

Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면측정의 정확도 향상에 관한 연구

노경완[†]

한국원자력안전기술원, 현안기술연구실

Ⓣ 305-338 대전시 유성구 구성동 19 한국원자력안전기술원 현안기술연구실

엄태경 · 김지연 · 박상훈 · 윤성기

한국과학기술원 기계공학과, 영상정보특화연구센터

Ⓣ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과

이준호

공주대학교 광공학과, 영상정보특화연구센터

Ⓣ 314-712 충남 공주시 옥룡동 326 공주대학교 광공학과

(2006년 9월 11일 받음, 2006년 10월 16일 수정본 받음)

Shack-Hartmann 파면측정 센서는 적응광학 분야에서 파면측정용으로 가장 널리 사용되고 있다. Shack-Hartmann 센서에서 파면측정 알고리즘은 크게 점영상의 중심점 탐색 알고리즘과 파면복원 알고리즘으로 나눌 수 있다. 이 중 점영상의 중심점 탐색은 파면측정 결과에 크게 영향을 미치나 많은 연구결과에도 불구하고 최적의 중심점 측정 알고리즘 및 내부 변수 설정에 대한 일반적인 해결책은 아직 제시되지 못하고 있다. 현재, 중심점 탐색 알고리즘으로는 무게중심법(center of gravity)이 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 중심점 탐색 알고리즘에 의한 측정 정확도 분석을 위해 무게중심법과 상관관계법(correlation)을 함께 고려하였다. 이를 위해 Shack-Hartmann 센서의 파면측정 과정을 전산모사하였고, 이로부터 중심점 탐색 알고리즘과 관련하여 무게중심법 및 상관관계법에서의 노이즈 특성을 비교, 분석하였다. 또한, 무게중심법에서 문턱값(threshold value)의 설정에 따른 파면측정의 정확도에 대한 분석을 통하여 노이즈 제거를 위한 최적의 문턱값을 제안하였다. 이와 더불어 Shack-Hartmann 센서 시스템을 구성하여 디포커스(defocus)를 발생시키고 이를 측정하는 실험을 수행함으로써 파면측정 알고리즘 및 전산모사 결과를 검증하였다.

주제어 : Adaptive optics, Shack-Hartmann sensor, Centroiding, Spot image.

I 서 론

Shack-Hartmann 파면측정 센서는 지상으로부터 찍은 인공 위성의 이미지를 개선하기 위하여 처음으로 개발되었고, 그 후 천체 망원경에서 렌즈계의 정렬 및 평가에 이용되어 왔으며, 현재 안광학, 광학부품의 평가, 장거리 레이저 통신 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.^[1]

Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면 측정은 비교적 간단한 기하학적인 원리를 사용하며 매우 직관적이다. 그러나 Shack-Hartmann 센서는 파면측정의 정확도 측면에서 여러 가지 오차요인을 내포하고 있다. 대표적인 오차 요인으로는 중심점 탐색^[2], 파면복원^[3] 및 광학정렬^[4] 오차 등이 있다. 중심점 탐색 오차는 바탕노이즈(background noise), 랜덤노이즈, 사이드로브(sidelobe)효과 등에 의해 나타난다. 파면복원 오차는 유한차분법을 기반으로 파면을 복원하는데 따른 오차이다. 광학정렬오차는 렌즈군, 렌즈릿 배열(lenslet array) 및 카메라 등의 정렬 오차를 포함하며 대표적으로 초점거리 산정 오차를 들 수 있다. 이와 같은 오차 요인들 중에서 특

히 점영상의 중심점 탐색 과정에서 가장 큰 오차가 유발되는 것으로 알려져 있다.^[5] 점영상의 중심점 탐색과정에서 문턱값의 설정에 따른 노이즈 제거 효과에 대한 이론적 연구가 J. Ares와 J. Arines에 의해 이루어졌다.^[6] 그러나 점영상을 가우시안(Gaussian) 형태의 함수로 가정하고 접근을 시도하였으므로 회절 효과에 의해 나타나는 영향들을 반영하지 못하고 있다. 또한 문턱값을 적용한 경우의 파면 측정 비선형성에 대한 연구가 수행된 바 있다.^[7]

상관관계법은 비교적 최근에 제시된 방법으로서 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용하여 측정 대상 점영상과 이론적인 점영상 간의 상관값을 계산해 중심점을 측정하는 방법이다. 상관관계법은 무게중심법에 비해서 바탕노이즈 및 랜덤노이즈의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있다.^[8] 그러나 중심점 측정에 사용된 기준 점영상의 형태에 따라 파면측정 정확도가 달라지며 계산량이 비교적 큰 단점이 있다. 지금까지 여러 가지 중심점 탐색 방법에 대한 비교 연구가 수행되어 왔으나 아직 만족할 만한 최적해가 제시되지 못하고 있다.^[9]

본 논문에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 무게중심법과 상관관계법의 노이즈 특성을 비교하였으며 또한 오차를 적절히 제거하기 위한 무게중심법의 문턱값 설정에 대한 연

[†] E-mail: kwroh@kins.re.kr

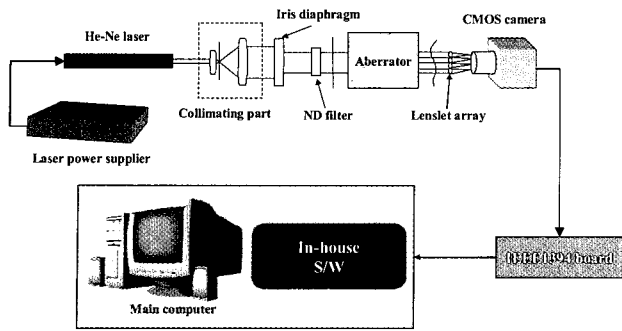


그림 1. Shack-Hartmann 파면측정 센서 구성도.

구를 수행하였다.

파면 복원 알고리즘은 Fried^[10]와 Southwell^[11]에 의해 각각 제안된 방법이 널리 사용되고 있으며 본 연구에서는 파면의 가장자리 부분에서 보다 우월한 파면 복원 성능을 갖고 있는 Southwell 방법을 사용하였다.

II. 본 론

2.1 파면측정 시스템의 구성 및 중심점 탐색 원리

Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면측정 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. Shack-Hartmann 센서를 구성하기 위한 주요 구성부품으로 가시광선 영역의 He-Ne 레이저, 렌즈렛 배열, CMOS 카메라 및 PC등을 사용하였다. 렌즈렛 배열은 16×16의 마이크로렌즈로 구성된 직교 배열 형태로 이루어져 있으며 각각의 마이크로렌즈는 0.3mm의 피치 크기 및 약 27mm의 초점거리를 갖고 있다. 카메라는 656×491의 해상도, 9.9µm×9.9µm의 픽셀크기 및 초당 최대 100 프레임의 측정이 가능한 CMOS타입을 사용하였다. 측정을 위해 레이저 발생기에서 나온 빛을 시준기(collimator)를 통과시켜 평행광으로 만든 후 다시 ND필터를 통해 적당한 광강도를 갖도록 하였다. 필터를 거친 레이저는 수차 발생기를 통과하면서 파면이 왜곡된다. 왜곡된 파면은 렌즈렛 배열을 지나 CMOS 카메라의 검출기 영역에 점영상 형태로 맺히게 된다. 이와 같이 얻은 광강도 정보는 점영상의 중심점 좌표를 얻기 위해 사용된다. 또한 파면의 기울기 정보는 왜곡이 없는 파면으로부터 측정된 점영상 중심점과의 비교를 통해 얻는다. 각각의 점영상에서 얻은 기울기 정보를 이용해 전체 파면을 복원하면 측정하고자 하는 왜곡된 파면의 정보를 얻게 된다. 파면측정 과정에서 점영상의 중심점 탐색 알고리즘으로 무게중심법 및 상관관계법을 사용하였다. 무게중심법을 적용할 때 임의의 한 점에 대한 중심점의 좌표는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_x = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N I_{i,j} \times x_i}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N I_{i,j}} \quad C_y = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N I_{i,j} \times y_i}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N I_{i,j}} \quad (1)$$

하나의 점영상의 중심점을 탐색하기 위해 N×N의 광검출기 배열을 사용하였으며 I_{i,j}는 광 검출기 배열의 i행 j열에서의 빛의 강도를 나타내고 x_i 및 y_i는 기준점으로부터의 좌표값을 의미한다.

무게중심법의 경우 중심점 탐색의 정확도가 노이즈에 의해 큰 영향을 받기 때문에 적절한 노이즈의 제거가 매우 중요하다. 노이즈 제거를 위해서 문턱값을 이용하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 문턱값은 최대 광강도 값에 대한 상대적인 비로 결정되며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{th} = T \cdot I_{max} \quad (2)$$

여기서 T는 최대 광강도에 대한 문턱값의 비율이며 I_{max}는 점영상의 최대 광강도 값이다. 측정된 광강도 값에서 문턱값을 빼주면 중심점 탐색을 위한 광강도 정보를 얻을 수 있다.

상관관계법은 광검출기로부터 얻은 점영상(I)과 기준이미지(K) 간의 상관관계를 계산하여 중심점의 좌표를 얻는 방법이다. 이 때 상관값은 점영상과 기준이미지가 얼마나 유사한가를 나타내는 값이 된다. 구성된 상관함수값의 행렬에서 가장 큰 값을 갖는 좌표가 점영상의 중심점에 가장 근접한 좌표이며 다항식 등을 이용해 보간할 경우 서브픽셀 단위의 분해능으로 중심점을 탐색할 수 있다. 본 연구에서는 이차원 가우시안 함수를 기준 이미지로 사용하였으며 상관값은 다음과 같이 표현할 수 있다.^[12]

$$X_{x,y} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} I_{x+i,y+j} \{K_{i,j}\} \quad (3)$$

여기서 x 및 y는 기준이미지(K)가 점영상(I)으로부터 떨어진 상대적인 거리를 나타낸다. 만일 기준이미지와 점영상이 x축으로부터 p만큼 이동된 관계를 가질 때 상관함수의 행렬 값은 X_{p,0}에서 최대값을 갖게 된다.

2.2 중심점 탐색 시의 오차 요인

점영상의 배경에 나타나는 노이즈는 중심점 탐색 오차를 발생시킨다. 이와 같은 노이즈는 상수값의 형태를 갖는 바탕 노이즈와 평균이 0이고 임의의 편차를 가지고 존재하는 랜덤노이즈로 나눌 수 있다. 또한 렌즈렛 배열의 회절로 인해 발생하는 점영상의 사이드로브(sidelobe)에 의한 효과도 중심점 탐색 오차를 발생시킨다.

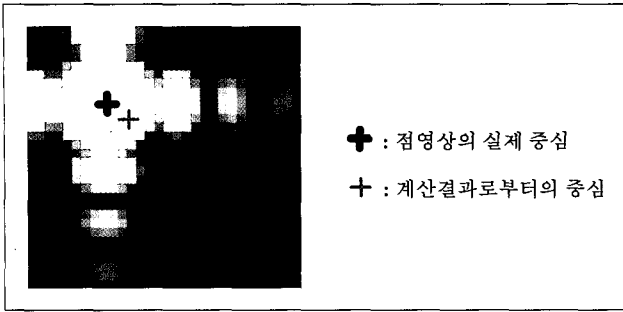


그림 2. 사이드로브에 의한 중심점 탐색 오차.

무계중심법의 경우 매우 작은 크기의 바탕노이즈일지라도 적절히 제거하지 않으면 중심점의 위치를 계산하는데 커다란 오차가 수반된다. 만일 바탕노이즈가 균일한 밝기 b 로 존재하고 랜덤노이즈가 O^2 이라고 가정하면 x 축 변위의 기대값 및 분산은 다음과 같이 표현된다.^[8]

$$E[\hat{x}] = \frac{m_r - m_l}{m_t + N^2 b} \quad (4)$$

$$Var(\hat{x}) = \sigma_r^2 \left(\frac{N^2(N^2 - 1)}{12m_t^2} \right) \quad (5)$$

여기서 m_r, m_l, m_t 는 각각 중심점 탐색 영역의 오른쪽, 왼쪽 및 전체 광강도의 평균값을 나타낸다. 또한 N^2 은 탐색영역 픽셀의 총 개수를 나타낸다. 위의 수식에 따르면 바탕노이즈 b 에 의해 중심점 측정결과의 기대값이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 위의 수식에서 중심점 탐색 영역의 픽셀 개수가 늘어날 때 중심점 탐색 값의 분산이 커지는 것을 알 수 있다.

상관관계법을 이용할 경우의 x 축 변위의 기대값 및 분산은 다음과 같이 표현된다.^[8]

$$E[\hat{x}] = \frac{0.5(m_1 - m_{-1})}{m_1 + m_{-1} - 2m_0} \quad (6)$$

$$Var(\hat{x}) = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_{-1,1}^2}{8(m_0 - m_1)^2} \quad (7)$$

위의 수식에서 $m_k, \sigma_k^2, \sigma_{k,l}^2$ 은 각각 상호상관(cross-correlation)에서의 평균(means), 분산(variances), 공분산(covariances)을 나타낸다. 기준이미지를 $r[i, j]$ 그리고 점영상의 픽셀값의 평균 및 분산을 각각 $m_s[i, j]$ 와 $\sigma_s^2[i, j]$ 라 놓고 기준 점영상의 형태가 N 개의 픽셀단위를 주기로 반복된다고 가정하면 다음과 같이 표현된다.^[8]

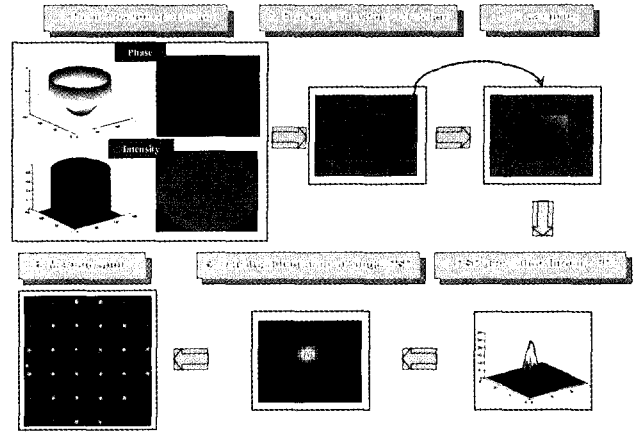


그림 3. 파동광학을 이용한 Shack-Hartmann 센서의 전산모사.^[13]

$$m_k = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} r[i-k, j] m_s[i, j] \quad (8)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} r^2[i-k, j] \sigma_s^2[i, j] \quad (9)$$

$$\sigma_{k,l}^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} r[i-k, j] r[i-l, j] \sigma_s^2[i, j] \quad (10)$$

사이드로브 효과는 렌즈릿 배열에 의한 빛의 회절로 인해 나타나며 본 연구에서는 서로 직교하는 양방향 원통형태의 표면을 갖는 렌즈릿 배열을 사용하였다. 그림 2는 검출기 영역 안에 맺힌 점영상을 나타내고 있으며 가장자리에 불연속적으로 나타나는 밝은 부분은 회절에 의한 사이드로브의 모습을 나타내고 있다. 그림과 같이 점영상의 중심점 위치가 중심점 탐색 영역의 가장자리로 이동하게 되면 한쪽 방향의 사이드로브가 탐색 영역을 벗어나게 되어 사이드로브의 대칭성이 깨어지게 되므로 무계중심법을 사용할 경우 중심점 탐색 오차를 유발하게 된다.

2.3 파면측정 전산모사 및 해석 결과

Shack-Hartmann 센서의 파면측정 정확도 분석을 위해 고차의 수차를 정밀하게 유발하는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서 전산 모사를 통한 해석이 유용하게 사용된다. Shack-Hartmann 센서의 렌즈릿 배열을 통과한 빛이 검출기 영역에 점영상 형태로 맺히는 현상은 파동광학적인 접근으로 모사할 수 있으며 그 과정을 그림 3에 나타내었다.^[13] Shack-Hartmann 센서의 전산모사를 위해서 먼저 위상과 광강도 정보를 갖는 입사 파면을 생성하였다. 생성한 입사파면의 이산화된 데이터를 각각의 렌즈릿에 해당하는 크기만큼씩 분할하여 할당한다. 이때 렌즈릿 배열의 개수와 물리적인 크기를 고려해서 데이터 샘플링을 수행해야 한다. 샘플링 이론에 따르면 입력 데이터의 간격 ($\Delta x, \Delta y$)과 출력 데이터의 간격 ($\Delta \xi, \Delta \eta$)간의 관계는 다음과 같다.^[14]

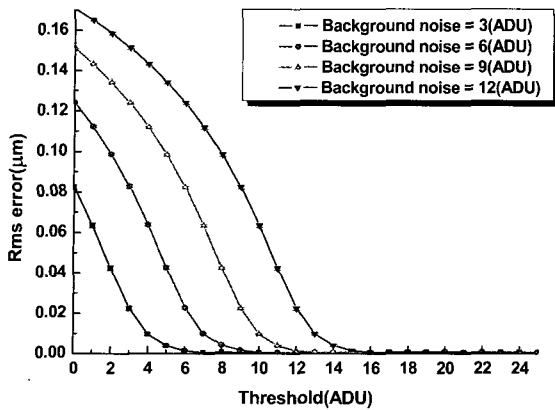


그림 4. 무계중심법에서 문턱값의 크기에 따른 측정 오차 (바탕노이즈).

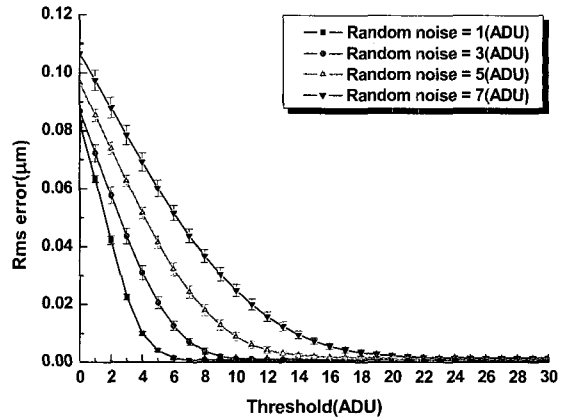


그림 5. 무계중심법에서 문턱값의 크기에 따른 측정 오차 (랜덤노이즈).

$$\Delta x \Delta \zeta = \frac{1}{N}, \quad \Delta y \Delta \eta = \frac{1}{N} \quad (11)$$

여기서, N 은 입력 데이터의 개수를 의미한다.

PSF(point spread function)는 렌즈릿 배열에 해당하는 입사 파면의 데이터를 푸리에 변환하여 얻는다. 이때 얻은 PSF의 데이터 간의 간격은 이미지 평면에서의 거리 ($\Delta x', \Delta y'$)로 나타나며 그 관계는 다음과 같다.^[15]

$$\Delta x' = \Delta y' = \frac{\lambda f N_{pupil}}{D N} \quad (12)$$

여기서, D 는 출사동의 직경, N_{pupil} 은 동공의 크기에 걸쳐 있는 픽셀의 개수를 나타낸다.

이렇게 얻은 각각의 렌즈릿에 해당하는 점영상을 물리적인 거리를 고려하여 통합하면 실제 Shack-Hartman센서에서 입사파면이 렌즈릿 배열을 통과해서 광검출기에 맺힐 때와 동일한 점영상의 배열을 얻게 된다.

노이즈 특성을 분석하기 위해 전산모사로부터 얻은 점영상의 광강도 분포에 노이즈를 추가하였다. 이때 추가된 노이즈는 다음의 식으로 묘사할 수 있다.

$$I_n(x, y) = I_d(x, y) + n_r(x, y) + n_{bg} \quad (13)$$

여기서 $I_n(x, y)$ 은 노이즈가 추가된 경우의 광강도 분포, $I_d(x, y)$ 는 노이즈가 없는 경우 이상적인 점영상의 광강도 분포, $n_r(x, y)$ 은 랜덤노이즈를 표현하는 항으로서 0의 평균값을 갖는 랜덤 노이즈, n_{bg} 는 위치에 관계없이 일정한 상수값의 형태를 갖는 바탕노이즈를 나타낸다. 랜덤노이즈를 고려하기 위해 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션 방법을 이용하였으며, 이때 각 측정점마다 500회의 반복 계산을 수행하였다.

무계중심법을 이용한 파면 측정과정에서 바탕노이즈의 영향을 알아보기 위해 전산모사를 수행하였다. 그림 4는 전산모사 결과로서 문턱값의 크기 변화에 따른 중심점 탐색 오차의 변화를 나타내고 있다. 전산모사 수행 시 바탕노이즈의

분포는 상수값으로 주었으며 표준편차 1ADU(Auto Digital Unit)인 랜덤 노이즈를 이용하였다. 바탕노이즈의 크기를 3(ADU)으로부터 12(ADU)로 변화시켜가며 측정된 결과 중심점 탐색 오차를 $\frac{1}{100}\lambda$ 이내로 하기 위해서는 문턱값을 바탕노이즈의 증가분만큼 설정해 주어야 한다는 것을 확인하였다.

랜덤노이즈의 크기에 따른 무계중심법의 점영상 중심점 탐색 오차를 알아보기 위해 바탕노이즈를 3(ADU)로 고정하고 랜덤노이즈의 표준편차의 크기를 1(ADU)로부터 7(ADU)까지 변화시켜 가면서 해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 측정결과와 표준편차 값은 바 형태로 나타내었으며 랜덤노이즈의 크기에 비례하고 문턱값에 반비례 하는 것을 확인하였다. 랜덤노이즈의 경우 바탕노이즈의 변화에 따른 해석결과와는 달리 랜덤노이즈 크기 변화의 3배만큼 문턱값을 설정할 경우 중심점 탐색 오차가 $\frac{1}{100}\lambda$ 이하가 됨을 확인하였다.

무계중심법을 이용한 파면측정 과정에 영향을 미치는 사이드로브의 효과를 알아보기 위해서 바탕노이즈 및 랜덤노이즈를 배제한 후 파면 측정 실험을 수행하였다. 중심점 탐색 과정에서 사이드로브의 영향은 탐색영역의 중심에서 멀어질수록 커지게 된다. 이와 같은 영향을 알아보기 위해서 전산모사 입력파면으로 선정한 구면파의 곡률반경을 120mm에서 200mm까지 늘려가면서 중심점 탐색을 수행하였으며 그 결과를 그림6에 나타내었다. 전산모사 결과에 따르면 문턱값을 점영상의 최대 광강도 값의 7%로 설정했을 때 측정 오차가 가장 작게 나타났다. 이 값은 실제 파면측정 실험에서 렌즈릿 배열에 의한 회절 효과로 생성되는 사이드로브의 실험적 크기와 일치하였다. 따라서 바탕노이즈 및 랜덤노이즈가 없는 경우에도 사이드로브 효과를 제거하기 위해서 $0.07 \cdot I_{max}$ 에 해당하는 문턱값을 적용해야 하는 것을 알 수 있다.

위의 해석 결과에 따르면 바탕노이즈, 랜덤노이즈 및 사이드로브 효과를 제거하기 위해서는 각각에 해당하는 문턱값

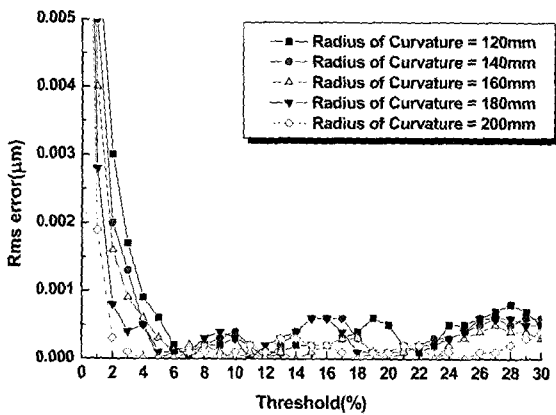


그림 6. 무게중심법에서 문턱값의 크기에 따른 파면측정 오차 (곡률반경).

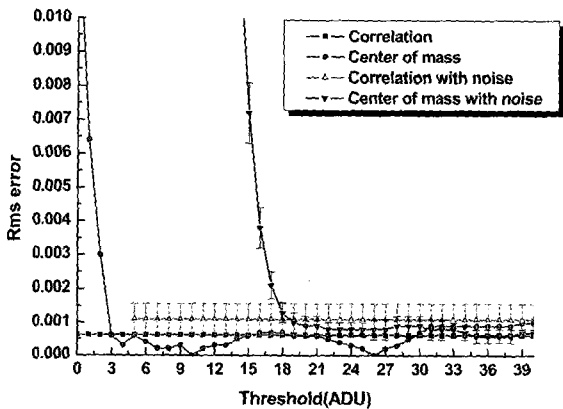


그림 7. 무게중심법과 상관관계법의 문턱값에 따른 중심점 탐색 오차.

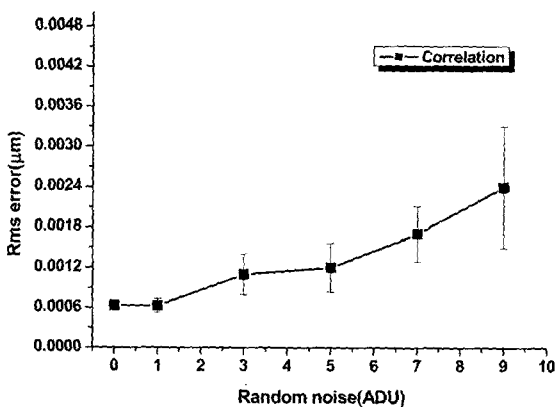


그림 8. 상관관계법에서 랜덤노이즈의 크기에 따른 중심점 탐색 오차.

을 더해주어야 함을 알 수 있다. 즉 무게중심법을 이용한 점영상의 중심점 탐색에서 바탕노이즈, 랜덤노이즈 및 사이드 로브 효과를 제거하기 위한 문턱값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{th} = n_{bg} + 3 \cdot n_r(x, y) + 0.07 \cdot I_{max} \quad (14)$$

상관관계법과 무게중심법에서 문턱값의 변화에 따른 중심점 탐색 오차의 특성을 알아보기 위한 전산모사를 수행하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 각각의 중심점 탐색 방법에 대해 바탕노이즈를 6(ADU), 랜덤노이즈를 3(ADU)으로 준 경우와 노이즈가 없는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 전산모사 결과에 따르면 상관관계법의 경우 바탕노이즈의 크기 및 문턱값의 변화에 영향을 받지 않았다. 그 이유는 상관관계법의 경우 점영상의 위상을 이용해서 중심점을 구하므로 위상 변화 없이 전체 광강도 분포에 균일하게 가감되는 바탕노이즈 및 문턱값의 영향을 받지 않기 때문이다. 그림에서 막대바는 측정 오차의 표준편차를 나타낸다. 무게중심법의 경우 표준편차가 문턱값에 반비례하는 경향을 보이는 반면에 상관관계법의 경우 문턱값에 관계없이 일정한 값을 갖게 된다. 그림 8은 상관관계법에서 랜덤노이즈의 변화에 따른 중심점 탐색 오차를 나타내고 있다. 그림과 같이 상관관계법에서 랜덤노이즈에 의한 영향은 무게중심법에서의 영향에 비해 매우 작긴 하지만 측정 파면의 위상 변화를 초래하여 그에 따른 오차가 수반되는 것을 알 수 있다.

2.4 파면측정 실험 결과

파면측정 실험을 통해 본 논문에서 제시한 문턱값의 적절성을 검증하기 위해 그림 9와 같이 Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면측정 시스템을 구성하였다. 파면측정을 위한 디포커스 수차를 생성시키기 위해 f/4의 양면 볼록렌즈를 사용하였다. 또한 렌즈의 이동을 위해 0.1mm 이내의 종축방향 위치 정밀도를 갖는 레일(rail)을 사용하였다. 디포커스 측정 원리는 그림 10에 나타냈으며 측정 절차는 다음과 같다.

먼저 렌즈의 초점 평면을 렌즈렛 배열 바로 위에 위치시킨 후 렌즈렛 배열로부터 멀어지는 방향으로 일정간격씩 이동시킨다. 이때 처음위치로부터 이동한 거리가 렌즈렛 배열에 도달하는 구면파의 곡률반경이 되며 구면파의 곡률반경과 제르니케 다항식의 디포커스 항의 계수 간에는 다음과 같은 관계가 존재한다.^[16]

$$R_{sphere} = -\frac{r_p^2}{4\sqrt{3}C_4} \quad (15)$$

여기서 R_{sphere} 는 구면파의 반경, C_4 는 제르니케 다항식의 디포커스 항의 계수, r_p 는 동공반경(radius of pupil)이다. 이때 파면측정을 위해 필요한 기준 점영상은 렌즈를 제거한 후 측정하여 얻는다.

그림 11은 6×6렌즈렛 배열을 사용하여 수행한 디포커스 측정 실험 결과를 나타내고 있다. C_4 계산을 위해 10차 항까지의 제르니케 다항식을 사용하였다. 또한 구면파의 곡률반경을 150mm에서 400mm까지 변화시키면서 파면을 측정하였으며 중심점 탐색 알고리즘은 상관관계법을 이용하였다. 측정 결과에서 그래프의 기울기가 0.9855로 1보다 작게 나타났다. 디포커스 측정 실험에서 입력값은 곡률반경의 변화량

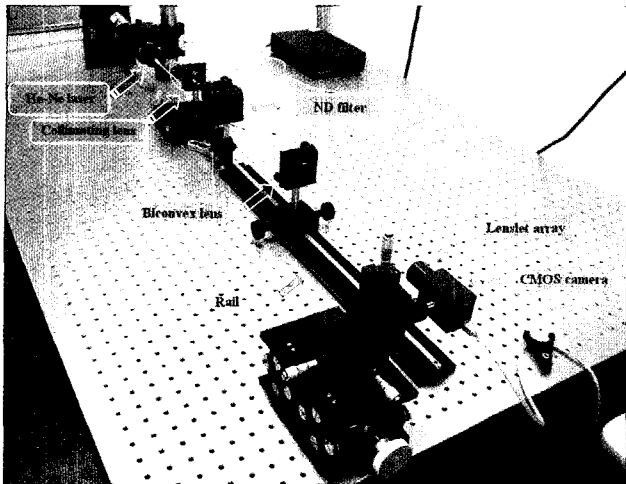


그림 9. Shack-Hartmann 파면측정 센서 실험 장치.

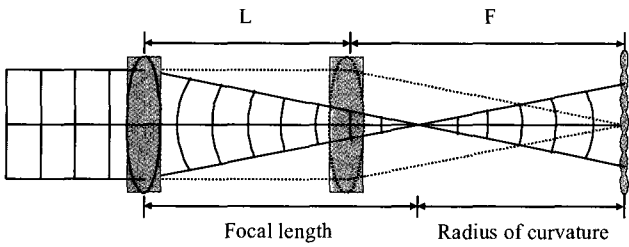


그림 10. Defocus 측정 원리.

표 1. 초점거리 보정 후 파면 측정 실험 결과

Expected radius[mm]	Measured radius[mm]	Calibrated radius[mm]
200	197.37	200.27
210	208.62	211.69
220	218.38	221.60
230	227.76	231.11
240	238.32	241.82
250	246.50	250.12
260	257.38	261.17
270	267.23	271.16
280	277.27	281.35
290	285.70	289.90
300	296.64	301.01

이때 각 측정 단계에서 10mm만큼의 변화를 주었으므로 측정된 파면의 곡률반경 변화량의 크기도 10mm에 가장 가까워야 한다. 이를 이용해 초점 거리를 보정하여 다시 계산한 결과는 그림 12와 같고 수치 데이터는 표 1에 나타내었다. 이 때 유효 초점 거리는 27.00mm에서 27.39mm로 재계산 되었으며 이 값을 적용해 센서를 보정 하였다. 그림 13은 무게 중심법을 이용해 얻은 파면측정 결과이다. 바 형태로 나타낸 값은 3장에서 전산 모사 결과를 토대로 제안한 문턱값이다. 제안한 문턱값이 노이즈 및 사이드로브 효과에 대한 영향을 적절히 제거하는 것을 확인할 수 있다.

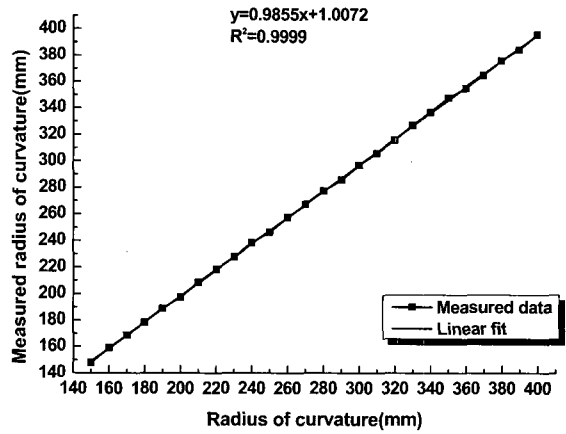


그림 11. Defocus 측정 결과.

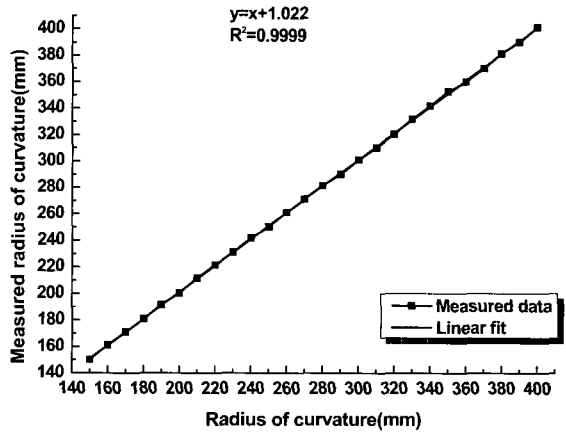


그림 12. 초점거리를 보정한 경우의 Defocus 측정 결과.

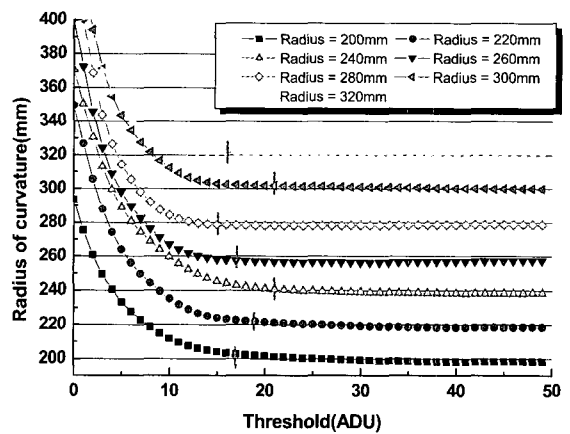


그림 13. Defocus 측정 실험 결과.

그림 14는 무게중심법을 이용해 얻은 측정 결과를 상관관계법과 비교한 것이다. 세로축은 측정된 곡률반경과 디포커스 측정 실험에서 입력값으로 준 구면파의 곡률반경 간의 상대적인 오차를 나타내고 있다. 본 논문에서 제안한 문턱값을 바 형태로 나타내었다. 파면 측정 실험 결과에 따르면 무게

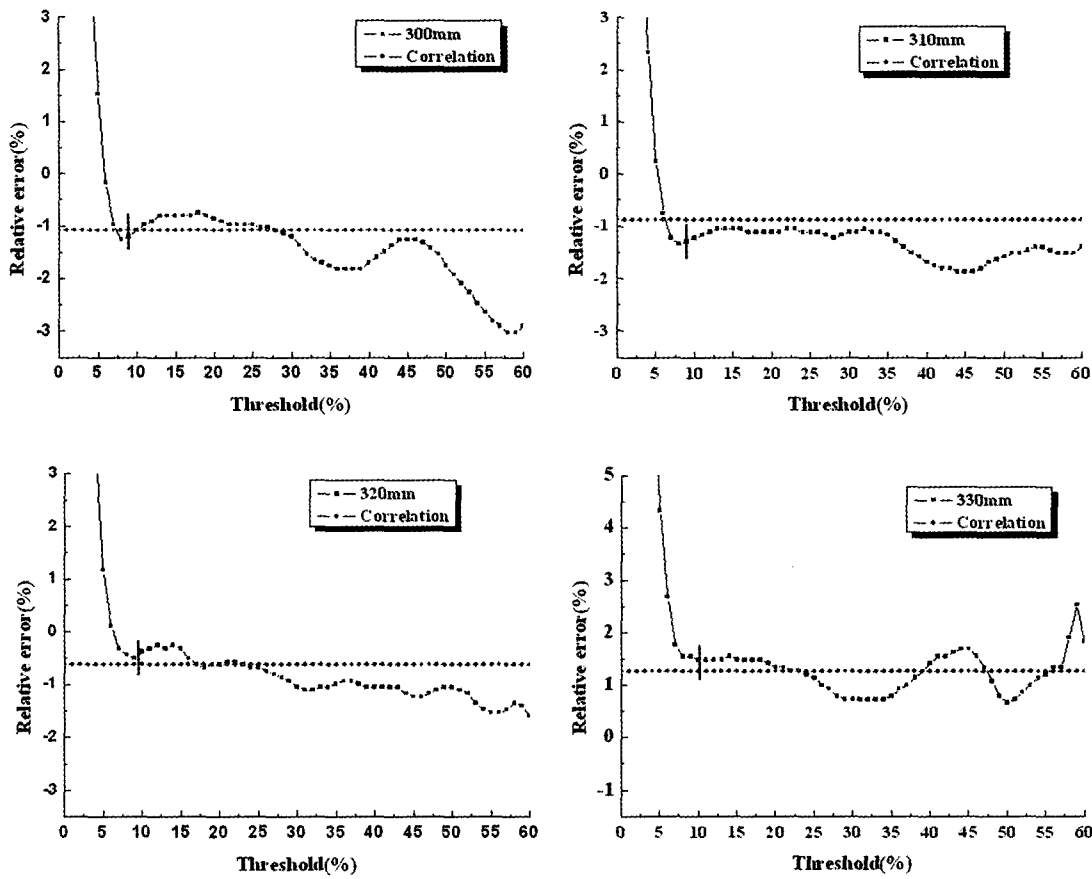


그림 14. 문턱값에 따른 Defocus 측정 오차.

중심법을 이용한 파면측정시 본 연구에서 제안한 문턱값을 사용할 경우 비교적 빠른 계산 속도와 함께 상대적으로 노이즈에 둔감한 상관관계법을 이용한 경우와 매우 유사한 파면 측정 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면측정 시스템의 구성 및 정확도 향상에 관한 연구를 수행하였으며 이를 위하여 Shack-Hartmann 센서의 파면측정 과정을 전산 모사하고 점영상의 중심점 탐색 알고리즘 중에서 무게중심법 및 상관관계법에 대한 특성을 비교, 분석하였다.

무게중심법의 경우 바탕노이즈, 랜덤노이즈 및 사이드로브 등에 의하여 중심점의 계산 오차가 비교적 큰 범위에서 변하는 것을 확인하였다. 또한 적절한 문턱값을 설정하여 노이즈를 제거해 줄 경우 측정오차를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 이때, 측정오차를 최소화할 수 있는 최적의 문턱값을 제안하기 위하여 각각의 오차 요인에 대한 해석을 수행하였고, 바탕노이즈, 랜덤노이즈 및 사이드로브의 효과를 고려한 문턱값을 제안하였다.

상관관계법의 경우 측정결과가 노이즈에 대하여 매우 안정

적임을 확인하였다. 그러나 상관함수를 구하기 위한 기준 점영상의 크기에 따라 파면측정 오차가 변하는 것을 확인 하였다.

위의 연구결과를 검증하기 위하여 Shack-Hartmann 센서를 이용한 파면 측정 시스템을 구성하였으며 디포커스 측정 실험을 수행하였다. 파면측정 실험을 수행하여 센서를 보정하였으며 이를 통해 Shack-Hartmann 센서 및 파면측정 알고리즘을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Ben C. Platt, Roland Shack, "History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing," *Journal of Refractive Surgery*, Vol. 17, pp. 573-577, 2001.
- [2] R. Irwan, R. G. Lane, "Analysis of optimal centroid estimation applied to Shack-Hartmann sensing," *Applied Optics*, Vol. 38, pp. 6737-6743, 1999.
- [3] David L. Fried, "Reconstructor Formulation Error," *Proc.*

- SPIE Optical Pulse and Beam Propagation III*, Vol. 4271, 2001.
- [4] J. Pfund, N. Lindlein, and J. Schwider, "Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor," *Applied Optics*, Vol. 37, pp. 22-27, 1998.
- [5] W. Jiang, H. Xian, F. Shen, "Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor," *SPIE 3126*, pp. 534-544, 1997.
- [6] J. Ares, J. Arines, "Effective noise in thresholded intensity distribution: influence on Centroid statistics," *Optics Letters*, Vol. 26 (23), pp. 1831-1833, 2001.
- [7] Justo Arines, Jorge Ares, "Significance of thresholding processing in centroid based gradient wavefront sensors: effective modulation of the wavefront derivative," *Optics Communications*, Vol. 237, pp. 257-266, 2004.
- [8] L.A. Poyneer, K. LaFortune, and A.A.S. Awwal, "Correlation wavefront sensing for Shack-Hartmann-based Adaptive Optics with a point source," *Lawrence Livermore National Lab Document September (Livermore, CA 94551)*, 2003.
- [9] Sandrine Thomas, "Optimized centroid computing in a Shack-Hartmann," Cerro Tololo Inter-American Observatories, Casilla 603, La Serena, Chile.
- [10] L. Fried, "Least-square fitting of a wave-front distortion estimate to an array of phase-difference measurements," *J. Opt. Soc. Am.* Vol.67, pp. 370-375, 1997.
- [11] W. H. Southwell, "Wave-front estimation from wave-front slope measurements," *J. Opt. Soc. Am.* Vol 70, No.8, pp.998-1006, 1980.
- [12] Michael K. Cheezum, William F. Walker, and William H. Guilford, "Quantitative Comparison of Algorithms for Tracking Single Fluorescent Particles," *Biophysical journal*, Vol. 81, pp. 2378-2388, 2001.
- [13] Weon-Woong Lee, Jun Ho Lee, and Chang Kwon Hwangbo, "Increase of dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by shifting detector plane," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 5639, 70, 2004.
- [14] Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier optics," 2nd ed, McGraw-Hill, 1996.
- [15] J. L. Beverage, R. V. Shack and M. R. Descour, "Measurement of the three-dimensional microscope point spread function using a Shack-Hartmann wavefront sensor," *Journal of Microscopy*, Vol. 205, pp. 61-75, 2002.
- [16] W. J. Smith, "Modern Optical Engineering," 2nd ed, McGraw-Hill, New York, 1990.

A Study on the Improvement of Wavefront Sensing Accuracy for Shack-Hartmann Sensors

Kyung-Wan Roh[†]

Department of Safety Issue Research, Korea Institute of Nuclear Safety, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-338, Korea

Tae-Kyoung Uhm, Ji-Yeon Kim, Sang-Hoon Park and Sung-Kie Youn

Department of Mechanical Engineering, KAIST and Image Information Research Center, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea

Jun-Ho Lee

Department of Optical Engineering, Kongju National University, Ongnyong-dong, Kongju, 314-712, Korea

[†] E-mail: kwroh@kins.re.kr

(Received September 11, 2006, Revised manuscript October 16, 2006)

The Shack-Hartmann wavefront sensors are the most popular devices to measure wavefront in the field of adaptive optics. The Shack-Hartmann sensors measure the centroids of spot irradiance distribution formed by each corresponding micro-lens. The centroids are linearly proportional to the local mean slopes of the wavefront defined within the corresponding sub-aperture. The wavefront is then reconstructed from the evaluated local mean slopes. The uncertainty of the Shack-Hartmann sensor is caused by various factors including the detector noise, the limited size of the detector, the magnitude and profile of spot irradiance distribution, etc. This paper investigates the noise propagation in two major centroid evaluation algorithms through computer simulation; 1st order moments of the irradiance algorithms i.e. center of gravity algorithm, and correlation algorithm. First, the center of gravity algorithm is shown to have relatively large dependence on the magnitudes of noises and the shape & size of irradiance sidelobes, whose effects are also shown to be minimized by optimal thresholding. Second, the correlation algorithm is shown to be robust over those effects, while its measurement accuracy is vulnerable to the size variation of the reference spot. The investigation is finally confirmed by experimental measurements of defocus wavefront aberrations using a Shack-Hartmann sensor using those two algorithms.