

왜곡된 파면의 분석을 위한 Shack-Hartmann 센서 개발

Development of Shack-Hartmann wavefront sensor for analysis of distorted wavefront

서영석, 백성훈*, 박승규*, 김철중*
충남대학교 물리학과, *한국원자력연구소 양자광학기술개발팀
ex-sys@nanum.kaeri.re.kr

능동광학계(adaptive optics system; 또는 적응광학계)의 중요한 구성요소인 파면측정 장치는 보정장치와 제어용 컴퓨터에 폐루프(closed-loop) 방식으로 연결되어 실시간으로 파면의 정보를 제공하는 역할을 한다. 본 실험실에서 제작한 Shack-Hartmann 파면측정 장치는 lenslet-array, 빔 축소 광학계, 영상중계렌즈 그리고 CCD 카메라 등으로 구성되어있으며, 측정된 파면의 정보는 영상처리 장치가 내장된 제어용 컴퓨터를 사용하여 분석한 뒤 실시간으로 보정장치를 구동하도록 설계되었다.

Shack-Hartmann 파면측정 장치의 성능 평가를 위해 He-Ne 레이저의 잘 정렬된 빔을 사용하였으며, 임의의 왜곡을 가할 수 있도록 하였다. 정렬된 레이저빔이 lenslet-array에 입사하게되면 작은 렌즈들에 의해 각각의 영역(subaperture)으로 나뉘어지고, 파면의 형태에 따라 초점면에 점 영상의 이동으로 나타나게 된다. 영상중계렌즈를 사용하여 미세 조정한 뒤 CCD 카메라를 통해 영상을 저장하고 영상처리장치로 각각의 영역에 대한 영상점으로부터 기울기를 계산한다. Lenslet-array의 초점면에서 영상점 위치가 파면의 국소적인 기울기의 양에 비례하여 이동되는 과정을 그림 1에 보였다. 각 영상점의 이동정보는 중심점 추출 알고리즘을 사용하여 sub-pixel 분해능으로 중심점 위치를 추출하였고, 이 값으로부터 변위 Δx , Δy 를 계산하였다.

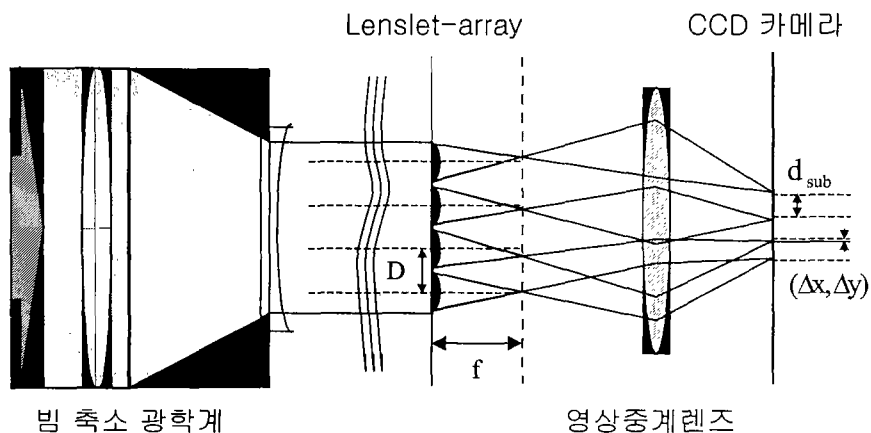


그림 1 Lenslet-array를 사용한 Shack-Hartmann 센서의 파면측정 원리

위상이 ϕ 인 레이저의 파면이 초점거리가 f 인 lenslet-array에 입사될 때, 초점면에서 x-축 방향의 영상점의 변위 Δx 를 측정한다면, 국소 파면의 기울기 θ 는 다음 식과 같다.

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{\Delta x}{f}$$

하지만, 빔 축소 광학계와 영상중계렌즈의 배율에 따라 빔의 크기가 바뀌게 되는 관계를 고려하면 실제 계산되어지는 x-축 방향에서의 파면 기울기 s^x 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s^x = \frac{m_e \Delta x}{m_i f}$$

여기에서, m_e 는 빔 축소 광학계의 배율이고, m_i 는 영상중계렌즈의 배율이다.

일반적으로 능동광학계에서는 기준파면이 존재하지 않기 때문에 위상을 재구성하기 위해서는 재구성에 따른 오차를 최소화 할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 즉, Shack-Hartmann 센서로부터 측정되어지는 파면의 기울기 정보로부터 재구성되는 위상점의 위치를 일치시키는 방법과 측정하는 파면의 특성에 따라 적절한 알고리즘을 사용할 필요가 있다.

파면측정 장치로부터 계산된 기울기 s^x, s^y 정보의 선형적인 관계로부터 행렬 방정식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$s = A\phi$$

여기에서, ϕ 는 위상을 나타내고, s 는 측정된 기울기의 정보이다. 그리고 A 는 x-축과 y-축 방향에 대한 기울기의 모든 정보와 연결되는 행렬이다. 수치계산용 소프트웨어인 Mathematica를 사용하여 행렬 A 를 구성하였고, 위상 ϕ 를 결정하기 위한 A 의 역 행렬 A^{-1} 을 singular value decomposition (SVD) 방법을 사용하여 계산하였다. 그러나 A^{-1} 는 근사적으로 구한 값이므로 $A^{-1}A \neq I$ 가 되고, 따라서 최소제곱법에 의한 해는 임의의 값 $\tilde{\phi}$ 을 포함하여 다음 식으로 나타낼 수 있으며, $\tilde{\phi} = 0$ 이기 위한 최소-노름 해를 구하여 실제 적용하게 된다.

$$\phi = A^{-1}s + (I - A^{-1}A)\tilde{\phi}$$

본 실험실에서 제작된 Shack-Hartmann 파면 측정장치는 제어용 컴퓨터에 연결하여 위상을 계산하고 파면을 재구성하는 과정을 실시간으로 처리한 뒤 3차원 영상으로 디스플레이 하도록 하였다.



후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Richard H. Hudgin, "Wave-front reconstruction for compensated imaging," J. Opt. Soc. Am., 67(3), 375(1977).
2. Jan Herrmann, "Least-squares wave front errors of minimum norm," J. Opt. Soc. Am., 70(1), 28(1980).