

영상처리 기법을 이용한 샡-하트만 파면 센서의 측정범위 확장에 대한 연구

김민석

두산중공업 주단BG 소재기술팀
☎ 641-792 경남 창원시 귀곡동 555번지

김지연[†] · 엄태경 · 윤성기

한국과학기술원 기계공학과, 영상정보특화연구센터
☎ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 기계공학과

이준호

국립 공주대학교 영상보건대학 영상광정보공학부 광응용과학전공
☎ 314-701 충남 공주시 신관동 182번지

(2007년 8월 16일 받음, 2007년 11월 15일 수정본 받음)

샡-하트만 센서는 렌즐릿 배열을 이용하여 파면의 국부적인 기울기를 계산하고 이로부터 파면의 왜곡된 정도를 측정하는 파면측정 센서이다. 일반적으로 하나의 점영상에 대한 중심점을 추출하여 기준 점영상의 중심점에 대한 상대적 이동량을 통해 파면의 국부 기울기를 계산, 전체 파면을 복원하는 원리이다. 따라서 하나의 점영상에 대한 정확한 중심점의 추출을 위하여 해당하는 하부개구 내에 점영상이 존재하여야 한다. 하지만 큰 기울기의 파면이 샡-하트만 센서에 입사하게 되면 측정범위를 벗어나게 되어 일반적인 방법으로는 파면의 국부적인 기울기를 계산할 수 없게 되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 특정 측정시스템에만 국한된 알고리즘이 아닌 모든 파면에 대해 측정 가능하면서도 추가적인 장비 없이 일반적인 샡-하트만 파면 센서가 지니고 있는 측정범위의 한계를 극복할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 영상처리 기법을 이용하여 각 점영상에 대한 유동적인 탐색영역을 설정하고 이러한 탐색영역 내에서 중심점을 추출하는 방법을 제안하였다. 또 점영상 대응법을 적용하여 측정 점영상과 기준 점영상을 일대일 대응시킴으로써 전체 측정파면을 복원할 수 있는 알고리즘을 제안함으로써 측정범위에 제한 없이 파면왜곡을 측정할 수 있는 측정방법을 제시하였다. 이렇게 제안된 알고리즘을 샡-하트만 파면 센서 시스템을 이용한 초점벗어남 측정실험을 통하여 검증하였다.

주제어 : 샡-하트만 센서(Shack-Hartmann Sensor), 측정범위(Dynamic Range), 영상처리 기법(Image Processing)

I 서 론

샡-하트만 파면 센서(Shack-Hartmann wavefront sensor)는 파면의 위상 정보를 측정하는 센서로서, 파면의 국부적인 기울기를 계산하여 전체 입사 파면을 복원하는 간단한 구조와 원리를 가지고 있다.^[1] 이러한 샡-하트만 센서의 장점 때문에 사용목적에 따라 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 특히 광학 부품의 정밀한 표면형상을 측정하거나 지상에서 찍은 위성의 이미지를 개선하기 위해서 널리 사용되고 있다. 또한 천체 망원경에서 렌즈의 정렬 및 평가, 안광학, 장거리 레이저 통신 등 여러 분야에서 사용되고 있다.

그러나 샡-하트만 파면 센서는 파면왜곡에 대한 측정범위가 제한적인 단점이 있다. 이것은 일반적인 샡-하트만 센서의 파면측정 알고리즘이 렌즐릿 배열(lenslet array)의 각 하부개구에 해당하는 고정영역을 중심점 탐색영역으로 설정하고 그 내부에서 중심점을 찾기 때문에 발생한다. 국부적으로 큰 기울기를 갖는 파면이 렌즐릿 배열을 통과하게 되면 점영

상이 각 하부개구에 해당하는 고정영역을 벗어나서 검출된다. 그러므로 이 경우 일반적인 방법으로는 파면의 국부적인 기울기를 계산할 수 없게 되는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구가 그 동안 활발히 진행되었으나 현재 각각의 구성 시스템의 특성에 맞게 특정한 장비를 추가하는 등의 개별적인 방법들이 적용되고 있다.^[2-5] 따라서, 특정 측정시스템에만 국한된 알고리즘이 아닌 모든 파면에 대해 측정 가능하면서도 추가적인 장비 없이 일반적인 샡-하트만 파면 센서가 가지는 측정범위의 한계를 극복할 수 있는 알고리즘이 필요하다.^[6]

본 연구에서는 샡-하트만 파면 센서의 측정범위 확장을 위한 새로운 파면측정 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안하는 파면측정 알고리즘의 주요과정은 다음과 같다. 우선, 영상처리 기법을 사용하여 점영상에 대한 유동적인 중심점 탐색영역을 설정한다. 설정된 영역 내에서 무게 중심법을 이용하여 점영상의 중심점을 추출한다. 점영상 대응법을 사용하여 앞서 얻은 측정 점영상의 중심점과 기준 점영상의 중심점을 대응시킴으로써 국부적인 파면 기울기를 계산한다. 최종적으로, 계산된 국부 파면 기울기로부터 기존과 동일한 방법으로

[†] E-mail: ele1111@kaist.ac.kr

파면을 복원한다. 이렇게 제안된 알고리즘을 샷-하트만 센서를 이용한 실제 파면측정 실험을 통해 검증하였다.

II. 샷-하트만 파면 센서의 측정 범위 한계

그림 1은 샷-하트만 파면 센서의 일반적인 파면측정 원리를 나타낸다. 파면이 렌즈배열에 입사하여 검출기에 점영상을 형성한다. 그림에서 점선으로 나타낸 비외곡 파면, 즉 기준 파면으로 인해 형성되는 점영상으로부터 실선으로 나타낸 왜곡 파면, 즉 측정 파면으로 인한 점영상의 상대적 이동량을 얻어서 국부적인 파면의 기울기를 계산하는 간단한 원리이다. 이때 점영상의 이동량을 정확히 계산하기 위한 점영상의 중심점 탐색법에 대해 많은 연구가 진행되었다.^[7,8]

그림 2는 입사파면이 렌즈배열의 각 하부개구를 통과하여 검출면에 생성될 때의 일반적인 점영상 이미지를 나타낸다. 렌즈배열을 통과한 점영상은 하부개구에 해당하는 영역에 걸쳐 광강도 분포를 가지며 이를 PSF(Point Spread Function)으로 나타낼 수 있다. 일반적인 샷-하트만 센서 알고리즘은 렌즈배열의 각 하부개구의 고정된 탐색영역 내에서 점영상의 중심점을 탐색한다. 이 때문에 광강도가 가장 작은 위치까지의 점영상 전 영역이 각 하부개구에 대응되는 검출기 영역 내에 존재할 때에만 정확한 파면측정이 가능하다. 그림 3에서 기준파면의 점영상 중심점으로부터 광강도가 가장 작

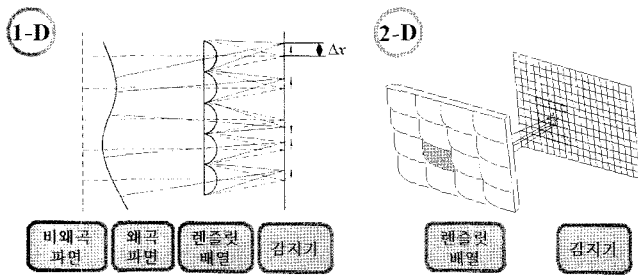


그림 1. 샷-하트만 센서의 하부개구에 대한 기하학적 형상.

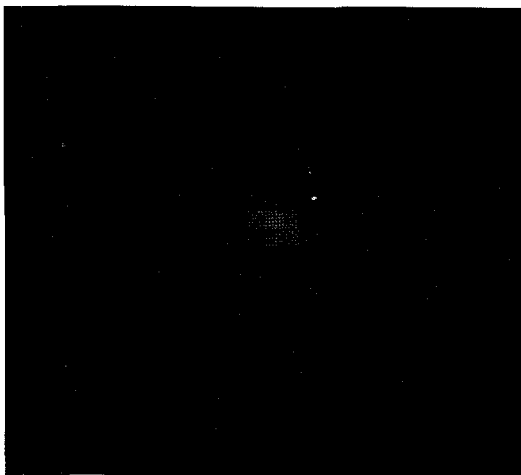


그림 2. 검지기 상에서의 단일 점영상.

은 위치까지의 거리 $\Delta\rho$ 는 사각 렌즈배열의 경우 식 (1)과 같다.

$$\Delta\rho = \frac{\lambda f}{d} \tag{1}$$

여기서 λ 는 측정에 사용된 파장이고, f 는 렌즈배열의 초점거리, d 는 렌즈배열 한 개의 지름이다. 이때, 하나의 사각 렌즈에 대한 프레넬 수(Fresnel coefficient)는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$N_{Fr} = \frac{d^2}{f\lambda} \tag{2}$$

국부 기울기를 갖는 파면이 입사할 때, 파면의 초점은 평행광이 입사할 때의 기준 위치로부터 국부 기울기와 비례하는 거리만큼 떨어져 초점을 형성한다. 이때, 최대 측정 가능한 초점의 위치를 $\Delta X(\Delta X = d/2)$ 라 하면 파면의 최대 측정 범위 θ_{max}^i 는

$$\theta_{max}^i = \frac{\Delta X - \Delta\rho}{f} = \left(\frac{N_{Fr}}{2} - 1 \right) \frac{\lambda}{d} \tag{3}$$

이다. 그러므로 일반적인 파면측정 알고리즘은 점영상이 렌즈배열의 하부개구를 벗어나서 이웃하는 렌즈배열의 하부개구를 침범하는 경우 점영상의 중심점을 찾을 수 없으므로 측정범위의 한계를 갖게 된다. 이러한 알고리즘에 의해 샷-하트만 파면 센서의 최대 측정 가능한 위상오차는 식 (4)와 같다.

$$\Delta W_{max}^i = \theta_{max}^i \frac{d}{2} = \left(\frac{N_{Fr}}{2} - 1 \right) \frac{\lambda}{2} \tag{4}$$

따라서 위의 식 (4)에서 나타내는 것과 같이 측정 가능한 최대 위상오차의 범위가 한정되게 되어 이러한 측정 알고리즘을 사용할 경우 샷-하트만 센서 이용에 제약을 받게 된다.

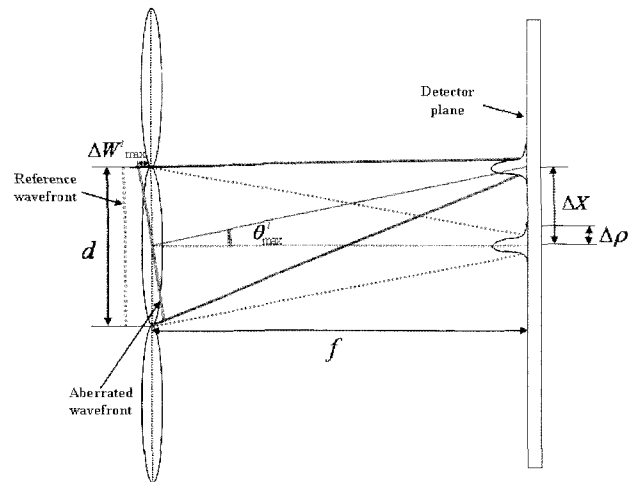


그림 3. 렌즈배열의 한 하부개구에 대한 측정범위.

III. 측정범위 확장을 위한 알고리즘 제안

일반적인 샷-하트만 파면 센서의 파면측정 알고리즘에서 탐색영역이 제한되는 문제점을 해결하면 더 큰 파면외곽에 대한 측정이 가능하므로 샷-하트만 파면 센서의 활용범위를 넓힐 수 있다. 파면의 측정범위 확장을 위하여 각 점영상에 대하여 유동적인 점영상 탐색영역을 설정하여 점영상의 중심점을 추출하고 기존 점영상 중심점과의 관계를 대응시켜 주는 새로운 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘에서 점영상 탐색법은 측정 점영상의 검출기 내의 위치에 관계없이 점영상을 인식하고 안정적으로 중심점을 결정하는 역할을 한다. 이때, 국부적인 파면의 기울기를 측정하기 위해서 측정 점영상 중심점과 기존 점영상 중심점의 일대일 대응관계를 파악하여야 국부 기울기의 계산이 가능하다. 본 연구에서는 점영상을 외곽부터 내부의 점영상으로 하나씩 대응시키면서 점영상의 순서를 부여하는 매우 단순하고 간단한 점영상 대응법을 제안하였다. 제안된 점영상 탐색법과 점영상 대응법은 다음의 세 가지 기본 가정에서 출발한다.

- i. 기존 파면의 점영상과 측정 파면의 점영상의 수는 동일하다.
- ii. 검출기 영역에 생성된 점영상들은 서로 겹치지 않는다.
- iii. 렌즈릿을 통과한 점영상 간에 서로 교차하여 넘어가지 않는다.

위의 세 가지 가정을 전제로 제안된 알고리즘을 적용하면 샷-하트만 파면측정 센서의 측정범위를 확장할 수 있다.

1. 영상처리 기법을 이용한 점영상 탐색법

점영상 탐색법은 렌즈릿 배열의 하부개구에 해당하는 점영상 탐색영역의 제한없이 점영상의 중심점을 결정하는 과정이다. 본 연구에서의 점영상 탐색법은 크게 이미지 변환, 점영상 탐색영역 설정, 중심점 결정의 세 단계에 걸쳐 수행된다.

첫 번째 단계인 이미지 변환은 물체를 식별하는 방법 중에서 영상처리 분야에서 가장 흔하게 쓰이는 방법 중의 하나이다.^[9] 이 방법은 측정 파면의 8비트 점영상 정보를 2비트 점영상 정보로 변환하여 새로운 영상을 생성한다. 이때, 모든 점영상의 위치를 파악하기 위해서 8비트 점영상 정보에 적절한 변환 문턱치 값(transfer threshold value of translation)을 설정하여 이를 2비트 점영상, 즉 흑백 이미지로 변환한다. 흑백 이미지로의 변환은 설정한 문턱치 값을 기준으로 문턱치보다 큰 값을 가지는 픽셀은 1의 값으로 변환하고, 문턱치보다 작은 픽셀 값은 0으로 변환하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 회색레벨 히스토그램(gray-level histogram)을 이용하는 알고리즘을 사용하여 적절한 변환 문턱치 값을 결정하였다.^[10] 적용한 알고리즘에 의하여 배경이 되는 영역과 물체가 되는 영역 사이의 그룹 분리도(class separability)를 정

의한다. 두 그룹의 분리도가 가장 높은 경우의 문턱치를 최적의 변환 문턱치 값으로 결정한다. 변환 문턱치 값의 결정 과정은 다음과 같다.

전체 영상에서 회색레벨 L 이 $[1,2,3,\dots,L]$ 과 같이 표현되고 각각의 레벨에 대한 픽셀의 개수를 n_i 라고 표현하면, 전체 픽셀의 개수는 $N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_L$ 이 된다. 따라서 각 회색레벨의 확률 분포는 식 (5)과 같다.

$$p_i = n_i / N \quad p_i \geq 0 \quad \sum_{i=1}^k p_i = 1 \quad (5)$$

일단 배경과 물체의 영역의 두 그룹으로 나누는 임의의 문턱치 값 k 를 설정한다. 변환 문턱치 값 k 를 기준으로 전체 영상은 배경이 되는 C_0 그룹 즉 $[1,2,3,\dots,k]$ 레벨의 픽셀들로 구성된 그룹과 점영상의 영역이 되는 C_1 그룹 즉 $[k+1,\dots,L]$ 로 나눌 수 있다. 두 그룹에 대한 그룹발생빈도(probabilities of class occurrence)는 다음과 같다.

$$\omega_0 = \Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (6)$$

$$\omega_1 = \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (7)$$

또한 배경이 되는 영역과 점영상이 되는 영역의 그룹평균레벨(class mean level)은 각각 다음과 같다.

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k i \Pr(i|C_1) = \sum_{i=1}^k i p_i / \omega_0 = \mu(k) / \omega(k) \quad (8)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L i \Pr(i|C_1) = \sum_{i=k+1}^L i p_i / \omega_1 = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (9)$$

여기서,

$$\omega(k) = \sum_{i=1}^k p_i \quad \mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i \quad \mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L i p_i \quad (10)$$

적절한 문턱치 결정의 기준은 그룹 분리도에 의하여 결정된다. 두 그룹간의 분리도는 다음과 같이 정의가 된다.

$$\eta(k) = \sigma_B^2(k) / \sigma_T^2 \quad (11)$$

여기서 $\sigma_B^2(k)$ 는 그룹간의 분산(the between-class variance)으로 정의되고, σ_T^2 은 전체분산(total variance)로 정의된다.

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (12)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i \quad (13)$$

따라서, 최적의 문턱치 값 k^* 는

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k < L} \sigma_B^2(k) \quad (14)$$

이 된다.

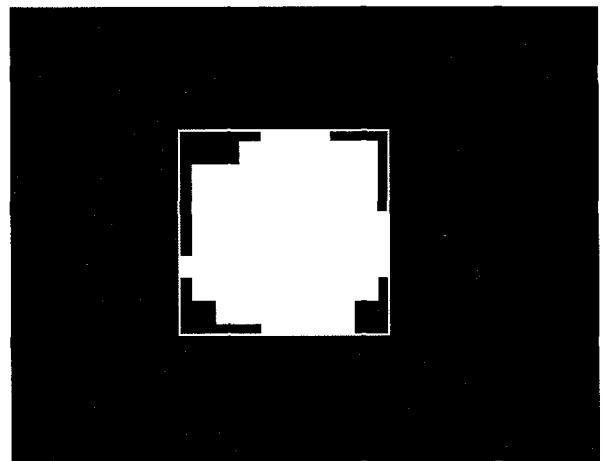
두 번째 단계에서는 생성된 2비트의 흑백 이미지로부터 점영상 위치와 경계 영역을 찾는 다. 전체 흑백 이미지의 픽셀 값은 0 혹은 1의 정보를 갖는다. 여기서 점영상은 1의 정보를 가지고 있으며 나머지 영역은 0으로 표현된다. 따라서 1의 정보를 가지고 있는 픽셀의 좌표를 찾게 되면 모든 점영상의 위치 좌표를 찾을 수 있다. 이때, 1의 값을 갖는 픽셀에 대하여 이웃하는 픽셀 정보 검색을 통해 픽셀간의 연결성을 얻을 수 있다. 이렇게 구해진 1의 값을 갖는 픽셀의 연결성을 통해 각각의 점영상 탐색영역을 찾게 된다. 이러한 영상 처리 과정을 통해 찾은 점영상의 수는 때때로 렌즐릿 배열의 점영상의 개수보다 많은 경우가 있다. 이러한 현상은 일부 점영상의 사이드로브(sidelobe) 또는 노이즈가 변환 문턱치보다 큰 픽셀 레벨을 가지기 때문에 발생한다. 따라서 점영상의 사이드로브 또는 노이즈에 의한 허위 점영상에 대하여 이를 제거하는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 허위 점영상은 실제 점영상에 비해 상당히 작으므로 점영상의 크기를 비교하여 허위 점영상을 제거하였다. 전체 영상에서 허위 점영상이 제거되면, 렌즐릿 배열에 의해 생성되는 점영상의 수와 일치하는 수의 점영상으로 변환된다.

세 번째 단계는 점영상의 중심점을 서브픽셀(subpixel) 단위로 결정하는 단계이다. 두 번째 단계에서 얻은 각 점영상은 여러 개의 픽셀로 구성된다. 이때, 그림 4(a)와 같이 각 점영상에 대하여 점영상의 모든 픽셀을 포함하는 사각 영역을 설정한다. 이 사각 영역은 점영상의 중심점을 결정하기 위한 영역으로서 8비트의 회색 이미지에서 사각형 영역에 해당하는 픽셀 정보를 추출한다. 실제 측정 점영상에는 노이즈 및 사이드로브 등 점영상의 중심점 탐색을 부정확하게 하는 오차가 포함되어 있다. 따라서 최고 광강도를 갖는 픽셀 정보의 30%에 해당하는 문턱치 값을 설정하여 중심점 측정상의 오차를 최소화 하였다.^[11] 그림 4(b)는 그림 4(a)에서 결정된 점영상 탐색영역 내에서 무게 중심법을 사용하여 중심점을 결정한 것을 나타낸다.

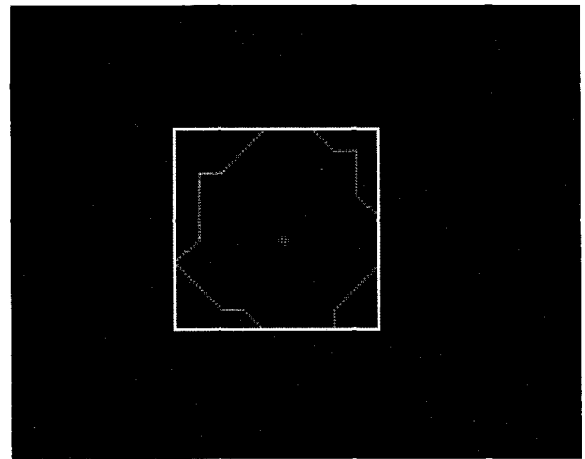
2. 점영상 대응법

그림 5는 10×10 렌즐릿 배열로 생성된 점영상에 대하여 점영상 탐색법을 적용하여 결정한 중심점들을 나타낸다. 다음으로 기준 점영상의 중심점과 측정 점영상의 중심점을 대응시키기 위해서 외곽에서부터 점영상 중심점에 순서를 부여한다. 이때, 전체 중심점 중에서 외곽의 중심점을 안정적으로 찾기 위해 전체 점영상의 네 모서리 영역에 가상점을 생성한다. 검출된 전체 영상의 가장 가까운 왼쪽 위의 중심점을 1번으로 번호를 부여하고 시계반대 방향으로 점영상 중심점에 번호를 붙인다.

그림 6과 같이 하나의 점영상 중심점을 기준으로 그 다음



(a)



(b)

그림 4. (a) 하나의 점영상에 대한 흑백 이미지와 유동적 중심점 탐색영역, (b) 회색이미지에 대한 유동적 중심점 탐색영역 내의 중심점 추출.

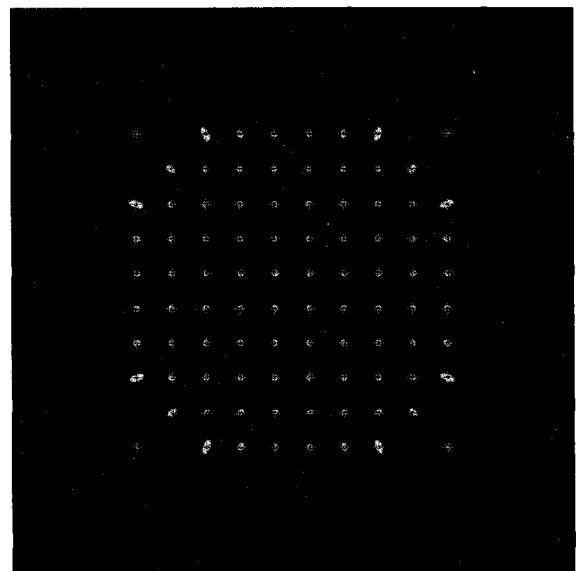


그림 5. 각 점영상의 중심점 및 네 개의 가상점.

점영상을 탐색하는 과정은 다음과 같다. 이전 단계에서 번호가 부여된 하나의 점영상 중심점을 기준으로 거리가 가까운 이웃하는 세 개의 점영상들을 찾아서 그 중 가장 외곽의 점영상 중심점에 다음 번호를 매긴다. 이를 위해 기준이 되는 점영상에서 이웃하는 세 개의 점영상들 사이의 각도를 비교하여 가장 시계방향에 위치한 점영상이 가장 외곽에 존재하는 점영상이므로 이를 찾는 방법을 적용한다. 이렇게 탐색된 점영상에 다음 번호가 부여되며, 이 점영상을 기준으로 또 다음 순서의 점영상을 찾을 때 이미 번호가 부여된 점영상을 탐색 대상에서 제외한다.

그림 6에서 왼쪽의 가장 위에 위치한 가상점이 1번 점영상이 되며 아래 방향에 위치한 점영상들이 순차적으로 2~7번의 번호를 부여 받는다. 그리고 왼쪽의 가장 아래에 위치한 가상점이 8번 점영상이 된다. 또한 8번 점영상을 기준으로 이미 번호가 부여된 점영상들을 제외하고 가까운 세 개의 점영상을 탐색하여 가장 외곽, 즉 시계방향에 위치한 점영상이 9번이 되는 것이다. 이러한 동일한 방법을 순차적으로 적용하면 모든 점영상 중심점의 순서가 정해지게 된다. 마지막으로 모든 점영상의 순서를 바탕으로 네 모서리의 가상점을 제외한 실제 점영상의 번호를 다시 정해주게 된다.

그림 7은 측정 파면의 점영상들을 외곽의 점영상 중심점부터 반 시계방향으로 내부의 모든 점영상에 대하여 순차적으로 번호를 붙인 그림을 나타낸다. 기준 점영상과 측정 점영상의 수가 일치하고 점영상이 동일한 순서를 가지므로 기준 점영상 이미지와 측정 점영상 이미지 사이에 같은 번호인 점영상을 일대일 대응 시킬 수 있다. 따라서 이러한 점영상 대응법을 이용하면 기준 점영상을 중심으로 측정 점영상의 이동량을 계산할 수 있으므로 측정범위의 제한 없이 샷-하트만 파면 센서를 이용한 파면의 국부적인 기울기를 얻을 수 있

고, 이를 Southwell 파면복원 알고리즘을 적용하여 전체 파면으로 복원할 수 있다.^[12]

IV. 실험을 통한 알고리즘 검증

그림 8은 본 연구에서 구성한 샷-하트만 파면측정 시스템을 나타내고 있다. 주요 구성부품으로는 가시광선 영역의 He-Ne 레이저와 직교 배열 형태를 갖는 렌즈렛 배열이 있다. 점영상을 검출하기 위한 카메라는 CMOS 타입의 디지털 카메라를 사용하였다. 초점벗어남(defocus)를 지배적 수차로 갖는 파면을 생성하고 이를 샷-하트만 파면 센서로 측정하여 제안된 파면측정 알고리즘의 측정정확도에 대한 검증에 이용하였다.^[11] 초점벗어남의 생성을 위하여 초점 거리 100 mm, 직경 1인치의 양면 볼록렌즈를 사용하여 그림 8과 같이 측정

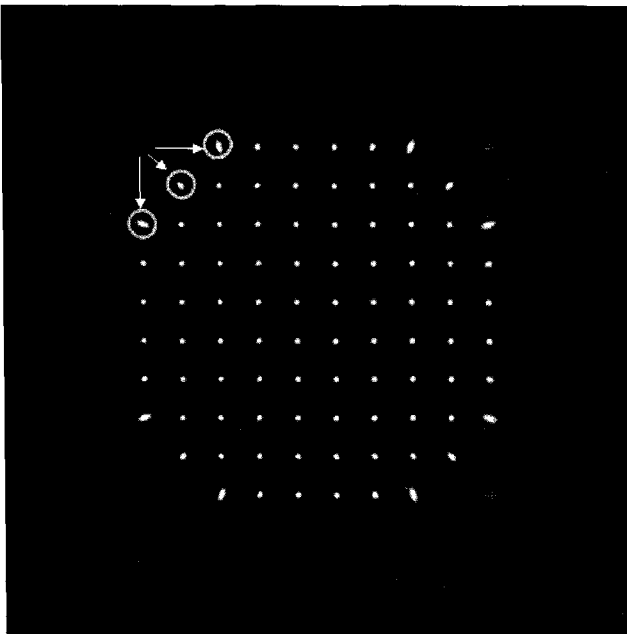


그림 6. 기준점에서 가까운 세 개의 점 탐색.

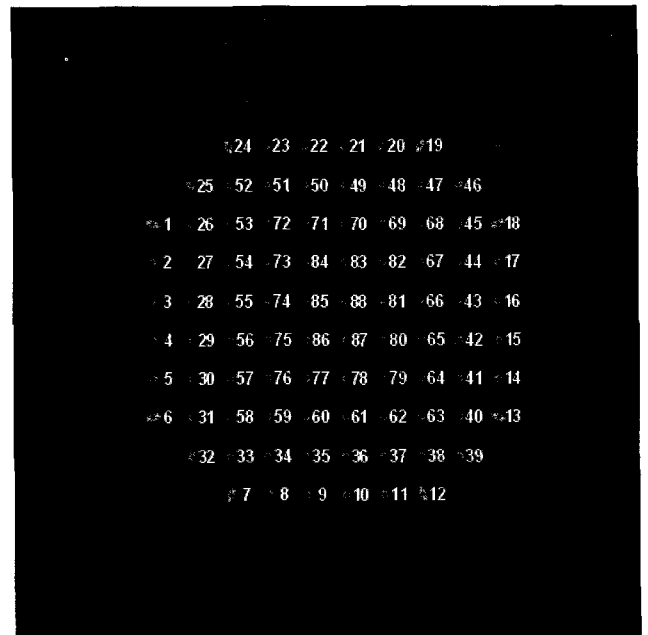


그림 7. 점영상 대응법을 통한 점영상 중심점의 순서.

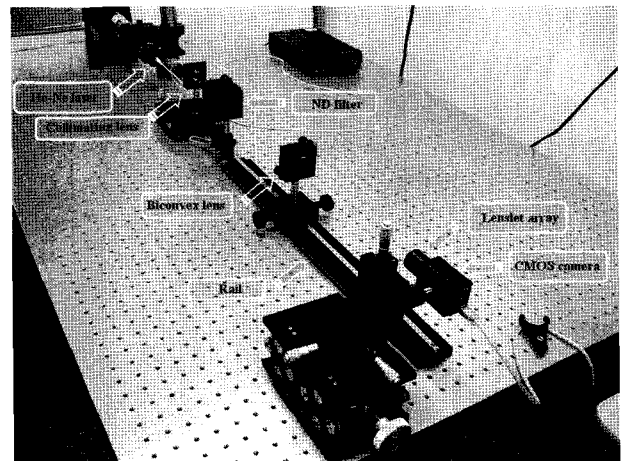


그림 8. 샷-하트만 센서 시스템 및 초점벗어남 측정실험 장치 구성.

시스템을 구성하였다. 이러한 양면 볼록렌즈로 일정한 양의 초점벗어남이 생성되는 것을 그림 9에 개념적으로 나타냈다. 점선과 같이 렌즈렛 배열상에 볼록렌즈의 초점이 맺히도록 볼록렌즈를 놓는다. 그리고 그림에서의 실선과 같이 길이 L 만큼 이동하면 곡률반경이 L 인 구면파가 렌즈렛 배열에 입사하게 된다. 이 때 렌즈렛 배열에 입사되는 구면파의 곡률반경 R_{sphere} 과 측정 영역의 반경 r_p , 그리고 초점벗어남 항에 대한 제르니케 다항식 계수 C_4 는 다음과 같은 관계를 가진다.^[13]

$$R_{sphere} = \frac{r_p^2}{4\sqrt{3}C_4}$$

그림 10은 이러한 방식으로 초점벗어남을 생성시킨 경우에 점영상 중심점을 가리키고, 그림에서의 사각배열은 기존의 일반적인 측정범위에 해당하는 영역을 나타낸다. 그림을 통하여 중심부분에서 외곽부분으로 갈수록 점영상은 렌즈렛의 하부개구를 벗어나는 것을 알 수 있다. 일반적인 샷-하트만 센서의 측정 알고리즘을 이용하면 식 (4)의 각 렌즈렛의 지름과 파장에 의하여 결정되는 최대 측정 가능한 위상 오차가 존재하는데 이 경우 발생하는 파면이 최대 측정 가능한 위상 오차보다 크게 된다. 따라서 이 파면에 대해서 일반적인 샷-하트만 센서로의 파면 측정이 불가능하다. 그러므로

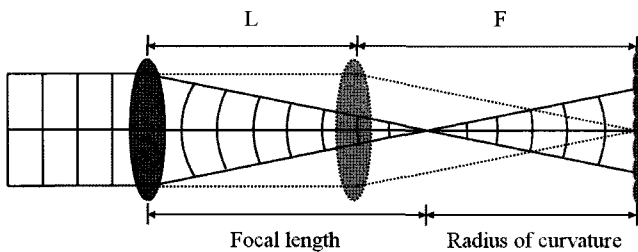


그림 9. 초점벗어남 측정 실험의 개념도.

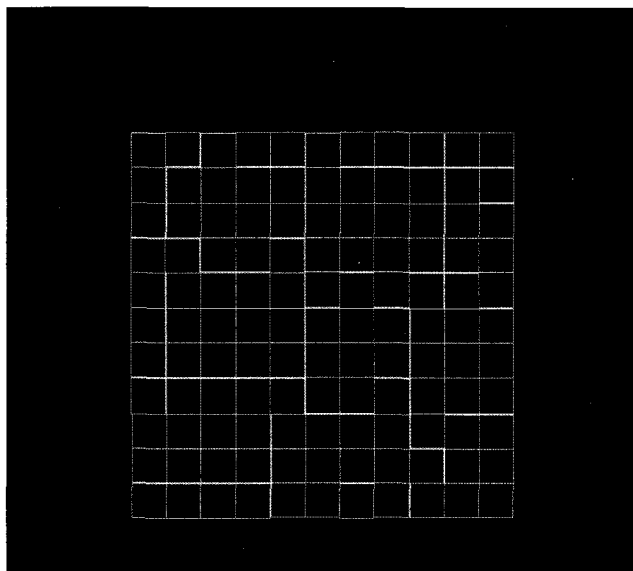


그림 10. 측정된 점영상 중심점(곡률반경 100 mm).

이러한 파면을 측정할 때 샷-하트만 센서의 측정범위 확장을 위한 알고리즘의 활용이 필요하게 된다.

그림 11은 곡률반경이 100 mm인 구면파를 측정한 결과를 나타내며 측정 결과를 제르니케 다항식(Zernike polynomial)으로 근사했을 때의 각 항의 계수 값을 나타낸다. 구면파는 제르니케 다항식에서 초점벗어남 항으로 표현이 되며 이때, 초점벗어남 항에 대한 제르니케 다항식 계수는 $C_4 = 3.9457 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. x -, y -틸트(tilt)는 초점벗어남과 서로 독립이기 때문에 측정 결과에 영향을 미치지 않는다. 틸트가 측정되는 이유는 광축 정렬 오차에 의한 것으로 추정된다. 측정에 사용된 렌즈렛 배열은 11×11 이며, 측정 영역의 반경 $r_p = 1.65 \text{ mm}$ 이므로 측정된 곡률반경은 다음과 같다.

$$R_{sphere} = \frac{r_p^2}{4\sqrt{3}C_4} = \frac{(1650 \mu\text{m})^2}{4\sqrt{3} \times 3.9457 \mu\text{m}} = 99.7918 \text{ mm}$$

측정된 곡률반경은 초점 거리 산정 시의 오차, 광축 정렬의 오차, 파면 복원의 오차, 센서 부품의 가공 오차 등이 영향을 미친 결과이다. 따라서 정확한 초점벗어남량을 측정하기 위해서 시스템의 인자를 보정해 주어야 할 필요가 있다. 초점 거리 f 는 렌즈렛 배열과 CMOS 카메라 검출면 간의 거리이다. 이 거리는 정확히 렌즈렛 배열의 초점거리와 일치해야 하지만 CMOS카메라에 렌즈렛 배열을 장착하면서 생기는 오차에 의한 영향을 받는다. 따라서 정확한 초점거리에 렌즈렛 배열이 위치되었는지 측정 결과와의 비교를 통해 검토해 본 후, 유효 초점 거리를 계산해 초점 거리를 보정해야 한다.

곡률반경을 100 mm에서 400 mm까지 변화시키면서 파면을 측정하였다. 곡률반경이 100 mm에서 150 mm인 파면의 점영상은 렌즈렛의 하부개구를 벗어나서 점영상이 생성된다. 따라서 일반적인 방법으로는 올바른 파면을 복원할 수 없다.

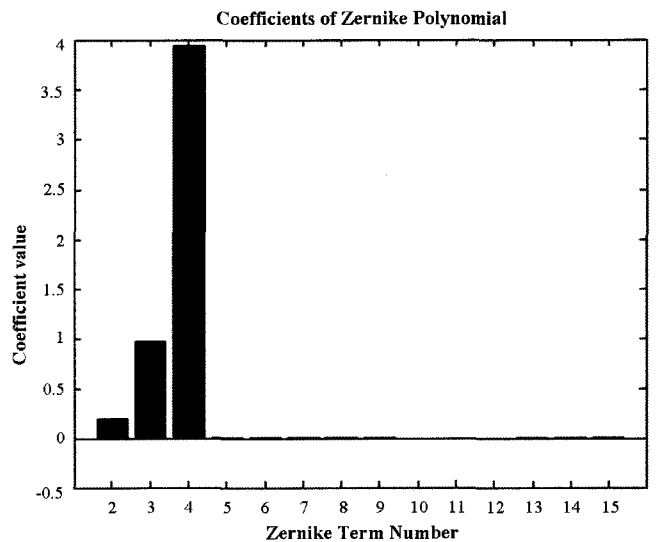


그림 11. 초점벗어남 실험 결과(곡률반경: 100 mm): 제르니케 다항식 계수.

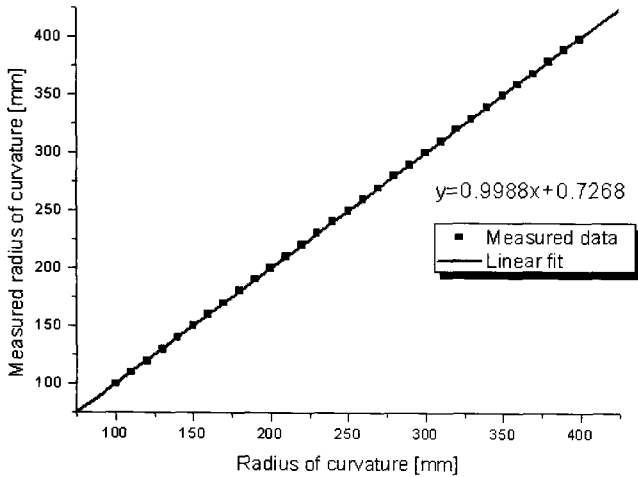


그림 12. 곡률반경에 따른 초점벗어남 측정실험 결과.

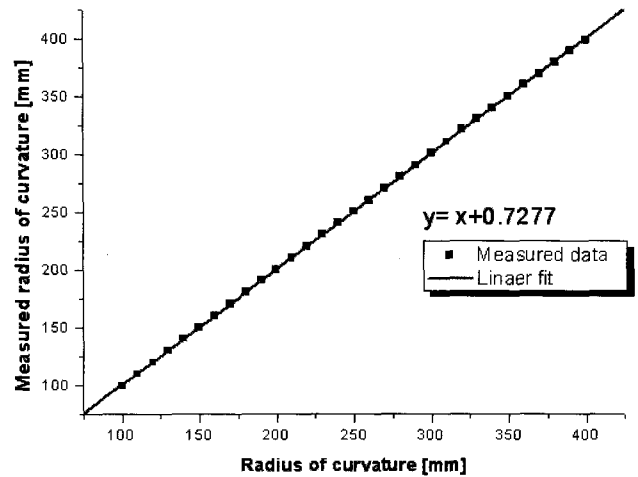


그림 13. 곡률반경에 따른 초점벗어남 측정실험 결과: 시스템 초점거리 보정.

하지만 점영상 탐색법과 점영상 대응법의 제안된 파면측정 알고리즘을 사용하면 측정범위의 제한이 없이 파면을 측정할 수 있다. 측정 결과 그래프에서 기울기가 0.9988로 평가되었고 이 결과를 그림 12에 나타내었다. 이는 렌즈렛 배열과 검출기 평면 간의 거리가 실제 거리보다 작게 계산되었다는 것을 의미한다. 따라서 초점 거리를 다시 계산하여 센서의 측정 결과 기울기를 1로 맞추어 주어야 한다. 초점벗어남 측정 실험에서 절대적인 계산이 가능한 값은 곡률반경의 변화량이다. 각 측정 단계에서 10 mm만큼의 변화를 주었으므로 센서의 측정량 변화의 평균값이 10 mm에 가장 가까워야 한다. 이를 이용하여 유효 초점 거리는 27 mm에서 27.032 mm로 재계산 된다. 보정된 유효 초점 거리를 사용하여 다시 실험을 수행한 결과는 그림 13와 같다. 여기서 그래프의 기울기는 1로 보정되었다. 초점거리를 보정하기 전의 초점벗어남 측정값에 대한 파면의 오차는 최대 $\frac{1}{72}\lambda$ 로 나타났다. 보정한 유효 초점 거리를 이용할 경우 최대 오차는 $\frac{1}{91}\lambda$ 로 보다 정밀한 파면의 측정이 가능함을 확인하였다. 이 때 그래프에서의 x축이 나타내는 곡률반경은 양 볼록 렌즈를 레일 위에서 위치시킬 때 감지기와 렌즈 사이의 거리를 나타낸다. 이 때 사용한 레일 눈금의 정확도가 1 mm이므로 그림 13과 같은 0.7277만큼의 오프셋을 발생하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 샷하트만 파면 센서의 측정 범위 확장에 관한 연구를 수행하였다. 샷하트만 센서의 중심점 탐색 일반적인 방법은 제한된 탐색영역을 설정하고, 이 영역 내에서 점영상의 중심점을 결정하는 것이다. 국부적으로 큰 기울기를 갖는 파면이 샷하트만 센서로 입사하게 되면 파면의 점영상이 탐색영역, 즉 하부개구의 범위를 벗어나기 때문에 입사 파면의 측정이 불가능한 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고자 측정 범위 확장을 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 점영상 탐색법과 점영상 대응법으로 구성된다. 점영상 탐색법은 영상처리 기법을 이용하여 유동적인 점영상 탐색영역을 설정하는 방법이다. 이때, 각각의 기준 점영상과 측정 점영상 사이의 대응관계가 올바르게 못하면 정확하게 파면을 복원할 수 없는 문제점이 있다. 이를 해결하고자 외곽에 있는 기준 점영상과 외곽에 있는 측정 점영상부터 서로 연결하여 모든 점영상을 일대일 대응시키는 점영상 대응법을 제안하였다.

또한 제안된 알고리즘에 대하여 실험을 통해 파면측정 정확성을 검증하고자 샷하트만 센서의 파면측정시스템을 구성하였다. 특정한 양의 곡률반경을 갖는 구면파를 생성시키고 이를 측정하여 초점벗어남량을 계산하고, 이를 다시 곡률반경으로 환산하여 입사파면의 곡률반경과 일치하는지를 검증하는 실험을 수행하였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 측정이 불가능하였던 국부적으로 큰 기울기를 갖는 파면까지 측정이 가능하다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD070007AD).

참고문헌

- [1] Ben C. Platt, Roland Shack, "History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing," *Journal of Refractive Surgery*, Vol. 17, pp. 573-577, 2000.
- [2] N. Lindlein, J. Pfund and J. Schwider, "Expansion the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor using astigmatic microlenses," *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 8, pp. 2220-

- 2225, 2000.
- [3] N. Lindlein, J. Pfund and J. Schwider, "Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator array," *Opt. Eng.*, Vol. 40, No. 5, pp. 837-840, 2001.
- [4] D. V. Podanchuk, V. P. Dan'ko, M.M. Kotov, J. Y. Son, Y. J. Choi, "Extended-range Shack-Hartmann wavefront sensor with nonlinear holographic lenslet array," *Opt. Eng.*, Vol. 45, No. 5, pp. 53605-53610, 2006.
- [5] G. Y. Yoon, S. Pantanelli, L. J. Nagy, "Large-dynamic-range Shack-Hartmann wavefront sensor for highly aberrated eye," *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 11, No. 3, pp. 30502-30505, 2006.
- [6] J. Lee, R. V. Shack, and M. R. Descour, "Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wavefront sensor," *Appl. Opt.*, Vol. 44, No. 23, pp. 4838-4845, 2005.
- [7] 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 2003* (Livermore, CA94551), 2003.
- [8] D. 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, 1977.
- [9] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MatLab*, Pearson Education, Inc., 2004.
- [10] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- [11] K. W. Roh, *et al.* "A study on the Improvement of Wave-front Sensing Accuracy for Shack-Hartmann Sensor," *Optical Society of Korea*, Vol. 17, No. 5, pp. 383-390, 2006.
- [12] W. H. Southwell, "Wave-front estimation from wave-front slope measurements," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 8, pp. 998-1006, 1980.
- [13] Emma Eriksson, *Low-order aberration correction with a membrane deformable mirror for adaptive optics*, Chalmers University of Technology: Master' thesis, Sweden, 2004.

A Study on the Dynamic Range Expansion of the Shack-Hartmann Wavefront Sensor using Image Processing

Min-Seok Kim

Doosan Heavy Industries and Construction Co. Ltd, 555 Gwigok-dong, Changwon, Gyeongnam 641-792, Korea

Ji-Yeon Kim[†], Tae-Kyung Uhm, and Sung-Kie Youn

Department of Mechanical Engineering, KAIST, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-701, Korea

[†]E-mail: ele1111@kaist.ac.kr

Jun-Ho Lee

Department of Optical Engineering, Kong-Ju National University, 182 Shinkwan-dong, Kongju, Chungnam 314-701, Korea

(Received August 16, 2007, Revised manuscript November 15, 2007)

The Shack-Hartmann wavefront sensor is composed of a lenslet array generating the spot images from which local slope is calculated and overall wavefront is measured. Generally the principle of wavefront reconstruction is that the spot centroid of each lenslet array is calculated from pixel intensity values in its subaperture, and then overall wavefront is reconstructed by the local slope of the wavefront obtained by deviations from reference positions. Hence the spot image of each lenslet array has to remain in its subaperture for exact measurement of the wavefront. However the spot of each lenslet array deviates from its subaperture area when a wavefront with large local slopes enters the Shack-Hartmann sensor. In this research, we propose a spot image searching method that finds the area of each measured spot image flexibly and determines the centroid of each spot in its area. Also the algorithms that match these centroids to their reference points unequivocally, even if some of them are situated off the allocated subaperture, are proposed. Finally we verify the proposed algorithm with the test of a defocus measurement through experimental setup for the Shack-Hartmann wavefront sensor. It has been shown that the proposed algorithm can expand the dynamic range without additional devices.