

레이저 빔의 파면 측정을 위한 영상신호처리 알고리즘

Image Processing Algorithm for Measuring Wavefront of Laser Beam

박승규, 백성훈, 서영석, 차병헌, 김철중(한국원자력연구소, 양자광학기술개발부),
박준식, 나성웅(충남대학교 전자공학과)
skpark4@kaeri.re.kr

본 논문에서는 레이저 빔의 파면을 고속으로 정밀하게 측정하기 위한 신호처리 알고리즘을 연구하였다. 레이저 빔의 파면 정보는 Shack-Hartmann 센서 내부의 CCD 카메라에 획득되는 점영상으로부터 기울기 정보를 추출하여 구할 수 있다. 컴퓨터는 영상처리 보드를 이용하여 하트만 센서 내부의 카메라에 획득되는 영상을 양자화된 디지털 값으로 획득한 후 이를 컴퓨터 메모리에 저장한다. 하트만 센서 내부의 CCD 카메라에 촬상되는 레이저 빔 영상은 CCD 픽셀들에 의하여 이산 샘플링되고, 이 영상은 컴퓨터 내부에 장착된 영상처리 전용 보드에 의하여 양자화된 디지털 값으로 변환된다. 본 논문에서는 유한개의 CCD 픽셀들에 의해 양자화된 디지털 영상으로부터 정밀하면서도 고속으로 파면을 측정하기 위한 영상신호처리 알고리즘을 연구하였다. 개발된 알고리즘에 대한 성능을 평가하기 위하여 본 논문에서는 다양한 종류의 파면을 생성하여 신호처리 알고리즘을 분석하였다. 본 논문에서는 어레이 렌즈(12x12)와 RS170형의 흑백카메라를 사용하여 하트만 센서를 구성하였으며 8비트 디지털 영상처리보드를 컴퓨터 내부 장착하여 디지털 영상을 획득하였다. 하트만 센서로부터 영상처리보드에 획득되는 디지털 점영상은 12x12 배열로 구성되어 있으며 각 점영상의 탐색영역은 21x21 픽셀로 구성되어 있다. 컴퓨터는 각 점영상의 중심점을 추출한 후 이를 기준 중심점과 비교하여 이동량을 계산함으로써, 즉 식 (1)과 같이 Δx 와 Δy 를 계산함으로써 각 점영상의 중심점 위치에서의 X-축 방향과 Y-축 방향의 기울기 정보를 얻을 수 있다.

$$\Delta x = P_x - P_x^{orig}, \quad \Delta y = P_y - P_y^{orig} \quad (1)$$

여기서 P_x 와 P_y 는 현재 순간에 획득한 파면 영상에서 각 점영상들의 X-축 방향과 Y-축 방향의 중심점 위치를 나타낸다. P_x^{orig} 와 P_y^{orig} 는 파면왜곡이 없는 기준 레이저 빔에 대하여 획득한 파면 영상에서 각각의 점영상들의 X-축과 Y-축 방향의 중심점 위치를 나타낸다. 각 점영상들의 기준 중심점 위치를 나타내는 P_x^{orig} 와 P_y^{orig} 값은 미리 획득한 정보를 텍스트 파일로 저장하여 활용할 수 있으며, 시스템의 초기 시작 단계에서 파면왜곡이 없는 레이저 빔을 생성할 수 있는 경우에는 이를 생성하여 각 점영상의 중심점을 추출한 후 이를 파일 정보로 저장하여 사용할 수 있다.

각 점영상의 중심점을 추출하는 첫 번째(k=1) 과정은 주어진 유한개의 CCD 픽셀 데이터를 사용하여 식 (2)와 같은 무게중심법을 사용하여 P_x^1 와 P_y^1 를 계산한다[1]. 식 (2)에서 얻어진 중심점 정보는 유한한 개수의 픽셀로 샘플링된 정보로부터 추출된 중심점 정보이므로 측정 정밀도가 높지 않은 한계가 있다. 그러므로 본 논문에서는 계층적으로 더욱 정밀한 중심점을 추출하기 위하여 두 번째 이후(k>1) 과정에서는 이전 단계에 추출된 중심점을 중심으로 더욱 세부적인 중심점을 추출하였다[2]. 즉, 두 번째 이후의

중심점 추출 단계에서는 식 (2)와 같이 이전 단계에서 추출한 중심점을 중심으로 작은 창을 씌워 세부 중심점을 추출한다. 이때 중심점 위치에서의 영상정보와 이 위치를 중심으로 탐색창 내에서 픽셀 간격 위치에서의 영상정보는 보간된 값을 사용한다.

$$P_x^k = \frac{\sum_{y=-w/2}^{w/2} \sum_{x=-w/2}^{w/2} I_{x,y} \times x}{\sum_{y=-w/2}^{w/2} \sum_{x=-w/2}^{w/2} I_{x,y}} \times \alpha_x, \quad P_y^k = \frac{\sum_{y=-w/2}^{w/2} \sum_{x=-w/2}^{w/2} I_{x,y} \times y}{\sum_{y=-w/2}^{w/2} \sum_{x=-w/2}^{w/2} I_{x,y}} \times \alpha_y \quad (2)$$

여기서 w 는 탐색창($w \times w$)의 크기를 나타내는 정수값이고, $I_{x,y}$ 는 영상의 (x,y) 위치에서의 픽셀 강도 값이다. 두 번째 이후의 중심점 추출 단계에서 $I_{x,y}$ 값은 보간된 값이다. P_x^k 와 P_y^k 는 k 번째 중심점 추출 과정에의 X-축과 Y-축 방향의 중심점 위치이다. α_x 와 b_x 는 X-축 방향으로의 중심점 측정과정에서 측정속도를 높이기 위한 예측 가중치 값과 평균 중심점 수렴을 값으로 식 (3)에 의하여 계산된다.

$$\alpha_x = \sum_{k=0}^L b_x^k, \quad b_x = \sum_{s=1}^A \sum_{t=2}^B \left| \frac{P_s^{t+2} - P_s^{t+1}}{P_s^{t+1} - P_s^t} \right| \frac{1}{A(B-1)} \quad (3)$$

여기서 L 은 정수이고, P_s^t 는 s 번째 점영상에 대한 t 번째 반복 추출 단계에서 X-축 방향의 위치를 의미한다. 같은 방법으로 α_y 와 b_y 도 계산된다. 그러므로 각 단계에서 추출된 중심점의 합이 최종적인 중심점의 위치가 된다.

본 논문에서는 실험을 위하여 여러종류의 평균중심수렴율을 갖는 파면 영상을 사용하였고, 히터를 사용하여 강제적인 파면왜곡을 유도하여 측정 알고리즘의 민감도를 분석하였다. 히터에 의하여 강제적으로 파면왜곡이 유도된 레이저 빔 파면에 대하여 X-축 방향과 Y-축 방향의 평균 중심수렴율 값의 변화를 측정된 결과는 그림 1과 같고, 평균 중심수렴율 값과 중심점 추출 속도와의 관계는 그림 2와 같다.

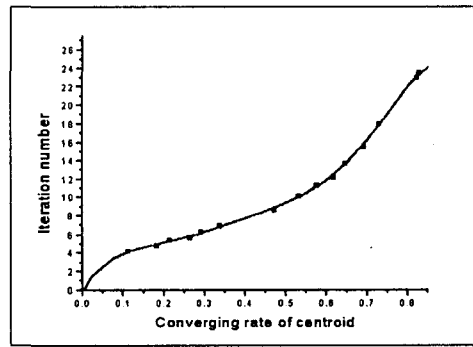
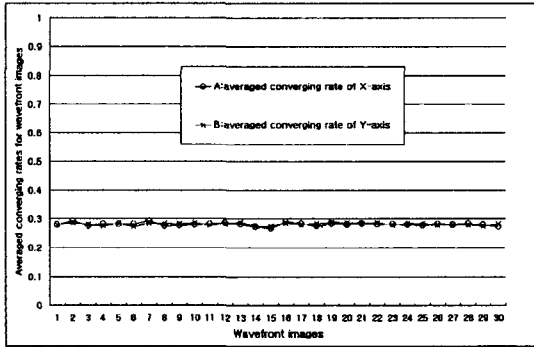


그림 1. 파면왜곡에 의한 평균 중심수렴율의 변화 그림 2. 중심수렴율 변화에 따른 파면 측정속도 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

참고문헌

[1] Luis D. S. H, Wavefront sensing in the human eye with a Shack-Hartmann sensor, Ph.D. thesis, University of London, pp45-83, 2000.
 [2] S. K. Park, S. H. Baik, A study on a fast measuring technique of wavefront using a Shack-Hartmann sensor, Optics & Laser Tech., Vol. 34, pp687-694, 2002.