

주간 별 센서 관측 모델 개발 및 중심찾기 성능 분석

나자경, 이 유[†], 김용하
충남대학교 천문우주과학과

DEVELOPMENT OF DAYTIME OBSERVATION MODEL FOR STAR SENSOR AND CENTROIDING PERFORMANCE ANALYSIS

Jakyoung Nah, Yu Yi[†], and Yong Ha Kim

Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

E-mail: jkna@cnu.ac.kr

(Received March 8, 2005; Accepted June 1, 2005)

요 약

주간에 활용될 수 있는 별 센서의 성능을 알아보기 위해, 주간 별 센서 관측 모델을 개발하였다. 주간 동안 별 센서가 감지하게 될 별들에 대한 중심찾기 오차는 그 모델을 사용해서 계산되었다. 별 센서가 운용되는 주간 환경의 대기 물리량을 계산하기 위해 표준 대기 모델(LOWTRAN7)이 사용되었다. 주간 별 센서 관측 모델에는 별과 태양 사이의 다양한 분리각, 중심찾기 알고리즘, 그리고 별 센서의 다양한 시스템 특성이 고려되었다. 개발된 별 센서 모델은 벡터 관측을 통한 자세 결정 성능의 예측에 있어서 보다 현실적인 오차 정보를 제공하게 될 것이다.

ABSTRACT

A star sensor daytime observation model is developed in order to test the performance of the star sensor useful for daylight application. The centroid errors of the star sensor in the day time application are computed by using the model. The standard atmospheric model (LOWTRAN7) is utilized to calculate the physical quantities of the daylight atmospheric environments where the star sensor is immersed. This observation model takes the separation angles between the sun and star, the centroid algorithm and the various system specifications of the star sensor into the account. The developed star sensor model will provide more realistic measurement errors in estimating the performance of the attitude determination from the vector observations.

Keywords: star sensor, centroid error, daytime star sensor model

1. 서 론

별 센서는 관성 좌표계에서 별을 자세 인식의 대상으로 삼는 우주비행체의 자세 결정 장치로써 다른 자세 결정 장치와 비교하여 고정밀의 3축 자세 정보를 제공한다. 우주시대 초창기부터 활발히 연구되고 있는 별 센서는 현재 지상 또는 우주 관측을 위한 인공위성 분야에서 필수 부품이 되고 있

[†]corresponding author

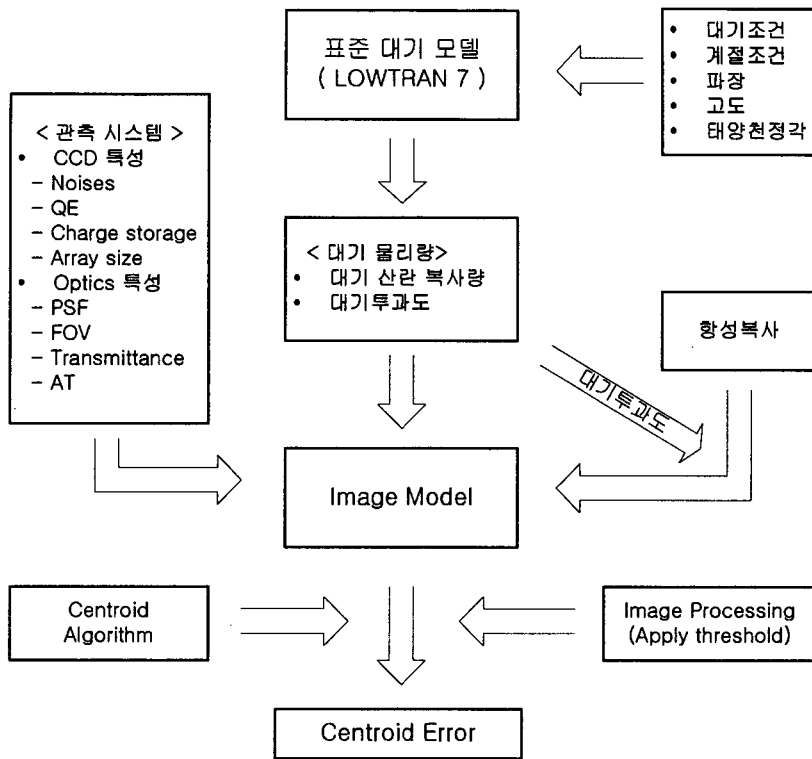


그림 1. 별 센서의 주간 별 관측 모델링 과정.

으며 그 활용이 증가하고 있다. 이와 더불어, 지상 항법용으로 별 센서를 이용하고자하는 관심 또한 증가하고 있으나 지상 항법의 특성상, 주간 운영 환경을 고려해야 하며 주간은 배경 복사가 매우 강한 환경이기 때문에 요구되는 정밀도를 얻기 위해 필요로 하는 별을 관측하기가 쉽지 않다.

실제로 주간 동안에 별을 관측한 경우로써, Sandven et al.(1995)의 연구가 있었다. 이 실험 관측에서는 1.6m 지상 망원경을 사용해서 3등급 정도의 별을 관측하고, 중심찾기(centroiding)를 실시하여 μrad 의 오차로 별을 추적하였다. 신호 대 잡음 비를 높이기 위한 방편으로 다양한 광학필터를 적용하였고, 대기 난류를 최소화하기 위해 적응광학 장치인 tip-tilt 거울시스템을 사용하였다. 별을 주간 항법의 수단으로 이용하기 위한 연구로는 Levine et al.(1990)의 연구가 있었다. 이 연구에서 Levine은 Northrop이 개발한 OWLS(Optical Wide-angle Lens Startracker)를 사용하는 주간 항성 항법의 가능성을 연구하였다. 이 OWLS 시스템은 항법을 위해 이전에 사용해왔던 김벌(gimbal)형태의 별 센서들과는 달리 구동장치가 없는 strapdown 형태를 갖고 있다. OWLS의 광학계는 빛을 선택적으로 집광할 수 있고, 충분한 별을 감지하기 위한 시야 확보를 위해 HOEs(Holographic Optical Elements)로 구성되어 있다. OWLS의 HOEs는 단일 구경으로 3개의 3° FOV(Field of View)를 갖는 광학계처럼 작용하며, 600 ~ 800nm의 관측 파장 대를 통해 5등급의 별을 관측하는 것을 목표로 하고 있다.

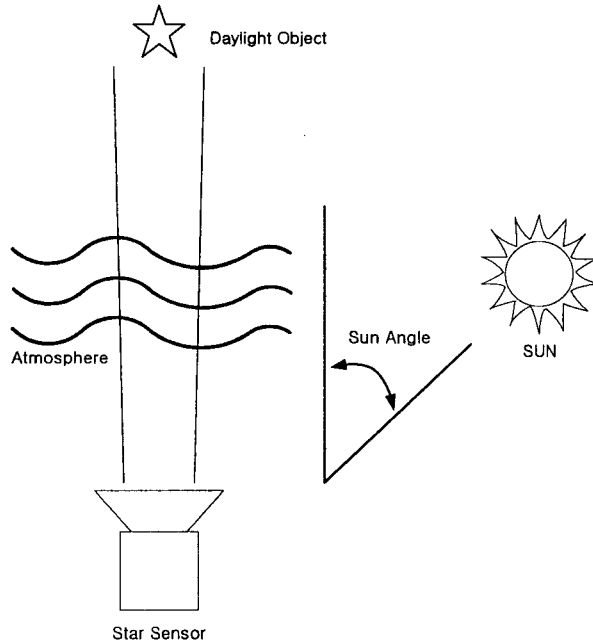


그림 2. 별 센서와 태양의 기하학적 배치.

본 연구에서는 주간 환경 동안에 운용되는 별 센서의 주간 관측 모델을 개발함으로써, 주어진 관측 환경과 관측 시스템 조건 변화에 따른 별 센서의 중심찾기 성능을 보다 자세히 알아보하고자 하였다. 별 벡터에 대한 관측으로부터 자세 결정 성능을 예측하는 대부분의 연구들을 보면, 별 벡터에 대한 측정 오차를 일정 크기로 가정해서 연구가 이루어지고 있다. 따라서 별 센서의 관측 모델로부터 얻어진 오차 정보를 활용하게 되면 보다 합리적인 비행체의 자세 결정 오차를 예측할 수 있게 된다. 주간 별 센서 모델링에 필요한 주간 대기 물리량들은 구하기 위해 표준 대기 모델인 LOWTRAN7을 이용하였으며 이 모델에는 고도, 태양과 별 센서의 다양한 기하학적 배치가 적용되었다. 대기 모델로부터 계산된 자료들은 별 센서 관측 모델의 기본 입력 값으로 사용되며 광학계의 특성, 별 센서의 감지센서로 사용되는 CCD의 잡음 특성, 그리고 센서의 전체 동작 특성을 고려한 시뮬레이션 과정을 거쳐 주간 환경에서 감지될 별 이미지들이 생성된다. 별 센서의 결상 특성과 잡음 특성에 의해 형성된 별 이미지에는 별의 위치를 정밀하게 결정할 수 있도록 하는 중심찾기 알고리즘이 적용된다. 이 과정은 Monte Carlo 방식으로 수행되었으며, 그림 1은 주간 별 센서 관측 모델에 대한 전체적인 모델링 과정을 나타낸다.

2. 주간 대기 물리량 계산

주간 환경 대기물리량의 계산을 위해 대기 표준 모델인 LOWTRAN7을 사용하였다. LOWTRAN7 프로그램은 대기 투과도, 대기 배경복사, 단일 산란 태양/달 복사, 직사하는 태양 휘도, 다중 산란 태양복사와 열적 복사를 계산할 수 있다. LOWTRAN7이 계산할 수 있는 고도 범위는 지

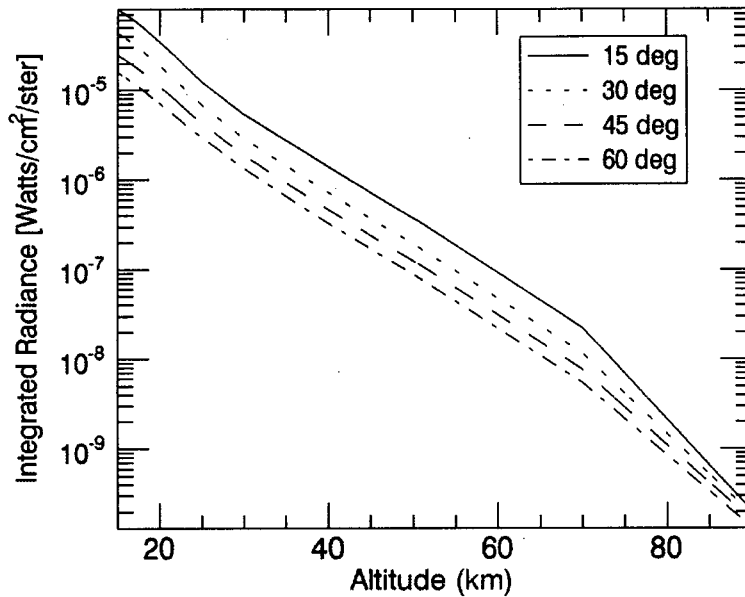


그림 3. 고도 및 태양 천정각에 따른 총 대기 복사(계절 조건: 가을(266일째), 관측 파장 대역 600 ~ 800nm).

상에서 100km까지이며 대기가 33개의 층을 이룬다고 가정하고 있다. 지상에서 25km까지 1km 간격, 25 ~ 50km 사이는 5km 간격, 50 ~ 70km 사이는 10km 간격 그리고 70 ~ 100km 사이는 하나의 층으로 해서 각 층을 나누고 있다. 모델의 분광 해상도는 파수로(full width at half maximum)이고, 범위는 0에서 $50,000\text{cm}^{-1}$ (파장으로 200nm에서 무한대)이다(Kneizys et al. 1992).

주간 별 센서 관측 모델을 구성하기 위해 요구되는 주요 대기특성은 각 고도별 대기 배경 복사와 대기 투과도이다. 대기 복사는 산란 복사이므로 산란 정도를 고려하게 되는데 주간에 활용될 별 센서의 경우는 고도가 높은 경우(여기서는 15km 이상)를 예상하는 것이므로 산란 광학 깊이가 큰 다중 산란의 경우는 필요하지 않다. 따라서 모델 계산에서는 태양 빛이 한번 산란되는 단일 산란을 적용하였다. 파장 선택성(filtering)을 고려하여 적용 파장 구간을 600 ~ 800nm로 설정하였다. 계절적 변화에 대한 고려는 각각 봄: 79일째, 여름: 173일째, 가을: 266일째, 겨울: 356일째로 설정하였다. 별 센서와 태양사이의 기하학적 배치는 그림 2와 같다. 별 센서는 천정을 향하고 주된 복사 광원인 태양의 천정각은 관측방향으로부터 15°, 30°, 45°, 60°씩 떨어져 있도록 하였다. 계산이 이루어지는 고도는 대류권을 벗어나는 고도 15km에서 90km(열권이하)로 국한하였다. 그 밖의 입력으로서 대기 시정 및 소광이 모델에 적용되었다.

LOWTRAN7을 이용하여 고도와 태양 천정각에 따른 총 대기 복사를 구한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3은 계절조건, 가을(266일째)에 대한 것으로써, 이 값들은 600 ~ 800nm 파장 구간의 총 에너지를 나타내며 단위는 $\text{Watts/cm}^2/\text{steradian}$ 이다. 그림 3에서 대기 복사가 고도가 높을수록, 태양 천정각이 클수록 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 시스템 평가를 위해서는 복사를 광자수로 변환하여 사용하는 것이 보다 용이하기 때문에 복사 에너지는 광자수로 변환되어 계산에 사용되어진다.

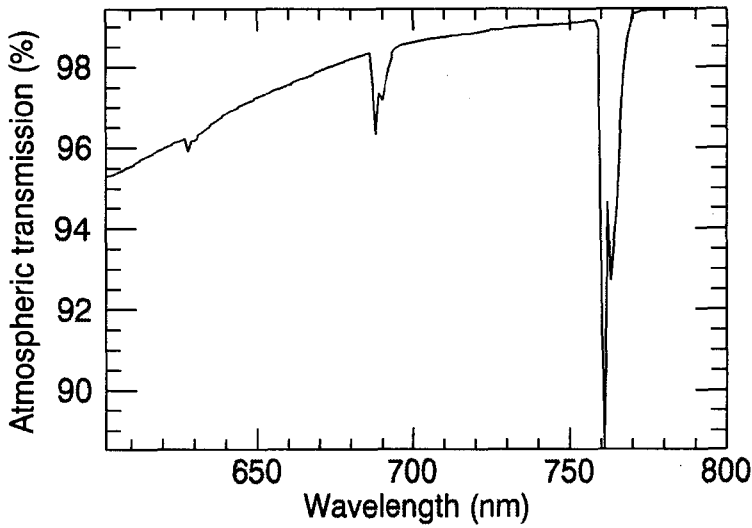


그림 4. 고도 15km에서의 대기 투과도(관측 파장 대역: 600 ~ 800nm).

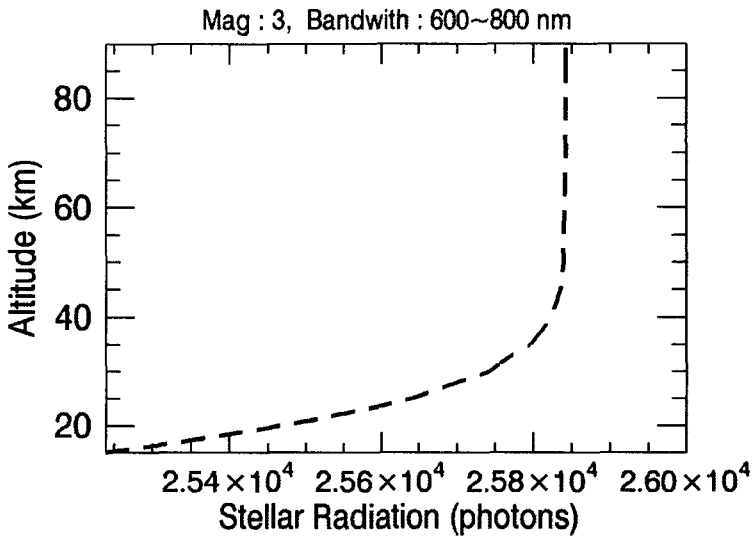


그림 5. 고도별 대기투과도를 적용한 3등급 별의 복사량(관측 파장 대역: 600 ~ 800nm).

LOWTRAN7에서 계산되는 또 다른 대기 물리량은 고도별 대기 투과도이며 이 대기 투과도는 고도가 높아질수록 파장이 길어질수록 높아지는 특성을 나타낸다. 그림 4는 고도 15km에서의 대기 투과도를 나타낸다. 대기 투과도는 주간 별 센서 모델에서 광원인 별의 복사에 적용된다. 그림 5는 3등급의 별에 고도별로 구한 대기 투과도를 적용한 결과로써 고도가 낮아질수록 대기가 불투명해지기

때문에 별로부터 발생한 복사도 고도가 낮아짐에 따라 조금씩 감소하게 된다.

3. 주간 별 센서 관측 모델

별 센서를 모델링하기 위해 관측 대상인 별과 관측 시스템인 별 센서의 특성이 고려되어야 한다. 모델링에서 표준성에 대한 복사는 별의 밝기에 따라 계산되어졌고, 관측 시스템의 특성으로서 광학계의 결상 능력과 CCD 및 전체 시스템의 잡음 특성이 포함되었다.

겉보기 등급 m 인 별로부터 발생한 복사는 $d\lambda$ 의 파장간격으로 투과효율 τ 이며 집광 면적, A 인 광학계에 의해 CCD 센서의 화소들 위에 결상되어 일정 수의 전자들을 생성시킨다. T 시간동안 집광된 별빛이 CCD에 결상되어 발생하는 전자의 수, N_e 는 다음 식과 같다(나자경 등 1999).

$$N_e = (hc)^{-1} \int \lambda \tau(\lambda) Q(\lambda) A T F_\lambda(0) \times 10^{-0.4m} d\lambda \quad (1)$$

여기서 $F_\lambda(0)$ 은 대기 밖, 0등급 표준성(분광형 A0)으로부터 나오는 에너지 플럭스이며 $Q(\lambda)$ 는 CCD 센서의 양자효율이다. 그리고 h 와 c 는 각각 Planck 상수와 광속을 나타낸다.

점광원인 별로부터 나온 빛은 이상적인 광학계일 경우, 초점면 상에 하나의 점상으로 나타난다. 그러나 실제로는 완전한 점상으로 결상되지 못하고 퍼져서 나타나며 이 퍼진 정도를 나타내는 함수가 점 퍼짐 함수(PSF, Point Spread Function)이다(Smith 1990). 별 센서의 모델링에서 이러한 별빛의 퍼짐 현상을 나타내기 위해 가우시안 패턴의 별빛 분포를 고려하였다. 가우시안 패턴으로 표현되는 점상의 크기를 광량의 약 85%가 집중되어 있는 에어리 원반(Airy disk)으로 나타낼 때, 두개의 화소에 걸쳐 점상이 형성되는 경우에 가장 좋은 별 중심찾기 성능을 보인다. 그러므로 점상을 나타내도록 가우시안 패턴을 설정할 때 이를 고려해야 한다.

별빛을 감지하는 CCD 센서에는 별빛의 광잡음을 포함한 내외부적인 영향으로 인한 다양한 잡음이 생성되며(Buil 1991), 모델링 과정에 발생하는 잡음들의 특성을 가능한 모두 고려해야 한다. 모델링에는 광잡음(Photon Noise), 화소간 반응감도의 비균일성, 암전류(Dark Current), 암전류의 비균일성, 읽기잡음(Readout Noise), 전하전달 비효율성(Charge Transfer Inefficiency), 그리고 계수화 잡음(Quantization Noise)이 잡음으로서 적용되었다. 그리고 이 잡음 특성 외에 필요에 따라, 이득(Gain)이나 문턱값(Threshold)이 적용된다.

잡음이 포함된 별 이미지가 형성되면, 이 이미지에 대해 별 중심찾기 알고리즘이 적용된다. 별 센서에서 사용되는 중심찾기 알고리즘은 매우 단순한 형태로서 3×3 또는 5×5 와 같은 화소 그룹을 형성한 후에 적용된다. 식 (2)는 일반적으로 사용되는 3×3 중심찾기 알고리즘이며, 5×5 중심찾기 알고리즘은 3×3 알고리즘의 단순한 확장이다(Stanton & Hill 1980).

$$x_c = A_1 \frac{S_{x3} - S_{x1}}{S} \quad y_c = A_2 \frac{S_{y3} - S_{y1}}{S} \quad (2)$$

$$S_{xj} = \sum_i I_{ij}, \quad S_{yi} = \sum_j I_{ij}, \quad S = \sum_{ij} I_{ij} \quad (3)$$

여기서 I_{ij} 는 화소(ij)의 신호 값이며 상수 A_1 과 A_2 는 형성되는 점상의 크기에 따라 결정되는 값이다. 이 중심찾기 알고리즘을 통해, 한 화소 내에서 내삽된 위치(X_c, Y_c)를 구하게 된다.

그림 6은 별 센서의 별 관측 모델링 과정을 나타낸다. 이 과정에 고도, 별 센서와 태양의 기하학

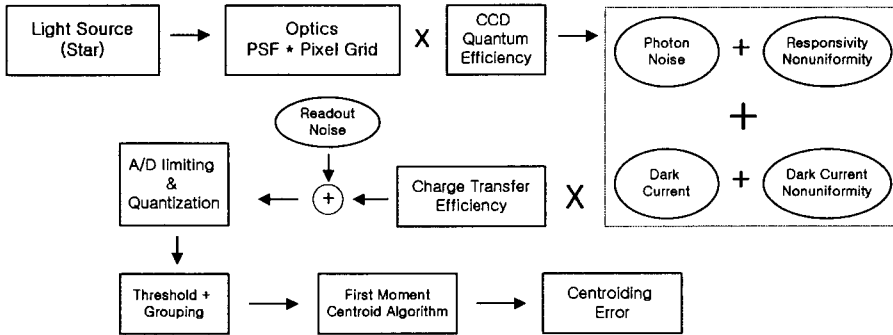


그림 6. 별 센서의 별 관측 모델링 과정.

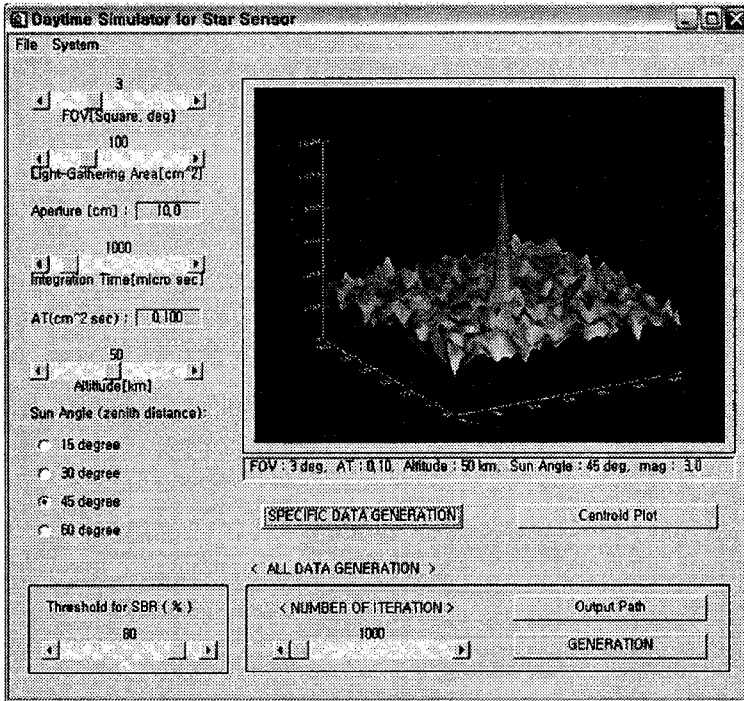


그림 7. 개발된 주간 별 센서 관측 모델 프로그램.

적 배치를 고려해서 구한 대기 물리량이 추가적으로 적용된다. 그림 7은 개발된 주간 별 센서 관측 모델 프로그램을 나타내며 프로그램의 특징은 표 1과 같다.

프로그램에 설정된 CCD 센서 특성들은 E2V Technologies사의 CCD47-20 AIMO의 자료를 기본값으로 하고 있으며(E2V Technologies 2005), CCD 파라미터 설정 기능을 통해 다양한 CCD 특성들을 적용할 수 있다. 광학계의 특성 또한 광학계 파라미터 설정 기능을 통해 PSF와 투과도 등을 변화

표 1. 주간 별 센서 관측 모델 프로그램의 특징.

구분	내용
사용언어	IDL(Interactive Data Language) 6.0
기능	다양한 시스템 환경 설정에 의한 별 센서의 중심찾기 성능 분석
입력	- 대기 모델로부터 구한 대기물리량 - CCD 특성: CCD의 잡음 특성들, 전하 저장능력, 양자효율 등 - 광학계 특성: 집광능력, 투과도, FOV, PSF - 기타: 별 센서 집광시간
출력	주어진 주간 시스템 조건에 대한 별 센서의 중심찾기 오차

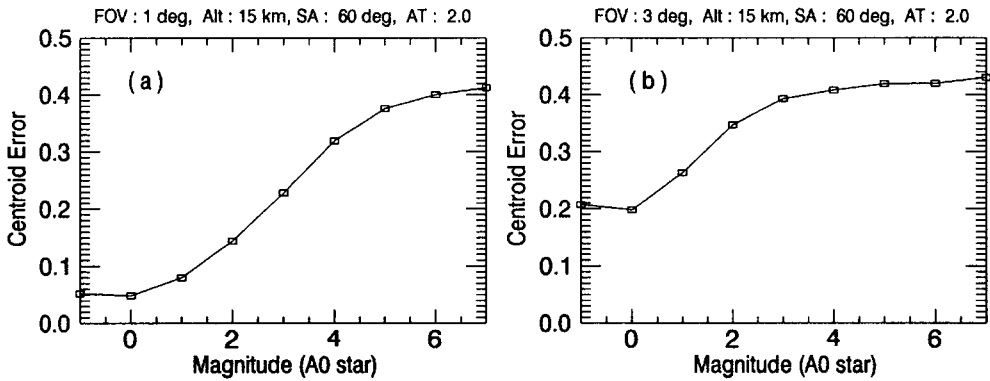


그림 8. 고도 15km에서의 FOV, 1°와 3°에 대한 중심찾기 오차. SA: 태양 분리각, AT: 별 센서의 집광인자($A \times T$, $cm^2 \times sec$).

시킬 수 있다. 현재 대기 자료는 파장 구간 600 ~ 800nm에서 얻어진 자료로 한정되어 있으나 새로운 자료 생성을 통해서 임의 파장 구간에 대해서도 모델링이 가능하다.

4. 시뮬레이션 결과

별 센서 관측 모델을 통해 다양한 내외부 조건을 변화시킴으로써 별 센서의 중심찾기 성능을 예측할 수 있다. 먼저, FOV의 영향을 알아보기 위해서 고도 15km에서 공통조건으로 $AT(A \times T, cm^2 \times sec) = 2$, 태양 천정각, SA(Sun Angle) = 60°, 90%의 대기 배경 복사 문턱값(Threshold)을 적용한 후, 각각 FOV, 1°와 3°에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 결과는 그림 8과 같다. 그림에서 세로축은 중심찾기 오차로써 화소 내에 위치한 별 중심과의 표준 편차를 나타내며 단위는 화소 단위이다. 그림 8의 결과에서 배경 복사는 점 광원인 별과는 달리 고려되는 FOV의 크기에 영향을 받기 때문에 FOV의 증가에 따라 배경 복사가 증가하게 된다. 배경 복사의 증가는 신호 대 잡음 비를 감소시키기 때문에 별 센서의 FOV, 1°인 경우가 밝은 별에 대해 비교적 작은 중심찾기 오차를 나타내었다. 그러므로 별 감지 가능성을 높이고 중심찾기 성능을 향상시키기 위해서는 주간 별 센서의 FOV를 가능한 작게 설정해야 한다. 그러나 별 센서의 FOV를 정할 때, 반드시 인식에 요구되는 별의 밝기와 그 밝기를 갖는 별이 정해진 FOV에 충분한 수로 관측 될 수 있는지를 고려해야 한다. OWLS

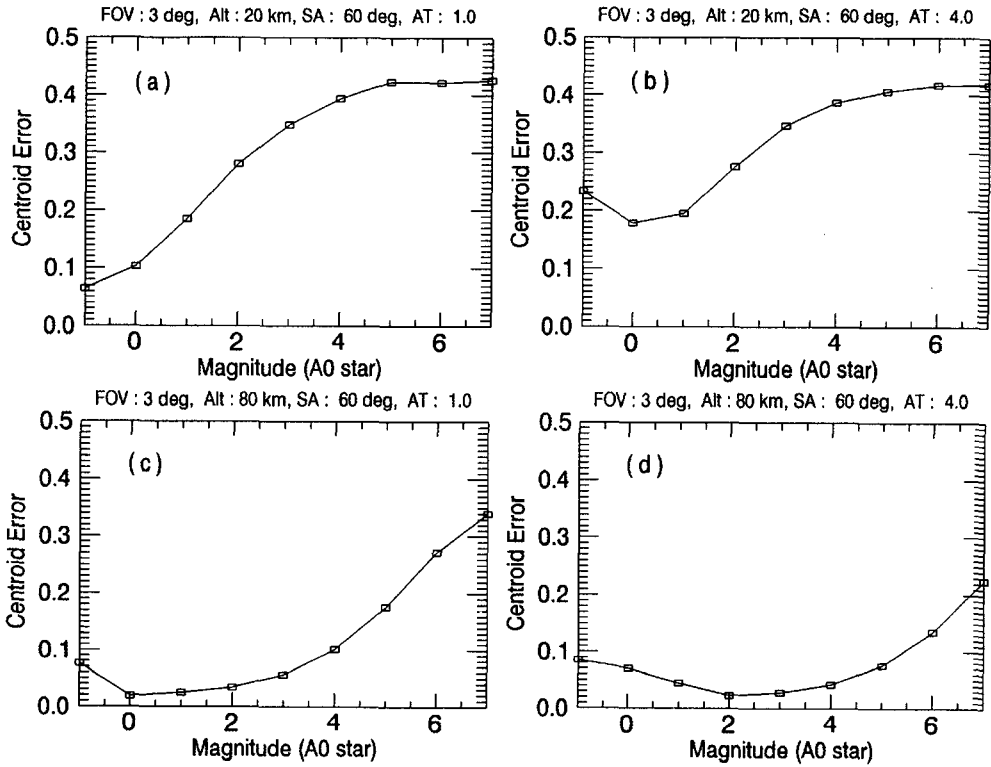


그림 9. 고도(20km, 8km)와 집광인자 AT(1.0, 4.0)에 대한 중심찾기 오차. SA: 태양 분리각, AT: 별 센서의 집광인자($A \times T$, $cm^2 \times sec$).

의 HOEs 경우, 이 광학계는 단일 구경의 광학계가 FOV, 3°를 갖는 3개의 광학계처럼 작용하며, 비행체의 운동 효과를 고려할 때 두 배의 FOV 증가 효과를 얻을 수 있도록 되어 있다. 만일, OWLS의 HOEs와 같은 광학계를 사용하지는 못하더라도 FOV, 3°를 갖는 3개의 광학계를 사용하면서, 비행체의 운동 효과를 적용한다면 동일한 별의 수를 이용할 수 있을 것이다. 이 경우에 대해 관측할 수 있는 최소 별의 개수를 계산해 보면, 5등급의 별에 대해 약 2개 정도의 별이 관측될 수 있다. 2개의 별은 별 센서를 이용한 자세 결정에 있어서, 요구되는 최소한의 수이다. 따라서 5등급의 별을 자세 결정에 이용할 경우, 별의 확보를 위해 별 센서 시스템의 FOV는 3° 이하로 설정해서는 안 된다.

배경 복사는 FOV의 크기 이외에도 고도, 별 센서와 태양 사이의 각거리에 따라 그 양이 변하며, 별 센서의 성능도 그에 따라 영향을 받게 된다. 고도와 집광 조건에 대한 영향을 알아보기 위해, 집광인자 AT의 값을 각각, 1과 4가 되도록 설정하고 고도 20km와 고도 80km에서의 중심찾기 오차 성능을 모델로부터 구하였다. 그림 9는 구한 결과를 나타낸다. 그림 9를 살펴보면 집광인자 AT의 영향은 낮은 고도인 20km에서 보다 높은 고도인 80km에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 고도 20km에서 두 집광인자 사이의 중심찾기 오차의 차이는 거의 없지만, AT = 4 경우에 있어서 집광력이 커짐에 따라 밝은 별에 대해 감지센서의 포화가 발생하고 이로 인해 중심찾기 성능이 저하되는 것을 볼 수 있

다. 고도 80km에 대한 경우, 대기 복사의 감소로 중심찾기 성능이 크게 향상된 것을 볼 수 있으며, 집광력이 커짐에 따라 밝은 별에 대해 센서 포화에 중심찾기 오차가 증가되는 것이 나타나지만 어두운 별에 대해서는 중심찾기 오차가 감소되는 것을 볼 수 있다. 모델링을 통해 고도가 높아질수록 별 센서의 중심찾기 성능이 야간 활용 별 센서의 성능을 갖는 것을 볼 수 있으며, 이 밖의 다양한 운영 환경과 시스템 조건에 대한 주간 별 센서의 중심찾기 성능 평가도 별 센서 관측 모델을 이용함으로써 가능하다.

5. 결 론

주간 활용 별 센서의 동작을 모사하는 별 센서 주간 관측 모델을 개발하였다. 주간 관측 모델에서 주간 대기 환경을 구현하기 위해 사용되는 주간 대기 물리량들은 표준 대기 모델을 사용해서 다양한 기하학적 배치와 고도에 따라 구해졌다. 구해진 대기 자료들은 잡음을 포함하는 별 센서의 동작 모델에 적용되었으며, 중심찾기 알고리즘을 이용하여 별의 밝기에 따른 중심찾기 오차를 구하였다. 개발된 별 센서 관측 모델은 별 센서를 개발하기 앞서, 요구되는 별 센서의 중심찾기 오차 성능을 만족하는 시스템 조건을 결정할 수 있도록 도움을 줄 수 있으며, 역으로 시스템 조건이 결정된 상황에서는 별 센서의 중심찾기 오차 성능을 예측할 수 있도록 한다. 개발된 주간 관측 모델을 이용하여 별 센서의 FOV, 고도, 별 센서의 집광능력에 따른 중심찾기 오차 특성을 구하였다. 이 결과는 제한된 시스템 조건에 대해 얻어진 것이었으나 오차 성능의 흐름을 파악할 수 있었으며, 앞으로 다양한 조건에 대해 모델링을 수행하여 별 센서의 성능 특성을 보다 상세하게 예측할 수 있을 것이다. 그리고 개발된 모델은 지금까지 별 관측 오차를 가정하여 자세 결정 성능 예측을 수행해 온 연구들에 대해 별 센서 시스템 차원에서 얻어진 별 관측 오차를 제공함으로써 보다 실제적인 자세 예측 평가를 가능하게 할 것이다.

감사의 글: 본 연구는 과학재단 국제공동연구(F01-2003-000-00186-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 나자경, 김용하, 이유 1999, 한국우주과학회지, 16, 273
- Buil, C. 1991, CCD astronomy (Virginia: Willmann-Bell Inc.)
- E2V Technologies 2005, CCD47-20 AIMO Data sheet, <http://www.eev.com>
- Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Anderson, G. P., Abreu, L. W., Chetwynd, J. H., Selby, J. E. A., Clough, S. A., & Gallery, W. O. 1988, Users Guide to LOWTRAN7, AFGL-TR-88-0177
- Levine, S., Dennis, R., & Bachman, K. L. 1990, Journal of The Institute of Navigation, 37, 347
- Sandven, S. C., Browne, S. L., & Dayton, D. C. 1995, Proc. SPIE, 2468, 246
- Smith, W. J. 1990, Modern Optical Engineering (New York: McGraw Hill Inc.)
- Stanton, R. H., & Hill, R. E. 1980, J. Guidance and Control, 3, 179