무관하게 일정하도록 만드는 역할을 하며, 이러한 특성으로 인해 뒤이은 디지털 영상 처리가 가능해진다. 이 때 위상 마스크에 의한 위상 변조는 동공 좌표계에서 식(1)과 같은 3차식을 따른다.

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\alpha x^3) & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad |\alpha| \leq 20 \quad (1)$$

이 방법을 이용하면 광량의 손실 없이 피사계의 심도를 상당히 확장시킬 수 있으므로, 여러 적용분야를 찾을 수 있지만 영상 획득 후 거쳐야 하는 디지털 영상 처리에 상당한 시간이 소요된다는 점을 감안하면, 미세조립 시스템 등 실시간 영상 피드백을 얻어야 할 경우에는 피드백 루프에 상당한 시간 지연이 포함될 수밖에 없음을 의미한다.

본 논문에서는 액정 공간 광 변조기(LC-SLM)를 이용하여 광학계의 피사계 심도를 늘이는 방법을 제안한다. 위상 마스크 대신 액정 공간 광 변조기를 사용할 경우 피사계 심도를 늘이기 위한 파면부호화 방법을 선택적으로 사용할 수 있다는 이점이 있다. 즉, 전체 상황을 파악해야 하는 상황에서는 파면부호화 방법을 이용하여 큰 심도로 대상을 관측하며, 물체나 매니플레이터의 위치를 영상으로 피드백하는 경우에는 파면부호화 방법을 이용하지 않고 실시간으로 영상을 얻어내는 방법이 가능해진다.

액정은 광학적으로 이방성 물질이므로 액정 변조기의 광변조 특성은 식(2)와 같이 존스 행렬 (Jones Matrix)를 이용하여 모델링할 수 있다.⁽²⁾

$$J = c \exp[-i(\phi_0 + \beta)] \begin{pmatrix} f - ig & -h - ij \\ h - ij & f + ig \end{pmatrix} \quad (2)$$

이 때, 이 존스 행렬을 각 파라미터는 마하-젠더 간섭계를 이용한 실험을 통해 결정할 수 있으며, 변조기의 앞뒤에 편광기와 분석기를 둬으로써 원하는 광변조 특성을 얻어낼 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법을 위해서는 광변조기가 위상 변조기로 사용되어야 하므로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 강도 변조는 거의 없으면서 위상 변조를 최대화하는 편광기와 분석기의 각도를 알아낼 수 있으며, 그 경우의 변조특성은 그림1,2의 그래프와 같으며, 이러한 위상 변조 특성을 이용하여 식(1)에서 제시한 위상부호화를 위

한 출사동에서의 변조신호를 구하면 그림3과 같다.

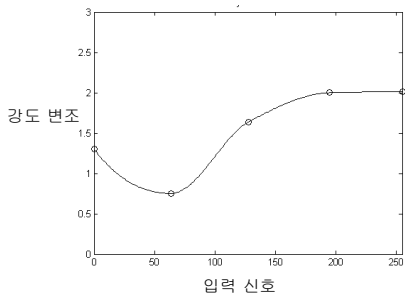


그림 1 LC-SLM의 강도변조특성

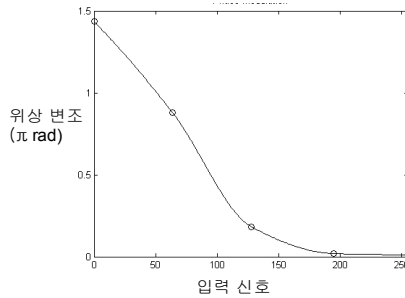


그림 2 LC-SLM의 위상변조특성

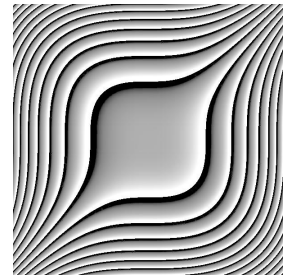


그림 3 위상부호화를 위한 변조기 입력신호

그림4,5,6은 차례로 물체가 광축에 대해 기울어져 있어 초점이 맞는 부분과 아닌 부분이 공존하는 영상, 그 물체에 대해 위상부호화된 영상, 위상부호화된 영상으로부터 복원된 영상을 보여준다. 그림 6을 보면 그림 4에서 초점이 흐려졌던 부분들이 어느 정도 복원되어 전체적으로 비슷한 수준의 초점을 유지하고 있음을 알 수 있다.

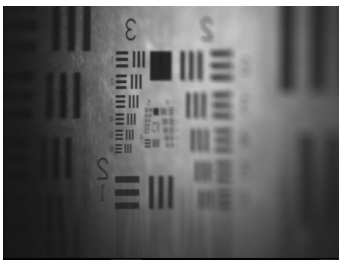


그림 4 광축에 대해 기울어진 물체의 영상

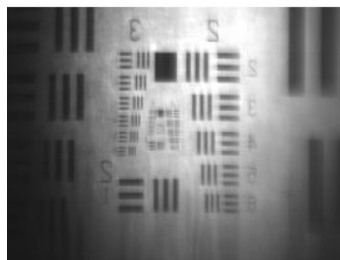


그림 5 [그림 4]의 물체에 대한 위상부호화된 영상

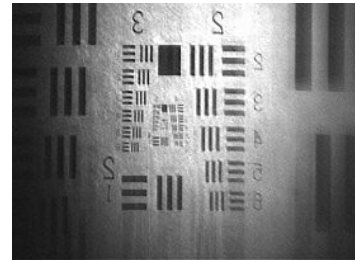


그림 6 [그림 5]의 영상을 복원한 영상

식(1)의 α 의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 α 를 변화시켜가며 변조전달함수 (MTF)를 측정해 보았으며, 그 결과는 그림7,8,9에 나타나 있다. 결과를 보면 α 가 커질수록 더 넓은 심도 영역에 대해 좀더 선명한 상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

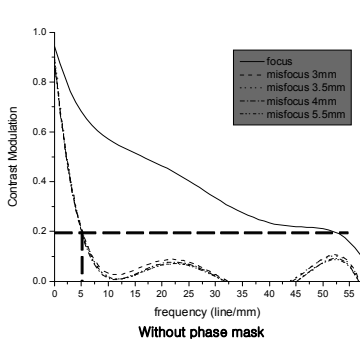


그림 7 위상부호화 없음

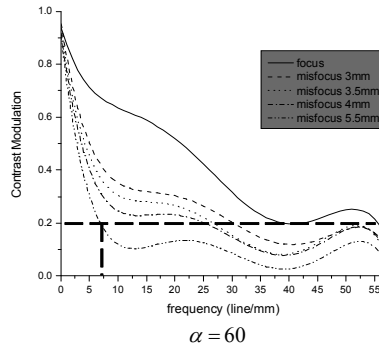


그림 8 $\alpha=60$ 일 때

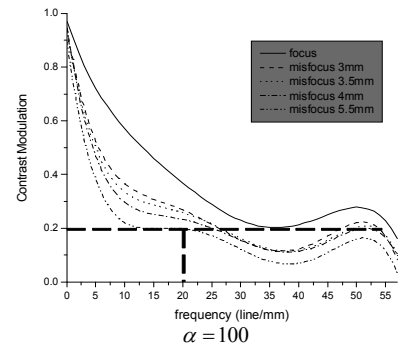


그림 9 $\alpha=100$ 일 때

1. E. Dowski and W. Cathey, "Extended depth of field through wave-front coding," Applied Optics, vol.34, no.11, pp.1859-1866, April, 1995.
2. M.Yamauchi and T. Eiju, "Optimization of twisted nematic liquid crystal panels for spatial light phase modulation," Optics Communications, vol.115, pp.19-25, March, 1995.