

레이저 파면 획득용 Lenslet Array 점 패턴 검출 알고리즘

Detection Algorithm of Lenslet Array Spot Pattern for Acquisition of Laser Wavefront

이재일*

Lee, Jae-Il

이영철*

Lee, Young-Cheol

허준*

Huh, Joon

ABSTRACT

In this paper, a new detection algorithm was proposed for finding the position of lenslet array spot pattern used to acquire laser wavefront. Based on the analysis of the required signal processing characteristics, we categorized into and designed four main signal processing functions. The proposed was designed in order to have robust feature against a variation of geometrical form of the spot and also implemented to have semi-automatic thresholding capability based on CCD noise analysis. For performance evaluation, we made qualitative and quantitative comparisons with Carvalho's algorithm which has been published in recent. In the given experimental spot images, the proposed could detect the spots which has 1/3 times lower than the least S/N of which Carvalho's can detect and could reach to a detection precision of 0.1 pixel at the S/N. In functional aspect, the proposed could separate all valid spots locally. From these results, the proposed could have a superior precision of location detection of spot pattern in wider S/N range.

주요기술용어(주제어) : Shack-Hartmann Sensor, Lenslet Spot Detection

1. 머리말

레이저 광 전송을 위한 적응광학시스템(adaptive optics system)은 군용시스템, 광학, 천문학에서 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로서 지상시스템과 위성시스템간 또는 위성과 위성간 통신을 하거나, 레이저 전력이 큰 경우, 위성의 전원을 원격 충전시킬 때 등에 적용되는 시스템이다^[1]. 주요 응용분야가 군용시

스템인 특성으로 인해 관련 기술을 선도하는 국가들은 정부차원의 기술보안 정책과 기술통제하에, 유관 기술의 구체적 구현 내용을 학술발표나 특허출원에도 제한하고 있다. 또한 이 분야 기술을 보유한 회사들도 기술자산 보호를 위해 관련기술의 확산을 제한하고 있어, 알려진 것이 미미한 실정이다^[2].

이러한 기술 가운데, 본 논문에서 제안된 알고리즘은 레이저 광 전송시스템의 최종 송신단에서, 광 파면을 측정하는 Shack-Hartmann 센서에 적용되며, 기준 레이저 파면(reference laser wavefront)에 대한 lenslet array 점 패턴 위치를 검출하기 위한 것이다. 이런 목적을 위한 알고리즘으로 최근에 발표된

† 2005년 9월 6일 접수~2005년 12월 7일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jerry@add.re.kr

Carvalho의 알고리즘이 있으며, 목적상 분류할 때 최초로 발표된 알고리즘이다^[2]. 본 논문에서 제안된 알고리즘은, Carvalho 알고리즘의 발표 이전부터 연구가 진행되었으며, 이와 무관하게 동일한 시점에 완성되었으나, 알고리즘 구성상 유사한 점이 존재한다^[3]. 그러므로 본 논문에서는 Carvalho 알고리즘과 제안된 알고리즘의 구조적 차이를 기술하고, 일련의 실험 결과를 통해 제안된 알고리즘의 상대 우위적 성능을 제시하고자 한다.

Carvalho 알고리즘은 점 패턴 신호세기가 클 때는, 적절히 기능을 수행하나, 신호가 작을 때는 구조적으로 잡음에 민감하게 반응해 점 패턴 검출에 오동작이 발생한다. 반면 본 논문에서 제안된 알고리즘은 신호세기가 작은 경우에도 잡음에 둔감한 특성으로 인해, 안정적인 검출 성능을 발휘하였다. 제안된 알고리즘은 기능적으로 네 개의 주요 신호처리부로 설계하였는데, 성긴 위치검출(coarse location detection), 성긴 국부분리화(coarse localization), 정밀 위치검출(fine location detection), 정밀 국부분리화(fine localization)로 구성된다. 성능실험에서는 전산 모사된 일련의 lenslet array 점 패턴에 대해 제안된 알고리즘과 Carvalho 알고리즘을 비교 수행하였으며, Carvalho 알고리즘의 문제점을 분석하여 제시함과 아울러, 제안된 알고리즘의 결과가 더 우수함을 보였다.

2. Lenslet Array 점 패턴 검출 알고리즘 제안

가. 적응광학시스템과 S-H 파면센서

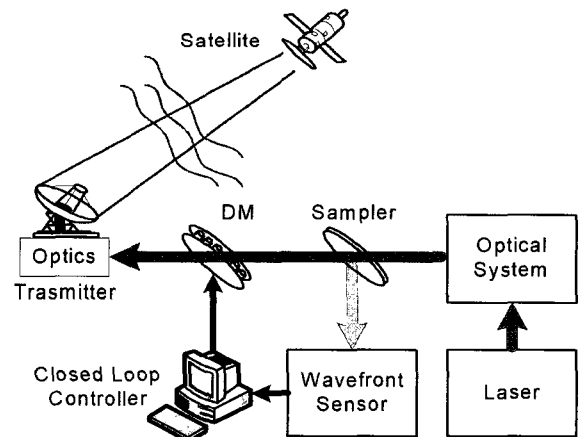
레이저 광을 전송하는 적응광학시스템 경우, 전송 시스템 내부의 광 왜곡이나 대기중 전송경로상의 광 왜곡을 전송 전에 미리 보정함으로써, 레이저 광의 전송효율을 향상시키는 역할을 한다. 시스템 내부 광 왜곡이 심하거나 대기요동이 심한 경우, 광 전송 성능을 크게 저하시키므로, 레이저 전송시스템에서의 적응광학기술은 필수적인 위치를 차지하고 있다^[4].

이러한 기술은 전송될 레이저 파면 왜곡량을 측정하는 S-H 파면센서(Shack-Hartmann wavefront sensor)와 이를 보정하는 페루프 제어계, 그리고 보

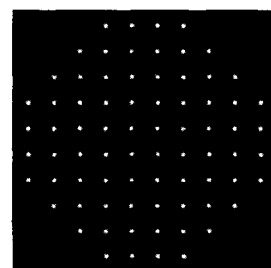
정장치인 변형거울(deformable mirror) 등으로 구성되어 있다. 전송시스템 내부에서 발생하는 광 왜곡량을 적절히 측정할 수 있고, 대기중 전송경로상의 왜곡도 측정할 수 있다면, 페루프 제어 알고리즘과 변형거울을 이용하여, 전송되는 광 파면을 제어하므로써, 원천적으로 광 전송효율을 증대시킬 수 있다. 적응광학 기술을 적용한 레이저 광 전송시스템의 개략 구성도를 그림 1에 나타내었다^[4].

S-H 센서는 입사광의 파면을 측정하는 센서이다. 입사하는 광 파면의 국부기울기(local slope)정보는 lenslet array 광 소자에 의해 CCD 검출기면에 수십에서 수 백개의 점 패턴들로 영상화되는데, 이 점 패턴들의 개별 위치를 검출하고 파면복원(wavefront reconstruction)과 같은 후처리를 통해 파면을 측정한다.

여기서, lenslet array 점 패턴 위치 검출은 파면복원 정밀도와 직접적인 관련이 있으며, 모든 유효한



[그림 1] 레이저 광 전송 시스템 개략 구성도



[그림 2] Lenslet array 점 패턴 예

점 패턴들의 국부분리와 정확한 위치검출 기술이 필수적이다. 그림 2에는 모사된 lenslet array 점 패턴 영상을 예로 나타내었다.

나. Carvalho의 점 패턴 검출 알고리즘

Carvalho는 인간의 눈 수차(eye aberration)를 측정하는 연구에서, 기준 레이저 파면에 대한 lenslet array 점 패턴 검출 알고리즘을 제안하였다. Carvalho 알고리즘의 신호처리 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

이 알고리즘은 전체적으로 균형있는 기능 구조로 구성되었으나, 몇 가지 문제점이 존재한다. 첫 째는 2차원 영상을 두 개의 독립적인 1차원 신호로 변환할 때, 기본형의 직교 진폭사영기법(orthogonal amplitude projection, OAP)을 적용하는데 있다. 그림 2의 점 패턴 경우, 외곽 점 패턴들에 대해 변환된 1차원 신호들은 심하게 진폭이 축소되는 특징이 있으며, 신호 세기가 작을 때는 더욱 영향이 커지게 된다. 두 번째는 Laplacian 연산자를 사용하는데 있다. 변환된 1차원 신호에 대해, Gaussian 필터링을 수행해도 점 패턴들 사이의 배경신호(background signal) 구간은 잡음만 존재하므로, 잔여잡음(residual noise)이 남게 된다. 이것에 대해 Laplacian을 사용하면, 잡음에 때

우 민감하게 반응하기 때문에 오차가 유발되고, 첫 번째 문제점에서 언급한 신호진폭 세기가 작을 때는 더욱 심하게 나타난다. 이것은 결과적으로 성긴 위치 검출과 후단의 신호처리 기능을 실패하게 만든다. 현대의 CCD 검출기들은 고유한 시간잡음(temporal noise)과 공간잡음(spatial noise)을 가지고 있으며, 제작사마다 잡음 특성도 다양한데, Laplacian과 같은 미분처리 관점에서는 이 양들을 무시할 수 없는 경우가 일반적이다. 검출 알고리즘은 설계자가 어떠한 잡음특성을 가지는 CCD 검출기를 선택하든지, 강인하게 신호처리를 수행하는 설계구조가 필요하게 된다.

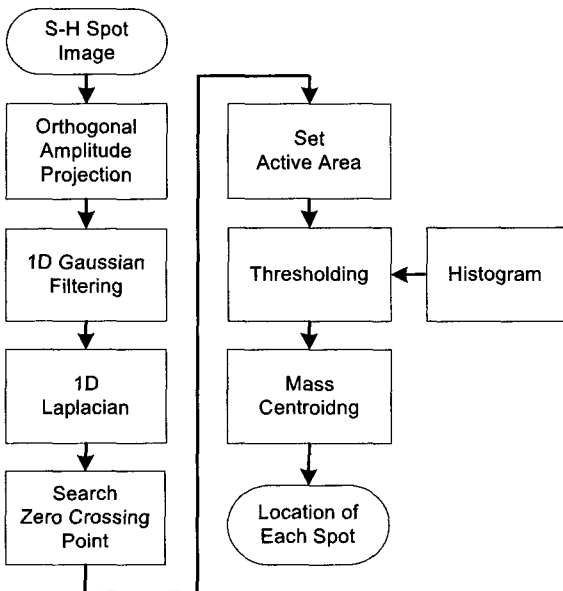
세 번째는 문제점이라기보다는 Carvalho 알고리즘의 고유한 처리특성으로서, 활성영역(active area) 설정 후의 thresholding 처리에서 뒤틀수분포표를 사용하는데 있다. 점 패턴의 뒤틀수분포표를 구해 운용자가 검열한 후, 반복적 시행착오(trial-and-error)에 의해 수동적으로 임계값(threshold)이 결정되는 방법을 사용한다. 이러한 방식은 운용상 번거로운 과정으로서, 보다 자동화된 개념을 적용하는 것이 바람직하다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 CCD 검출기 잡음특성을 분석하여 모델링하고, 이 자료를 기반으로 반자동적으로 임계값을 결정하는 구조를 채택하였다.

다. Lenslet Array 점 패턴 검출 알고리즘 제안

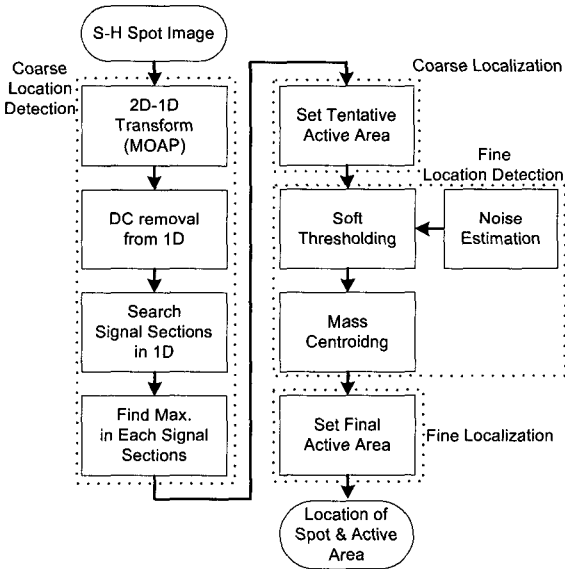
본 논문에서 제안된 알고리즘을 그림 4에 나타내었다. 제안된 알고리즘은 신호처리 기능상 네 부분으로 분류할 수 있는데, 순서적으로 성긴 위치검출, 성긴 국부분리화, 정밀 위치검출, 정밀 국부분리화로 구성된다.

여기서, 제안된 알고리즘이 대상으로 하는 점 패턴 형상은 lenslet array 광 소자가 광학적으로 잘 정렬되어, 그림 2와 같이 수직, 수평방향으로 직교배열 형상을 가지는 점 패턴으로 제한한다.

첫 번째로 성긴 위치검출 기능부는 획득된 S-H 점 패턴에 대해, x, y방향으로 수정된 직교진폭사영(modified orthogonal amplitude projection) 처리를 수행하여 2차원 영상신호를 2개의 독립된 1차원 신호(S_h, S_v)로 변환한다. 수정된 OAP 방식은 입력영상 전체의 평균(I_{avr})과 최대값(I_{max})을 구하고 식 (3)과 같이 조정인자(adjusting factor) α 로 가중 처리한 후,



[그림 3] Carvalho 알고리즘의 흐름도



[그림 4] 제안된 점 패턴 검출 알고리즘 흐름도

양의 값을 가지는 화소들에 대해서만 OAP를 수행하는 것이다. 이러한 처리는 잡음이 주로 존재하는 배경영역 제거와 함께, 변환된 1차원 신호가 과도하게 평균 처리되어 신호진폭이 축소되는 것을 방지한다. 이에 대한 수식을 식 (1)~(5)에 나타내었다. 여기서, $MAX[\cdot]$ 는 최대값 연산자(maximum operator)이다. 여기서, α 는 실험적으로 결정된 값으로 0.10~0.30 사이 값을 설정할 수 있다. 본 논문에서는 0.10을 사용하였다.

$$I_{avr} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} I_{ij} \quad (1)$$

$$I_{max} = MAX[I_{ij}] \quad (2)$$

$$\tilde{I}_{i,j} = I_{ij} - (\alpha I_{max} + (1-\alpha) I_{avr}) \quad (3)$$

$$S_h = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \tilde{I}_{ij} \quad (4)$$

$$S_v = \frac{1}{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \tilde{I}_{ij} \quad (5)$$

여기서, N_m, N_n 은 $\tilde{I}_{i,j} > 0$ 인 값에 대한 화소 개수이고, $\tilde{I}_{i,j} < 0$ 값은 0으로 설정한다.

변환된 x, y 1차원 신호는 빗살무늬 형상(comb pattern)을 가지게 되는데, 전체 영상에 대해 구한 평균값(I_{avr}) 이상 값을 가지는 잡음이 존재하는 경우, 변환된 x, y 1차원 신호에도 잔여잡음이 존재한다. 이를 제거하기 위해, 다시 x, y 1차원 신호 평균을 구하고, 1차원 신호로부터 이를 제거한다. 이것을 식 (6), (7)에 나타내었다. 이때, x, y 1차원 신호($\hat{S}_h; \hat{S}_v$)는 여전히 빗살무늬 형상을 가지며, 신호가 존재하는 구간(signal section)과 영(zero) 값을 가지는 구간(zero section)이 교대로 나타난다. 그러므로 신호가 존재하는 구간만을 찾기 위해, 신호가 영 값에서 양의 신호값으로 천이하는 위치와, 양의 신호값에서 영 값으로 천이하는 모든 점의 위치정보를 찾는다. 이때, 검출된 신호구간($\hat{S}_{h\langle k \rangle}_{x_1}^{x_2}; \hat{S}_{v\langle k \rangle}_{y_1}^{y_2}$) 개수는 x, y 방향으로 점 패턴 개수와 같다. 다음으로, 검출된 신호구간 각각 내부에서 신호의 최대값을 찾으면, 성긴 위치검출 기능부 목적인 모든 점 패턴의 개략적인 x, y 위치정보($P_{h\langle k \rangle}; P_{v\langle k \rangle}$)를 구할 수 있다. 이를 식 (8), (9)에 나타내었다.

$$\hat{S}_h = S_h - \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} S_{h(j)} \quad (6)$$

$$\hat{S}_v = S_v - \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} S_{v(i)} \quad (7)$$

$$P_{h\langle k \rangle} = MAX[\hat{S}_{h\langle k \rangle}_{x_1}^{x_2}] \quad (8)$$

$$P_{v\langle k \rangle} = MAX[\hat{S}_{v\langle k \rangle}_{y_1}^{y_2}] \quad (9)$$

여기서, k 는 검출된 신호구간 개수이고, $[x_1, x_2], [y_1, y_2]$ 은 각 신호구간 시작점과 끝점 위치좌표이다.

두 번째 신호처리 기능부는 성긴 국부분리화이다. 이것은 후단에서 적용할 무게중심 추정(mass centroid estimation)기법 계산에 사용되는 데이터 영역인 임

시 활성영역(tentative active area)을 정의하는 과정으로서, 점 패턴 획득에 적합한 lenslet array의 기계적 치수로 결정할 수 있다. Lenslet subaperture 반경을 d_p 라 할 때, 앞에서 검출한 점 패턴의 성긴 위치정보($P_{h\langle k_x \rangle}$; $P_{v\langle k_y \rangle}$)에 대해 $\pm \epsilon \cdot d_p$ 함으로서 결정토록 하였다. 여기서 ϵ 는 샘플데이터 개수 선택 및 연산량 증감과 관련 있는데 0.5~1.0 사이 값을 선택적으로 설정할 수 있도록 하였으며, 본 논문에서는 $\epsilon = 0.8$ 을 사용하였다. 이것을 식 (10)에 나타내었다. 여기서 k_x , k_y 는 각각 x, y 방향으로 검출된 신호구간 색인정보이다.

$$A_{k_x, k_y} = [(L_x, L_y); (H_x, H_y)] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } L_x &= P_{h\langle k_x \rangle} - \alpha \cdot d_p \\ L_y &= P_{v\langle k_y \rangle} - \alpha \cdot d_p \\ H_x &= P_{h\langle k_x \rangle} + \alpha \cdot d_p \\ H_y &= P_{v\langle k_y \rangle} + \alpha \cdot d_p \end{aligned}$$

세 번째 신호처리 기능부는 정밀 위치검출로서, 앞에서 검출한 입시 활성영역 내에 존재하는 점 패턴들의 중심위치를 추정하는 것이다. 이를 위해 CCD 검출기 잡음을 추정하고 이 정보를 기반으로 thresholding 처리하여 배경잡음을 제거토록 하였다. 이렇게 잡음제거 처리 후 최종적으로, 무게중심 추정 기법을 적용하여 중심위치를 검출하였다.

실제 점 패턴 영상은 입사하는 레이저 광 외에 주변으로부터 입사하는 산란광(stray light)을 충분히 제어하여 이를 무시할 수 있는 조건이라면, 주된 잡음원은 CCD 검출기 잡음이 된다. 모든 CCD 검출기는 여러 형태의 고유한 잡음을 가지는데, 본 논문에서는 확률적으로 상호 독립이고 각각 랜덤한 Gaussian 분포 특성을 가지는 시간잡음(δ_{TP})과 공간잡음(δ_{SP}) 그리고 일정한 값을 가지는 평균오프셋(δ_{offset})의 세 요소로 모델링하였다. 시간잡음은 시간적으로 수시로 랜덤 변화를 일으키는 잡음이며, 공간잡음은 시간적으로는 변화가 없고 검출기면의 공간에서 랜덤한 분포 특성을 가지는 잡음이다. CCD 검출

기 잡음은 제작사에서 제공하거나, 카메라 영상을 실측하여 추정할 수 있다. 이러한 잡음정보를 기반으로 임계값(L_{TH})을 결정하기 위해 식 (11), (12)을 정의하였다. 이것은 전체잡음(δ_{TOT}) 분포가 Gaussian 분포를 가지는 것을 가정하여 모델링한 것이다. 여기서, β 는 범위 가중치(range weighting factor)로서, 3~6 사이 값을 가변 설정토록 설계하였는데, 이것은 잡음을 Gaussian 분포 기반으로 모델링 했기 때문이다. 최적의 β 값을 찾기 위해, 점 패턴과 Gaussian 잡음을 전산 모사하여 실험한 결과, 최적값으로 3을 찾았다. 이 값을 더 증가시켜도 배경잡음 제거 효과가 더 증가하지는 않았다. 과도하게 β 값을 증가시키면 L_{TH} 값도 증가하므로, 오히려 신호정보를 손실하는 역효과가 발생 할 수 있다. 그러므로, 이러한 모의실험과 모델 오차를 감안하여 β 값의 설정 범위를 결정하였다. 본 논문에서는 5를 설정하여 사용하였다. 여기서, $\lceil \cdot \rceil$ 는 ceil 연산자이다.

$$\delta_{TOT} = \sqrt{\delta_{TP}^2 + \delta_{SP}^2} \quad (11)$$

$$L_{TH} = \lceil \beta \cdot \delta_{TOT} + \delta_{offset} \rceil \quad (12)$$

입시 활성영역 내에서 thresholding 처리된 점 패턴들은 최종적으로 식 (13), (14) 무게중심 추정 기법을 적용하여 모든 점 패턴들의 x, y 좌표를 추정한다. 여기서, $\tilde{I}_{i,j}$ 는 thresholding 처리된 영상신호이고, R_1 과 R_2 는 입시 활성영역 크기이다.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{R_1} \sum_{j=1}^{R_2} x_i \cdot \tilde{I}_{i,j}}{\sum_{i=1}^{R_1} \sum_{j=1}^{R_2} \tilde{I}_{i,j}} \quad (13)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^{R_1} \sum_{j=1}^{R_2} y_j \cdot \tilde{I}_{i,j}}{\sum_{i=1}^{R_1} \sum_{j=1}^{R_2} \tilde{I}_{i,j}} \quad (14)$$

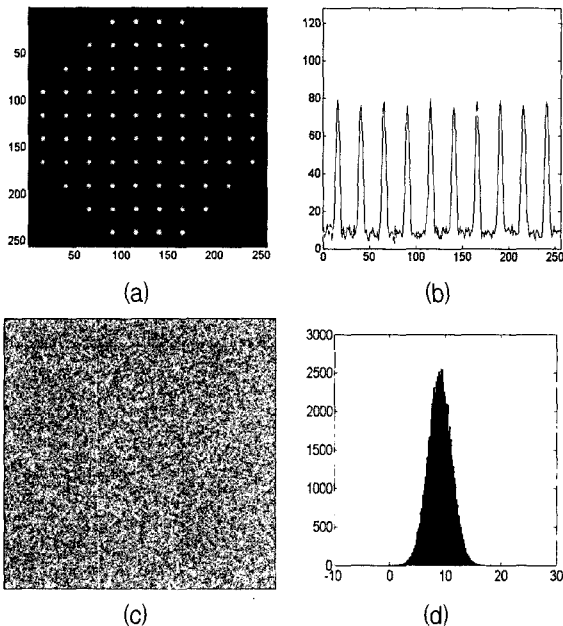
마지막으로 네 번째 신호처리 기능부는 정밀 국부

분리화이다. 두 번째 신호처리 기능부인 성간 국부분리화에서 검출한 임시 활성영역은 몇 가지 오차요인을 가지고 있어, 최종적으로 더 정확한 활성영역을 설정할 필요가 있다. 이러한 오차요인 중에서 lenslet array 소자를 광 정렬할 때 발생하는 회전 장착오차 (rotationally mounted error)와, 식 (8), (9)에서 최대값 연산자를 적용할 때 최대값 부근에 잔여잡음이 존재하는 경우로 인해 편이오차(bias error)가 일부 존재할 수 있다. 그러므로, lenslet array 점 패턴들의 정확한 중심위치를 추정한 후, 이를 중심으로 식 (10)을 다시 수행하여, 좀더 정확한 활성영역을 설정토록 하였다.

3. 모의실험 및 평가

가. 점 패턴 영상의 전산모사 생성

본 논문에서 제안한 알고리즘 성능평가를 위해 그림 5와 같이 점 패턴을 전산 모사하여 사용하였다. 점 패턴 개수는 총 76개이며, 영상 크기는 256×256,



[그림 5] 전산모사한 lenslet array 점 패턴과 CCD 잡음

8비트 영상을 사용하였다.

그림 5에서 점 패턴 하나의 직경은 FWHM(full-width-half-maximum) 기준으로 5화소이고, 기저부 기준으로 9화소이다. 모든 점 패턴 진폭은 기본적으로 70DN(digital number)으로 설정하였다. 그림 5(b)는 그림 5(a) 영상에서 141번째 행을 추출한 것으로 점 패턴 최고점에서의 신호단면을 나타낸 것이다.

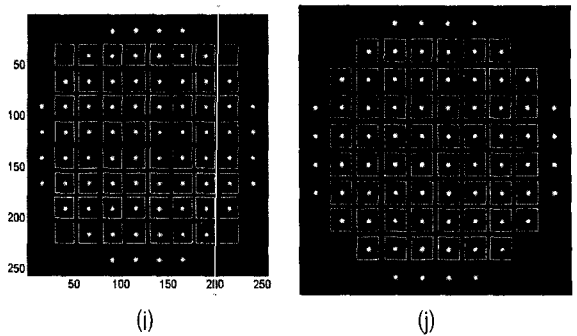
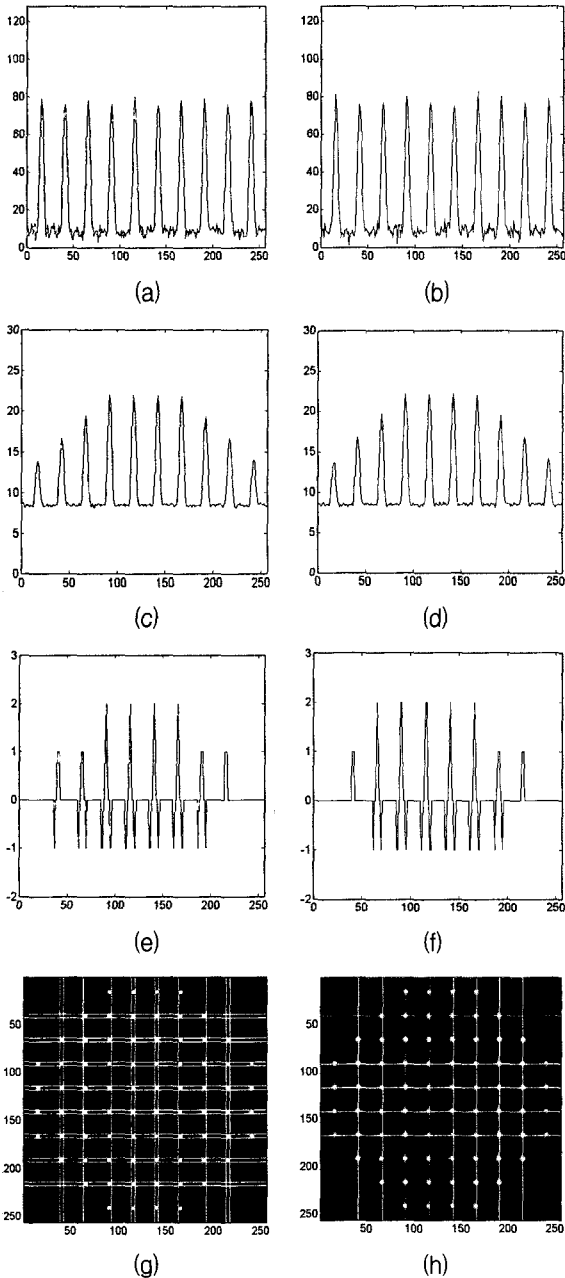
또한 실제에 근사한 잡음효과를 주기 위해, CCD 카메라 전문 제작사인 Dalsa사로부터 제공된, CA-D8 모델 잡음값을 점 패턴에 부가하여 실험영상을 생성하였다^[5]. 그림 5(c), (d)에 전산 모사한 CCD 잡음을 나타내었다. 이 잡음은 공간잡음과 시간잡음 그리고 평균잡음을 합성한 것으로서 Gaussian 분포를 가진다. 각 잡음양은 규격치 최대값을 적용한 것으로서, 공간잡음 표준편차는 1.7DN이고, 시간잡음 표준편차는 1.2DN 그리고 평균잡음은 9DN이다.

나. Carvalho 알고리즘의 성능실험

Carvalho 알고리즘은 점 패턴의 신호크기가 큰 경우에는, 모든 유효한 점 패턴들을 각각 국부분리화하고 위치검출을 할 수 있었으나, 그림 5(a) 실험영상보다 작은 신호크기에 대해서는 영 교차점을 찾는 것부터 오동작하였다. 이에 대한 전사모사 실험과정을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a), (b)는 실험영상에서 141번째 행과 열에서의 신호단면이고, 그림 6(c), (d)는 수직, 수평방향으로 OAP 처리된 1차원 신호이다. 여기서 신호 외곽으로 갈수록 신호진폭 감소가 더욱 심해지는 부작용이 나타남을 알 수 있다. 그림 6(e), (f)는 이러한 1차원 신호에 Laplacian 처리한 결과인데, 외곽의 감소된 신호진폭에 대해서는 Laplacian 처리가 실패함을 알 수 있다. 이것은 결국 그림 6(g), (h)의 영 교차점 검출 과정에 오류를 유발하고, 그림 6(i), (j)의 일부 점 패턴에 대한 최종적인 활성영역 설정을 실패시키므로, 점 패턴들을 국부분리시키지 못하는 결과를 초래하였다. 그림 6(j)의 상, 하, 좌, 우, 각각 4개 점 패턴들은 활성영역 설정 오류로 인하여, 점 패턴 국부분리가 실패한 최종결과이다.

여기서 사용한 실험영상 진폭은 70DN이고, 잡음을 제외한 전체 잡음이 2.1 DN이므로 S/N비(signal to noise ratio)는 30dB이다. Carvalho 알고리즘은 31.5

dB 이상의 S/N비에서는 정상적인 점 패턴 국부분리가 되었으나, 이 값 이하에서는 점 패턴 국부분리가 실패하였다. 결과적으로, Carvalho 알고리즘은 S/N비가 작을 때, 취약한 특성을 보이는데, 이것은 기본형 OAP 기법 적용으로 인한 신호감소와 함께, 잡음에



[그림 6] Carvalho 알고리즘 수행결과(S/N=30dB)

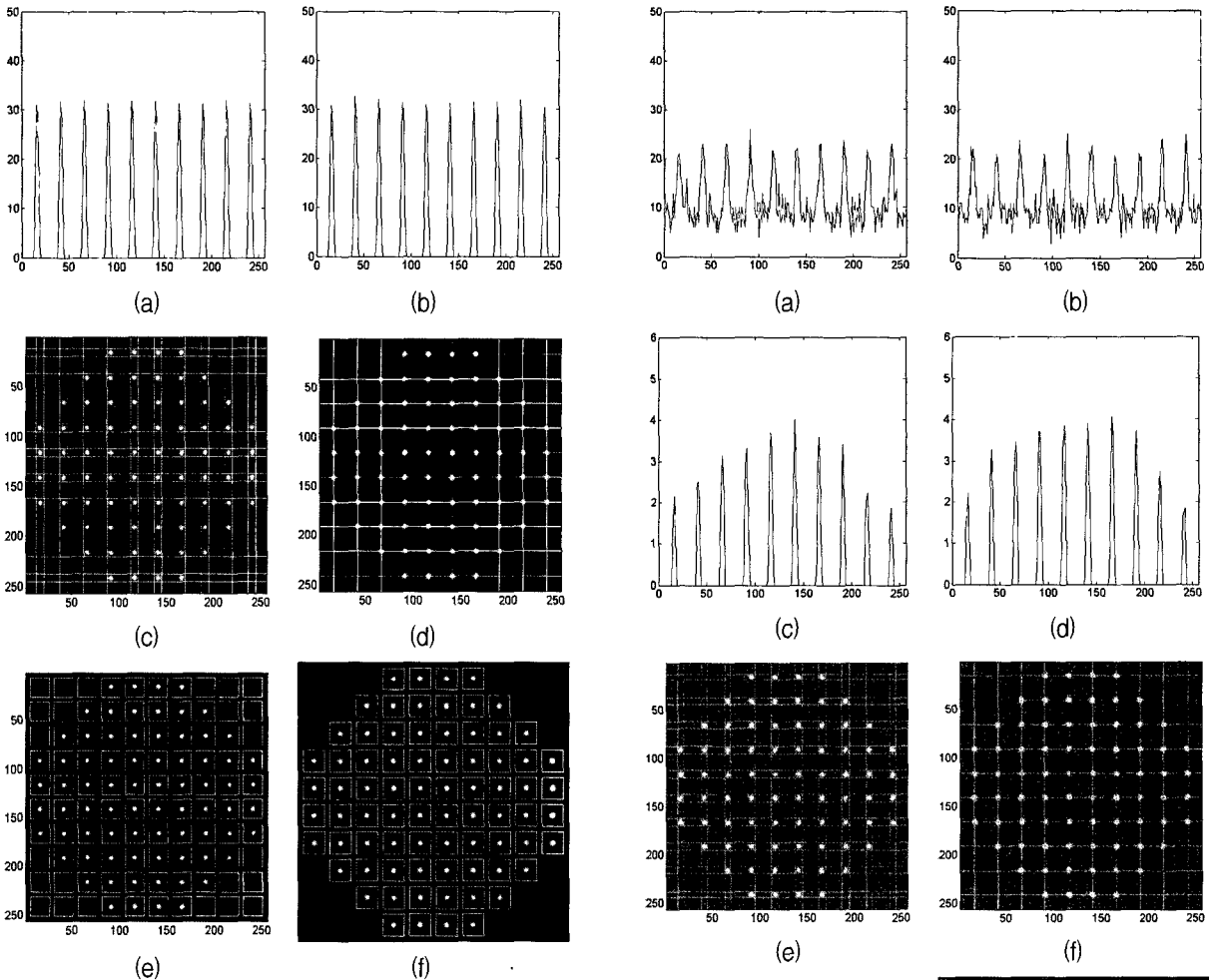
민감하고 추가적인 신호감소를 유발하는 Laplacian 기법을 적용한 것에 원인이 있다. 사용한 실험영상에서, 외곽에 위치한 점 패턴이 방향에 따라 각각 4개였지만, 실제 상황의 실험조건에 따라서는 3~1개로 더 축소 될 수도 있으므로, Carvalho 알고리즘의 오동작 현상은 더 명백하게 발생할 수 있다.

다. 제안된 알고리즘의 성능실험

Carvalho 알고리즘에 사용한 동일한 실험영상에 대해, 본 논문에서 제안한 알고리즘 수행결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a), (b)는 수직, 수평방향으로 각각 MOAP 기법을 적용한 후의 1차원 신호이다. 외곽에 위치한 점 패턴 개수에 무관하게, 모두 균일한 신호진폭을 유지함을 알 수 있다. 그림 7(c), (d)는 성긴 중심위치 검출을 위한 과정으로서, 1차원 신호의 영 교차점 위치와 점 패턴들의 최대값이 위치하는 곳을 찾은 것이다. 모든 점 패턴들에 대한 성긴 위치 정보를 잘 나타내고 있다. 그림 7(e), (f)는 최종적으로 성긴 활성영역을 검출한 것을 나타내었다. 그림 7(e)에서 성긴 활성영역 내부 화소에 대해 모든 화소가 $(\alpha I_{max} + (1-\alpha)I_{avr})$ 보다 작으면 활성영역을 무효 화시키고, 이보다 큰 값이 존재하면 유효 활성영역으로 간주한다. 이에 대한 결과가 그림 7(f) 이다.

그림 8에는 점 패턴 신호크기가 작은 경우로서, S/N비가 13.5dB 일 때의 실험결과를 나타내었다. 그림 8(a), (b)는 실험영상에서 141번째 행과 열에서의 신호단면이고, 나머지 순서는 그림 7의 경우와 같다.

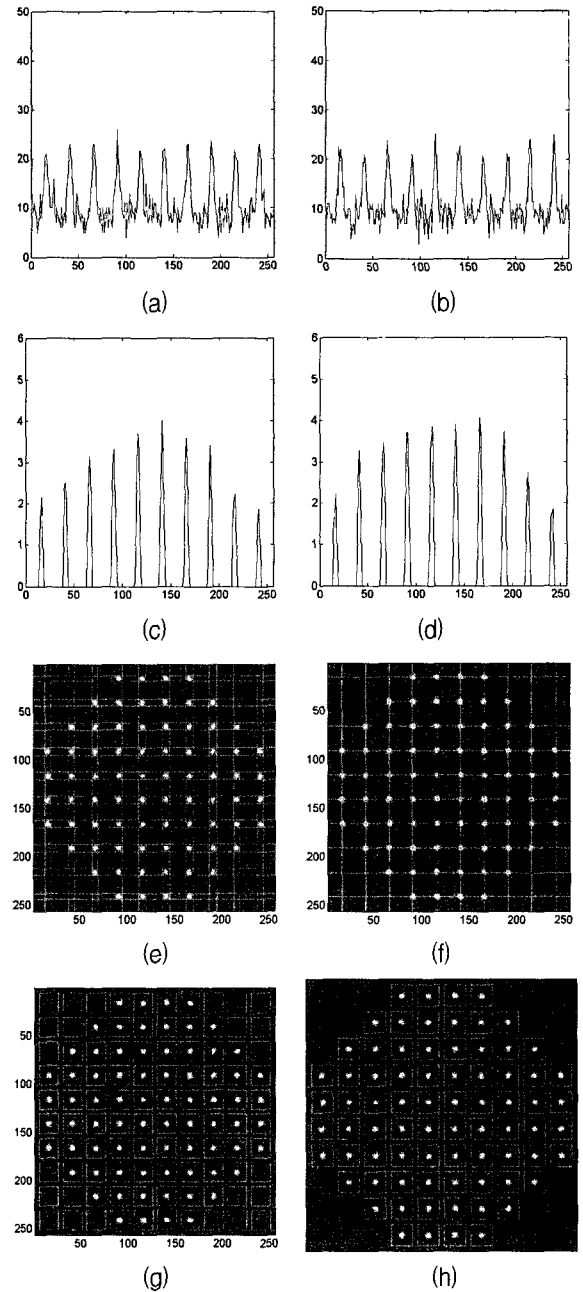
그림 8(e)~(h)의 점 패턴 영상은 신호진폭이 매우 작아, 실제 해상도로 영상을 표시하면 육안으로



[그림 7] 제안된 알고리즘의 수행결과 - I(S/N=30dB)

는 거의 관측이 안 되므로, 대조비 개선(contrast enhancement) 처리하여 제시한 것이다. 이때 점 패턴 크기는 13DN으로 잡음과 비교하면 약 $6\delta_{TOT}$ 수준이다. 성긴 위치검출과 성긴 국부분리화 기능이 성공적으로 수행되었다.

점 패턴 중심위치 검출 정밀도의 경우, Carvalho 알고리즘이 운용자 검열에 의한 임계값 선택 기법을 사용하므로, 운용자에 따라 편이특성이 유발되어 객관적 비교가 어렵다. 그러므로 비교상 편의를 위해, 본 논문에서 제안된 식 (12)에 의해 결정된 값을 임계값으로 설정하고 두 알고리즘의 중심위치 검출 정밀도를 측정하였다.



[그림 8] 제안된 알고리즘의 수행결과 - II (S/N=15.8dB)

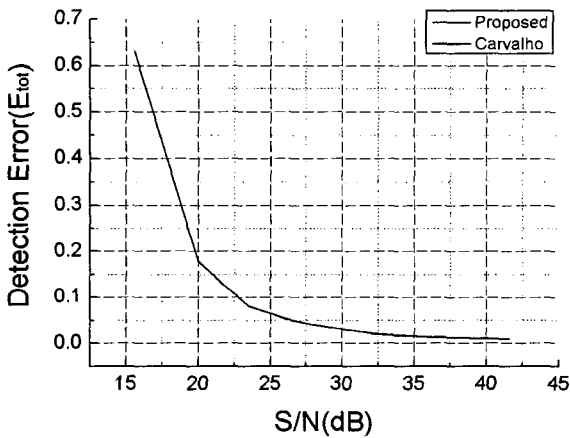
검출 정밀도는 식 (15)~(17)과 같이 정의하여 사용하였다. 점 패턴의 중심위치는 사전에 알고 있으므로, 알고리즘을 이용해 x, y 좌표를 검출하고 이들

상호간 오차(e_i)를 구한다. 그리고 x, y 좌표 각각의 RMS 값을 구하면, 식 (17)과 같이 전체 위치검출오차를 구할 수 있다.

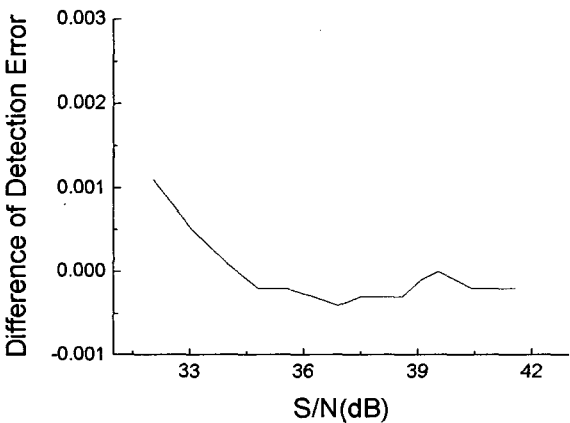
$$e_i = s_i(\text{known}) - s_i(\text{detect}) \quad (15)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n e_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n e_i\right)^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

$$E_{tot} = \sqrt{E_{RMS(x)}^2 + E_{RMS(y)}^2} \quad (17)$$



(a)



(b)

[그림 9] 제안된 알고리즘과 Carvalho 알고리즘간의 검출오차 비교

그림 9(a)에 제안된 알고리즘과 Carvalho 알고리즘의 중심위치 검출 결과를 나타내었다. 제안된 알고리즘은 15.6dB 까지 신호를 검출할 수 있었으며, Carvalho 알고리즘은 31.5dB 까지만 신호를 검출하고 그 이하는 오류가 발생하였다. 또한 제안된 알고리즘은 0.1 화소 이하의 위치정밀도로 검출하는데 23.5dB 신호수준까지 가능하였으며, 이것은 약 30DN 크기의 점 패턴 신호까지 검출할 수 있음을 의미한다. 또한, S/N비가 증가할 수 록, 검출 정밀도가 향상됨을 알 수 있는데 이것은 충분한 점 패턴 광 세기를 광학적으로 보장하는 것이 검출정밀도 향상에 기여한다고 할 수 있다.

그림 9(b)에는 두 알고리즘 검출오차 간의 차이값을 나타내었다. Carvalho 알고리즘이 31.5dB 이상 신호에서만 유효하므로, 이 구간에 대해서만 비교를 하였다. 모든 차이값은 0.001 화소이하 수준이므로 거의 동등한 성능을 보인다고 할 수 있다. 이것은 우선적으로, 동일한 임계값을 사용했기 때문이며, 충분한 S/N비가 확보된다면 두 알고리즘은 동등한 수준의 성능을 발휘한다는 것을 의미한다. 이러한 비교 결과를 통해 본 논문에서 제안된 알고리즘은 S/N비가 작은 영역에서도 우수한 위치검출 정밀도를 가지며, 더 넓은 S/N비 영역에서 동작이 가능한 특징을 가진다고 할 수 있다.

4. 맺음말

레이저 파면 획득용 lenslet array 점 패턴 위치를 검출하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 요구되는 신호처리특성을 분석하여, 네 개의 주된 신호처리기능으로 분류 설계하였다. 점 패턴의 배치 형상 변화에 강인한 특성을 가지도록 설계하였으며, 반자동화 운용을 위해 CCD 잡음 분석을 기반한 반자동 thresholding 기법을 구현하였다. 성능평가를 위해, 최근에 발표된 Carvalho 알고리즘과 정성적, 정량적 비교를 수행하였다. 주어진 실험영상에 대해 제안된 알고리즘은 낮은 S/N비 신호특성에서도 강인하게 중심 위치를 검출할 수 있음을 확인하였다. 특히, Carvalho 알고리즘의 최소 S/N비 보다 1/3 정도 작은 수준에

서도, 0.1 화소 정밀도로 중심위치를 검출할 수 있었다. 또한 기능적으로는 모든 유효 점 패턴들을 국부 분리할 수 있었다. 이러한 결과는 본 논문에서 제안된 알고리즘이 보다 더 넓은 S/N비 영역에서도 우수한 위치검출 정밀도를 가진다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Robert K. Tyson, "Adaptive Optics and Ground-to-Space Laser Communications", *Applied Optics*, Vol. 35, no. 9, 1996. 7, pp.3640 ~3646.
- [2] Luis Alberto Carvalho, "A Simple and Effective Algorithm for Detection of Arbitrary Hartmann-Shack Patterns", *J. of Biomedical Informatics*, Vol. 37, 2004. 2, pp.1~9.
- [3] 이영철, 이재일, 레이저 파면측정 및 파면재구성 알고리즘연구, 연구보고서 TEDC-520-031436, 국방과학연구소, 2003.
- [4] Robert K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, 2nd ed., 1998.
- [5] CA-D8 Camera User's Manual, Dalsa, rev. 07, 1998.