

MTF 측정에 의한 카메라 렌즈 해상력 검사 시스템 개발

박희재*, 신호승**, 노영훈***

Development of Measuring System for Camera Lens Resolution Based on the MTF Performance

Heui Jae Pakh*, Ho Seung Sin** and Young Hoon No***

ABSTRACT

This System is developed for the estimation of the Camera Lens Resolution. Signal data proportional to light intensity is obtained and sampled from the 2D CCD. Based on the measured signal, the MTF characteristics of a camera lens are measured. We could measure the sagittal and tangential MTF in the on and off-axis at the same time. The automatic measuring methods for optimal image plane, magnification, and best marginal direction of test lens are presented.

Key Words: MTF(Modulation Transfer Function)(변조전달함수), charge-coupled device(CCD), camera lens(카메라 렌즈), projector(투영기)

기호설명

- u : 공간 주파수 [c/mm]
- m : 렌즈의 배율
- M(u) : 공간 주파수에 대응하는 렌즈의 MTF
- O(u) : 슬릿의 푸리에 변환
- I(u) : 슬릿 상의 푸리에 변환
- a : 슬릿의 폭
- Δl : CCD 카메라의 화소폭
- I_k : 상의 광세기
- E : 포물선 곡선 맞춤에서 광세기의 error²의 합
- α, β, γ : 포물선 곡선 맞춤을 위한 계수
- L1, L2 : 포물선 곡선 맞춤을 하는 영역
- L3 : 슬릿 전 영역
- L4 : 포물선 곡선 맞춤에 의해 결정되는

MTF계산 구간

- x_1, x_2 : 포물선 곡선 맞춤에서 크기가 최대가 되는 위치
- w : 검사영역(=L4)의 pixel 수

1. 서론

현재 카메라, 현미경과 같은 광학관련 제조산업에서 광학 부품들의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이며 특히 렌즈의 해상력은 제품의 성능을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 여기에 대량 생산이나 측정의 용이를 위해 이를 자동화 할 수 있는 시스템 개발의 필요성이 있다.

이를 자동화하기 위해서 MTF, Modulation Transfer Function을 이용하여 컴퓨터 상에서 해상력을 결정하려 한다. 본 연구에서 개발된 시스템의

* 서울대학교 기계항공공학부
 ** 서울대학교 기계항공공학부
 *** 서울대학교 기계항공공학부

구성은 할로겐 램프를 사용한 광원, 입력창으로 사용된 차트, 그리고 초점 거리를 조절하기 위한 부분과 스크린 등으로 이루어져 있다. 여기에, 2차원 CCD를 사용하여 디지털 주사함으로써 슬릿의 선분도 함수를 구하고 이것을 다시 푸리에 변화하는 간접 MTF 측정방법을 이용하여 Sagittal 및 Tangential MTF를 동시에 측정하였다.

2. CCD를 이용한 렌즈의 MTF

2.1 MTF 측정 이론

렌즈의 MTF 측정방법은 여러 가지가 있는데 그중, CCD를 사용한 디지털 푸리에 변환 방법을 연구하였다. 물체는 슬릿이며 상의 광도분포를 측정하기 위하여 2차원 CCD를 사용하였다. 렌즈에 의하여 CCD 위에 결상한 슬릿의 상은 각각의 화소들이 광세기에 비례하는 전기 신호를 일정한 화소간격으로 출력하므로 매우 짧은 시간에 상의 광세기 분포를 알 수 있다. 물체인 슬릿은 그 폭의 크기에 따라 공간주파수 성분을 가지고 있으며 렌즈는 Fig.1에서 보듯이 광세기에 대하여 선형적으로 상을 맺는다.

그러므로 슬릿 상은 슬릿의 공간 주파수 성분에 비례하며 또한 렌즈의 성능에 관계하는 공간주파수 성분을 가진다고 볼 수 있다. MTF는 각각의 공간 주파수 성분의 비로서 정의되므로 슬릿 및 슬릿 상의 푸리에 변환을 각각 $O(u)$, $I(u)$ 이라 하면 렌즈의 MTF는 다음과 같이 표현된다.

$$MTF = \frac{|I(u)|}{|O(u)|} \quad (1)$$

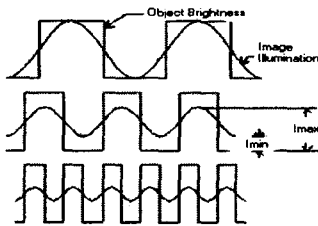


Fig.1 Effect of the image blur on progressive finer pattern

여기서 u 는 공간주파수이며 슬릿 폭은 이미 알

고 있으므로 $I(u)$ 만 구하면 된다. 즉 시험하는 렌즈의 공간 주파수 영역을 고려하여 슬릿의 폭을 정한 후 슬릿 상의 푸리에 변환을 행하면 MTF를 구할 수 있다.

3. 카메라 렌즈의 MTF 측정장치

3.1 측정장치의 구성

다음은 측정 장치를 기능에 따라 광원부, 스크린과 CCD, 그리고 PC를 이용한 상분석부로 나누어 설명하겠다.

3.1.1 광원부

투영 차트의 모양은 Fig.2a와 같다.

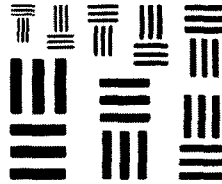


Fig.2a MTF 측정용 chart 모양

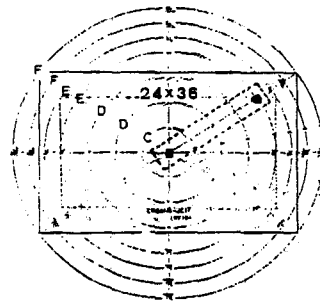


Fig.2b chart의 배열 모양

본 연구에서 사용할 투영 차트는 sagittal 및 tangential 방향으로의 주사가 동시에 가능하다는 장점을 가지고 있고 또 여러 공간 주파수에 대해 한번의 측정을 통해 MTF값을 얻어낼 수 있는 장

점이 있다.

이를 이용해서 측정 장치를 구성하였다. 투영기는 할로겐 램프를 사용하였고 확산판을 이용해 밝기를 균일하게 조절하였다. 렌즈를 축방향으로 미세하게 움직이는 것이 가능하도록 되어있고 렌즈의 착탈이 용이하도록 제작되어 있다.

3.1.2 스크린과 CCD

투영상이 맺히는 스크린으로는 기름종이를 사용하였다. 이러한 방법을 통해 스크린 뒤에서 CCD를 이용하여 Image를 받아들이는 것이 가능하였다. CCD는 소니사의 XC-73을 사용하였고, 이 CCD의 화소수는 768×494 이며 화소간격은 $6.25 \times 7.28 \mu\text{m}$ 이다.

3.1.3. 상분석부

CCD의 출력은 multiplexer(SFA-CCU1)에 의하여 한 개씩 선택되며 Image grabber(matrox, Meteor)에 의하여 디지털로 변환된다. 변환된 신호는 1/256의 분해능을 가지며 TIFF파일로 저장된다. 측정과정은 실시간으로 모니터에 나타나며 image와 검사 대상의 광세기 값을 확인할 수 있다. 전체적인 시스템 구성은 Fig.3와 같다.

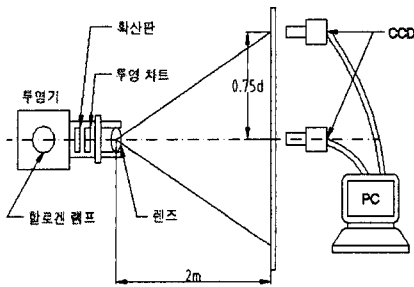


Fig. 3 MTF 측정장치의 전체 구성

4. 렌즈의 MTF 및 변수 측정

4.1 렌즈의 최적 상면

보통 MTF의 측정시 최적 상면을 결정하는 방법은 기준 공간 주파수에 대해 MTF값이 가장 크게 되는 위치로 정하는 것이 일반적이다. 이 때 스

크린의 위치를 축방향으로 미소변화시키면서 그때마다의 MTF를 측정하게 되는데, 카메라 렌즈의 경우는 이 방법이 옳지 못하다. 카메라 렌즈의 경우는 보통 원하는 상면까지의 거리가 이미 정해져 있으므로 검사하고자 하는 렌즈를 축방향으로 이동시키면서 MTF의 변화를 측정한다. 본 연구에서 요구되는 최적 상면의 거리는 2m에서 2m 50cm이다. 거리는 2m 40으로 고정시켜놓고 렌즈를 축방향으로 움직이면서 MTF값이 최대가 될 때 그 값을 수용하였다. 사용한 공간주파수는 중심 투영상중 가장 큰 모양(32c/mm)을 사용했다.

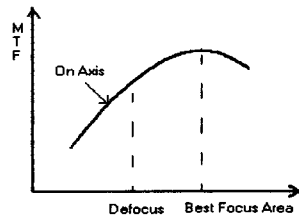


Fig. 4 렌즈 위치 변화에 따른 MTF 변화

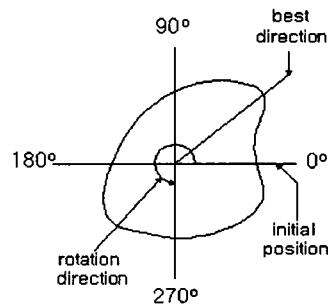


Fig. 5 렌즈의 회전위치에 따른 MTF 변화

4.2 렌즈의 회전위치에 따른 MTF

렌즈가 광축에 기울어져 있거나 렌즈를 구성하는 단일 렌즈면이 기울어져 있는 불량품 혹은 비대칭렌즈인 경우 렌즈를 회전시키면 Fig.5와 같이 각도에 따라 MTF값이 변한다. 즉 렌즈의 분해능이

광축에 대하여 비대칭이므로 회전각도에 따른 MTF를 측정하여 값이 가장 높은 최적방향을 정한다. 렌즈를 단위각도 $\Delta\theta$ 씩 1회전시켜 기준 공간 주파수의 MTF값을 기록한 후 각각의 방향에 대하여 MTF값이 최대가 되는 방향을 최적방향으로 정한다. 최적 방향이 조립면에 수직이 되도록 조립하면 카메라의 렌즈 성능을 최대로 할 수 있다.

4.3 MTF 계산 알고리즘

4.3.1 Data Getting

본 연구에서는 vertical 및 horizontal image에 대해 Fig.5와 같이 격자 방향에 수직인 방향으로 9개의 주사선을 택해 그 화소값을 얻어냈다. 이는 측정정밀도를 향상시키기 위해서인데 9개의 값중 상위 3개의 값과 하위 3개의 값을 제외한 나머지 3개의 값을 평균하여 그 화소값으로 사용하였다.

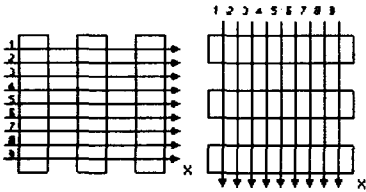


Fig.5 슬릿 이미지에 대한 수평 및 수직 주사

4.3.2 검사 영역 결정

검사영역은 Fig.6과 같이 $L4(=m \times (1/u))$ 로 잡았다.

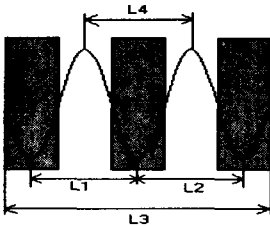


Fig.6 MTF 계산 영역

슬릿의 전체 영역은 Fig.6에서 보듯이 $L3$ 이지만 양쪽의 격자는 슬릿 이외의 부분의 영향을 받기 때문에 제외시킨다. $L4$ 구간을 구하기 위해서 $L1, L2$ 두 구간에서 포물선의 형태로 곡선맞춤(Curve fitting)한 후 최소자승법을 이용하여 구한다.

$$x = -\frac{\beta}{2a} \quad (2)$$

Fig6에서 $L1, L2$ 두 구간에 대해서 각각 식(2)를 이용하여 x_1, x_2 값을 구하면 그 사이 구간(= $L4$)의 간격은 다음과 같이 구해진다.

$$w = x_2 - x_1 \quad (3)$$

w 는 슬릿 상의 1 cycle에 대응되는 길이이다.

4.3.3 MTF식의 적용

본 연구에서는 모니터에 나타난 디지털 값을 이용할 계획이다. 따라서 배율, 화소간격등이 고려된 새로운 식이 필요하다. 4.3.2에서 구한 검사 영역은 1 cycle이므로 이를 이용해서 배율 m 을 구한다. 여기서 배율 m 은 렌즈의 배율이 아니라 슬릿 대 모니터 상의 pixel의 비율이다.

$$m = \frac{w \times \Delta l}{1/u} \quad (4)$$

본 연구에서는 가장 큰 슬릿 상을 택해 배율 m 을 구한후 이를 식(4)에 대입해 MTF값을 계산하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 공간 주파수에 따른 MTF

Fig.7은 공간 주파수에 따른 MTF값을 보여준다. 공간 주파수가 0일 때 MTF값은 1이므로 다른 8개의 데이터들과 함께 3차원 spline 보간법을 이용해 그렸다. 그래프를 살펴보면 처음에는 공간 주파수가 증가함에 따라 MTF값이 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. sagittal 방향의 경우 66(c/mm)에서 다시 증가하고 있으며 tangential 방향의 경우에는 64(c/mm)에서 다시 증가하고 있다. Fig12.a에서 보면 얻어진 image의 intensity가 63c/mm(아래에서 4번째 그림)부터는 주기성을 보이지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 연구 대상인 카메라 렌즈의 경우 대략 60(c/mm)이상의 공간주파수에 대해서는 변별력을 갖지 못함을 알 수 있

다. 본 연구에서는 center에서 32(c/mm)를 택해 그 MTF값을 해석하였다.

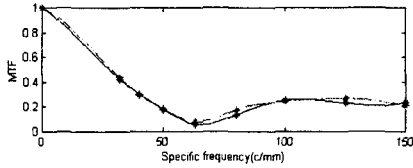


Fig. 7 공간 주파수에 따른 MTF의 보간
(- : sagittal MTF , --: tangential MTF)

5.2 렌즈의 축방향 이송에 따른 MTF 측정

Fig. 12a, Fig. 12b, Fig. 12c는 렌즈를 축방향으로 이동시키면서 MTF값을 나타낸 것이다. 이는 4.1에서 살펴본 최적 상면을 구하기 위한 것이다. Fig. 12a는 수직 이미지에 대해 sagittal 방향으로 사하여 얻은 MTF 값을 3차곡선 spline 보간법을 이용해서 그렸다. Fig. 11b는 수평 이미지에 대한 tangential 방향 주사로 얻은 MTF값에 대한 것이고, Fig. 12c는 둘의 평균값을 나타낸다. 측정 대상을 center image중 공간 주파수 32(c/mm)인 슬릿모양으로 택하고 실험을 행한 결과이다. 최적상면을 tangential 방향과 sagittal 방향에 대한 MTF 값을 평균하여 가장 최대가 되는 위치로 선택하였다. 대상 렌즈의 경우 tangential과 sagittal 방향의 MTF값의 평균은 기준 위치에서 152 μ m 이동된 거리에서 최대값(=0.4854)을 나타냈다.

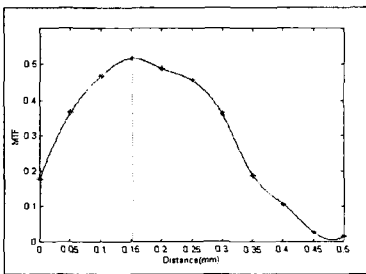


Fig. 8a 렌즈의 축방향 이송에 따른 sagittal MTF 측정(32c/mm)

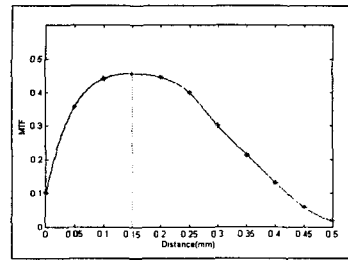


Fig. 8b 렌즈의 축방향 이송에 따른 tangential MTF 측정(32c/mm)

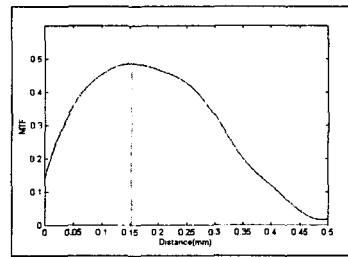


Fig. 8c sagittal & tangential MTF의 평균 (32c/mm)

5.3 렌즈의 회전 위치에 따른 MTF 측정

Fig. 9a, Fig. 9b는 렌즈를 축방향으로 회전시키면서 각도에 따라 MTF를 측정한 그림이다. Fig. 9a는 32c/mm의 공간 주파수를 가지는 수직 이미지에 대해 sagittal 주사를 하여 얻은 데이터 값들로 MTF를 구하여 극좌표에 그린 것이고, Fig. 9b는 같은 주파수를 가지는 수평 이미지에 대해 tangential 주사를 하여 얻은 데이터 값들로 MTF를 구하여 극좌표에 나타낸 것이다. 단위각도는 $2\pi/32$ (rad)으로 하였으며 3차곡선 spline 보간법을 이용해 보간한 후 극좌표로 옮겨 그림을 그렸다. Fig. 13c는 회전 위치에서 수직 이미지와 수평 이미지의 MTF의 평균값을 나타낸다. 대상 렌즈의 경우 시작 위치에서 2.9060rad 회전했을 때 MTF값이 0.4577로 최대가 되었다.

6. 결론

카메라 렌즈의 성능 평가를 위하여 2차원 CCD를 이용한 MTF 측정 시스템을 개발하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 렌즈의 배율과 상의 Intensity를 측정해 MTF값을 구했다.

(2) CCD를 사용하는 경우 측정시간이 매우 짧은 장점이 있으나 그 구조적인 문제로 인해 적합한 공간 주파수를 택해 MTF를 측정해야 한다. 8개의 공간 주파수에 대한 MTF를 구해 렌즈 성능을 평가할 수 있는 공간 주파수를 선택했다.

(3) 축방향 이송에 따른 MTF 측정으로 최적 상면을 결정하였다.

(4) 회전 위치에 따른 MTF값을 구해 MTF가 최대가 되는 위치를 최적 방향으로 정했고 이 때 MTF의 최소값을 렌즈 성능 평가를 위한 한계값으로 사용하였다.

개발된 시스템은 여러 개의 공간 주파수에 대해 sagittal 및 tangential 방향의 MTF 측정이 가능하여 다양한 렌즈의 성능평가에도 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) W. J. SMITH., Modern Optical Engineering, McGraw-Hill, 1996.
- (2) J. C. Dainty and R. Shaw, Image Science(Academic Press, London). Ch.2, 1974.
- (3) 박희재, 이석원, 김왕도, "선형 CCD를 이용한 MTF방법에 의한 카메라 렌즈 초점거리의 측정 및 보정 시스템 개발", 한국정밀공학회지, 15, 8 pp. 71-80, 1998.
- (4) 이윤우 외 4인, "실시간 렌즈 성능평가장치 설계 및 제작", 한국광학회지, 6, 1, pp. 8-1 1995.
- (5) 조현모 외 5인, "2차원 CCD를 이용한 복사기 렌즈의 실시간 MTF 측정", 한국광학회지, 7, 1, pp. 1-8, 1996.

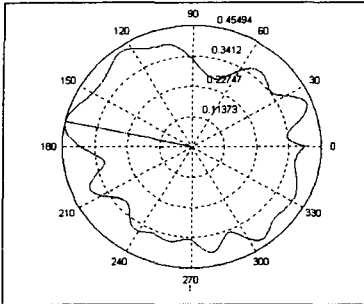


Fig. 9a 렌즈의 회전 위치에 따른 sagittal MTF 측정(32c/mm)

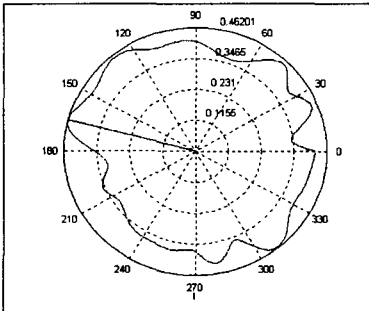


Fig. 9b 렌즈의 회전 위치에 따른 tangential MTF 측정(32c/mm)

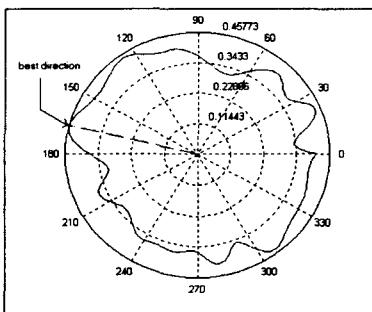


Fig. 9c sagittal & tangential MTF의 평균 (32c/mm)