

칼날주사방법에 의한 일차원 CCD의 MTF 측정

조현모 · 이윤우 · 이인원

한국표준과학연구원, 광학그룹

이상태 · 이종웅

청주대학교 광학공학과

(1995년 6월 22일 받음)

칼날주사방법을 이용한 CCD의 MTF 측정장치를 제작하고 일차원 CCD의 MTF 특성을 측정하였다. 주사방향에 수직인 직선과 칼날이 이루는 각도에 따른 CCD MTF 측정값의 변화는 1° 미만의 작은 각도변화에 의해서도 MTF값이 크게 변함을 알 수 있었으며 CCD의 MTF 측정값은 간섭필터와 텅스텐 필라멘트가 조합된 광장에 따라 다른 값을 나타내었다. 또한 광원의 색온도 변화에 의한 CCD의 MTF 특성과 CCD 화소들의 균일성을 조사하였다.

I. 서 론

CCD는 정보입력 및 화상처리의 가장 기본소자로서 스캐너, 바코드, 캠코더 등 각종 광입출력장치와 방범 및 가정용 범용 이미지 센서, 지능 로보트 등의 시각으로 사용되고 있다. 또한 광학계의 실시간 성능평가를 위한 각종 측정장치들에 CCD의 사용 범위가 점차 확대되고 있는 추세이며 CCD의 각종 광학적 특성이 활발하게 연구되고 있다.^[1,2] 특히 결상계의 주사형 OTF(Optical Transfer Function) 측정장치에 CCD를 사용할 경우 실시간 주사에 의해 빠른 시간에 측정결과를 얻을 수 있다. 그러나 CCD 자체의 MTF(Modulation Transfer Function) 특성이 측정결과에 큰 영향을 미치기 때문에 CCD의 정확한 MTF 특성 분석이 이루어져야 한다. CCD는 charge coupling 방법을 이용하여 반도체 광검출기인 각각의 화소에 빛에너지의 세기에 따라 축적된 전하를 shift register를 이용하여 순차적으로 이동시켜 각 화소에 입사한 빛에너지의 분포를 측정하는 장치이다. 이때 전하 전달효율에 따라 shift register 내에 잔류전자가 발생할 수 있으며 이러한 잔류 전자가 많이 발생할 수록 전하 전달효율이 나빠지고 CCD의 MTF 값이 변하게 된다. 광장에 따른 분광감응도와 전하전달 효율 등이 CCD의 설계, 제작 방법에 따라 달라지기 때문에 MTF 측정장치 등에 CCD를 이용할 경우 CCD의 MTF

특성을 반드시 측정하여야 한다. 또한 CCD 각 화소에 저장될 수 있는 신호전하에 제한이 있기 때문에 포화노출 이상의 빛에너지가 CCD에 입사할 때 상이 번지는 현상이 나타나서 MTF값이 달라지게 되며 일부 CCD에서는 이러한 상의 번짐을 막기 위한 회로를 채택하고 있다. 일반적으로 일차원 CCD가 상재현 능력에서 2차원 CCD보다 우수하며 이는 일차원 CCD가 검출할 수 있는 최대 빛의 세기와 최소 빛의 세기의 비인 동작영역이 크기 때문이다.

CCD의 MTF 측정방법은 여러 가지가 있으며 그 중에서 칼날주사 방법이 가장 정확한 측정방법으로 알려지고 있다.^[3] 칼날주사 방법은 칼날을 물체로 사용하고 칼날을 광축에 수직한 방향으로 주사했을 때 CCD의 한 화소에서 나온 신호로부터 MTF를 구하거나 혹은 렌즈에 의해 결상된 칼날의상을 CCD의 한 화소로 광축에 수직한 방향으로 주사하여 MTF를 측정하는 방법이다. 측정되는 CCD의 한 화소에 의해 주사된 칼날의상은 칼날주사 함수이며 이를 미분하여 line spread function을 구한 다음 푸우리에 변환하여 MTF를 구한다. 이렇게 하여 측정된 결과는 칼날을 결상하는 렌즈와 CCD를 결합한 전체 MTF이며 렌즈만의 MTF를 측정하여 보정하여 줌으로써 CCD의 MTF를 구할 수 있다. 본 연구에서는 칼날주사방법에 의한 CCD의 MTF 측정장치를 제작하고 일차원 CCD의 MTF특성을 측정하였다.

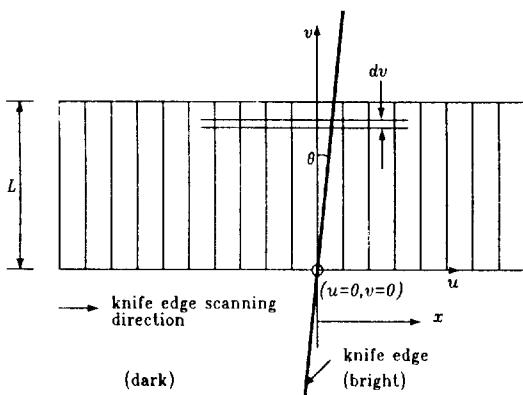


그림 1. 일차원 CCD에서 OTF를 계산하기 위한 좌표계

II. CCD의 MTF 측정 이론

화소간격이 Δl , 화소크기가 x_1 인 CCD 위에 정현파의 상이 결상된 경우 정현파의 상 중심과 화소 중심사이의 위상차를 ϕ 라 하고 정현파의 한 주기에 포함된 CCD 화소의 갯수를 짹수인 2M개 혹은 홀수인 2M+1 개라 하면 CCD의 MTF는 두가지 경우에 대하여 다음과 같이 표현된다.^[7]

$$\text{MTF} = \frac{\sin(\pi f x_1)}{\pi f x_1} \cos \phi \quad (\text{짜수인 경우}, f = 1/2M\Delta l) \quad (1)$$

$$= \frac{\sin(\pi f x_1)}{\pi f x_1} \cos\left(\frac{\Delta l}{2} f \pi - \phi\right) \cos\left(\frac{\Delta l}{2}\right) \quad (2)$$

(홀수인 경우, $f = 1/2(2M+1)\Delta l$)

식 (1)과 식 (2)에서 화소간 간격에 의한 위상차 때문에 나타내는 효과는 측정조건에 따라 위상이 항상 바뀌므로 일정한 값이 아니며 평균 위상오차를 계산하여 보정한다. 그러나 CCD 화소크기, 구조, 전하전달효율 등 제작방법에 의해 나타나는 영향은 정해진 공간주파수에서 일정한 값을 가지며 직접 측정에 의해 MTF를 구할 수 있다. 그림 1은 일차원 CCD에 결상된 칼날을 나타낸 것이며 그림 1에서 x 는 주사방향의 공간좌표를 나타내고 u 와 v 는 칼날의 좌표이며 θ 는 주사방향에 수직인 직선과 칼날이 이루는 각도이다. 칼날주사 방법에 의해 측정된 CCD 화소 한개의 칼날주사함수 $e_m(x)$ 는 위치 (u, v) 에서

$$e_m(x) = \frac{1}{L} \int_0^L e(x-u) dv \quad (3)$$

이고 line spread function은 다음과 같다.^[6]

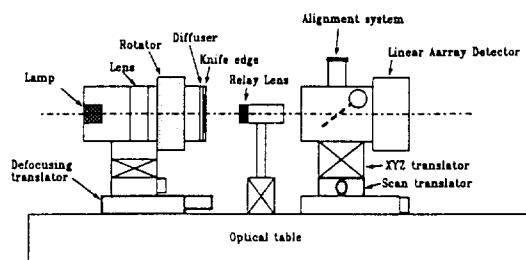


그림 2. CCD의 MTF 측정장치

$$l_m(x) = \frac{de_m(x)}{dx} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{de(x-v\tan\theta)}{dx} dv \quad (4)$$

$$= \frac{1}{L} \int_0^L l(x-v\tan\theta) dv \quad (5)$$

측정된 line spread function으로부터 일차원 푸우리에 변환하여 OTF를 구한다.

$$O_m(f) = FT[l_m(x)] = FT\left[\frac{1}{L} \int_0^L l(x-v\tan\theta) dv\right] \quad (6)$$

OTF는 복소수 함수이며 OTF의 modulus인 MTF를 구할 수 있다.

III. 측정장치 제작

CCD의 MTF 측정장치는 object generator, relay 렌즈, 상분석부로 나눌 수 있으며 그림 2는 측정장치의 개략도를 보여준다. Object generator는 물체로 사용된 칼날과 칼날회전용 rotator, 칼날을 조명하기 위한 조명장치로 구성된다. 조명장치는 텅스텐 필라멘트 램프와 집속렌즈, 간섭필터를 조합하여 사용하였으며 결안맞는(incoherent) 조명을 하기 위해 물체 가까이에 확산필터를 사용하였다. 일차원 CCD에 칼날의상을 맷게 하는 relay 렌즈는 Ealing사에서 구입한 배율 X5, NA 0.3인 apochromatic 렌즈를 사용하였다. Relay 렌즈의 MTF는 백색 광을 광원으로 사용했을 때 공간주파수 40 lps/mm에서 0.95, 공간주파수 100 lps/mm에서 0.90이다. 상분석부는 스테핑 모터와 XYZ translator 위에 장착된 CCD와 광축에 수직방향으로 CCD를 주사하는 장치, CCD로부터 나온 광신호를 읽어 들여 해석하고 분석하는 장치로 구성된다. 자동총점조절을 위해 물체부에 광축방향으로 분해능 1 μm인 스테핑모터를 부착하였고 상분석부에 부착된 스테핑 모터는 광축에 수직방향으로 이동하며 1 μm의 분해능을 가진다. Relay 렌즈를 사용하여 물체의

상을 전송할 때 물체면과 상면이 광축에 수직이고 평행이 되도록 물체면의 경사를 미세조정할 수 있도록 하였다. 스텝핑 모터 구동과 CCD의 광신호를 읽고 해석하기 위해 마이크로 컴퓨터를 사용하였으며 MTF 계산과 최적상평면을 찾기위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

IV. CCD의 MTF 측정

실험에 사용된 일차원 CCD는 Hamamatsu S3904-512Q이며 한화소의 감응면적은 $25\text{ }\mu\text{m} \times 2.5\text{ mm}$, 전체 감응면적은 $12.8\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, $200\sim 1000\text{ nm}$ 의 파장영역에서 분광감응도를 나타낸다. 물체로 사용된 칼날을 rotator 위에 장치하여 광축을 중심으로 칼날을 미세회전할 수 있도록 한 다음 relay 렌즈로 물체의 상을 CCD에 전송하였으며 물체면과 CCD 측정면이 서로 평행이고 광축에 수직이 되도록 광축을 정밀하게 정렬하였다. CCD의 주사방향에 수직인 직선과 칼날이 이루는 각도를 일치시키기 위해 CCD 전체화소를 이용하여 칼날의 출력분포를 측정하여 칼날주사함수의 모양이 계단함수에 가장 가깝게 되도록 칼날의 방향을 회전시켰다. CCD가 부착된 스텝핑 모터를 광축에 수직방향으로 주사하면서 CCD의 출력 신호중에서 한 화소의 신호를 읽어들여 CCD의 칼날주사함수를 측정하였다. CCD의 칼날주사함수 측정 시 주사간격은 $2\sim 4\text{ }\mu\text{m}$, 주사구간은 $256\text{ }\mu\text{m}$ 정도로 하였으며 주사함수의 모양에 따라 주사간격을 조절하였다. 칼날주사함수를 미분하여 line spread function을 구할 수 있으며 이 line spread function을 푸우리에 변환하여 일차원 MTF를 계산하였다. 최적상평면의 위치를 구하기 위해 우선 눈으로 현미경 광학계의 촛점을 물체에 일치시킨 다음 광축방향으로 $1\text{ }\mu\text{m}$ 간격으로 $5\sim 7$ 개의 defocus 위치로 물체를 이동시키면서 각 위치에서 CCD의 MTF를 측정하였다. 최적상평면은 정해진 공간주파수에서 MTF 값이 최대인 상면이며 본 실험에서는 공간주파수 10 lps/mm 에서 최적상평면을 측정하였고 이 위치에서 CCD의 각종 MTF 특성을 측정하였다. CCD를 사용하여 상을 검출할 때 포화 노출이상에서 사용하면 CCD 자체의 상의 번짐 때문에 MTF 값이 작아지게 되므로 포화노출 이하에서 CCD의 MTF를 측정하였다. 칼날과 주사방향에 수직인 직선이 이루는 각도에 따른 CCD MTF 측정값의 변화를 측정하기 위하여 물체가 장치된 rotator를 0.5° 간격으로 회전하면서 MTF값의 변화를 측정하였다. 그림 3은 물체로 사용된 칼날과 주사방향에 수직인 직선이 이루는 각도에 따른 CCD MTF 측정값의 변화를 보여준다. 1° 미만의 작은 각도변화에

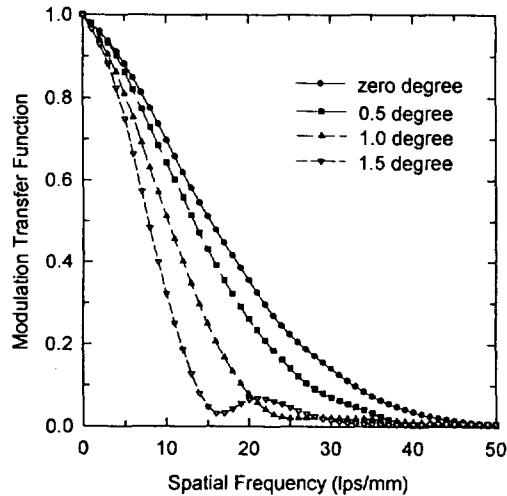


그림 3. 칼날과 주사방향에 수직인 직선이 이루는 각도에 따른 일차원 CCD의 MTF.

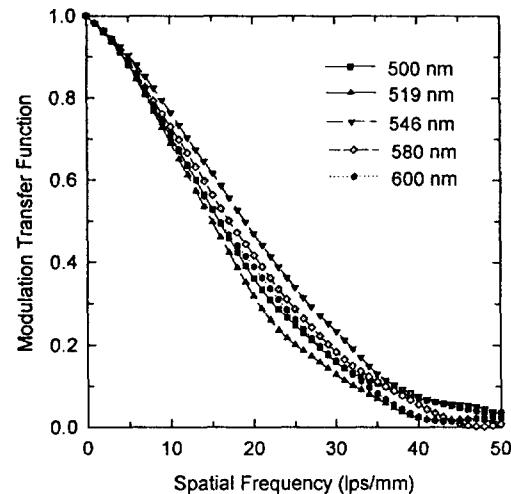


그림 4. 중심파장이 $500, 519, 546, 580, 600\text{ nm}$ 인 간섭필터와 텅스텐 필라멘트 램프가 조합된 광원에서 측정된 일차원 CCD의 MTF 측정값.

의에서도 MTF값이 크게 변함을 알 수 있다. 이는 CCD의 각 화소가 주사방향으로는 $25\text{ }\mu\text{m}$ 의 폭을 가지지만 이에 수직한 방향으로는 2.5 mm 의 비교적 긴 길이를 가지기 때문에 나타나는 오차이다. 주사방향에 수직으로 화소의 길이가 길어질수록 각도오차에 의한 화소의 양끝에서 주사위치 오차는 더욱 커지기 때문이다. 그림 4와 그림 5는 파장변화에 의한 CCD의 MTF 측정값의 변화를 나타낸 것이며 파장변환을 위하여 텅스텐 필라멘트 램프

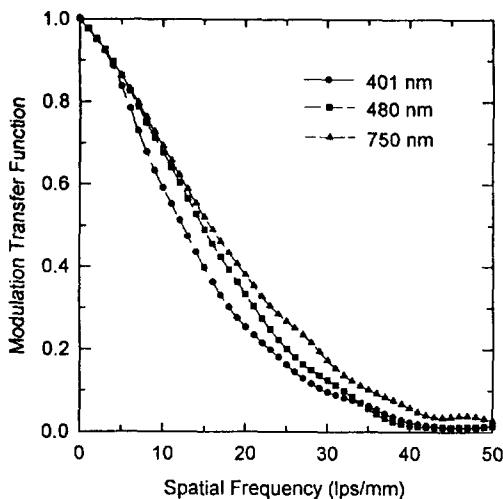


그림 5. 중심파장이 401, 480, 750 nm인 간섭필터와 텡스텐 필라멘트 램프가 조합된 광원에서 측정된 일차원 CCD의 MTF 측정값.

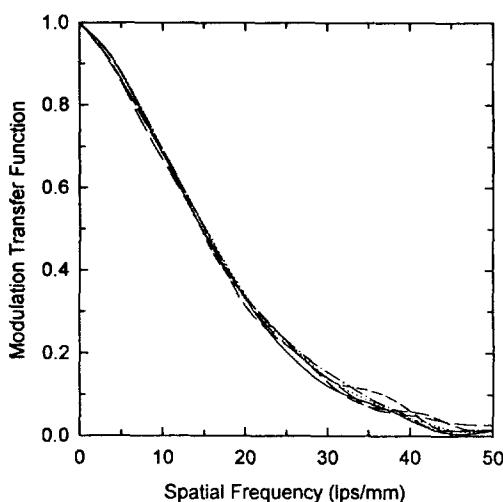


그림 6. 광원으로 사용된 텡스텐 필라멘트 램프의 입력 전압에 따른 CCD MTF값의 변화.

기에 여러파장의 간섭필터의 조합하여 사용하였다. 사용된 간섭필터는 FWHM이 10 nm 정도이며 가시광선 영역에서 CCD의 MTF를 측정하였다. 중심파장이 546 nm, 580 nm, 600 nm의 간섭필터를 사용했을 때 MTF 측정값이 다른 파장영역에 비해 크게 나타났으며 401 nm에서 가장 낮은 MTF 값이 측정되었다. 광원의 색온도 변화에 의한 CCD의 MTF 특성을 조사하기 위해 광원에 공급되는 전압을 변화시키면서 MTF를 측정하였다. 실

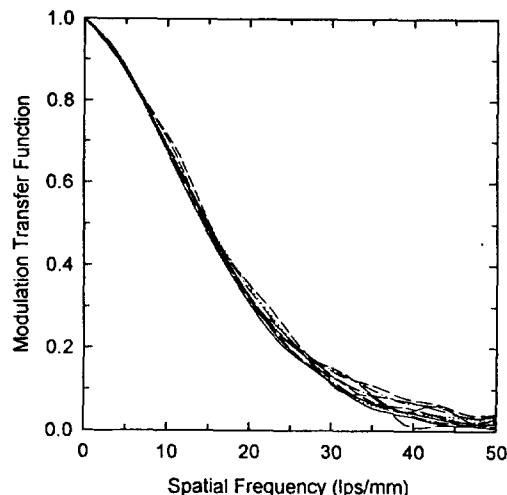


그림 7. CCD 화소들의 MTF 균일도 측정

험에 사용된 광원의 정격전압 및 출력은 12 V, 50 W이며 2 V~12 V까지 전압을 변화시키면서 CCD의 MTF를 측정하였으나 그림 6에 나타낸 것처럼 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. CCD 화소들의 균일성을 조사하기 위해 총 512개의 화소들 중에서 50개의 화소 간격으로 11개 화소의 MTF를 측정하였다. 그림 7은 CCD 위치에 따른 화소들의 MTF 측정값들을 보여주며 MTF 측정값의 변화가 3% 정도의 오차내에서 거의 균일한 특성을 나타낼 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 CCD의 MTF 특성을 연구하기 위해 칼날을 물체로 사용한 CCD의 MTF 측정장치를 제작하고 1차원 CCD의 MTF 특성을 연구하였다. 주사방향에 수직인 직선과 칼날이 이루는 각도에 따른 CCD MTF 측정값의 변화는 1° 미만의 작은 각도변화에 의해서도 MTF값이 크게 변함을 알 수 있었으며 이러한 CCD를 광학렌즈의 MTF 측정장치에서 광검출기로 사용할 경우 물체로 사용되는 슬릿 혹은 칼날과 CCD의 배열방향을 정확하게 정렬해야 함을 알 수 있다. CCD의 MTF 측정값은 간섭필터와 텡스텐 필라멘트 램프가 조합된 광장에 따라 다른 값을 나타내었으며 광원으로 사용된 텡스텐 필라멘트 램프에 공급되는 전압을 변화시켰을 때 광원의 색온도 변화에 의한 CCD의 MTF 특성은 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. CCD에서 각화소들의 MTF는 3% 정도의 오차내에서 거의 균일한 특성을 나

타내었다.

참 고 문 헌

- [1] S. K. Park, R. Schowengerdt, and M. A. Kacynski, *Appl. Opt.* **23**(15), 2572(1984).
- [2] D. J. Bradley, C. J. Baddiley, and P. N. J. Dennis, *Proc. SPIE* **807**, 33(1987).

- [3] J. C. Feltz, *Opt. Eng.* **29**(8), 893(1990).
- [4] J. C. Feltz, and M. A. Karim, *Appl. Opt.* **29**(5), 717(1990).
- [5] M. Marchywka and D. G. Socker, *Appl. Opt.* **31**(34), 7198(1992).
- [6] H. S. Wong, *Opt. Eng.* **30**(9), 1394(1991).
- [7] 이윤우, 조현모, 이인원, 박태호, 윤성균, 서형원, *한국광학회지* **5**(3), 364(1994).

Modulation Transfer Function Measurement of a Linear Charge Coupled Device Imager by Using a Knife-Edge Scanner

Hyun Mo Cho, Yun Woo Lee and In Won Lee

Optics Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606, Korea

Sang Tae Lee and Jong Ung Lee

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

(Received: June 22, 1995)

The scanning type modulation transfer function (MTF) measurement system of linear charge coupled device (CCD) imagers is fabricated and the MTF of a linear CCD imager is tested. Measured MTF values are very sensitive to small angle knife-edge skew within 1 degree and show different results in several wavelengths. The MTF of the linear CCD imager is measured in different color temperatures of a tungsten filament lamp and the MTF uniformity of the CCD pixels is tested.