

A Study on Stability Improvement of High Energy Laser Beam Wavefront Correction System

Jongkyu Jung*, Sooman Lee**

Abstract

The adaptive optics for compensating for optical wavefront distortion due to atmospheric turbulence has recently been used in systems that improve beam quality by eliminating the aberrations of high power laser beam wavefront. However, unseen-mode, which can not be measured in the wavefront sensor, increases the instability of the laser beam wavefront compensator on the adaptive optics system. As a method for improving such instability, a mathematical method for limiting the number of singular values is used when generating the command matrix involved in generation of the drive command of the wavefront compensator. In the past, however, we have relied solely on experimental methods to determine the limiting range of the singular values. In this paper, we propose a criterion for determining the limiting range of the singular values using the driving characteristics and the correlation technique of the wavefront compensator's actuators and have proved its performance experimentally.

▶ Keyword: High energy laser beam wavefront correction, Adaptive optics, Influence matrix, command matrix, singular value decomposition

I. Introduction

적응광학기술은 대기권 밖에 위치하는 천체를 명확하게 관측하기 위해 개발된 기술이다. 대기권 밖에 있는 별들로부터 출발한 빛은 대기권에 진입하면서 파면(wavefront)이 왜곡되고, 이 왜곡된 파면은 각종 수차를 유발시켜 정확한 천체의 형상을 관측하는데 어려움을 준다. 적응광학 기술은 왜곡된 파면의 수차들을 제거해 줌으로써, 별의 정확한 형상 관측을 가능하게 해 준다. 이 기술은 최근에는 천체 관측 분야뿐만 아니라 고출력 레이저 시스템 분야에서도 각광을 받고 있다. 고 에너지 고체 레이저 발전기는 고출력 레이저의 기저 빔인 시드 빔과 시드 빔을 증폭시키는 전치 증폭기 그리고 증폭된 빔의 출력을 고출력으로 만드는 주 증폭기로 구성된다. 이러한 과정 중 주 증폭 단계에서 발생하는 고열은 증폭기 내부의 대기난류뿐만 아니라, 증폭기를 구성하는 광학계에 수차 변화를 유발하여 레이저 빔 파면을 왜곡시키고, 고 에너지 레이저 빔 품질을 저하시킨다.

최근에는 적응광학 기술을 이용한 레이저 빔 파면 보정장치로 빔 품질을 개선하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 레이저 빔 파면 보정장치는 레이저 빔 파면을 측정하는 파면 측정기와 파면을 보정하는 파면 보정기로 구성 된다 [1-4]. 그러나 파면 센서는 측정이 불가능한 unseen-mode가 존재하고, 레이저 빔 파면 보정장치의 불안정성을 증가시킨다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되었다. Kevin P. Vitayaudom와 Nathan Engstrom는 공간필터를 적용하여 파면보정의 안정도를 높이는 방법[5-7]을 제안하였으며, Farid U. Dowla와 Lisa Poyneer는 파면 측정기로부터 측정된 신호를 푸리에 변환을 통한 주파수 필터기법을 적용 방법 [8-10]을 제안하였다. 그러나 이러한 기법들은 신호처리를 위한 연산에 많은 시간이 소비되어, 100Hz급 이상의 고속 레이저 빔 파면보정 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다는 특징을

• First Author: Jongkyu Jung, Corresponding Author: Sooman Lee
*Jongkyu Jung (jongkyu.jung@hanwha.com), Laser team, Hanwha Defense Systems
**Sooman Lee (sooman.lee@hanwha.com), Laser team, Hanwha Defense Systems
• Received: 2017. 11. 28, Revised: 2017. 12. 14, Accepted: 2018. 02. 12.

가지고 있다. 또 다른 기법으로는 변형거울 구동전압 생성에 관여하는 명령행렬(command matrix) 획득을 위한 수학적 연산 과정에서 특이해 범위를 제한하는 방법이 사용되었다. 그러나 특이해 범위를 제한하는 정량적인 기준이 없어, 실험적으로 특이해의 제한 범위를 결정해 왔다. 수학적 방법을 이용하여 파면보정의 안정도를 향상 시키는 방법은 하드웨어 변경 없이 시스템에 적용 할 수 있다는 장점이 있지만, 특이해 범위 결정을 위해 수많은 실험이 수반되어야 하고, 파면 보정 장치의 최적화에 대한 보장이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 파면 보정기의 구동특성 및 상관관계 기법을 이용하여 정량적으로 특이해 제한 범위를 결정 할 수 있는 기법을 새롭게 제안하였고, 그 효과를 실험을 통해 증명하였다. 2장에서는 레이저 빔 파면 보정 장치에 대하여, 3장에서는 명령행렬의 특징 및 최적화 기법에 대해 서술하였다. 4장과 5장에서는 실험 장치와 결과에 대해 서술하였으며, 마지막 5장에서는 결론에 대해 서술하였다.

II. Laser Beam Wavefront Correction System

그림 1에서 보여주듯이 레이저 빔 파면 보정장치는 파면 측정기(wavefront sensor)와 파면 보정기(deformable mirror) 그리고 파면 신호처리 및 파면 보정을 위한 실시간 제어기(real-time controller)로 구성된다.

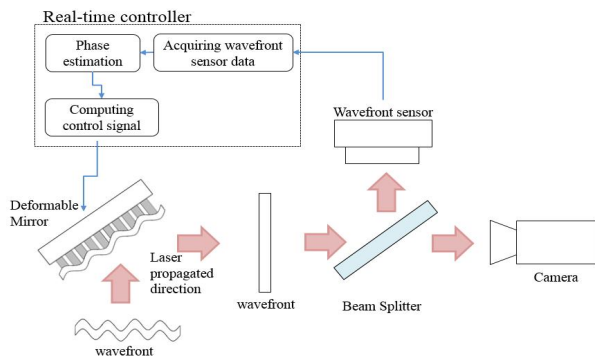


Fig. 1. Concept of laser beam wavefront correction system

파면측정기로는 lens-let array와 CCD 카메라로 구성된 샵-하트만 센서(Shack-Hartmann sensor)가 사용되며, 파면보정기로는 거울 뒷면에 다채널 구동기가 부착되어 있어, 거울 표면이 다양한 수차를 갖는 파면으로 변형이 가능한 변형거울이 주로 사용된다. 레이저 빔 파면은 샵-하트만 센서 내부의 lens-let array를 통과하여 CCD에 맺히는 점 영상의 기울기 변화를 이용하여 계산된다. 실시간 제어기는 변형거울의 거울면의 형상이 측정된 파면과 동일하도록 변형거울 각 구동기를 제어함으로써 레이저 빔 파면을 보정한다. 이때, 변형거울 각

구동기의 구동명령은 샵-하트만에 의해 측정된 점 영상의 기울기와 영향행렬(influence matrix)의 역행렬 연산을 통해 계산된 명령행렬과의 연산을 통해 계산된다.

영향행렬은 각 구동기의 구동 전압과 샵-하트만 센서 각 lens-let array의 점 영상의 기울기 사이의 관계 정보를 담고 있는 행렬로서, 변형거울 각 구동기를 단위전압으로 구동시킨 후, 샵-하트만 센서로부터 측정되는 각 점 영상의 기울기 신호를 행렬 형태로 정리함으로써 획득된다, 즉, 영향행렬의 행(row)의 크기는 샵-하트만 센서의 lens-let array수의 2배, 열(column)의 크기는 변형거울의 구동기 수와 동일한 크기를 갖게 된다. 일반적으로 영향행렬은 정방행렬이 될 수 없으며, 명령행렬을 구하기 위해 유사 역행렬(singular value decomposition) 프로세스를 이용할 수밖에 없다. 유사 역행렬 연산을 통해 생성된 명령행렬에는 그 수학적 불완전성으로 인해 변형거울의 구동명령 생성에 있어서 불안정성이 존재하게 된다. 이러한 현상을 개선하기 위한 방법들 중, 적용이 손쉬운 방법으로 유사 역행렬 프로세스에 기여하는 특이해의 범위를 제한하는 방법을 사용된다. 그림 2는 특이해 범위 제한에 따른 변형거울의 중앙에 위치한 구동기와 외곽 구동기에 대한 명령행렬 특성을 보여준다. 명령행렬 생성을 위한 유사 역행렬 프로세서에 기여하는 특이해 수가 많을 수록, 변형거울의 외곽에 위치한 구동기일수록, 동일 구동 입력에 대해 구동특성에 변화가 발생하고, 이러한 변화가 레이저 빔 파면 보정의 안정성에 악 영향을 미치게 된다. 이와는 반대로 변형거울의 중앙에 위치한 구동기일수록, 특이해 제한에 따른 구동 특성 변화가 미비함을 알 수 있다.

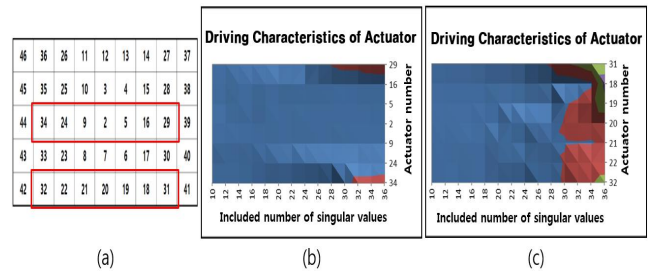


Fig. 2. Driving characteristics of a deformable mirror by limitation of singular value, (a)Actuator map, (b) central actuators' characteristics, (c)outer actuators' characteristics

그림 3은 특이해의 제한 범위가 최적화 된 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 레이저 빔의 far-field 이미지를 보여준다. 이미지에 확인할 수 있듯이, 특이해 수의 제한이 최적화 된 경우에만 레이저 빔 파면 보정 성능을 보장 할 수 있음을 알 수 있다.

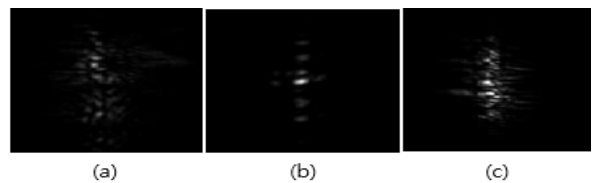


Fig. 3. Far-field images of laser beam by limitation of singular value, (a)less range, (b)optimized range, (c)larger range

명령행렬 생성에 있어서, 특이해 제한 범위가 시스템에 성능에 크게 기여함에도 불구하고, 기존에는 그 범위 결정에 대한 명확한 기준이 없었기 때문에 실험적인 방법에 의존할 수밖에 없었으며, 그로인해 시스템의 최적화가 어려웠다. 다음 장에서는 파면 보정기의 구동특성 및 상관관계 기법을 이용하여 정량적으로 특이해 제한 범위를 결정할 수 있는 기법을 소개한다.

III. Command Matrix Features and Optimization Techniques

레이저 빔 파면 보정의 안정성을 확보하고, 보정 성능 보장을 위한 유효 특이해의 범위는 영향행렬과 명령행렬의 점 영상의 기울기 정보에 대한 상관도와 변형거울 중앙에 위치한 구동기의 구동 특성변화를 이용함으로써, 최적화 할 수 있다. 영향행렬과 명령행렬은 역행렬 관계에 있지만, 변형 거울 각 구동기의 구동에 대하여 파면 센서로 측정된 각 점 영상의 기울기 정보를 담고 있는 행렬이므로, 이 두 행렬 사이에 변형거울 각 구동기와 점 영상의 기울기 정보는 서로 유사해야 한다. 따라서 유사 역행렬 연산에 기여하는 특이해의 수 제한에 따라, 명령행렬의 하부개구별 점 영상 기울기와 작용행렬의 점 영상 기울기 사이의 상관성을 이용하여 특이해 제한을 위한 적정구간을 확인할 수 있다. 두 신호의 상호상관 함수는 수식 (1)과 같이 정의될 수 있으며, 수식 (2)는 상관계수를 보여준다[11].

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt \quad \text{-----(1)}$$

$$\rho_{XY}(\tau) = \frac{R_{XY}(\tau)}{\sqrt{R_{XX}(\tau)R_{YY}(\tau)}} \quad \text{-----(2)}$$

RXY는 작용행렬 각 하부개구 점 영상의 기울기와 명령행렬 각 하부개구 점 영상의 기울기에 사이의 상호상관을 의미하며, RXX, RYY는 작용행렬 각 하부개구 점 영상의 기울기와 명령행렬 각 하부개구 점 영상의 기울기 각각에 대한 자기상관을 의미한다. 그리고 ρXY는 상관계수를 의미한다.

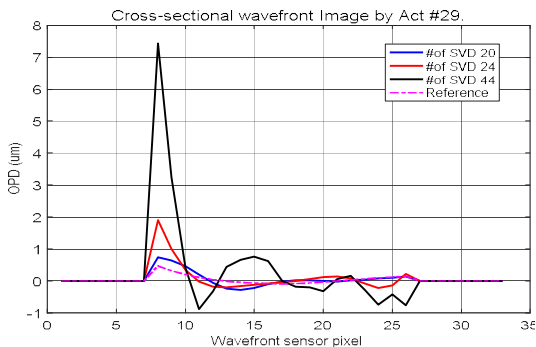


Fig. 4. Cross-sectional wavefront image by limitation of singular value

그림 4는 특이해 범위 제한에 따른 변형거울의 외곽 구동기에 의한 파면 변화 단면도를 보여준다. 특이해 제한 범위가 넓을수록 구동기의 작동에 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

그러나 그림 2의 특이해 수의 제한 범위에 따른 변형거울 구동기의 구동특성 그래프에서 확인할 수 있듯이, 유사 역행렬 연산에 기여하는 특이해의 수가 적으면 적을수록, 변형거울 구동기의 구동량이 제한되어, 레이저 빔 파면 보정에 악 영향을 끼치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 특이해의 최소 포함 범위는 변형거울의 중앙에 위치한 구동기의 구동 특성변화를 특이해 제한에 따라 관찰함으로써 결정할 수 있다. 변형거울의 중앙에 위치한 구동기의 움직임은 외곽에 위치한 구동기들에 비해 그 거동이 가장 많은 lens-let array를 통해 명확히 관측되기 때문에, 유사 역행렬에 기여하는 특이해 수 증가에 따라 변형거울 중앙에 위치한 구동기의 구동특성이 정상상태에 진입하는 구간을 명확히 확인할 수 있다. 이 두 기법을 통해 도출된 각각의 특이해 제한 범위를 동시에 만족하는 범위에서 유사 역행렬에 기여하는 특이해 범위를 결정함으로써 명령행렬의 안정도를 향상시킬 수 있다.

IV. Experimental Setup

그림 5는 레이저 빔 파면 보정을 위한 실험장치의 레이아웃을 보여준다. 레이저 발전기의 출력포트에서 출발한 고 에너지 레이저는 FSM(Fast Steering Mirror)를 거쳐, 파면 보정기로 입사된다. 파면 보정기에서 반사된 레이저 빔은 빔 스플릿터를 통과하여 PSD(Position Sensing Detector)와 파면 측정기로 각각 입사되며, 파면 측정기로 검출된 레이저 빔의 각종 수치들은 파면 보정기에 의해 보정된다.

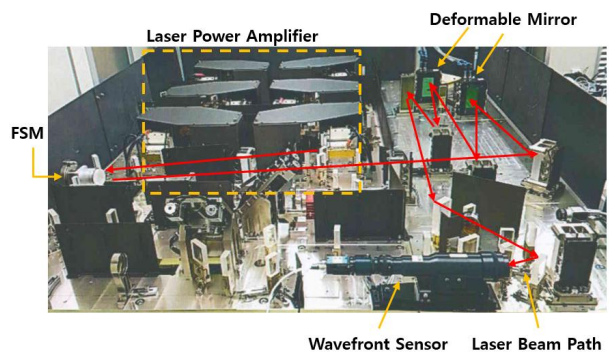


Fig. 5. Experimental setup for laser beam wavefront correction system

1. Wavefront Sensor

파면 측정기로는 Night N사의 약-하트만 센서를 사용하였다. 약-하트만 센서는 초당 100번의 레이저 빔의 파면 변화를 측정할 수 있는 CCD 카메라와, 레이저 빔 파면의 기울기를 측정할 수

있는 lens let array로 구성되어 있다. 그림 6은 약 하트만 센서를 통해 레이저 빔 파면을 측정원리 및 CCD 카메라로 측정된 전기적 신호를 물리적인 신호로 환산하는 방법을 보여준다.

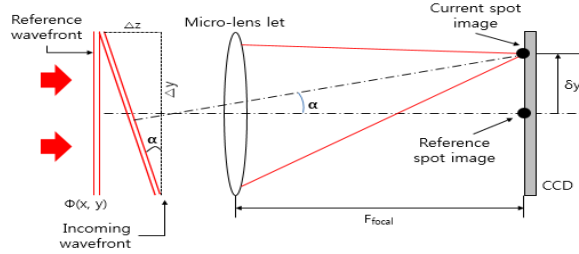


Fig. 6. Principle of laser beam wavefront measurement

기준이 되는 레이저 빔 파면보다 α만큼 기울기를 갖고 약-하트만 센서로 입사되는 빔의 OPD(Optical Path Difference)의 물리적 길이는 lens-let에 의해 CCD면에 맺히는 점 영상의 기울기와 초점거리(F_focal)를 이용하여 구할 수 있다. 수식 (3)은 약-하트만 센서로부터 획득한 점 영상의 기울기 정보를 통해, 레이저 빔의 OPD의 물리적 길이를 구하는 방법을 보여준다.

$$\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} = \frac{\delta x}{F_{focal}}, \quad \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} = \frac{\delta y}{F_{focal}} \quad \text{-----}(3)$$

$$\delta x = \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \times F_{focal}, \quad \delta y = \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \times F_{focal}$$

측정된 레이저 빔의 OPD는 약-하트만 센서로 측정된 점 영상의 기울기와 레이저 빔의 파면의 해당 영역에서의 지역적 기울기는 등가라는 이론[12-16]에 의해 수식 (4)와 같은 방법으로 복원될 수 있다. 수식 (4)에서 S는 약-하트만 센서가 각 하부개구 별로 측정된 기울기 벡터이며, Φ는 레이저의 OPD를 의미한다. 또한 R은 기울기 연산행렬, G는 위상 연산 행렬을 의미한다.

$$R \cdot S = G \cdot \Phi \quad \text{-----}(4)$$

$$G^T G \Phi = G^T R S$$

$$\Phi = (G^T G)^{-1} G^T R S = (V \Sigma^{-1} U^T) G^T R S$$

2. Deformable Mirror

파면보정기로는 AKA사의 Bimorph 구동기를 이용하는 변형 거울을 사용하였다. 수식 (5)는 측정된 레이저 빔 파면 보정을 위한 변형거울 각 구동기의 구동신호 산출 방법을 보여준다. 수식에서 I는 작용행렬을 의미하며, A는 변형거울 각 구동기에 인가되는 전압에 대한 행렬, Q는 약-하트만 센서로부터 측정된 점 영상 기울기로부터 변형거울 구동 전압을 산출하기 위한 명령행렬을 의미한다. 레이저 빔 파면 보정의 안정도 향상을 위한 특이해 수의 제한 기법은 작용행렬의 유사역행렬 연산 과정에 적용이 된다.

$$\Phi_{WFS} = \Phi_{DM}$$

$$(V \Sigma^{-1} U^T) G^T R S = (V \Sigma^{-1} U^T) G^T R I A$$

$$I^T S = I^T I A$$

$$(I^T I)^{-1} I^T S = (I^T I)^{-1} I^T I A$$

$$(V_1 \Sigma_1^{-1} U_1^T) I^T S = Q S = A$$

------(5)

그림 7은 실시간 레이저 빔 파면보정을 위한 제어 블록 다이어그램을 보여준다. r은 파면제어 기준신호를 의미하며, y는 파면 보정기 출력, d는 외란신호, n은 노이즈를 각각 의미한다.

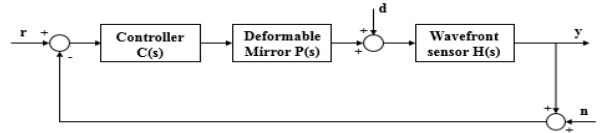


Fig. 7. Control block diagram of laser beam wavefront correction system

파면보정기의 동특성은 파면제어 시스템의 개루프 주파수 응답을 통해 얻었으며, C와 P 그리고 H는 각각 제어기, 파면 보정기 및 파면 측정기의 전달함수를 의미한다. 레이저 빔 파면 변화의 주요 주파수 성분이 10Hz 대역 이하의 주파수에 분포되어 있음을 감안할 때, 제어기 설계를 위한 loop shaping 조건은 다음 수식 (6)과 같이 표현 할 수 있다. S(jω)는 sensitivity function을 의미한다. 그림 8은 이러한 조건을 만족하는 |C(jω)P(jω)|의 프로파일을 보여준다.

$$\begin{cases} |S(j\omega)| \ll 1, \forall \omega < 10\text{Hz} \\ |C(j\omega) \cdot P(j\omega)| \gg 1, \forall \omega < 10\text{Hz} \end{cases} \quad \text{-----}(6)$$

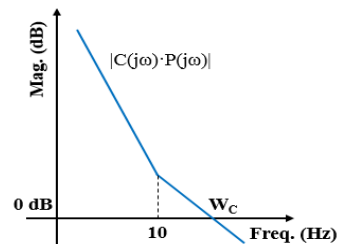


Fig. 8. |C(jω)P(jω)| profile

제어기 설계를 위한 파면 보정기의 모델은 주파수 응답 특성을 이용하여 생성된 동적 모델 전달함수를 이용하였다.

V. Experimental Results

그림 9는 특이해 제한 범위를 변경하며 생성한 명령행렬에서 변형거울의 중앙에 위치한 구동기 변위 특성을 보여준다. 특이해 값이 22이하로 제한되면 구동기의 구동범위도 함께 제한되지만, 그 이상에서는 구동기가 구동해야하는 범위에 변화가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 변형거울 구동기의 정상적인 구동을 위한 명령행렬 생성을 위해 24개 이상의 특이해가 포함되어야 함을 알 수 있다.

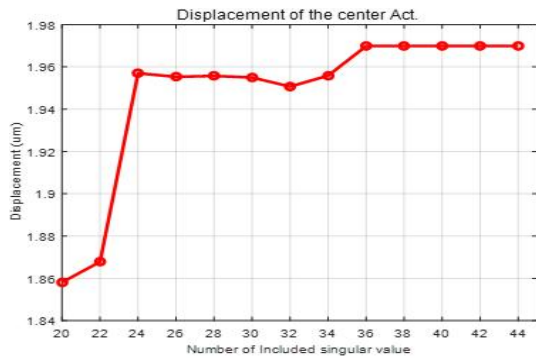


Fig. 9. Displacement graph of the center actuator by the singular value limitation

그림 10은 동일 외곽 구동기에서, 유사 역행렬 연산에 기여하는 특이해 범위에 따른 영향행렬과 명령행렬의 점 영상 기울기에 대한 상관관계를 보여 준다. 유사 역행렬 연산에 기여하는 특이해 수를 34개 이상 포함 시킬수록, 두 행렬 사이의 상관관계가 거의 없음을 확인 할 수 있다. 즉, 유사 역행렬에 기여하는 특이해 수가 증가할수록 점 영상의 기울기에 대한 구동 특성이 점차 왜곡되어, 레이저 빔 파면 보정의 안정성을 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 따라서 두 행렬 사이의 높은 상관도를 고려한다면, 유사 역행렬에 기여하는 특이해 수를 최소화해야 한다.

최종적으로 유사 역행렬에 기여하는 특이해 범위의 최적화는 이 두 결과를 동시에 만족하는 범위에서 유효 특이해 수를 결정해야 한다.

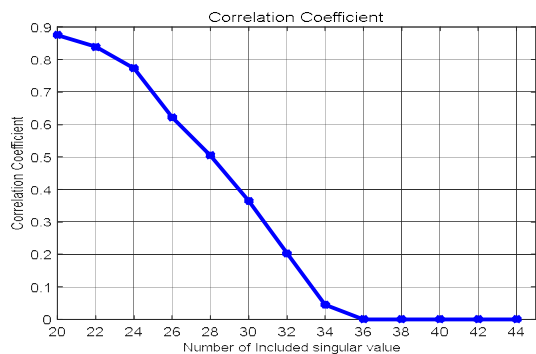


Fig. 10. Correlation coefficient graph by the singular value limitation

그림 11은 레이저 빔 파면 보정장치에서 특이해 제한 범위를 변화시키면서 측정된 파면 보정 후의 레이저 빔 품질과 파면 보정기 구동기에 걸리는 전압을 보여준다. 레이저 빔 품질(B.Q.)은 초점 위치에서 이론적인 빔의 크기와 실제 측정된 빔의 크기에 대한 비율로서, 파면 보정 성능을 나타내는 하나의 척도이다. 중앙구동기가 정상적인 변위로 작동하기 위한 특이해 설정조건과 외곽구동기의 영향행렬과 명령행렬 사이의 상관관계가 높은 특이해 조건을 동시에 만족하는 범위로 특이해를 제한한 경우, 레이저 빔 파면보정 결과 빔 품질이 가장 좋을 것을 확인 할 수 있다.

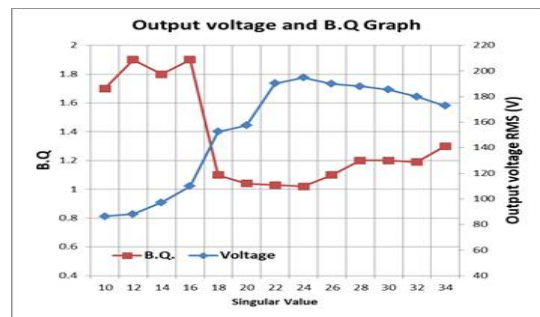


Fig. 11. Average driving voltage for the deformable mirror and beam quality by the singular value limitation

그림 12는 특이해 제한 조건을 달리하며 레이저 빔 파면 보정 성능을 측정된 Far-Field 레이저 빔 영상 및 단면 프로파일이다. 특이해 제한은 각각 22, 24, 26으로 제한하였다. 레이저 빔 파면보정 결과 그림 11(b)와 같이 명령행렬 생성 시, 기여하는 특이해 범위를 최적화하여 명령행렬의 안정도를 확보한 경우, 회절한계에 가깝게 레이저 빔 파면이 보정됨을 확인할 수 있다.

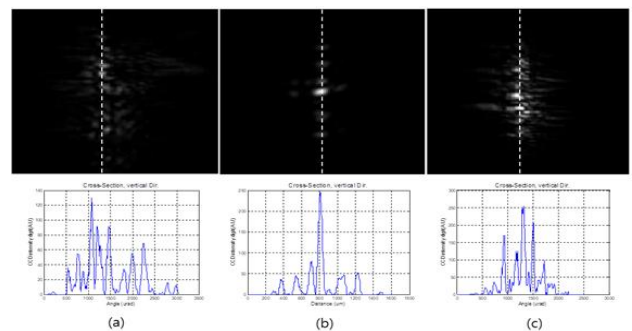


Fig. 12. Laser beam far-field images and cross-sectional images

그림 13은 레이저 빔 파면 보정 장 안정도 향상 기법으로 공간 필터링 기법과 제안된 기법을 적용한 경우에 대한 파면 보정 결과를 보여준다. 공간필터 기법을 적용한 경우에는 구동기 명령의 필터링 효과로 시스템의 안정도는 획득 할 수 있는 반면, 파면 보정성능의 감소로 레이저 빔이 초점 위치에서도 잘 집속되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안된 기법을 적용한 경우에는 시스템의 안정도 향상뿐만 아니라, 초점 위치에서 레이저 빔이 잘 집속되는 것을 확인 할 수 있다.

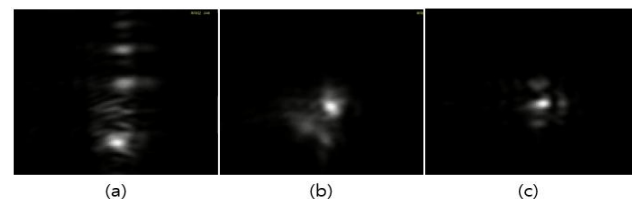


Fig. 13. Laser beam far-field images, (a) without correction, (b) with spatial filtering method, (c) with proposed method

VI. Conclusion

본 논문에서는 수학적 기법을 이용하여 레이저 빔 파면 보정 장치의 안정도를 향상시키기 위해, 명령행렬 생성에 영향을 주는 특이해 제한 범위를 결정할 수 있는 기준을 새롭게 제안하였으며, 그 성능을 실험적으로 증명하였다. 실험을 통하여 그 범위를 결정했던 기존 방법과는 달리, 제안된 방법은 특이해 제한 범위 결정을 위한 시간과 노력을 줄일 수 있다는 장점뿐만 아니라, 실시간 파면보정을 위한 제어기의 성능을 배제하고, 명령행렬만의 성능을 최적화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 최적화된 명령행렬을 기반으로 실시간 파면 보정 제어기를 설계함으로써, 레이저 빔 보정 시스템의 안정도 및 보정성능을 향상 시킬 수 있음을 보였다.

REFERENCES

- [1] K. Bush, D. German, B. Klemme, A. Marrs and M. Schoen, "Electrostatic Membrane Deformable Mirror Wavefront Control Systems: Design and Analysis," Proc. of Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications II, Vol. 5553, pp. 28-38, 2004
- [2] E. J. Fernandez, "Adaptive optics with a magnetic deformable mirror: applications in the human eye," Optics Express, Vol. 14, No. 20, pp. 8900-8917, 2006
- [3] V. Kmetik, S. Nencova, L. Jiran, E. Stranakova, A. Inneman, "Development of large aperture elements for active and adaptive optics," Proc. of EPJ Web of Conferences, Vol. 48, id: 00008, 2013
- [4] K. L. Wlodarczyk, E. Bryce, N. Schwartz, M. Strachan, D. Hutson, R. R. Maier, D. Atkinson, S. Beard, T. Baillie, P. Parr-Burman, K. Kirk, and D. P. Hand, "Scalable stacked array piezoelectric deformable mirror for astronomy and laser processing applications," Review of Scientific Instruments Vol. 85, No. 2, pp. 024502_1- 024502_9, 2014
- [5] K. P. Vitayaudom, D. J. Sanchez, D. W. Oesh, P. R. Kelly, C. M. Tewksbury-Christle, J. C. Smith, "Dynamic Spatial Filtering of Deformable Mirror Commands For Mitigation of the Waffle Mode," Air Force Research Laboratory technical paper, 2009
- [6] N. D. Engstrom, J. D. Schmidt, "Misregistration in adaptive optics system," Proc. of Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VII, Vol. 7466, 2009
- [7] Y. W. Lee, J. C. Park, "A study on the subset averaged median methods for gaussian noise reduction," The Korea Society of Computer and Information , Vol. 4, No. 2, pp. 120-134, 1999
- [8] L. A. Poyneer, B. A. Macintosh, "Wavefront control for extreme adaptive optics," Proc. of Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications, Vol. 5169, 2003
- [9] L. A. Poyneer, "Optimal modal Fourier-transform wavefront control," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 22, Issue 8, pp. 1515-1526, 2005
- [10] F. U. Dowla, J. M. Brase, S. S. Olivier, C. A. Thompson, "Fast Fourier and wavelet transforms for wavefront reconstruction in adaptive optics," Proc. of High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications II, Vol. 4124, 2000
- [11] H. K. Yang, J. H. Choi, "Study on the Correlation between Digital Images using ICOR," The Korea Society of Computer and Information , Vol. 14, No. 3, pp. 75-82, 2009
- [12] R. H. Hudgin, "Wave-front Reconstruction for compensated Imaging," J. Opt. Soc. Am. Vol. 67, Issue 3, pp. 375-378, 1977
- [13] D. L. Fried, "Least-Squares Fitting a Wave-front Distortion Estimate to an Array of Phase - Difference Measurements," J. Opt. Soc. Am., Vol. 67, Issue 3, pp. 370-375, 1977
- [14] J. Herrmann, "Least-Squares WaveFront Errors of Minimum Norm," J. Opt. Soc. Am., Vol. 70, Issue 1, pp. 28-35, 1980
- [15] L. E. Schmutz, "Hartmann sensing at AOA," Proc. of Electromechanical System Interaction with Optical Design, Vol. 0779, 1987
- [16] P. S. Davila, W. L. Eichhorn, M. E. Wilson, "Hartmann wavefront sensing of the corrective optics for the Hubble space telescope," Proc. of Instrumentation in Astronomy VIII, Vol. 2198, 1994

Authors



Jong Kyu Jung received the B.S. in Mechatronics from Chungnam National University, Korea, in 2006 and received the M.S. and Ph.D. degrees in Mechatronics from Gwangju Institute Science and Technology, Korea, in 2007 and 2012,

respectively Dr. Jung joined Hanwha Defense Systems Corp., Changwon, Korea, in 2013. He is currently a Research Engineer in Optoelectronic System Technology Center, Hanwha Defense Systems Corp.. He is interested in developing algorithm and a program for robust servo control system and image tracking system.



Soo Man Lee received the B.S. in Physics from Sungkyunkwan University, Korea, in 1990. and received the M.S., Ph.D. degrees in Solid State Physics from Sogang University, Korea, in 1992 and 1997, respectively Dr. Lee joined Hanwha

Defense Systems Corp., Changwon, Korea, in 2003. He is currently a Principal Research Engineer in Optoelectronic System Technology Center, Hanwha Defense Systems Corp.. He is interested in high energy laser developing, laser beam combining and laser wavefront controlling.