

적응광학시스템의 고속 파면측정 알고리즘에 대한 연구

박승규[†] · 백성훈 · 서영석 · 김철중

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

☎ 305-353 대전지 유성구 덕진동 150

박준식 · 나성웅

충남대학교 전자공학과, 통신공학연구소

☎ 305-764 대전시 유성구 궁동 220

(2002년 2월 25일 받음, 2002년 4월 12일 수정본 받음)

고속 정밀 파면측정 기술은 적응광학 시스템의 성능향상에 중요한 요소이다. 본 논문에서는 적응광학시스템의 하트만 센서로부터 파면정보를 고속으로 측정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 또한 변형거울 및 기울기거울을 외부유입 노이즈에 강하게 제어하기 위하여 차분 신호를 구성하는 전기적인 제어 장치들을 개발하였다. 무게중심법에 기초한 파면측정 기술은 하트만 센서를 이용한 파면측정 알고리즘으로 가장 널리 사용 되어오고 있으며 좋은 측정결과를 제공해오고 있다. 본 논문에서는 하트만 센서를 이용한 점 영상에서 실제 각 점의 무게 중심위치를 예측하는 예측 가중치가 결합된 무게중심법을 제안하였다. 제안된 고속 파면측정 알고리즘은 실험을 통해 고속의 정밀한 측정 결과를 제공함을 확인하였고 결과를 비교 분석하였다.

주제어 : adaptive optics system, centroid algorithm, Shack-Hartmann sensor, wavefront.

I. 서 론

입사광의 파면 왜곡을 측정하고 보정하는 적응광학시스템은 파면 센서를 이용하여 광의 파면왜곡 정도를 측정하고 변형거울을 사용하여 변형된 파면왜곡을 보상함으로써 입사광의 품질을 향상시키는 장치이다. 이러한 적응광학 시스템은 지상에서 하늘의 별이나 위성을 관측할 경우 대기 유동에 의한 굴절을 변화로 인하여 발생하는 관측 오차를 보상함으로써 관측시스템의 측정 분해능을 향상시킨다.^[1] 또한 고출력 레이저를 이용하여 전자부품이나 반도체, 철판 등에 대해 정밀 절단이나 용접 등을 할 때 레이저 공진기 내부에서 발생하는 레이저빔은 공진기 내부의 열적 특성의 변화로 인하여 레이저빔의 파면이 왜곡되어 출력특성이 나빠진다. 이러한 정밀 용접 및 절단 시스템에 적응광학시스템을 적용하여 레이저빔의 파면 왜곡 정도를 측정하여 이를 보정함으로써 시스템의 절단 및 용접 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 파면 왜곡의 보정 속도는 적응광학 시스템의 적용 환경에 따라 다르나 일반적으로 수 Hz에서 수백 Hz의 고속 보정이 필요하다.^[2,3]

적응광학시스템에서 입사광의 파면형상을 정밀하게 측정하는 것은 시스템의 성능 향상에 중요한 요소이다. 정밀한 파면형상을 측정하기 위하여 많은 연구가 진행되었다. 그 중 계산 과정은 복잡하지만 정밀한 정보를 제공하는 무게중심법(mass centroid)과 하드웨어 구성이 간단하여 고속의 파면형상 측정이 가능한 모멘트(moment)를 이용하는 방법이 현재 널리 사

용되고 있다.^[4-6]

본 논문에서는 광의 파면 왜곡 측정 및 보정을 경제적이면서도 고속 정밀 보정을 수행하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 IBM PC의 윈도우즈 환경에서 하트만 센싱 파면측정 장치와 파면 보정 장치인 기울기거울 및 변형거울을 사용하여 적응광학시스템을 구성하였다. 또한 외부 유입 노이즈에 강하게 변형거울 및 기울기 거울을 제어하기 위하여 그라운드 절연된 데이터 신호 생성 드라이브를 구성하였다. 또한 입사광에 대하여 고속으로 정밀한 파면형상 정보를 추출하기 위하여 실제 중심점을 예측하는 예측 가중치가 결합된 무게중심법 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 보간 방법에 기초한 반복 중심점 추출법을 사용하여 더욱 정밀하게 기울기 정보를 획득하였다.

II. 본 론

2.1. 적응광학시스템의 기본원리

그림 1에 보이는 바와 같이 페루프 적응광학시스템은 Shack-Hartmann형 파면측정 센서와 보정을 위한 변형거울(deformable mirror)과 기울기거울(tip/tilt mirror) 및 주 운영 컴퓨터로 구성된다. 변형거울에 의하여 반사된 레이저 빔 일부는 빔분할기(BS)에 의하여 샘플링된다. 샘플링된 레이저빔은 Shack-Hartmann형 센서를 사용하여 파면의 형상을 측정한다. Shack-Hartmann형 센서는 배열 렌즈(12×12)를 사용하여 CCD센서에 파면의 점영상을 촬상시킨다. 주 운영 컴퓨터는 CCD센서에 촬상된 점 영상을 디지털화 시켜 영상처리전용보

[†]E-mail: skpark4@kaeri.re.kr

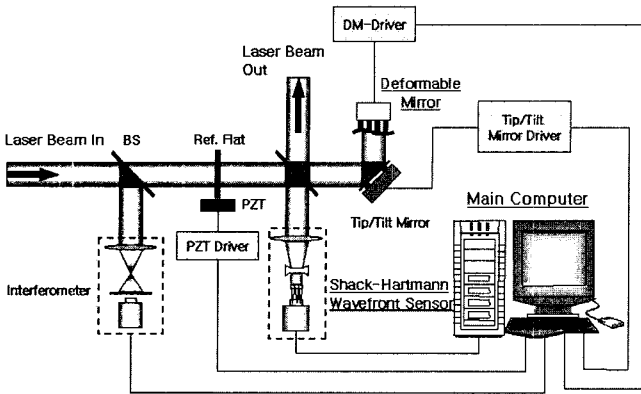


그림 1. 적응광학시스템의 구성.

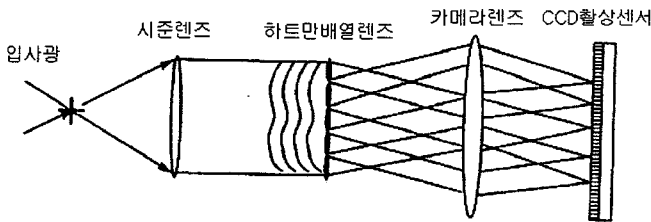


그림 2. 파면측정 센서 내부 구성 블록도.

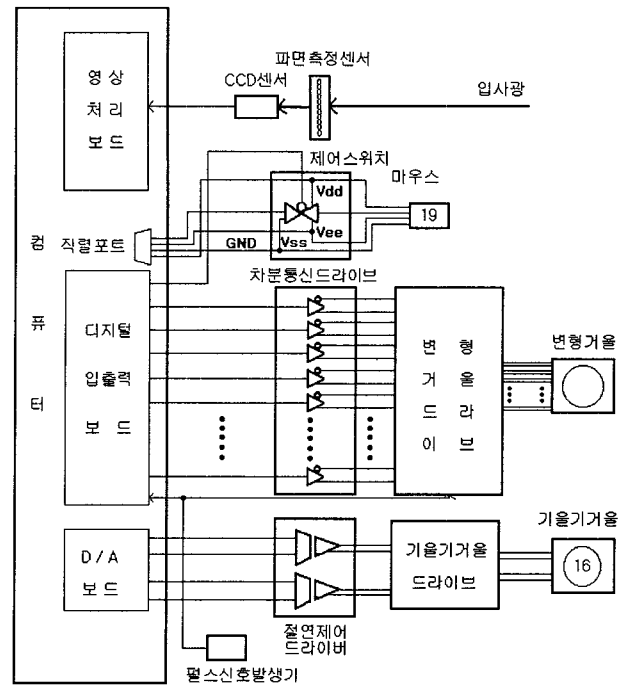


그림 3. 구성한 적응광학시스템의 블록도.

드의 메모리에 저장시킨다. 그림 2는 파면측정 센서의 세부 구성도이다. 입력되는 입사광은 시준 렌즈를 통과하면서 평행광으로 변환 후 하트만 배열렌즈로 입력된다. 하트만 배열렌즈를 통과한 파면 왜곡된 입사광은 카메라렌즈를 통과한 후 CCD활상센서로 영상이 맺힌다.

주 운영 컴퓨터는 저장된 하트만 센싱 점영상으로부터 각 점의 X축과 Y축의 기울기 정보를 추출함으로써 입사광의 파면 형상 정보를 얻는다. 주 운영 컴퓨터는 파면왜곡 측정 및 보정을 수행하기 전에 노이즈가 없는 기준 입사광에 대한 하트만 센싱 점 영상을 획득하여 각 점의 위치를 기준 위치로 기억하고 이를 기준파면 정보로 인식한다. 기준 파면정보는 파면왜곡이 없는 입사광에 대하여 변형 거울 면과 기울기 거울 면을 평면으로 유지한 후 하트만 센싱 영상을 획득하여 각 점의 중심점을 추출하여 생성한다. 생성된 기준파면 정보는 텍스트 파일로 하드디스크에 저장되어 필요시 재활용이 가능하다. X축과 Y축의 파면왜곡 기울기 값은 이 기준 위치와 현재 측정된 하트만 점영상의 중심위치와의 차이값을 의미하므로 주 운영 컴퓨터는 파면 측정 센서를 이용하여 파면왜곡 기울기 값을 추출한 후 기울기 거울 및 변형거울을 구동하여 파면 왜곡을 보정한다.^[5,6] 그림 1에서 간섭계는 광학계의 자체 왜곡 감시 및 적응광학 시스템을 이용한 파면왜곡 측정과 파면 보정 결과의 측정 과정에서 측정량의 정량화를 위하여 활용되며 또한 기울기거울과 변형거울의 각 구동축의 구동 검증과 이동량을 측정하기 위하여 활용되는 보조 장치이다.

2.2. 적응광학 시스템의 구성

본 논문에서 구성한 적응광학시스템의 블록도는 그림 3과 같고 신호처리 순서도는 그림 4와 같다. 사용된 IBM PC 컴

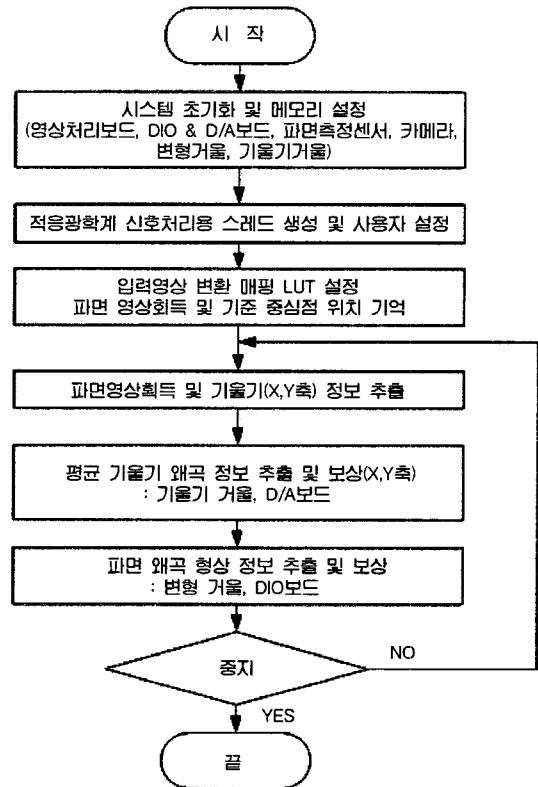


그림 4. 적응광학 시스템의 신호처리 순서도.

퓨터에는 파면측정센서에서 측정되는 파면 영상을 8비트 디지털 값으로 변환시키기 위한 영상처리전용보드가 장착되어 있으며 펄스신호 수신과 변형거울을 제어하기 위한 디지털 입출력 보드 및 기울기거울을 제어하기 위한 디지털아날로그(D/A)

보드가 장착되어 있다.

컴퓨터는 초기단계에서 내부에 장착된 영상신호처리전용보드, 디지털입출력보드, 디지털아날로그변환보드, 변형거울, 기울기거울, CCD 카메라, 직렬포트를 초기화시킨 후 영상신호처리보드의 메모리를 설정한다. 변형거울 제어드라이버와 컴퓨터는 펄스신호 발생기로부터 펄스신호를 수신하여 데이터통신 동기화를 수행한다. 측정을 시작하기 전에 컴퓨터의 주 운영 신호처리는 현재 측정 환경에 대한 사용자 환경설정을 요구한다. 사용자는 현재 획득되는 파면영상(하트만센서에 의해 획득되는 점영상들)에서 각 점 영상의 시작점 위치와 간격 등을 입력하여 각 점의 중심점 탐색 영역을 설정하고, 원하는 중심추출 방법이나 보간방법 등에 대한 사용자 요구사항을 입력한다. 사용자 설정이 끝나면 컴퓨터는 각각의 입사광에 대한 하트만 센싱 영상을 획득한 후 각 영상의 좌측상단, 우측상단, 좌측하단, 우측하단 위치에 식 (1)과 같은 5×5창을 씌운 평균값의 평균을 각 영상의 배경영상 픽셀값(TH)으로 설정하여 입력 LUT(look-up table)에 영상 입출력 변환 테이블 공식 (2)를 설정한다.

$$\frac{\sum_{y=-2}^2 \sum_{x=-2}^2 I_{x,y}}{25} \quad (1)$$

$$Y_{x,y} = X_{x,y} - TH \quad (2)$$

여기서 $I_{x,y}$ 는 X축 방향으로 x위치, Y축 방향으로 y위치에서의 픽셀 강도값을 의미한다. $Y_{x,y}$ 는 X축 x위치와 Y축 y위치에서의 출력 영상 픽셀 값이며 $X_{x,y}$ 는 (x,y)위치에서의 입력 영상 픽셀 값이다. 값을 갖는 $Y_{x,y}$ 는 0으로 매핑하였다.

파면왜곡 측정 및 보정을 수행하기 전에 컴퓨터는 파면왜곡이 없는 입사광에 대하여 기준 파면 점 영상을 획득한 후 설정된 환경 변수들로부터 영상 점 들의 중심점 위치를 서브픽셀 분해능(sub-pixel resolution)으로 추출하여 메모리에 기억한 후 파면왜곡측정 및 보정을 시작한다. 컴퓨터는 연속 패 루프로 계속하여 왜곡이 발생하는 입사광의 파면 왜곡을 보정한다.

파면형상 기울기 정보는 각각의 하트만센싱 점 영상에 대해 사용자가 설정한 탐색 영역에서 중심점 추출 방법에 기초하여 서브픽셀 분해능으로 추출한다. 컴퓨터는 추출된 중심점 정보로부터 광의 파면 왜곡 기울기 정보를 계산한다. 계산된 파면 왜곡 정보에서 X축 전체에 대한 기울기 평균값과 Y축 전체에 대한 기울기 평균 값을 구한 후 X축과 Y축의 평균 기울기 값의 반대 값으로 D/A보드를 통하여 아날로그 전압 값을 출력한다. 출력된 아날로그 X, Y축 기울기 값은 절연제어드라이브에 의하여 각 X, Y축 신호는 절연된 후 기울기거울 제어드라이브에 의하여 증폭되어 기울기거울에 입력된다. 컴퓨터는 각각의 점 영상에서 X축과 Y축의 기울기 평균 값을 뺀 나머지 파면 왜곡에 대해 이를 보정하는 변형거울 각 채널의 전압값을 계산한다. 구해진 전압값은 디지털 입출력 보드를 통하여 통신방식으로 16비트 값으로 출력된다. 출력된 16비트 디지털 데이터 값은 노이즈에 강한 차분형 통신드라이브에 의하여 각 비트가 각각의 기준점을 갖는 차분값으로 변환되어 변형거울 제어드라이브에 전송된다. 전송된 16비트 데이터 값

은 변형거울 제어드라이브에 의하여 변형거울을 구동하기 위한 전압값으로 증폭된 후 변형거울에 입력된다.

일반적으로 변형거울은 컴퓨터로부터 멀리 떨어져 있고 주변의 환경이 노이즈 성분이 많은 열악한 환경이므로 장거리 통신에서 에러를 줄이기 위하여 차분형 통신방식을 사용하여야 한다. 또한 변형거울의 채널 수가 많아지고 노이즈 성분이 빠른 속도로 유입될 경우에 대비해서 데이터 전송속도(30 KHz-20 MHz)가 빨라야 하므로 공통 전압 기준점을 사용하여서는 안되고 반드시 각 채널은 고유의 전압 기준점을 가지도록 구성하여야 한다. 또한 일반적으로 사용되는 윈도우 OS 환경은 시분할(time sharing)에 의한 다중작업(multi-tasking)을 수행하므로, 만약 통신을 하고 있는 환경에서 컴퓨터가 다른 작업을 수행하면 통신상의 에러가 발생할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 직렬통신 포트상에 장착된 마우스에 대하여 통신중에는 마우스 기능을 중지시키는 마우스제어스위치를 사용하여 통신상의 에러를 방지하였고 제어데이터 전송을 신호처리업무중 최상위 업무로 할당된 스레드(threads)를 구성하여 시스템의 안정화를 추구하였다.

2.3. 고속 파면형상 측정 알고리즘

획득된 하트만 점영상에서 중심점의 추출은 파면의 형상정보를 추출하는데 가장 중요한 신호처리 과정이다. 본 논문에서는 파면왜곡 정보를 서브픽셀 분해능으로 정밀하면서도 고속으로 추출하기 위한 알고리즘을 구성하였다.

영상신호처리 전용보드에 저장된 입사광의 파면 영상에서 각각의 하트만 센싱 점의 중심값을 사용자 설정에 기초한 탐색 영역내에서 X, Y축의 중심위치를 추출한다. X, Y축의 초기 중심점 추출은 탐색영역 전체에 대한 무게중심법으로 추출한다. 즉 X축의 중심점은 식 (3)과 같고 Y축 중심점은 식 (4)와 같다.

$$P_x^0 = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I_{x,y} \times x}{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I_{x,y}} \quad (3)$$

$$P_y^0 = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I_{x,y} \times y}{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I_{x,y}} \quad (4)$$

여기서 N은 사용자에게 의해 설정되는 점영상의 X, Y축 방향 중심점 추출 탐색영역 길이(픽셀단위)를 나타낸다.

추출된 X, Y축 방향의 중심점(P_x^1, P_y^0)을 중심으로 5×5창을 씌운 후 세부 X축 방향의 중심값과 Y축 방향의 중심값을 식 (5)와 식 (6)을 사용하여 추출한다.

$$P_x^1 = \frac{\sum_{y=-2}^2 \sum_{x=-2}^2 I_{x,y} \times x}{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y}} \quad (5)$$

$$P_y^1 = \frac{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y} \times x}{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y}} \quad (6)$$

추출된 X, Y축 방향의 중심위치(P_x^1, P_y^1)를 중심으로 다시 5×5창을 씌워 픽셀간격으로 픽셀강도값의 선형 보간된 값을 사용하여 세부 중심점 즉 X축 방향의 중심점 위치를 식 (7)을 사용하여 추출하고 Y축 방향의 중심점 위치를 식 (8)을 사용하여 서브픽셀 분해능으로 추출한다. 이와 같이 반복하여 세부 정밀 중심 위치를 추출한다.

$$P_x^k = \frac{\sum_{y=-2}^2 \sum_{x=-2}^2 I_{x,y}^{k-1} \times x}{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y}^{k-1}} \times \alpha \quad (7)$$

$$P_y^k = \frac{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y}^{k-1} \times y}{\sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 I_{x,y}^{k-1}} \times \alpha \quad (8)$$

여기서 P_x^k 는 X축 방향으로 k번째 추가로 찾아진 중심점 위치이고 P_y^k 는 Y축 방향으로 k번째 추가로 찾아진 중심점 위치이며 k값은 2~∞ 사이의 정수값이다. $I_{x,y}^{k-1}$ 는 X축으로 x, Y축으로 y번째 위치에서 k-1번째로 보간된 픽셀 강도값이다. α 는 $\alpha = 1.0 + e^{-z}$ 이다. z는 0.1에서부터 추출단계별로 단조증가(monotone-increasing)하는 값이다.

최종적으로 추출된 X축과 Y축 방향의 중심점 위치는 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$P_x = P_x^0 + P_x^1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_x^k \quad (9)$$

$$P_y = P_y^0 + P_y^1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_y^k \quad (10)$$

2.4. 실험 및 결과

본 논문에서는 IBM PC 호환형 개인용 컴퓨터(Pentium2-400 MHz)와 파면측정센서(하트만배열렌즈 : 12×12), CCD카메라(Pulnix, TM-7Ex), 영상처리보드(Matrox, Meteor2-MC), 디지털입출력 및 D/A변환보드(Adlink, PCI-9118), 펄스발생기(HP, 811A), 변형거울(Xinetics, 37DM) 및 기울기거울을 사용하여 적응광학 시스템을 구성하였다.

입사광의 측정 영상은 256 강도값에 640×480 픽셀 영상내에 12×12 매트릭스 형태의 점 영상이 맺힌다. 컴퓨터는 입력 영상변환 테이블 설정과 파면왜곡 전 하트만 센싱 점 영상으로부터 기준 중심 위치값을 추출하여 기억한 후에 파면왜곡 측정 및 보정을 시작한다.

그림 5(a)는 입사의 렌즈를 사용하여 왜곡시킨 파면왜곡 형

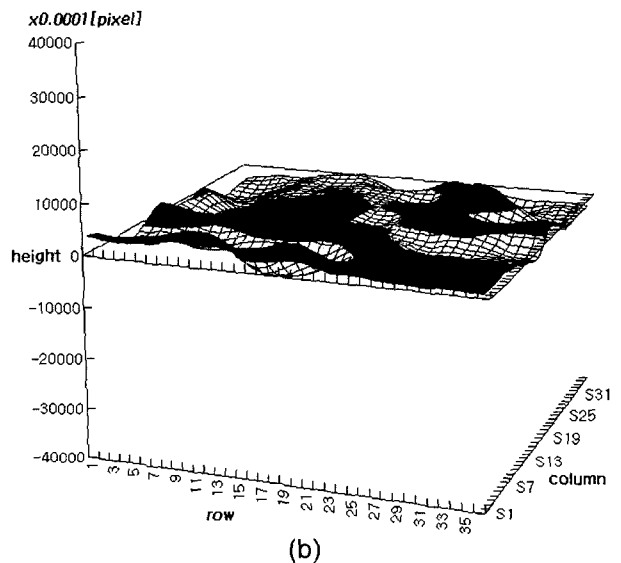
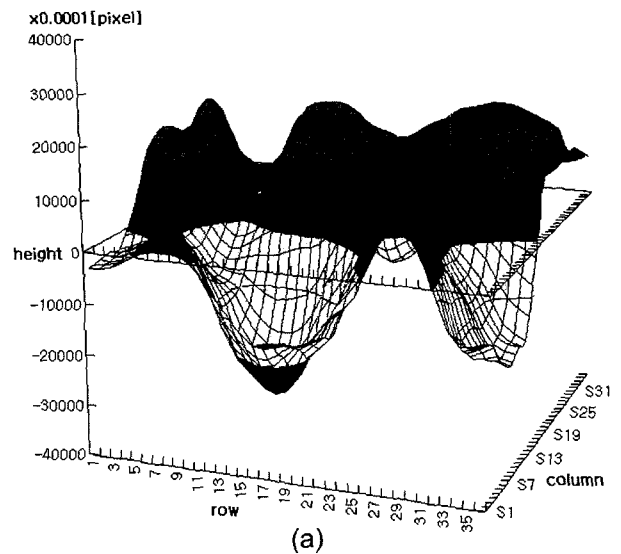
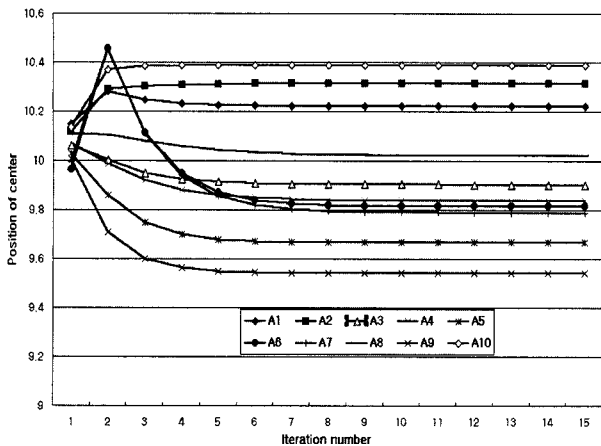
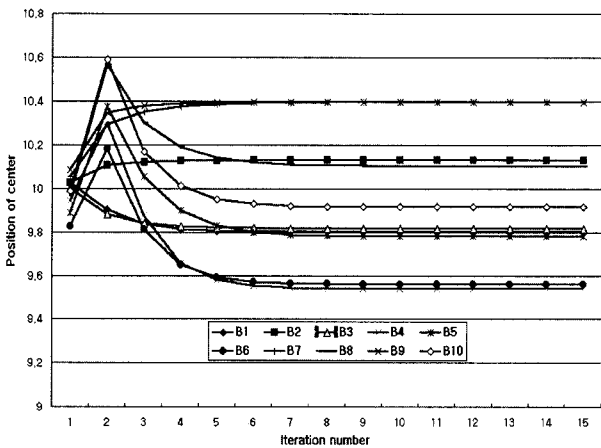


그림 5. (a) 파면왜곡 형상 및 (b) 보정후의 파면 형상.

상을 보여주며 그림 5(b)는 이를 보정한 결과를 보여준다. 여기서 한 픽셀 간격은 0.45 [wave]이며 본 실험에서 구성한 적응광학 시스템의 보정 속도는 약 5 Hz이다. 본 논문에서는 변형거울의 영향함수(Influence function) 매트릭스를 구성하기 위하여 변형거울 구동축의 움직임 량에 따른 기울기 정보를 활용하였다. 본 논문에서는 중심점 추출 정밀도를 높이기 위하여 선형보간 방법을 사용하였다. 3차 보간 방법인 스플라인 보간법을 사용하면 정밀도를 더욱 높일 수 는 있으나 정보추출 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 그림 6(a)는 무계중심법을 사용하여 10 개의 하트만 센싱 점 영상에 대한 X축 방향의 중심점 위치에 대한 수렴과정을 나타내고 그림 6(b)는 Y축 방향의 중심점 위치에 대한 수렴과정을 나타낸다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 약 9번의 반복추출 후에 X축 방향으로 중심 위치가 0.01픽셀 이내로 수렴하였으며, Y축 방향으로 중심점 위치가 0.01픽셀 이내로 수렴하기 위해서는 10번의 반복추출이 요구되었다.



(a)

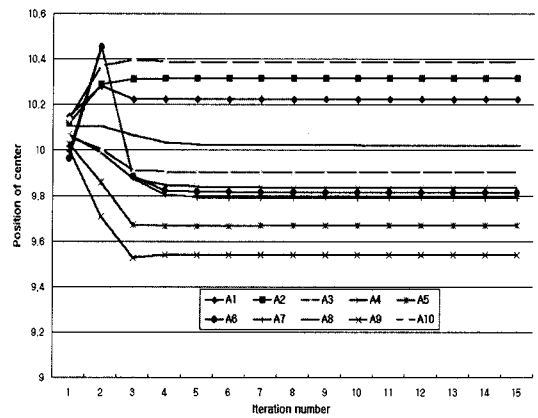


(b)

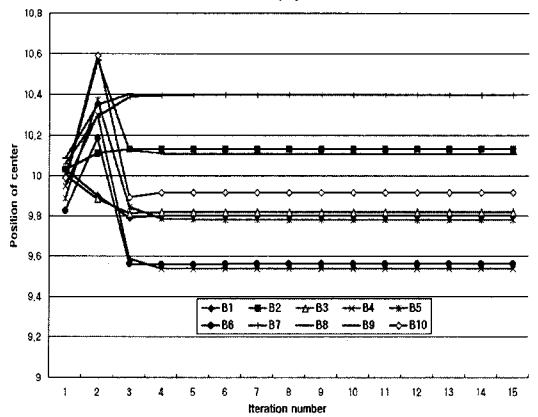
그림 6. 무게중심법으로 추출한 (a) X축과 (b) Y축 방향의 중심점 위치.

본 실험에서 하나의 하트만 센싱(12×12배열) 파면 영상에는 유효한 점 영상이 104개가 존재하며 그림 6의 점 영상은 그 중 10개를 임의로 선택한 것이다. 그림 6에서 A1~A10은 선택된 점영상의 X축 방향의 중심위치를 반복추출 단계별로 나타낸 것이고 B1~B10은 Y축 방향의 중심위치를 반복추출 단계별로 나타낸 것이다. 본 논문에서는 파면기울기 측정 범위를 높이면서 측정속도를 높이기 위하여 첫 번째 추출 단계에서 한 개의 점영상에 대한 전체탐색 영역인 21×21픽셀 창을 무게중심법을 사용하여 중심점을 추출하였으며, 그 다음 단계에서는 찾아진 중심점을 중심으로 5×5 픽셀 창을 씌워 반복적으로 중심점을 추출하였으며, 추출과정에서 보간은 고속의 선형보간 방법을 사용하였다.

그림 7(a)와 그림 7(b)는 그림 6에서 선택한 점 영상에 대해 예측가중치 무게 중심법을 사용하여 X축과 Y축 방향의 중심점 위치를 추출한 결과이다. 첫번째 중심점 추출 단계에서는 21×21 픽셀 창을 씌워 중심점을 추출하였으며, 두 번째 추출 단계에서 예측가중치(α)의 z값을 0.4로 설정하였고, 세 번째 추출 단계에서 0.7, 네 번째 추출 단계에서 1.2, 다섯 번째 추출 단계에서 2.0을 설정하였으며, 그외는 예측가중치값을



(a)



(b)

그림 7. 예측가중치 무게중심법으로 추출한 (a) X축과 (b) Y축 방향의 중심점 위치.

1로 설정하였다. 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 약 5번의 반복추출 후에 X축 방향으로 중심 위치는 0.01픽셀 이내로 수렴하였으며, Y축 방향으로 중심점 위치는 약 4번의 반복추출 후에 0.01픽셀 이내로 수렴하였다.

그림 8은 하나의 하트만 센싱 점영상에 대해 5×5픽셀 창과 전체 탐색영역인 21×21픽셀 창을 사용하여 예측가중치 무게 중심법으로 추출한 X축과 Y축 방향의 중심점 수렴과정을 보여준다. 그림 8에서 A1과 A2는 5×5픽셀 창을 이용한 X축과 Y축 방향의 중심점 위치를 반복추출 단계별로 나타낸 것이며, B1과 B2는 21×21픽셀 창을 이용한 X축과 Y축 방향의 중심점 위치를 나타낸다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 5×5픽셀 창을 이용한 X축과 Y축의 중심점이 0.01픽셀 이내로 수렴하는데 약 3번의 반복추출이 필요하며, 21×21픽셀창의 경우 7번의 반복추출이 필요하다. 그러므로 큰 창을 사용한 중심점 추출법은 측정 범위는 높일 수 있으나 수렴 속도가 느려 반복추출 수를 높여야 하고 또한 계산량이 많은 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 측정범위를 넓히면서 고속의 측정을 위하여 첫 번째 추출 단계에서 전체탐색 영역인 21×21픽셀 창을 무게 중심법을 사용하여 중심점을 추출하였으며, 다음 단계 부터는 찾아진 중심점을 중심으로 5×5 픽셀 창을 씌워 반복적으로 중심점을 추출하였다.

그림 9는 하나의 하트만 센싱 점영상에 대한 일반적인 무게

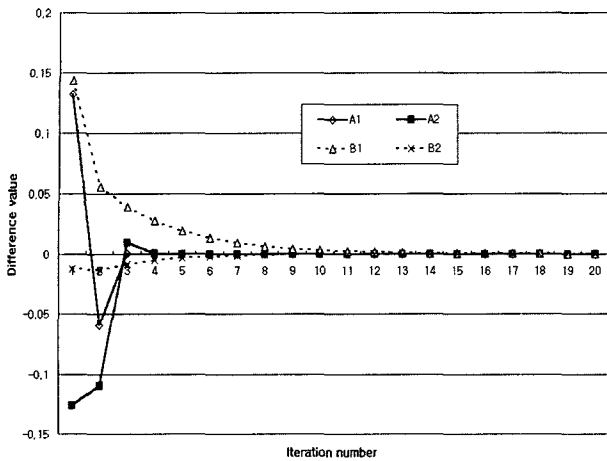
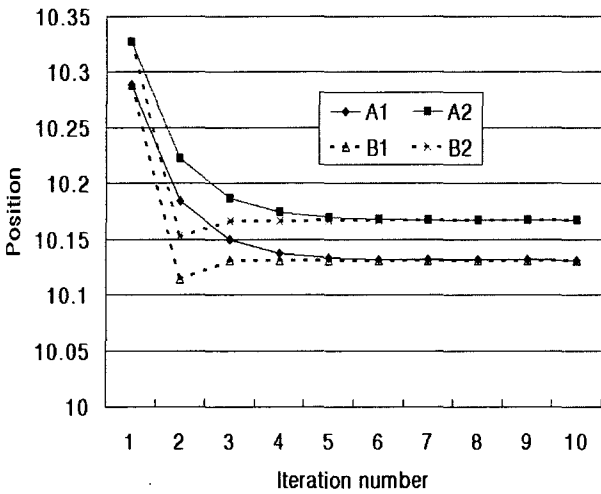
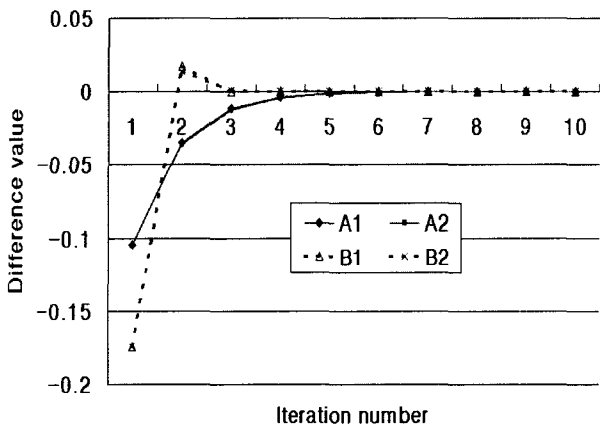


그림 8. 5×5창과 21×21창을 이용한 X축과 Y축 방향의 중심점 수렴속도 비교.



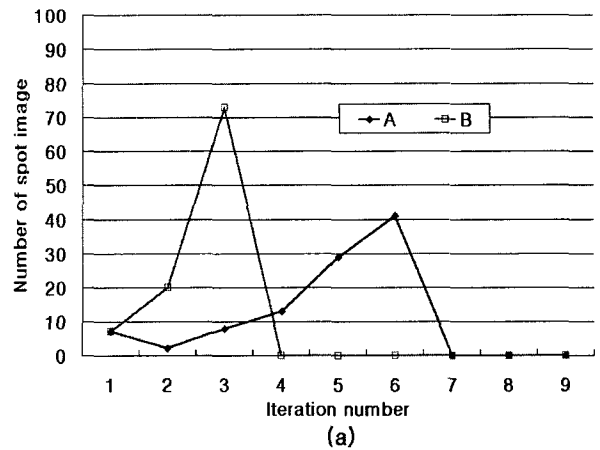
(a)



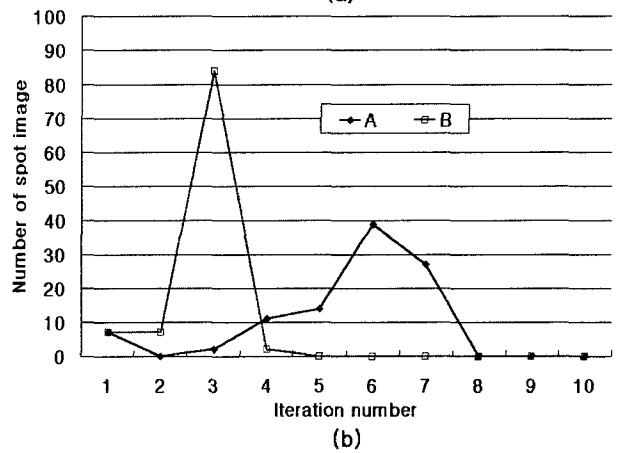
(b)

그림 9. 무게중심법과 예측가중치 무게중심법으로 추출한 중심점 위치 및 추출 단계별 이동량 비교.

중심법으로 추출한 X축과 Y축의 중심점 수렴과정과 예측가중치 무게 중심법을 사용한 중심점 수렴 과정을 비교하였다. 그림 9(a)는 반복추출 단계별로 X축과 Y축 방향의 중심점 위치



(a)



(b)

그림 10. 무게중심법과 예측가중치 무게중심법에 의한 중심점 수렴 속도 비교.

를 나타내고, 그림 9(b)는 반복추출 단계별로 중심점의 이동량을 나타낸 결과이다. 그림 9(a)와 그림 9(b)의 A1과 A2는 일반적인 무게중심법을 사용한 X축과 Y축의 중심점 위치 및 이동량을 나타내며, B1과 B2는 예측가중치 무게중심법을 사용한 X축과 Y축의 중심점의 위치 및 이동량을 나타낸다. 또한 첫 번째 중심점 추출 단계에서는 21×21픽셀 창을 이용한 무게중심법으로 X축과 Y축의 중심위치를 추출하였다. 그림 9의 결과에서 볼 수 있듯이 일반적인 무게 중심법으로 추출한 X축과 Y축의 중심점 위치가 0.001픽셀 이내로 수렴하기 위해서는 13번과 8번의 반복 추출이 필요하며, 예측가중치 무게중심법의 경우에는 7번과 5번의 반복추출이 필요하였다. 그림 10은 CCD카메라로 획득한 하나의 하트만 센싱 파면 영상내에 존재하는 모든 점영상(104개)의 중심점 수렴과정을 나타낸다. 그림 10(a)는 X축과 Y축 방향의 중심점 이동량이 동시에 0.01 픽셀 이내에 수렴되는 점영상의 수를 나타내고, 그림 10(b)는 0.005 픽셀 이내로 수렴되는 점영상의 수를 나타낸다. 여기서 A는 일반적인 무게중심법을 사용한 점영상의 수이고, B는 예측가중치 무게 중심법을 사용한 점영상의 수를 나타낸다. 그림 10(a)에서 볼 수 있듯이 일반적인 무게 중심법을 사용하여 모든 점영상의 중심점 이동량이 0.01 픽셀 이내로 수렴하기 위해서는 7번의 반복추출이 필요하며, 예측가중치 무게중심법을 이용한 경우에는 4번의 반복추출이 필요하였다. 또

한 일반적인 무게중심법을 사용하여 반복추출 단계별로 중심점 이동량이 0.005픽셀 이내로 수렴하기 위해서는 8번의 반복추출이 필요하지만 예측 가중치 방법을 사용한 경우에는 5번의 반복추출로 모두 수렴하였다.

그림 6에서 그림 10까지의 결과에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 예측 가중치 무게중심법에 기초한 파면측정 방법은 기존의 방법에 비하여 측정정밀도는 동일하면서도 더욱 고속의 파면 측정이 가능함을 알 수 있으며, 고속의 파면 형상 측정 및 보정이 요구되는 현장에서 제안한 예측가중치 파면측정 방법은 더욱 효과적임을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 하트만 센서를 이용한 적응광학시스템에서 고속의 파면측정알고리즘을 제안하였고, 제안된 방법은 기존의 방법과 비교하여 동일한 정밀도로 더욱 고속의 파면 측정이 가능함을 실험으로 확인하였다. 또한 본 논문에서는 광의 파면 왜곡 측정 및 보정을 경제적이면서도 고속 정밀 보정을 수행하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 IBM PC의 윈도우즈 환경에서 하트만 센싱 파면측정 장치와 파면 보정 장치인 기술기거울 및 변형거울을 사용하여 적응광학시스템을 구성하였다. 또한 외부 유입 노이즈에 강하게 적응광학 시스템을 구

성하기 위하여 그라운드 절연된 데이터 신호 생성 드라이브를 구성하였으며 구성된 적응광학 시스템은 실험을 통하여 안정성을 확인하였다.

차후 연구 과제로는 수백 Hz의 고속 보정을 위한 병렬 신호처리 적응광학 시스템에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] R. K. Tyson, *Adaptive Optics Engineering Handbook* (Marcel Dekker Inc, 2000).
- [2] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics* (Academic Press, Inc. 1991).
- [3] Deliang Zhang and Wenhan Jiang, "Simulation calculation and theoretical analysis of an adaptive optics system and light propagation in the atmosphere," *SPIE*, vol. 2778, pp. 990-1009, 1996.
- [4] S. E. Bulau, "Simulations of various centroiding algorithms," *SPIE*, vol. 627, pp. 680-687, 1986.
- [5] Wenhan Jiang, Hao Xian, and Feng Shen, "Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor," *SPIE*, vol. 3126, pp. 534-544, 1997.
- [6] Genrui Cao and Xin Yu, "Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object," *Opt. Eng.*, Vol. 33, pp. 2331-2335, 1994.

A study on a fast measuring algorithm of wavefront for an adaptive optics system

Seung-Kyu Park[†], Sung-Hoon Baik, Young-Seok Seo, and Cheol-Jung Kim

Quantum Optics Lab., Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, KOREA

[†]*E-mail: skpark4@kaeri.re.kr*

Jun-Sik Park and Sung Woong Ra

Dept. of Electronic Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, KOREA

(Received February 25, 2002 ; revised manuscript received April 12, 2002)

The measuring resolution and speed for wavefronts are important to improve the performance of an adaptive optics system. In this paper, we propose a fast measuring algorithm with high resolution in the Shack-Hartmann wavefront sensor for an adaptive optics system. We designed ground isolated electrical devices whose differential data signals are used to control the deformable mirror and tip/tilt mirror for robust control. The conventional mass centroid algorithm in the Shack-Hartmann sensor to measure wavefront has been widely used and provided good measurement results. In this paper, the proposed fast measuring algorithm for measuring the wavefront combines the conventional mass centroid algorithm with a weighting factor. The weighting factor is a real value estimating the real center of mass in a wavefront spot image. This proposed wavefront measuring algorithm provided fast measurement results with high resolution from experimental tests.

Classification code : SM.030.