

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(5), 472-478(2015)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.5.472>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

소형 위성 영상안정화를 위한 능동형 광학 보정장치 설계

황재혁*, 양지연**, 박진호**, 조정빈**, 강명수**, 배재성***

Design of the Active Optical Compensation Movements for Image Stabilization of Small Satellite

Jai Hyuk Hwang*, Ji Youn Yang**, Jean Ho Park**, Jeong Bin Jo**,
Myoung Soo Kang** and Jae Sung Bae***

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University* , ***

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU**

ABSTRACT

This paper describes the design of the active optical compensation movements(at focal plane, secondary mirror) for the image stabilization of a small satellite camera. The movements can correct optical misalignment on-line and directly compensate vibration disturbances in the focal plane. Since the devices are installed inside the space camera, it has an remarkable advantage to deal with the structural deformation of a space camera effectively. In this paper, the requirements of the active optical compensation movements for 1m GSD small satellite camera have been analyzed. Based on the established requirements, the design of the active compensation movements have been conducted. The designed active optical compensation system can control 5 axes movements independently to compensate micro-vibration disturbances in the focal plane and to refocus the optical misaligned satellite camera.

초 록

본 논문에서는 소형 위성 카메라의 영상안정화를 위해 진동외란 보상 및 궤도상 광학정렬이 가능한 능동형 광학 보정장치의 설계에 대해 연구하였다. 능동형 광학 보정장치는 초점면부 보정장치와 부경 보정장치로 이루어져 있다. 초점면부 보정장치는 영상센서에 유입되는 진동 외란을 초점면부에서 직접 보상하는 장치이다. 또한 부경 보정장치는 초점면부 보정장치와 협력하여 궤도상에서 능동적으로 광학정렬을 수행할 수 있는 장치이다. 본 논문에서는 해상도 1 m급 소형 위성에 적용 가능한 능동형 광학 보정장치 설계를 위해 소형 고해상도 위성 카메라의 요구도를 분석하고, 진동 외란 보상과 궤도상 광학정렬이 능동적으로 가능하도록 초점면부 보정장치와 부경 보정장치의 요구도를 선정하였다. 선정된 요구도를 기준으로 본 연구에서 설계된 능동형 광학 보정장치는 초점면부에서 진동외란 보상 및 초점조절, 부경에서 틸트 및 디스페이싱 보상이 가능하므로 독립적으로 5축 제어가 가능한 시스템이다.

† Received : February 23, 2015 Revised : April 1, 2015 Accepted : April 3, 2015

* Corresponding author, E-mail : jhhwang@kau.ac.kr

Key Words : Image Stabilization(영상안정화), Optical Alignment(광학 정렬), Cassegrain Optics(카세그레인 광학계), Optical Compensation Movement(광학보정장치), Focal Plane Control Method(초점면부 제어기법)

1. 서 론

소형위성은 동시에 복수 위성 발사가 가능하고 또한 발사체 수납효율 극대화를 통해 발사비용을 현저히 저감할 수 있기 때문에 최근 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 위성 발사 시 발사비용을 현저히 저감시킬 수 있는 방안인 전개형 광학 구조체가 우주분야 연구에서 많은 관심을 받고 있다. 그러나 소형위성에 탑재되는 광학카메라는 경통구경이 작아지기 때문에 높은 SNR(Signal to Noise Ratio)을 얻기 위해 어두운 초점면부(Focal Plane)에 충분한 빛이 들어올 수 있도록 노출시간을 증가시켜야 하며, 이에 따라 영상품질이 진동 외란에 민감해지게 된다[2,3]. 또한 전개형 광학 구조체는 전개 후 정렬 정밀도에 따라 광학성능이 좌우되는 단점을 갖고 있다. 따라서 소형 위성 카메라 혹은 전개형 광학 구조체에서 최종적으로 얻어지는 영상的高品質을 보장하기 위해서는 효율적인 영상안정화 기법이 필요하다.

위성 카메라의 영상안정화를 위해서는 위성의 자세 안정성을 높이거나 진동 절연 플랫폼을 이용할 수 있으나, 공간과 무게에 제한이 있는 소형위성에 적용하기에는 한계가 있는 기술이다. 또한 비용의 증가도 무시할 수 없는 부분이다[2]. 따라서, 소형 위성의 영상안정화는 공간과 무게의 한계를 극복하면서 비용 및 성능면에서 효과적인 방법을 적용하는 것이 필요하다. 이런 측면에서 위성의 운동과 영상센서가 있는 초점면부의 운동을 분리시키는 초점면부 영상안정화 기법은 다른 방법에 비해 무게가 가벼운 구성요소를 움직여 주기 때문에 소형 위성카메라에 적용하기 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다[2-5].

위성의 광학계는 지상에서 정밀한 광학정렬 과정을 거치게 되지만, 위성의 발사 시 진동환경과 우주환경에 의해 광구조품의 정렬이 흐트러질 수 있기 때문에 궤도상에서 리포커싱(Refocusing)과정을 거치게 된다. 일반적으로 리포커싱 과정은 위성의 촬영영상을 지상 관제국에서 판독 후 원격으로 수행되기 때문에 많은 시간과 비용이 소모된다[6]. 따라서, 리포커싱 과정을 궤도상에서 실시간 수행이 가능하다면 시간과 비용측면에서 매우 효과적일 것이다. 그러나, 이러한 기법을 위성에

적용한 사례는 현재까지 없는 것으로 보인다.

본 논문에서는 공간과 무게에 한계가 있고, 경통이 작아 진동에 민감한 소형 위성의 영상안정화를 위해 진동 외란 보상 및 궤도상 실시간 광학정렬이 가능한 능동형 광학 보정장치의 설계에 대해 연구하였다. 본 연구에서 설계하고자 하는 능동형 광학 보정장치는 초점면부 보정장치와 부경 보정장치로 이루어져있다. 먼저 초점면부 보정장치는 영상센서에 유입되는 진동 외란을 초점면부에서 직접 보상하는 방법으로 카메라 내부에 진동보정장치가 장착되기 때문에 위성카메라 구조변형에 능동적으로 대처할 수 있다는 장점이 있다. 또한 부경 보정장치는 초점면부 보정장치와 협력하여 궤도상에서 능동적으로 광학정렬을 수행할 수 있기 때문에 공간, 무게, 비용 등의 제약을 받는 소형 위성카메라나 전개형 광학 구조체에 적용 시 높은 영상 품질을 기대할 수 있는 광학 보정장치이다.

위성 카메라로부터 획득한 영상의 품질은 위성 카메라의 GSD(Ground Sample Distance)와 MTF(Modulation Transfer Function), SNR 등으로 표현된다. GSD와 MTF는 획득한 영상의 해상도 특성을 나타내는 것으로, GSD는 위성 영상의 한 픽셀(Pixel)이 지상의 얼마만큼의 거리(혹은 면적)에 대응하는가를 의미하는 가장 중요한 스펙이다. MTF는 1 GSD에 해당하는 픽셀이 얼마만큼 선명하게 나타낼 수 있는가를 보여주는 스펙이며, SNR은 획득한 영상의 신호 대 잡음비를 나타내는 것으로, 획득한 영상에서 더 많은 정보를 이끌어내기 위한 중요한 지표이다. 따라서, 획득한 영상으로부터 더 많은 정보를 얻기 위해 GSD와 MTF로 나타내는 높은 해상도와 높은 SNR이 요구된다[7].

본 논문에서는 초점면부 진동제어를 통한 미소진동 보상과 궤도상에서 능동적으로 광학정렬이 가능한 광학 보정장치의 설계에 대한 내용을 기술 하였다. 광학 보정장치 설계를 위해 소형 고해상도 위성 카메라의 요구도와 위성 카메라의 외란을 먼저 분석한 후, 초점면부 안정화 보정장치와 부경 보정장치의 요구도를 선정하였다. 결정된 요구도를 기준으로 초점면부 보정장치와 부경 보정장치의 설계를 수행하고, 이러한 광학 보정장치를 검증하기 위한 광학계를 설계하였다.

Table 1. Requirement of optical payload

Optics	Cassegrain Type
Altitude	500 km
GSD(PAN)	1 m
Aperture diameter	500 mm
Detector/Pixel size	CMOS / 8 μm
Swath with/FOV	12 km/ $\pm 0.687^\circ$
F/#	f/8
MTF(@Nyquist frequency)	10% (EOS)

II. 광학 보정장치 요구도 분석

2.1 소형 고해상도 위성 카메라 요구도 분석

본 논문에서는 현재까지 궤도에 오른 지구관측 소형위성 중 가장 좋은 성능을 가진 고해상도 위성인 Dubaisat-2호와 Skysat-1호를 기준으로 요구도 분석을 수행하였다. Dubaisat-2호는 300 kg급 위성으로 GSD 1 m(PAN)/4.0 m(MS)으로 주반사경의 직경은 400 mm이다. Skysat-1호는 100 kg급 위성으로 GSD 0.9 m(PAN)/2.0 m(MS)로 위성의 크기와 무게로 추정해볼 때 주반사경의 크기는 Dubaisat-2호와 유사하거나 작을 것으로 판단된다[8]. 따라서 본 연구에서는 저궤도 소형 고해상도 위성을 기준으로 주반사경 직경이 500 mm, GSD 1 m인 광학 탑재체에 적용 가능한 광학 보정장치를 설계하고자 한다. 능동형 광학 보정장치가 장착될 위성카메라의 요구도는 Table 1과 같다.

2.2 위성 카메라의 외란 분석

인공위성에서 발생하는 진동은 우주환경에 의한 외부외란과 위성에 장착된 기계적 메커니즘에 의한 내부외란에 의해 유발된다. 내부외란의 진동 원으로는 기계적 광학 필터, 저온 냉각장치, 태양 전지판 구동장치, 안테나 지향장치 및 반작용 휠 등이 있으며, 주로 반작용 휠에 의해 가장 큰 외란이 발생된다. 반작용 휠이 3,000 rpm으로 회전 시 50 Hz 및 150 Hz (3배 Superharmonics)의 주파수를 갖는 진동이 광학 탑재체로 들어오게 된다[9].

이러한 내부외란에 의해 발생하는 지터(Jitter)는 그 크기가 1 μrad 이더라도 500 km 거리에서 약 1 m의 FOV(Field of View)변화를 초래한다. 위성은 설계 시 각 가진원 별로 지터량을 할당하며, 본 연구에서는 목표 광학계 모델과 비슷한 사양을 갖는 HiRISE의 지터 할당량을 참고하여 위성의 지배적 가진원인 반작용 휠의 지터 할당

량을 1.25 μrad 로 설정하였다[10].

2.3 초점면부 안정화 보정장치 요구도 분석

2.3.1 보정장치 구동범위

본 절의 초점면부 광학 보정장치는 초점면부에 들어오는 미소진동외란을 보상하는 구동장치이다. 자이로에서 측정된 신호를 이용하여 미소진동에 의한 영상의 움직임을 계산한 후 영상센서를 영상의 이동량만큼 움직여 고품질의 영상을 얻을 수 있다. 이 제어기법을 초점면부 영상안정화 기법이라 부르며, 민수 카메라의 손떨림 보정기법과 같은 개념이다. 초점면부 보정장치는 광학정렬을 위한 초점 조절 기능도 포함하기 때문에 독립적으로 3축(De-space(z-광축), De-center (x,y)) 제어가 가능해야 한다.

영상 촬영 시 지터에 의한 영상의 이동량은 지터각도와 EFL(Effective Focal Length)의 곱과 같다. 지터각도 1.25 μrad , EFL 4 m일 때 영상의 이동량은 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이다. 그러나, 위성 카메라의 광학 정렬오차 및 기계적인 오차와 안전계수를 고려하여 진동보상을 위한 보정장치의 구동범위는 $\pm 50 \mu\text{m}$ 이 되도록 요구도를 선정하였다.

궤도상에서 위성카메라의 광학정렬이 흐트러질 경우 초점 조절은 보통 열제어 방식을 통해 수동적으로 이루어진다. 또는 모터를 이용하여 초점 보정렌즈나 부경을 직접 이동하는 방법 등이 적용 가능하다[11]. 본 연구에서는 공간과 무게가 제한된 소형 위성에 적용 가능하도록 초점면부를 z축(광축)방향으로 제어할 수 있도록 하였다.

Figure 1은 본 논문에서 설계된 슈미트-카세그레인 방식 광학계의 나이퀴스트 주파수에서 비초점(Defocus)에 따른 MTF의 변화를 보여주는 그래프이다. 광학적 전달함수(Optical Transfer Function)는 공간주파수에 따라 변하는 복소수이며 그 크기가 MTF이다. 그래프에서 실선은 광학전달함수의 위상이 90° 인 Tangential Plane에서의 MTF값, 점선은 위상이 0° 인 Sagittal Plane에서의 MTF값이다. 검은색 선은 광

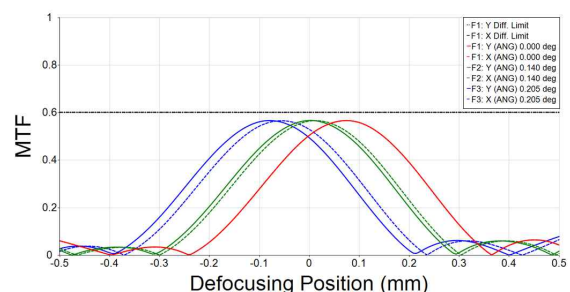


Fig. 1. MTF vs defocus at Nyquist frequency

Table 2. Requirement of the focal plane compensation movement

구분	요구도	단 위
Size(assembly)	150×120×31	mm
Size(1 stage)	150×120×5	mm
Stage의 Payload(x/y)	2.25/2.5	kg
x축 Stroke	±50	μm
y축 Stroke	±50	μm
Required Force (x, y축)	Max. 111.3	N
z축 Stroke	±500	μm
Holding Force(z축)	10	N
Bandwidth (x, y축)	150	Hz

학계의 회절한계에서의 MTF 값이며, 붉은색, 파란색, 초록색 선은 0, 0.7, Full Field별로 계산된 MTF 그래프이다. 비초점 양이 0에서 0.5mm로 증가함에 따라 MTF 값이 급속히 감소함을 알 수 있다. 초점면부의 비초점에 대한 민감도는 부경에 비해 약 1/10 ~ 1/20 정도이므로, 초점조절을 위한 보정장치의 구동범위는 설계여유를 포함하여 ±500 μm가 되도록 요구도를 선정하였다.

2.3.2 보정장치 대역폭

위성 카메라의 외란분석에 의하면 위성의 광학 탑재체에 들어오는 반작용 휠의 진동외란 주파수 대역은 0~150 Hz 범위에 있다. 기타 다른 가진원에서 오는 외란은 반작용 휠의 영향보다 작기 때문에 고려하지 않아도 무방하다. 따라서, 미소진동보상을 위한 초점면부 보정장치의 대역폭(x, y축)은 0~150 Hz가 되도록 요구도를 선정하였다.

2.3.3 보정장치 구동력

진동 보상을 위해 초점면부 보정장치는 전자부를 포함하는 초점면부 조립체의 무게만큼의 관성력을 감당할 수 있는 구동력이 필요하다. Dubaisat-2호의 경우, 전자부가 포함된 초점면부 조립체의 전체 무게는 약 2 kg정도이다. 따라서 초점면부 안정화 보정장치의 Payload를 최대 2 kg으로 설정하고 이에 필요한 구동력을 계산하였다.

x, y축 작동기의 구동력은 150 Hz로 입력되는 최대 ±50 μm의 진동 외란 보상 시 각 축에 작용하는 관성력이며, 필요한 힘을 계산하면 약 111 N이 된다. z축의 구동은 동역학적인 특성이 없으므로, 빠른 응답속도가 요구되지 않는다. 또한 무중력상태인 우주공간에서 z축의 구동력은 10 N이면 충분하다. 최종적으로 얻어진 초점면부 보정장치의 요구도는 Table 2와 같다.

2.4 부경 보정장치 요구도 분석

위성용 고해상도 카메라에 주로 사용되는 카세그레인 방식이나 코쉬 방식은 부경의 위치 변화가 카메라 성능에 큰 영향을 주며, 초기 정렬 상태로부터 보통 2~3 μm 이내의 변위 오차만이 허용된다[11].

해상도 1 m 급의 소형위성의 경우 광학정렬 오차는 10 μm 이내로 알려져 있다. 그러나, 위성 광학 구조체는 위성 발사 시 외력에 의한 변형, 우주 환경의 극심한 온도변화에 의한 반사경 및 구조물의 변형 등에 의해 틸트(Tilt, x/y-기울기), 디센터(De-center, x/y-중심이동), 디스페이스(De-space, z-이동)가 발생하게 된다. 일반적으로 동일한 정렬오차 크기에 대해 디스페이스가 디센터에 비해 광학성능에 민감한 영향을 미친다[12]. 이러한 광학정렬 오차는 MTF 성능저하와 직결되므로 고품질의 영상을 획득하기 위해서는 궤도상에서 광학정렬을 통해 오차 보상이 이루어져야 한다. 이러한 역할을 위해, 부경에 광학 보정장치를 부착시켜 부경이 3축 방향(De-space, Tilt(x/y))으로 운동이 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 궤도상 온라인 광학정렬을 위해 부경 보정장치의 요구도를 디스페이스 ±50 μm, 틸트 ±100 μrad으로 선정하였다. 부경 보정장치 및 초점면부 보정장치를 이용하여 위성카메라를 능동적으로 광학 정렬하는 알고리즘에 대한 결과는 추후 논문에서 발표할 예정이다.

III. 광학 보정장치 설계

3.1 초점면부 보정장치 설계

광학 보정장치 설계 요구도를 기본으로 초점면부 보정장치의 설계를 수행하였다. Fig. 2와 같이 초점면부 보정장치는 x, y, z축 3개의 스테이지로 구성되어있다. x-스테이지와 y-스테이지는 진동 보상을 위해 150 Hz까지 빠른 응답이 가능한 압전 작동기를 통해 구동되며, 초점 조절을 담당하는 z-스테이지는 VCM(Voice Coil Motor)에 의해 제어가 이루어진다. 스테이지 이동 변위 센서는 정전용량형(Capacitive Type)으로 선정하였으며, 각 스테이지는 독립적으로 초정밀 운동이 가능하다. 초점면부 보정장치의 이동량 명령은 위성 카메라에 부착된 자이로센서에서 얻어진다.

영상센서는 x-스테이지에 위치하며, 각 스테이지는 슬라이드 베어링을 통해 운동 시 마찰력이 최소가 되도록 하였다. 또한 정밀 구동을 위해 슬라이드 베어링이 설치되는 스테이지에 리니어 가이드를 추가하여 운동 시 직진도(Straightness)

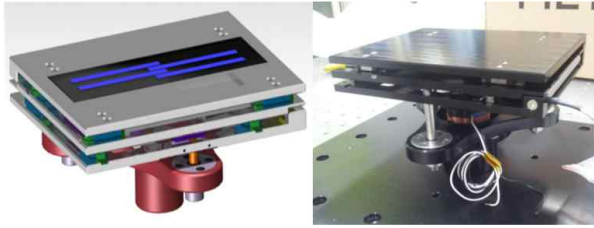


Fig. 2. Focal plane compensation movement

가 유지되도록 설계하였다.

x-스테이지와 y-스테이지 내부에는 진동외란 보상을 위해 적층형 압전 작동기(PSt 150/5/100 VS10)가 장착되어 있으며 구동전압은 $-30\text{ V} \sim +150\text{ V}$, 구동범위 $130\ \mu\text{m}$, 구동력 800 N 이다 [13]. 압전 작동기는 높은 주파수에서 작동이 가능하며, 정밀 제어가 가능하고, 마찰이나 마모가 없어 수명이 반영구적이다. 또한, 구동력이 크고, 응답속도가 빠르기 때문에 초점면부 보정장치와 같이 높은 주파수로 구동되는 정밀제어 기구에 적합한 작동기이다.

베이스 구조물은 x, y, z-스테이지를 받치는 역할을 하며, VCM 작동기는 베이스 구조에 고정되어 z-스테이지와 연결되며, z축으로 x, y, z-스테이지 전체를 구동하여 초점조절이 가능하도록 한다. z축 방향 구동 시 축(Shaft)을 잡아주는 무급유 부시(Bush)를 이용하여 마찰이 작으면서도 VCM에 의한 스테이지의 직진운동을 보장할 수 있도록 설계하였다.

3.2 부경 보정장치 설계

광학 보정장치 설계 요구도를 기본으로 부경 보정장치의 설계를 수행하였다. Fig. 3과 같이 보정장치는 부경의 틸트와 디스페이스 정렬오차를 보상하기 위한 메커니즘으로 이루어져 있다[14].

부경 보정장치는 부경과 동일한 곡률을 갖는 베이스 구조에 구축되어 회전 시 디센터가 일어나지 않도록 설계하였다. 베이스 구조와 틸트 보정을 위한 작동기는 S 모양 유연 힌지(Flexure Hinge)로 연결되어 2축에 대한 틸팅(Tilting)을 보정한다. μrad 단위 정밀제어를 위해 작동기는 압전 작동기로 선정하였다[14].

디스페이스 정렬오차는 부경과 보정장치를 z축 방향으로 구동하여 보정한다. 설계된 광학계에서 부경의 디스페이싱(De-spacing)이 광학특성에 가장 민감하므로, 정밀한 제어를 위해 압전 작동기를 구동기로 선정하였다[14].

Figure 4는 능동형 광학 보정장치를 적용한 위성카메라의 전체적인 개념도이다. 위성카메라는 슈미트-카세그레인 타입으로 초점면부에 부착된

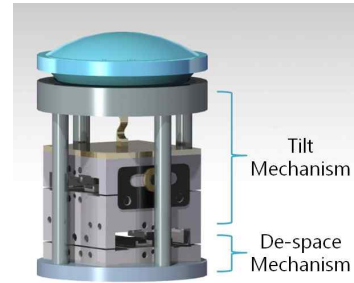


Fig. 3. Compensation device for secondary mirror movement [14]

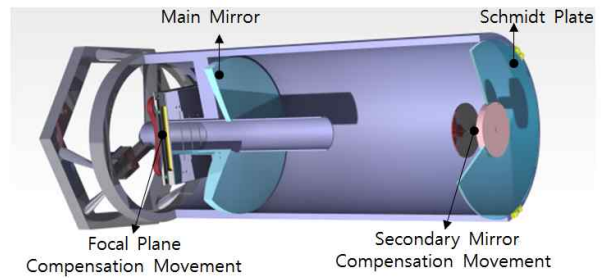


Fig. 4. Conceptual design of satellite camera equipped with compensation movements

보정장치와 부경에 부착된 보정장치를 포함하고 있다. 초점면부 보정장치는 x, y축 진동제어와 z축 초점조절이 가능하며, 부경 보정장치는 틸트와 디스페이스 보정이 가능하다. 따라서 능동형 광학 보정장치는 총 5자유도 운동이 가능하다.

3.3 광학 보정장치를 적용한 광학계

광학 보정장치의 실험실 수준 검증을 위해 광학계의 축소 모델을 설계하였다. 설계된 위성 카메라는 슈미트-카세그레인 타입으로 운용고도 700 km 에서 GSD(PAN) 3.8 m , MTF(Nyquist Frequency) 30%의 요구도를 만족할 수 있도록 설계되었다. 소형위성에 적용 가능하도록 광학계 길이는 450 mm 이하로 제한하여 설계하였다. 설계된 광학계 축소 모델의 사양은 Table 3과 같이 슈미트판 직경 205 mm , 주반사경 직경 200 mm , 부경 직경 54 mm , 광학계 길이 449 mm 이다.

Figure 5는 설계된 광학계의 MTF값 그래프이다. 나이퀴스트 주파수(Nyquist Frequency)인 약 50 cycle/mm 에서 모든 필드(0, 0.7, Full Field)에 대해 50%의 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 선도는 회절(Diffraction), 수차(Aberration), 차폐(Obscuration)에 의한 영상품질 저하까지 고려한 값이다.

RMS 스팟(Spot) 크기는 0, 0.7, Full Field에서 각각 $9.6\ \mu\text{m}$, $7.8\ \mu\text{m}$, $9.7\ \mu\text{m}$ 로 CMOS 픽셀 사이즈

Table 3. Specification of optical testbed for function evaluation of optical compensation movements

Optics	Schmidt Cassegrain
Aperture Diameter	200 mm
GSD(PAN)	3.8 m
F/#	9.07
Swath width/FOV	5 km/0.41 deg
Total tube length	449.2 mm
MTF(Optic design)	50% @Nyquist frequency
Linear Obscuration	0.27
Pan detector	CMOS area sensor (10 μm)

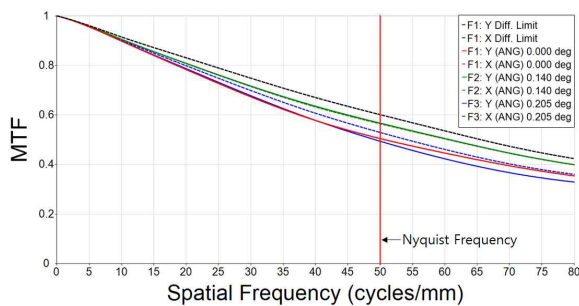


Fig. 5. MTF of optical testbed

인 10 μm보다 작게 설계되어 광학적으로도 GSD 3.8 m 성능을 만족함을 확인하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 위성 카메라의 영상안정화를 위해 초점면부 제어를 통한 진동보상과 궤도상에서 광학정렬이 가능한 능동형 광학 보정장치의 설계에 대해 연구하였다. Dubaisat-2호, Skysat-1호와 같은 소형 고해상도 위성 카메라의 요구도를 분석하여 능동형 광학 보정장치의 설계를 위한 광학 탑재체 모델을 선정하였다. 선정된 광학 탑재체 모델에 대해 진동 외란 보상과 궤도상 광학정렬이 가능하도록 초점면부 보정장치와 부경 보정장치의 요구도를 선정하였다. 선정된 요구도를 기준으로 본 연구에서 설계된 능동형 광학 보정장치는 초점면부에서 진동외란 보상 및 초점조절, 부경에서 틸트 및 디스페이싱 보상이 가능하므로 독립적으로 5축 제어가 가능한 시스템이다. 또한 광학 보정장치의 평가를 위해, 실험실 수준 슈미트-카세그레인 타입 광학계를 설계하였다. 설계된

광학계는 주반사경의 직경 200 mm, GSD 3.8 m 이고, MTF성능은 약 50% 정도이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.NRF2013MIA3A3A02042321).

References

- 1) Herbert J. Kramer , Arthur P. Cracknell, "An Overview of Small Satellites in Remote Sensing," International Journal of Remote Sensing, Vol. 29 No. 15, 2008, pp. 4285~4337.
- 2) Klaus Janscheck, Valerij Tchernykh, Serguei Dyblenko, "Integrated Camera Motion Compensation by Real Time Image Motion Tracking and Image Deconvolution," Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2005, p.1437~1444.
- 3) Klaus Janscheck, Valerij Tchernykh, Serguei Dyblenko, "Performance Analysis of Opto-mechatronic Image Stabilization for a Compact Space Camera," Control Engineering Practice, Vol. 15, 2007, pp.333~347.
- 4) Bora Erbas, C.I. Underwood, "Active Focusing System for Earth Imaging Reflecting Telescope," Recent Advance in Space Technologies, Proceedings of 2nd International Conference on IEEE, 2005, pp.545~550.
- 5) Dong Gi Kwag, Jae Sung Bae, and Jai Hyuk Hwang, "Dynamic Characteristics of a Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuator for Focal Plane Image Stabilization," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 37 No. 4 , 2009, pp.399~405.
- 6) Dominique Leger, Francoise Viallefont, Emmanuel Hillairet, Aime Meygret, "In-flight Refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras," International Symposium on Remote sensing. International Society for Optics and Photonics, 2003, pp. 224~231.
- 7) Young Jun Jang, Jong Pil Kong, Haeng Pal Heo, Young Sun Kim, Jong Euk Park, "

Development of CCD Non-uniformity Corrector for Image Improvement of High Resolution Space Camera," Current Industrial & Technological Trends in Aerospace, Vol. 3 No. 2, 2005, pp. 49~55.

8) <https://directory.eoportal.org>.

9) Dae Kwan Kim, "Modeling of Micro-vibration of a Reaction Wheel based on Measurement Data," Magazine of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Vol. 7 No. 2, 2013, pp. 70~77.

10) Hong Bae Kim, Won Beom Lee, Gyu Sun Kim, "Vibration Suppression Techniques Adopted in Spacecraft Development," Current Industrial & Technological Trends in Aerospace, Vol. 9 No. 2, 2011, pp.90~97.

11) Eung Shik lee, "Technology of Optical Payload of Satellite," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 45 No. 7, pp. 43~46.

12) Do Hyeong Kim, Young Wan Choi, Myeong Seok Kang, Ee Eul Kim, Ho Soon Yang "Computer-Aided Alignment of an Earth Observation Camera," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Vol. 32, No. 10, 2014, pp.142~146.

13) <http://www.piezomechanik.com>.

14) Jeanho Park, Jaihyuk Hwang and Jiyoun Yang, "Conceptual Design for Tilt Mechanism of The Secondary Mirror with Deployment Structure," The Society for Aerospace System Engineering, Fall Conference, Paper #43, 2014.