

우리별 인공위성의 지상 촬영 장치에 쓰여진 렌즈의 MTF 측정

류광선 · 민경욱

한국과학기술원 물리학과

유상근

한국과학기술원 인공위성 연구센터

MTF MEASUREMENT OF THE LENS ON THE KITSAT-1 EARTH IMAGING SYSTEM

K. S. Ryu, K. W. Min

Korea Advanced Institute of Science and Technology

S. K. Yoo

Satellite Research Center

(Received November 20, 1994; Accepted November 30, 1994)

요 약

한국과학기술원 인공위성 연구센터에서는 1992년 8월과 1993년 9월에 마이크로 위성인 우리별 1호와 2호를 발사, 운용중이다. 두 위성 모두에는 지표면을 촬영하기 위한 CCD 카메라가 실려있다. 이들 카메라에 쓰여진 렌즈(초점거리: 50mm)를 평가하기 위해 MTF(Modulation Transfer Function) 측정을 하였다. 실험을 위해 표준과학연구소의 MTF 측정장치를 사용하였으며, f-number와 field angle을 변화시켜 가면서 측정하였다. 측정 결과로부터 f-number 가 4.0 보다 작을때, 점광원으로 부터 나온 빛이 CCD 칩의 한 화소(pixel) 안으로 들어 간다는 사실을 알수 있었으며, field angle을 변화시켜가면서 tangential MTF와 sagittal MTF를 측정한 결과, field angle이 증가함에 따라 MTF 값이 떨어짐을 알수 있었다.

ABSTRACT

The KITSAT-1(August, 1992) and the KITSAT-2(September, 1993) were successfully launched and operated by the SatRec(Satellite Research Center). Both carry the CCD cameras to monitor the image of the earth. We used the camera bench type automatic equipment in the KSRI(Korea Standards Research Institute) to measure the MTF(Modulation Transfer Function) value

of the lens attached to the CCD camera. We measured the tangential MTF and the sagittal MTF by varying the f-number and the field angle. According to the result, the light from a point source is focused within one pixel of the CCD chip when the f-number is smaller than 4.0, and the MTF value becomes smaller as the field angle increases.

1. 서 론

한국과학기술원 인공위성 연구센터에서는 92년 8월과 93년 9월에 각각 마이크로 위성인 우리별 1호와 2호를 성공적으로 발사 운용중이다. 두 위성 모두에는 지상 촬영 카메라(Earth Imaging System: EIS)가 실려있는데, 이는 우리별 인공위성에 탑재된 여러 탑재물 중 하나로 지표면을 촬영하는 임무를 수행한다. 지구 주위를 돌면서 촬영한 사진은 digitized된 형태로 기억소자(memory)에 보관하고 있다가 위성이 관제국 위를 통과할때 지상으로 내려 보내게 된다. 이 지상 촬영 카메라의 구조는 크게 Transputer, micro-controller, 그리고 CCD 카메라 3가지로 나눌 수 있다. Transputer는 외부 시스템과의 연결을 담당하고 있고, micro-controller는 노출시간이나 증폭율의 결정 등 촬영 전반의 제어를 담당한다. 이 중에서 CCD 카메라는 상이 촛점 평면에 맺히도록 해주는 광학부와 맺힌 상을 시그널로 변환 해주는 전자부로 나뉜다. 지상 촬영 장치의 개략도가 그림 1에 나타나 있다.

CCD는 FET(Field Effect Transistor)의 2차원 배열이라고 할수 있다. 영상이 CCD의 영상 영역상에 맺히면, 광자가 biased voltage가 걸려 있는 기판을 통과하면서 전자 정공 쌍을 생성하는데, 이 중 정공은 기판상에서 소멸되고, 전자가 가장 근접한 electrode로 이동하여 시그널의 역할을 하게 된다. 실제로 촛점 평면상에 상을 맺도록 해주는 것은 렌즈이다. 이 논문의 목적은 이러한 렌즈의 성능을 평가하는 척도를 마련하고자 함이다. 우리별 1호에 쓰여진 렌즈의 사양은 다음과 같다.

- 광각 lens (FOV: Field of View가 60°)
 - 2000 km 영역 촬영
 - Effective focal length: 4.8 mm (4 km/pixel)
 - Back focal length: 9.2 mm
 - Center wave length: 850 nm (80nm wide)
- 협각 lens (FOV: Field of View가 10°)
 - 200 km 영역 촬영
 - Effective focal length: 50 mm (400 m/pixel)
 - Back focal length: 15.8 mm
 - Center wave length: 650 nm (80nm wide)

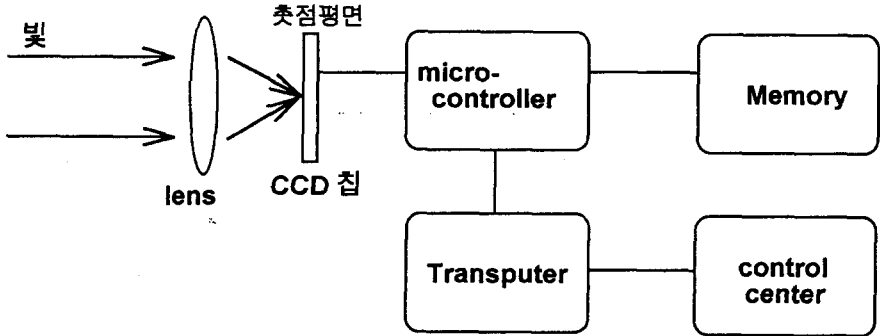


그림 1. 지상 촬영 장치의 개략도

두 카메라에 공통적으로 EEV사의 CCD 04-06 칩이 쓰여졌다. 이 칩은 578×576 pixel format을 가지며, 화소와 화소 사이의 거리가 가로, 세로 각각 15 μm 와 22.5 μm 이다. 실제로 상이 맺히는 면적은 가로 세로 각각 8.5 mm 와 6.3 mm 이다. 카메라에 의해 찍히는 면적은 위성의 고도(우리별 1호: 1,300 km, 우리별 2호: 800 km)와 렌즈의 초점 거리(Effective focal length)에 의해 결정된다. 지구상의 거리와 위성의 고도의 비는 칩상에서의 거리와 초점거리의 비와 같다는 간단한 비례식이 성립한다.

2. MTF 측정 방법 및 내용

MTF는 렌즈의 성능을 평가하는 척도로서 가장 많이 쓰이며(Goodman 1968), 선형 시스템 이론을 광학 시스템에 적용한 것이다. 그림 2에 선형 시스템과 렌즈 시스템의 관계가 나타나 있다. 선형 시스템에서는 주파수에 대한 특성으로 그 시스템을 완벽하게 기술할 수 있는데, 렌즈의 경우 선형 시스템의 조건을 만족하므로, 공간 주파수에 대한 특성으로 성능을 평가할 수 있다. 공간 주파수란 일정한 공간 내에서 얼마나 많은 modulation이 있는가를 나타내는 것으로, 일반적으로 높은 공간 주파수에 대한 특성이 떨어지게 된다. 렌즈의 목적은 한 점에서 나온 빛이 다시 한점에 그 상이 맺도록 해주는 것이다. 이와 같은 이상적인 렌즈의 경우 모든 공간 주파수에 대한 특성이 모두 1로 주어진다. 그러나, 실제 렌즈의 경우 한 점에서 나온 빛이 한점에 맺히지 않고 퍼지게 되는데, 이 경우 MTF는 높은 공간 주파수일수록 작은 값을 갖는다. 광학 시스템을 기술하는 매개변수(이상수 1985)는 MTF 이외에도 f/#(빛의 양을 결정), axial color(파장에 따른 초점거

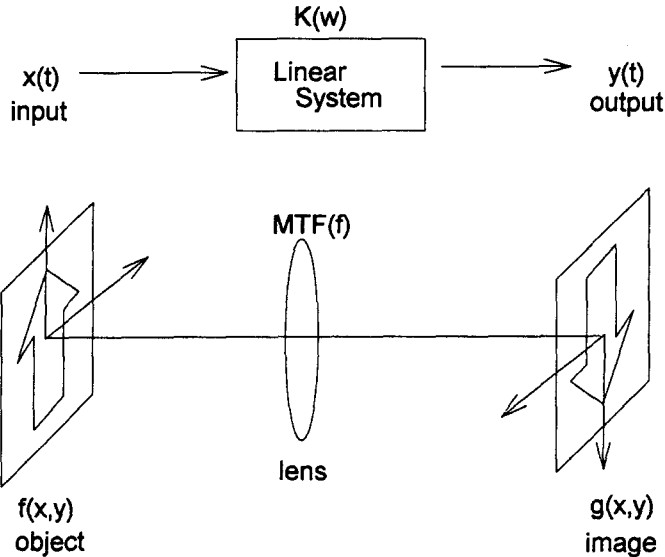


그림 2. 선형 시스템과 렌즈의 관계

리의 변화), field curvature(초점 평면의 휘어짐), distortion(상이 찌그러짐), transmission(빛의 투과 정도), relative illumination fall off(field angle이 증가함에 따라 빛의 양이 감소), veiling glare(렌즈를 이루는 물질의 결합에 의한 빛의 산란)와 thermal behavior(주위 온도에 따른 초점 거리의 변화) 등이 있다.

MTF를 측정하는 방법으로 가장 많이 쓰이는 방법은 knife edge scan 방법이다. point source는 모든 공간 주파수의 중첩임을 이용하여, 점광원의 렌즈에 의한 상을 칼날로 scan 하여 얻은 point spread function을 Fourier transform 하여 MTF를 얻는데, 이 과정이 그림 3에 나타나 있다. 실험은 한국표준연구소의 MTF 측정 장치 (조현모 등 1987, 이윤우 등 1990, 조현모 등 1991)를 사용 하였다. 이 방법을 이용하여 우리별 1호에 쓰여진 협각 렌즈에 대한 MTF를 측정 하였다. 광각 렌즈의 경우 초점거리가 너무 짧고 850 nm 밴드에 대한 실험 기기 미비로 행해지지 못하였다.

실험은 두가지로 나누어 행하였다. 광축상에서 f/#를 1.8, 4.0, 8.0, 11.0 으로 변화 시키면서 MTF를 측정하였고, f/#를 4.0 으로 고정 시킨후 field angle(광축에서 벗어난 각도)을 변화 시키면서 tangential MTF(광축을 포함하는 면을 따라 scan)와 sagittal MTF(광축을 포함하는 면에 수직하게 scan)를 측정 하였다.

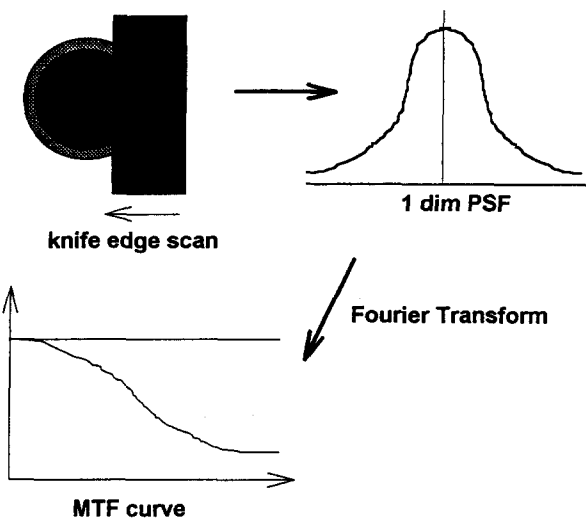


그림 3. knife edge scan 을 이용한 MTF 측정

3. 실험 결과 및 분석

MTF 측정을 하기 전에 nodal slide(기하 광학적 특성을 측정하는 기구)를 이용하여 초점거리를 측정한 결과, 렌즈의 초점 거리(Effective focal length)가 49.90 mm 였다.

3.1 f/#를 변화 시켰을 때

광축상에서 f/#를 변화 시키면서 MTF를 측정하였을때의 결과가 표 1에 나타나 있다. f/#가 4.0보다 커지면서 MTF 값이 떨어지는데, 이는 렌즈가 구면 수차가 거의 없다는 것을 나타낸다. 결과에서 주의깊게 보아야 할 공간 주파수는 CCD 칩의 sampling frequency 이다. 우리별 인공 위성의 카메라의 경우 sampling frequency가 가로, 세로 각각 33 c/mm 와 22 c/mm 이다. 즉, 1 mm 의 공간 안에서 각각 33개와 22개의 정보를 얻는 것이다. 이 sampling frequency 에서 MTF 값이 충분히 커야만 렌즈에 의한 정보의 손실이 없는 것이다. 표 1 에서 보면, f/#가 4.0 보다 작으면 공간 주파수 30 c/mm 에서 MTF 값이 0.75 보다 크다는 사실을 알수 있다. 그림 4에는 f/#가 4.0 이고, field angle 이 0°일때의 MTF 곡선을 실었다.

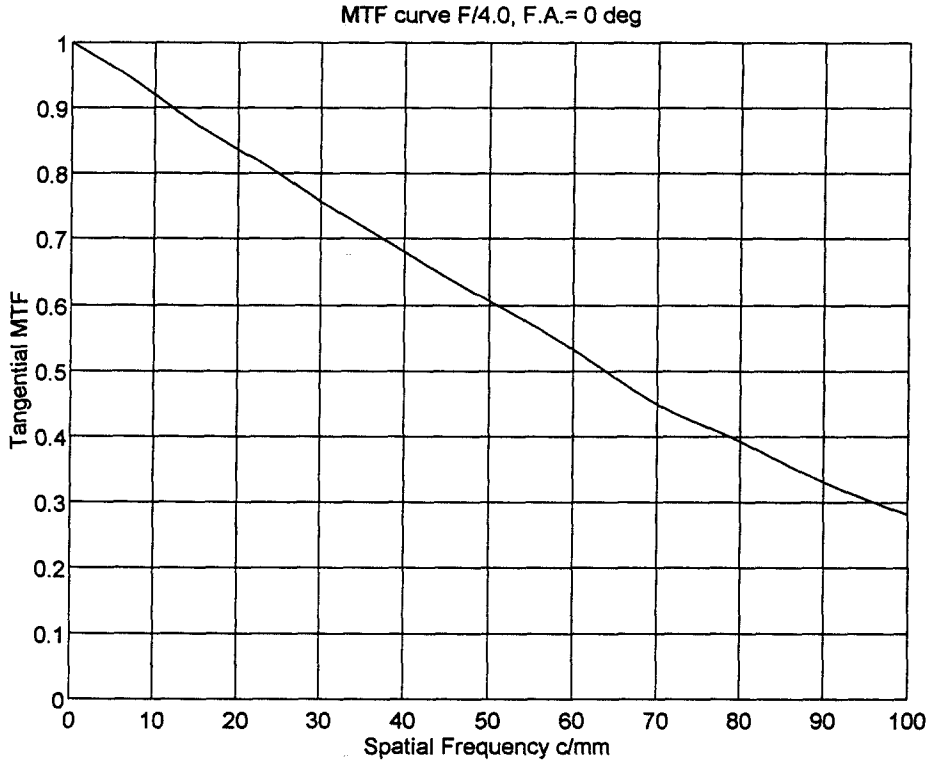


그림 4. MTF curve, f/4.0, field angle=0°

표 1. 축상에서의 MTF

f/#	30 c/mm	50 c/mm	100 c/mm
1.8	0.800	0.653	0.350
4.0	0.757	0.657	0.281
8.0	0.591	0.353	0.018
11.0	0.333	0.091	0.024

표 2. 비축상에서의 MTF(30 c/mm)

각도	tangential	sagital
0°	0.757	0.784
3°	0.642	0.697
5°	0.479	0.462
7.5°	0.641	0.571

3.2 각도를 변화 시켰을때

$f/\#$ 를 4.0 으로 고정하고, field angle 을 변화시키면서 MTF를 측정한 결과가 표 2에 나타나 있다. 결과를 보면, 각도가 커짐에 따라 MTF 값이 감소하는데, 이는 중앙에서 벗어나 있는 상이 퍼진다는 것을 말해준다. 그리고, tangential MTF 와 sagital MTF 가 각도에 따라 차이가 있기는 하지만 카메라의 FOV(Field of View) 10도 내에서 거의 일치 하고 있다. 이는 렌즈의 비축 수차 (광축에서 벗어난 빛에 대한 렌즈의 수차)가 거의 없다는 사실을 말해 준다.

4.결론 및 논의

결과에서 볼때, 렌즈의 $f/\#$ 가 4.0 보다 작고, field angle이 카메라의 FOV 보다 작을때, MTF 값이 CCD 칩의 sampling frequency 에서 0.5 보다는 크다. 이는 카메라의 성능에서 렌즈에 의한 정보의 유실이 거의 없다는 것을 말해준다. 렌즈는 수차가 거의 없는 diffraction limited 렌즈이다. 위의 모든 측정은 MTF의 값이 최대가 되는 점을 자동적으로 찾아서 행해진 것이다. 이 점에서 벗어나면, 즉 CCD의 영상영역이 촛점 평면에서 벗어나면, MTF 값이 감소 한다. 이러한 결과를 바탕으로 렌즈를 카메라에 고정 시킬때, MTF 값을 측정하면서 가장 상이 잘 맺히는 점을 찾아야 한다. 그리고, 앞으로는 가시광 이외의 자외선이나 적외선, X-ray 영역에 대한 촬영에도 이와 같은 분석이 계속 되어야 한다.

감사의 글: 실험이 행해질 수 있도록 도와주시고 많은 조언을 해주신 표준 과학 연구소의 이윤우, 조현모, 이희윤님께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 이상수 1985, 기하 광학, 교학 연구사
 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희 1990, 응용물리, 3(2), 153
 조현모, 이윤우, 이인원 1987, 새물리, 27(5), 423
 조현모, 이윤우, 이희윤, 이인원 1991, 한국광학회지, 2(3), 121
 Goodman, J. W. 1968, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill