技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.7.682

결함안전 기능을 고려한 교정 반사경 구동장치

이경민*, 오현웅*

Calibration Mirror Mechanism with Fail-Safe Function

Kyong-Min Lee* and Hyun-Ung Oh*

ABSTRACT

Calibration mirror mechanism has been widely used for on-board calibration with black body. The calibration mirror is deployed to reflect the radiation energy from the black body to the image sensor for calibrating the sensor system. After the calibration, the calibration mirror is stowed not to hide a main optical path. It also has a fail-safe function which can stow the mirror by just removing the input power of motor when the calibration mirror is stopped at certain position during the calibration. In the present work, the operation concept, design, torque analysis and functional test results of the calibration mirror mechanism with the aforementioned function have been introduced and investigated.

초 록

일반적으로 탑재 교정을 위한 교정 반사경 구동장치는 교정임무 수행 시에는 주광경로상의 전개위치로 반사경을 구동하며, 교정 후에는 주광경로와 이격된 수납위치로 반사경을 구동한다. 교정 반사경 구동장치의 결함 발생 시에는 반사경이 전개된 상태로 남아 주광경로를 차단하지 않도록 반사경을 강제 수납한다. 본 논문에서 제안한 결함 안전장치를 가지는 교정용 반사경 구동장치는 구동을 위한 스텝모터, 전개 및 수납 상태확인을 위한 마이크로 스위치, 베어링과 스프링의 기능을 동시에 갖는 피봇베어링 등으로 구성된다. 본 논문에서는 상기의 기능을 갖는 교정 반사경 구동장치 구현을 위한 구동장치 구성을 제안하였으며, 구성요소의 최적화 설계치를 도출하고 기능시험을 통해 결함안전 기능을 갖는 교정 반사경 구동장치의 유효성을 검증하였다.

Key Words : Mirror Mechanism(반사경 구동장치), Fail-Safe(결함안전), Calibration(교정)

1. 서 론

JPL이 제안한 Microwave Instrument for the ROSETTA Orbitor (MIRO) Calibration Switch Mechanism [1]은 우주용 영상센서의 교정을 목적으로 하는 전개(Deploy)/수납(Stow)형 교정 반

사경 구동장치로 교정임무 수행 시에는 반사경을 전개(Deploy) 하여 두 개의 상이한 온도정보를 갖는 교정용 타겟을 지향하고, 교정임무 종료와 함께 반사경을 원위치로 수납(Stow)시켜 주광경로(Main Optical Path)를 확보하는 기능을 갖는다. MIRO Calibration Switch Mechanism은 반사경의 구동을 위한 기어형 스텝모터, 반사경의 위치정보 획득을 위한 근접센서, 반사경 회전방향으로의 가이드 역할을 하는 볼베어링 그리고 반사경 운용 중 결함발생으로 인한 주광경로 차단 방지를 위해 Pinpuller와 복원 스프링으로 이

† 2011년 5월 18일 접수 ~ 2011년 6월 24일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 영상정보체계개발단
교신저자, E-mail : ohlee314kr@yahoo.co.kr
대전시 유성구 유성우체국 35-5호

루어진 결함안전(Fail-Safe) 장치로 구성된다. MIRO Calibration Switch Mechanism의 결함안전 장치는 궤도상에서 반사경 동작 중 예상치 못한 요인으로 반사경이 주광경로 상에서 정지되었을 때, 형상기억합금 와이어로의 전원인가로 구동력을 갖는 Pinpuller를 작동시켜 반사경의 구동을 위한 모터축과 반사경의 구속을 해제하고, 이와 동시에 복원 스프링의 복원력으로 반사경을 자동으로 수납하는 기능을 갖는다. MIRO Calibration Switch Mechanism에 적용된 결함안전 구동장치의 경우, Pinpuller 작동을 위한 별도의 기능이 반사경 제어용 전자유닛에 추가 되어야 하며 전자유닛의 결함발생 시에는 Pinpuller로의 전원인가 불능으로 결함안전 기능을 적용할 수 없게 된다. Pinpuller와 같은 별도의 액츄에이터를 활용하는 결함안전 장치는 시스템의 복잡화를 비롯해 결함안전장치 제어용 전자유닛의 신뢰도 확보를 위한 별도의 개발비용증가 등의 단점을 갖는다.

상기의 결함안전장치가 갖는 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 반사경 운용 중 예상치 못한 결함이 발생하여 반사경이 주 광경로 상에 정지되었을 때에 구동장치로의 전원차단만으로도 자동으로 반사경이 수납될 수 있도록 하는 결함안전 기능을 적용한 교정 반사경 구동장치를 제안하였다. 본 구동장치는 MIRO Calibration Switch Mechanism에서 적용한 Pinpuller 등의 액츄에이터 없이도 결함안전기능 구현이 가능하며, 교정 반사경 제어를 위한 전자유닛의 결함발생 시에도 반사경을 자동으로 주광경로와 이격된 위치로 수납 가능한 장점을 갖는다. 본 논문에서는 상기의 기능구현을 위한 구동장치의 구성요소 제안 및 각 구성요소의 최적화된 파라미터를 추출하였으며 기능구현 검증을 위해 실시된 구동시험을 통해 결함안전 기능을 갖는 교정 반사경 구동장치 설계의 타당성을 입증하였다.

II. 본 론

2.1 MIRO Calibration Switch Mechanism

Fig. 1은 우주용 영상센서의 교정을 목적으로 하는 MIRO Calibration Switch Mechanism [1]의 형상을 나타낸다. MIRO Calibration Switch Mechanism은 반사경 구동을 위한 기어형 스텝모터, 축의 공차 영향을 최소화하고 모터의 회전력을 전달하기 위한 커플링, 반사경 회전방향으로의 가이드 역할을 하는 볼베어링, 결함발생으

Fig. 1. MIRO Calibration Switch Mechanism

로 인한 주광경로 차단 방지를 위한 Pinpuller와 복원스프링(Return Spring)으로 이루어진 결함안전 장치, 반사경의 위치 정보 획득을 위한 적외선 근접센서(Reflective Object Sensors) 등으로 구성된다. 상기의 메커니즘은 교정임무 수행 시 반사경을 Fig. 1 (B), (C)의 전개위치로 구동하여 두 개의 상이한 온도 타겟을 지향하도록 하며, 교정임무종료 후에는 (A)의 안전위치로 반사경을 구동하여 수납한다. 반사경 구동을 위한 스텝모터의 회전력은 커플링, Pinpuller, 반사경 순으로 전달되며, 결함안전장치는 Pinpuller를 작동시켜 Pinpuller와 반사경 사이의 구속을 해제함과 동시에 복원스프링의 복원력으로 반사경을 (A)의 안전위치로 자동수납 시키는 것으로 동작된다. 반사경의 위치정보 획득을 위한 적외선 근접센서(Reflective Object Sensors)는 안전위치(A) 및 전개위치(B), (C)에 장착되었으며 발사하중 및 메커니즘 운영 중 발생하는 외란의 영향을 최소화하기 위한 평형추는 반사경 및 Pinpuller에 적용되었다.

상기 결함안전장치는 Pinpuller 및 Pinpuller 작동을 위한 전자유닛의 추가로 인해 시스템의 복잡화를 비롯해 Pinpuller 및 전자유닛의 신뢰도 확보를 위한 별도의 개발비용 증가 등의 단점을 갖는다. 적외선 근접센서의 경우, 반사경의 접근 인지를 위한 반사면의 Reflectance 및 주변온도, 구동전류의 크기 등에 따른 응답특성 변화로 최대 5°의 측정오차를 가지고 있어 정밀한 위치 정확도를 요구하는 메커니즘에는 적용할 수 없는 단점이 있다.

2.2 교정 반사경 구동장치의 개요

2.2.1 교정 반사경 구동장치를 적용한 영상시스템의 구성

Fig. 2는 영상센서의 비균일 출력특성 교정을 위한 교정 반사경 구동장치 및 흑체를 포함한 영

Fig. 2. Image Acquisition Mode(a) and Calibration Mode(b) of System

상시스템의 구성 및 기능을 나타낸다. 영상시스템은 타겟의 이미지 획득을 위한 영상센서(Imaging Sensor), 교정임무 시 흑체를 지향하기 위한 교정 반사경 구동장치(Calibration Mirror Mechanism)와 균일한 교정온도정보 제공을 위한 흑체(Black Body)[2-3]로 구성된다. Fig. 2의 (a)는 영상센서가 영상을 획득할 때의 형상으로 교정 반사경 구동장치는 수납상태로 유지하여 주광경로(Main Optical Path)를 교란시키지 않도록 하며, (b)는 영상센서의 비균일 출력특성 교정을 위해 흑체의 교정온도정보를 획득할 때의 형상으로 교정 반사경 구동장치를 전개위치로 구동하여 영상센서의 광경로가 흑체를 지향하도록 한다. 본 영상시스템에 적용되는 교정 반사경 구동장치는 스텝모터에 인가되는 전원을 차단함으로써 동작되는 Passive형 결함안전(Fail-Safe) 기능, 교정 시 흑체의 중심을 지향하기 $\pm 0.35^\circ$ 의 전개각, 교정 후 주광경로(Main Optical Path)를 교란하지 않기 위한 $< 2.6^\circ$ 의 수납각(Safe Stow Angle)을 갖도록 한다.

2.2.2 교정 반사경 구동장치 모델

MIRO Calibration Switch Mechanism은 결함안전장치의 동작방법 및 근접센서의 위치정확도 단점으로 인해 상기의 영상시스템에 적용이 불가하다. Fig. 3은 기존 메커니즘의 단점을 보완하여 목표 영상시스템에 적합하도록 구성된 1자유도

Fig. 3. 1-DOF Model

모델로 직구동 스텝모터와 복원스프링을 적용한 Passive 방식의 결함안전장치 및 위치정확도 향상을 위한 접촉식 마이크로스위치를 갖는다. 본 1자유도 모델의 결함안전장치는 스텝모터로 인가되는 전원을 차단함과 동시에 복원스프링의 복원력으로 반사경을 수납함으로써 동작되며 별도의 제어를 위한 전자유닛을 필요로 하지 않는다. 접촉식 마이크로스위치는 기계적 접촉으로 동작하는 센서로 주변온도 및 전류의 영향을 받지 않고 높은 반복정확도를 갖는다.

Passive형 결함안전 기능을 갖는 상기의 1자유도 모델은 반사경의 질량 M , 반사경의 구동각도 θ_1 ($0^\circ \leq \theta_1 \leq 23^\circ$), 복원스프링의 Pre-torsion 각도 θ_2 , 구동축에서부터 마이크로스위치의 동작점까지의 거리 l_1 , 마이크로스위치의 동작거리 l_2 , 복원스프링의 강성 k_1 , 마이크로스위치의 강성 k_2 , 결함안전 기능 구현시 반사경을 자동수납하기 위한 복원스프링의 복원토크 T_r , 반사경의 위치정보 획득을 위한 마이크로스위치의 동작토크 T_s , 회전력 제공을 위한 직구동 스텝모터의 구동토크 T_m , 무여자 상태의 스텝모터에서 발생하는 무여자 토크(Detent Torque) T_d 의 설계인자로 구성된다. 1자유도 모델에 적용된 복원스프링은 기존의 MIRO Calibration Switch Mechanism에 사용된 스프링과는 달리 스프링의 역할과 동시에 베어링의 역할을 하는 Flex-pivot 베어링이므로 반사경 회전방향으로의 가이드 역할을 하기위해 축의 양단에 2개를 장착한다. 마이크로스위치는 신뢰성을 확보하기 위한 Active Redundancy 개념을 적용하여 하단부 및 상단부에 각 2개씩 장착한다.

2.2.3 설계인자 최적화 설계

상기 1자유도 모델의 설계인자 최적화는 구현 가능한 하드웨어를 바탕으로 하며 ECSS-E-ST-33-

01C [4]에 따라 스텝모터의 구동토크 T_m 은 다음의 수식 (1)을 만족하여야 한다.

$$T_m > 2(1.2T_r + 1.2T_s + 1.2T_{acc}) \quad (1)$$

각 설계인자의 계수 1.2는 측정오차 마진, 상수 2는 구동토크의 안전 마진이다. T_{acc} 는 구동시간(10sec) 내에 반사경을 전개 및 수납시키기 위한 최대 가속도 토크로 0.003Nm의 값을 가진다. T_s 는 반사경의 위치정보 획득을 위한 마이크로 스위치의 동작토크이며 Honeywell사의 마이크로 스위치 17HM5를 적용하여 동작토크 측정시험을 수행하였다. 17HM5는 0.34mm의 동작거리(ℓ_2), 4000N/m의 강성(k_2)을 가지며 모터의 구동축으로부터 20mm의 거리(ℓ_1)에 장착되어 있으므로 $T_s = 2k_2\ell_2\ell_1 = 0.0544\text{Nm}$ 의 값을 가진다. T_r 은 결함안전 기능 구현시 반사경을 자동수납하기 위한 복원스프링의 복원토크로서 무여자 상태의 스텝모터에서 발생하는 무여자 토크 T_d 보다 큰 값을 가져야한다. 무여자 상태에서 $T_r > T_d$ 을 만족하고 반사경 구동 시에는 수식 (1)을 만족하는 구현 가능한 복원스프링과 스텝모터의 조합은 C-Flex사의 Flex-pivot Bearing(H-10)와 세한전자의 S56Q-08254S이다. 200Step/Rev의 스텝각을 가지는 스텝모터 S56Q-08254S의 구동토크 T_m 은 0.737Nm(@100Hz)이며 무여자 상태의 무여자 토크 T_d 는 0.029Nm이다. 복원스프링 H-10은 0.003344Nm/Degree의 강성 k_1 을 가지며 1자유도 모델에 적용시 $\theta_2 = 6^\circ$ 의 Pre-torsion을 주어 구동각도 θ_1 에 상관없이 T_d 보다 항상 큰 0.04Nm의 복원력을 갖도록 한다. 복원스프링의 복원력 T_r 은 $\theta_1 = 23^\circ$ 인 전개위치에서는 최대값 0.194Nm을 가지며 이 값을 수식 (1)에 적용하면 스텝모터의 구동토크 T_m 이 우변의 필요토크 0.603Nm보다 큰 값을 가짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 구현 가능한 하드웨어를 바탕으로 설계인자를 최적화한 1자유도 모델의 토크관계를 나타낸다. Fig. 4 (a)는 영상센서의 교정을 위해 교정 반사경 구동장치에 전원을 인가하였을 경우의 구동각도 θ_1 에 따른 모터의 구동토크 T_m (Running Torque) 및 구동에 반하는 토크의 합 $T_r + T_s + T_{acc}$ 를 나타내며 Fig. 4 (b)는 교정임무를 수행하지 않는 경우의 θ_1 에 따른 복원스프링의 복원토크 T_r , 무여자 토크 T_d , 마이크로스위치 토크와 무여자 토크의 합 $T_s + T_d$ 의 관계를 나타낸다.

Fig. 4. Torque Relationship during the Calibration(a) and the Non-calibration(b)

상기의 영상시스템에 적용하기 위한 1자유도 모델은 Fig. 4와 같이 교정임무 수행시 반사경 구동을 위해 충분한 구동토크를 가지며 결함발생시 무여자 상태에서 복원스프링의 복원력이 스텝모터의 무여자 토크보다 항상 크도록 하여 Passive 형태의 결함안전 기능을 갖도록 하였다. 1자유도 모델에 위치정보 획득을 위해 주변온도 및 구동전류에 영향을 받지 않는 접촉식 마이크로 스위치를 적용하고 스텝모터 구동을 위한 전자 유닛에 1/8 Micro Stepping Function을 적용하여 교정시 흑체를 지향하기 위한 위치정확도를 갖도록 하였다. 무여자 상태의 토크관계에서 $T_s + T_d$ 와 T_r 과의 토크평형점이 $\theta_1 = 0.79^\circ$ 에서 형성되므로 상기의 1자유도 모델은 수납상태에서 주 광경로를 교란하지 않음을 확인 할 수 있다.

2.3 교정 반사경 구동장치의 구성

Fig. 5는 Fig. 3의 1자유도 모델의 각 구성요소의 설계인자 최적화로부터 교정임무 수행이 가능하고 위급시 결함안전기능을 갖는 교정 반사경 구동장치의 구성을 나타낸다. 스텝모터(Step Motor)는 베이스프레임(Base Frame) 상단에 장착되며 반사경 지지프레임(Mirror Support Frame)의 일단과 연결되어 모터의 회전력을 교정 반사경(Calibration Mirror) 및 반사경 지지프레임으로 전달한다. 베어링과 스프링의 역할을 수행하는 복원스프링(Return Spring)은 스텝모터의 회전축의 좌우에 장착되며 일단에는 베이스프레임 타단에는 반사경 지지프레임과 연결된다. 반사경의 전개 또는 수납 위치정보를 획득하기 위한 마이크로 스위치(Micro Switch)가 Active Redundancy 개념에 의해 하단부 및 상단부 총 4개가 장착되어 있다. 발사환경에서 교정 반사경 구동장치의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 SMA(Shape Memory Alloy)로 구동되는 구속장치를 적용하여 수직방향의 구조적 안전성을 확보하였으며, Ball&Socket 구조를 적용하여 수평방향의 구조적 안전성을 확보 하였다.

교정 반사경 구동장치는 교정임무 수행 시 반사경을 주광경로 상에 위치시키기 위한 전개모드(Deploy Mode), 교정 반사경을 수납위치로 구동하는 수납모드(Stow Mode), 비상시 반사경을 자동수납하기 위한 비상모드(Emergency Mode)의 세 가지 모드에서 동작한다. 전개모드에서 교정 반사경 구동장치는 Fig. 6 (a)와 같이 반사경을 전개위치(23°)로 구동하여 140초 동안 전개위치를 유지하며, 수납모드에서 Fig. 6 (b)와 같이 반사경을 수납시킨다. 비상모드에서 위급시 스텝모터로 인가되는 전원을 차단함과 동시에 복원스프링의 복원력으로 결함안전기능을 수행하여 Fig. 6 (b)와 같은 형상으로 반사경을 자동수납한다.

Fig. 5. Calibration Mirror Mechanism

Fig. 6. Deploy Mode(a) and Stow Mode(b)

2.4 교정 반사경 구동장치 기능 및 성능시험

Fig. 7은 교정 반사경 구동장치의 전개/수납 기능 및 결함안전 기능을 확인하기 위한 시험 구성을 나타낸다. 시험 실시를 위한 구성은 교정 반사경 구동장치, 전원장치, 스텝모터 운영 컴퓨터, 마이크로 스위치 신호 확인을 위한 오실로스코프, 각도측정을 위한 Theodolite로 이루어지며 시험은 스텝모터 운영 컴퓨터로 교정 반사경 구동장치를 전개/수납 구동하여 상/하단부 마이크로 스위치의 신호 확인 및 Theodolite로 전개/수납각을 측정함으로써 이루어진다. 교정 반사경 구동장치는 교정임무 수행 후 전원이 차단된 상태로 다음의 임무 때까지 대기하므로 모터의 전개/수납 구동 후 모터로의 전원을 차단시켜 수납각을 측정한다. 교정 반사경 구동장치의 결함안전 기능은 운영 컴퓨터로 반사경을 전개시킨 후 모터로 인가되는 전원을 차단함으로써 동작을 확인하며 이때의 수납각을 측정한다.

시험결과, 교정 반사경 구동장치는 수납, 전개, 비상모드 동작이 모두 정상적으로 이루어졌으며 전개 및 수납의 구동시간은 최대 4.09sec로 구동

Fig. 7. Functional Test Set-up Configuration

Fig. 8. Measured Deploy Angle (a)
Measured Stow Angle (b)

요구시간 10sec를 만족한다. Fig. 8은 Theodolite를 통해 획득한 전개각 및 수납각을 나타낸다. Fig. 8 (a)의 전개각은 $23^{\circ} \pm 0.12^{\circ}$ 내에 위치하여 흑체를 지향하기 위한 전개각 $23^{\circ} \pm 0.35^{\circ}$ 을 만족하며, (b)의 수납각은 최대 0.894° 로 주광경로를 교란하지 않는 수납각 $< 2.6^{\circ}$ 를 만족한다. Fig. 8 (b)의 수납각도는 각각 수납모드로 동작하여 측정된 값

($< 0.0016^{\circ}$), 수납모드로 동작한 후 모터의 전원을 차단하여 측정된 값($< 0.582^{\circ}$), 비상모드의 결함안전 기능으로 자동수납 한 후 측정된 값($< 0.894^{\circ}$)이다. 각 모드에서 보이는 수납각의 차이는 스텝모터의 전원 유무, 전원 차단시의 반사경 전개각, 무여자 토크의 작용점 변화 및 마찰토크의 영향으로 인하여 발생한다.

III. 결 론

본 논문은 MIRO Calibration Switch Mechanism의 결함안전장치 및 전자유닛의 신뢰도 확보 문제 및 개발비용의 증가, 부정확한 위치정확도 등의 단점을 극복하기 위해 스텝모터로의 전원차단만으로 동작되는 Passive형 결함안전 기능을 구현하고 정밀한 위치정확도를 갖는 교정 반사경 구동장치를 제안하였다. 1자유도 모델로부터 설계인자를 추출하고 구현 가능한 하드웨어를 바탕으로 최적화된 교정 반사경 구동장치의 기능 및 성능시험을 통해 전개/수납 기능 및 결함안전 기능의 유효성을 입증하였다.

참고문헌

- 1) Suchman, J., Salinas, Y., and Kubo, H., "MIRO Calibration Switch Mechanism", 35th Aerospace Mechanisms Symposium, 2001.
- 2) Xiong, X., Chiang, K., Esposito, J., Guenther, B., and Barnes, B., "MODIS on-orbit calibration and characterization", *Metrologia*, Vol. 40, No. 1, 2003, pp. S89-S92.
- 3) 오현웅, 신소민, 홍주성, 이민규 "영상센서의 비균일 출력특성 교정용 흑체의 열설계 및 궤도 열해석", 한국항공우주학회지, 제38권 제10호, 2010년 10월, pp. 1020-1025.
- 4) European Cooperation for Space Standardization (ECSS-E-ST-33-01C): Mechanism, Mar. 6, 2009.