

아리랑위성 2호 영상촬영계획 궤도예측 정밀도 분석

정옥철*, 김해동**, 정대원***

Analysis on the Orbit Prediction Accuracy of the Image Collection Planning for KOMPSAT-2

Ok-Chul Jung*, Hae-Dong Kim**, Dae-Won Chung***

Abstract

In order to acquire the images requested by users, it is very important to calculate mission schedule parameters such as imaging execution time and attitude tilt angle accurately. These parameters are based on orbit prediction. This paper describes the accuracy of orbit propagation for image planning. The orbit prediction data from PSS and MAPS has a certain discrepancy due to different orbit propagator. It is necessary for mission planner to confirm this value during mission planning phase. The pointing error which means the difference between target center and real image received is calculated and analyzed using KOMPSAT-2 image data.

초 록

본 논문에서는 아리랑위성 2호의 영상촬영 계획 절차를 살펴보고, 각 단계에서 발생할 수 있는 궤도예측 오차를 분석하였다. 이를 위해 영상촬영 계획을 수립하는 PSS와 명령계획을 작성하는 MAPS에서 각각 계산된 자세정보를 상호 비교하여 궤도예측 오차의 원인을 규명하였다. 또한, 아리랑위성 2호의 실제 영상자료를 이용하여 촬영된 영상의 중심점과 미리 계획된 목표지점 사이의 이탈거리인 촬영 지향오차를 계산하였다. 영상촬영 계획은 실제 촬영일보다 이전에 수행되어 궤도예측 오차를 어느 정도 포함하게 되므로, 영상촬영 계획 시 일정한 Margin을 적용해야 할 것으로 판단된다.

키워드 : 영상촬영계획(Image Collection Planning), 궤도예측(Orbit Prediction), 지향 오차(Pointing Error), 궤도 전파기(Orbit Propagator)

1. 서 론

2006년 7월 28일 러시아 플레세츠크 발사장에서 성공적으로 발사된 아리랑 2호(KOMPSAT-2)

는 MSC(Multi-Spectral Camera)를 탑재하여 매우 정밀한 영상정보를 제공하고 있다. MSC는 Push-Broom 스캔 센서 형태로 1-m 급의 흑백(Panchromatic) 및 4-m 급의 컬러(Multi-Spectral) 영상 데이터를 수집한다. 위성이 정해진 시간에

접수일(2007년 10월 4일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 위성관제팀/ocjung@kari.re.kr

** 위성관제팀/haedkim@kari.re.kr

*** 위성관제팀/dwchung@kari.re.kr

영상을 획득하기 위해서는 촬영계획-임무계획-명령변환 및 명령전송 등의 일련의 과정을 거쳐야 한다. 한국항공우주연구원 지상국(KARI Ground Station)에서는 PSS(Pass Scheduling Subsystem)를 이용하여 영상촬영 계획을 수립하고, MAPS(Mission Analysis & Planning System)에서 정밀한 궤도예측 데이터를 이용하여 재계산한 후 최종적인 영상촬영 계획을 위성 임무에 반영하게 된다. 아리랑위성 2호의 영상 촬영폭(Swath)이 15km 인 점을 고려할 때, 영상촬영을 계획하는 과정에서 발생하는 오차는 최악의 경우 원래 계획했던 지역의 영상을 획득하지 못하는 결과를 초래할 수도 있다. 본 논문에서는 영상촬영 계획시 발생 가능한 궤도예측 오차를 분석하고, 아리랑위성 2호 영상촬영 계획의 정밀도를 분석하기 위해 촬영계획에 사용된 목표지점과 실제 영상의 중심점 간의 차이를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 영상촬영 계획 절차

영상촬영을 계획하고 실행하기 위한 일련의 절차를 그림 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 항공우주연구원 지상국에서는 위성으로부터 수신한 GPS 데이터를 이용하여 자동 궤도운용 시스템 (KOOPS, KGS Operational Orbit Processing System)에서 궤도결정을 수행하고 TLE(Two-Line Element) 정보를 생성한다[1]. 또한, PSS에서는 사용자가 요구하는 촬영지점의 좌표정보(위도 및 경도)와 최신 TLE 데이터를 이용하여 촬영이 가능한 시각과 위성의 자세정보를 계산하여 SRF(Schedule Request File)을 생성한 후 이를 MAPS로 전송한다. MAPS에서는 보다 정밀한 궤도예측을 위해서 자동 궤도운용 시스템의 궤도결정 결과와 고정밀 궤도전파기를 이용하게 되며, SRF의 입력된 값을 바탕으로 최종적인 자세정보를 계산하여 원격명령을 생성한다. 이렇게 생성된 원격명령은 위성에 전송되어 영상촬영 임무를 수행하게 된다.

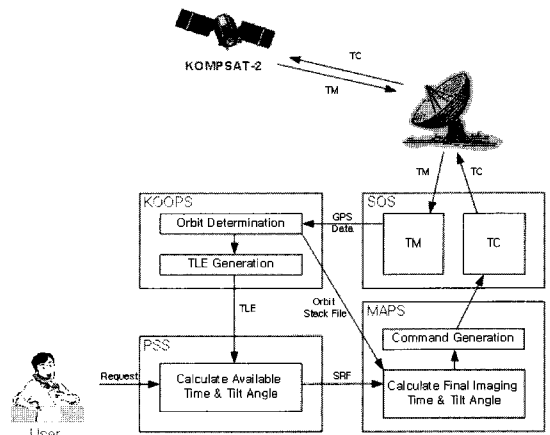


그림 1. 영상 촬영계획 및 실행 절차

사용자가 원하는 지역의 영상을 정확하게 확보하기 위해서는 촬영지점을 오차 없이 지향하기 위한 자세정보(Roll Tilt Angle)가 요구된다. 이러한 자세정보는 촬영시각에 대한 궤도예측 자료에 근거하여 계산되므로 무엇보다도 궤도예측 정밀도가 중요하다고 할 수 있다. 즉, 영상촬영을 계획하기 위해서는 되도록 최신 궤도정보를 이용하는 것이 유리하며, 궤도예측 정밀도는 일반적으로 시간에 따라 점차 저하되므로 너무 먼 미래의 시각에 대한 촬영계획은 목표지점과 실제 영상의 중심점 간의 오차를 증가시킬 수 있다. 위성의 정상운영에 있어 궤도결정은 매일 정해진 시각에 자동으로 수행되며, 이에 따라 TLE 데이터와 궤도정보(Orbit Stack File)는 매일 갱신되므로 궤도예측 정밀도는 충분히 보장된다고 할 수 있다.

2.2 PSS 궤도예측 성능 분석

앞 절에서 기술한 바와 같이 PSS에서는 TLE 데이터를 이용하여 궤도예측을 수행한 후 자세정보를 계산하는 반면에 MAPS에서는 궤도결정 데이터를 이용하여 보다 정밀한 궤도예측을 통해 자세정보를 계산하게 된다. 이는 두 시스템에서 서로 다른 궤도전파 알고리즘을 사용하는 것을 의미한다. 즉, PSS는 SGP-4(Simplified General Perturbation-4) 궤도전파기를 사용하고, MAPS는 코웰(Cowell) Method를 이용한 수치적분 알고리

즘을 사용하여 궤도예측을 수행한다. 궤도예측에 있어 SGP-4는 영년변화, 주기변화, 달 및 태양의 인력, 대기모델을 이용한 평균궤도(Mean Orbit) 개념으로 계산하는 반면, MAPS HPOP(High Precision Orbit Propagator)은 지구 비대칭 중력장, 달 및 태양의 인력, 태양 복사압, 대기 저항력을 실제 궤도에 근접하도록 정밀하게 모델링한 접촉궤도(Osculating Orbit) 개념으로 계산한다. 따라서 SGP-4 궤도전파기는 MAPS (HPOP) 궤도전파기에 비해 상대적으로 정밀도는 낮으나 수치 계산 소요시간이 적어 대략적인 장기 궤도예측이나 안테나 추적 등에 사용되고, MAPS (HPOP) 궤도전파기는 정밀한 궤도를 예측하고자 할 경우에 이용된다.

2.2.1 자세정보 계산오차 비교분석

PSS와 MAPS에서 계산하는 자세정보의 차이를 비교하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 같은 입력파일을 사용하기 위해, PSS의 입력 값인 TLE와 MAPS의 입력 값인 궤도결정 결과는 촬영일 하루 전 날짜의 값(최신정보)을 동일하게 사용하였다. 표 1은 PSS에서 계산한 롤 방향 기울각도(Roll Tilt Angle)와 MAPS에서 계산한 값을 비교한 것으로, 두 시스템 사이에 지향 오차가 평균 1.54km (0.12895 Deg.) 정도 나타나는 것이 확인되었다.

표 1. PSS 및 MAPS의 지향 오차

Date	PSS-MAPS (Deg.)	Distance (km)
2007-01-15	0.16011°	1.91419
2007-01-16	0.10703°	1.27959
2007-01-17	0.12949°	1.54811
2007-01-18	0.09072°	1.08460
2007-01-19	0.16280°	1.94635
2007-01-20	0.11955°	1.42928
2007-01-21	0.11972°	1.43131
2007-01-22	0.14220°	1.70007
평균 값	0.12895°	1.54 km

2.2.2 입력 TLE에 따른 오차 분석

PSS의 입력파일인 TLE는 궤도결정 결과를 이용하여 매일 갱신되므로 영상촬영 계획 시 항상 최신의 데이터를 사용한다고 볼 수 있다. 하지만, GPS 데이터가 장기간 이용 가능하지 않거나, 궤도결정 결과에 문제가 있을 경우 이전에 생성된 TLE를 사용하여 촬영계획을 수립해야 한다. 최신 TLE가 아닌 입력파일을 이용하여 자세정보 생성 시 정밀도를 분석하기 위해 표 2에 나타난 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표에서 Case 1은 촬영일(D-Day) 바로 직전의 최신 TLE 데이터를 이용하는 것을 나타내며, Case 8은 1주일 전의 TLE 데이터를 사용하는 Worst Case를 의미한다. 또한, 표에서 HPOP은 촬영일 직전의 최신 궤도정보를 이용하여 STK[2]의 HPOP으로 궤도예측을 수행한 후 목표지점을 지향하기 위한 자세정보를 계산한 것으로, TLE와의 비교를 위해 실제 궤도 값(True Orbit)으로 가정하였다.

표 2. 시뮬레이션 시나리오

구분	TLE	HPOP
Case 1	(D-1)일	(D-1)일
Case 2	(D-2)일	
Case 3	(D-3)일	
Case 4	(D-4)일	
Case 5	(D-5)일	
Case 6	(D-6)일	
Case 7	(D-7)일	
Case 8	(D-8)일	

그림 2에 각 Case에 따른 PSS와 HPOP간의 지향오차를 나타내었다. PSS에서 촬영계획 시 최신 TLE가 아닌 데이터를 사용할수록 오차가 점차 증가하게 되며, 1주일 전 이상의 TLE를 이용할 경우 약 2 km 이상의 오차(Case 8)가 부가적으로 발생하여 이탈거리가 총 3.5km 이상이 된다. 또한, 그림 2에서 전체적으로 약 1.5km 바이어스 오차를 가지고 있는 것은 앞에서 언급한 바

와 같이 PSS에서는 SGP4 알고리즘을 이용하여 궤도예측을 수행하기 때문이다. 즉, PSS의 궤도예측은 MAPS 또는 HPOP에 비해 약 1.5km의 지향 오차가 발생함을 알 수 있다.

이와는 별도로, PSS의 궤도전파 알고리즘의 성능 검증을 위하여 STK에서 자체적으로 제공하는 SGP4 궤도전파기를 이용하여 궤도데이터를 생성한 후 자세정보를 계산하여 HPOP과의 비교를 수행하였다. 이를 위해 표 2에 정의한 시뮬레이션 시나리오를 동일하게 적용하였고, 그 결과를 그림 2에 점선으로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 계획일로부터 1주일 이전의 TLE를 사용할 경우 2 km 이상의 오차를 가지며, 이는 앞에서 PSS를 사용한 경우와 동일한 경향(Profile)을 보임을 확인할 수 있다. 하지만, 이 경우에는 PSS를 이용했을 때 발생했던 바이어스 오차(1.5 km)는 존재하지 않는다. 이에 대한 원인은 PSS의 궤도예측 과정이나 자세정보 계산과정에서 기인한 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 심도 있는 분석이 필요하다.

지금까지 살펴본 오차는 오직 롤 기동 각도만을 고려한 것으로 1주일 이전의 TLE를 사용한다 하더라도 자세지향 오차는 예상했던 것보다 크지 않음을 확인하였다. 이는 롤 기동 각도가 위성의 LVLH(Local Vertical Local Horizontal) 좌표계의 YZ 평면상에서 계산되기 때문이다. 여기서 Z 방향은 지구중심을 향하는 방향(Nadir)이고, Y방향은 궤도평면에 수직(Normal)인 방향을 의미한다.

일반적으로 TLE를 입력으로 사용하는 SGP4의 궤도예측 성능은 시간에 따라 정밀도가 급격하게 저하되는데 이를 확인하기 위해 SGP4의 In-track 방향의 오차 성분을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 궤도(True Orbit)로 가정한 HPOP 결과와 In-track 방향 오차가 시간에 따라 급격하게 증가함을 알 수 있고, 1주일 이전의 데이터를 사용할 경우 최대 약 50km 정도의 오차를 갖는다. 결국 이러한 오차 특성을 롤 기동 각도만을 고려할 경우에는 반영되지 않지만, 영상촬영 시작 및 종료시각을 계산할 때에는 직접적인 영향을 미치므로 주의해야 한다.

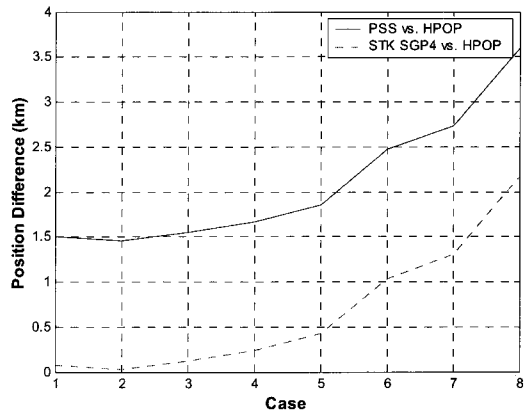


그림 2. 궤도전파기에 따른 정밀도 비교

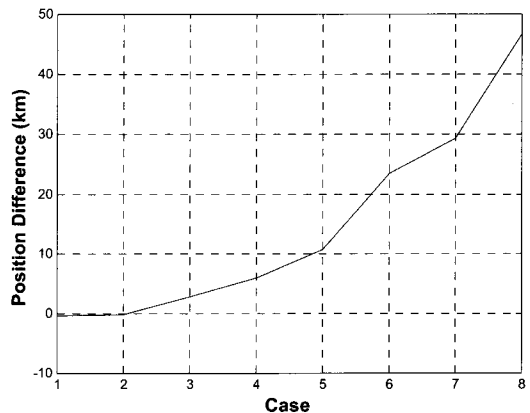


그림 3. SGP4의 In-track 방향 오차

2.3 영상지향오차 분석

영상촬영계획은 실제 촬영시점보다 이전에 수행되므로 궤도예측 오차를 어느 정도 포함하게 된다. 본 절에서는 아리랑위성 2호에서 획득한 실제 영상을 이용하여, 획득된 영상 중심점과 미리 계획된 목표지점과의 이탈거리를 분석하였다. 이를 위해 실제 영상자료를 이용한 지향오차는 다음과 같이 계산되었다.

$$D = L_{swath} \times \frac{d}{10}$$

위 식에서 D 는 계획된 목표지점과 획득된 영

상의 중심점과의 이탈거리(영상지향오차)를 나타낸다. 또한, L_{Swath} 는 전체 Swath 폭을 의미하며, d 는 중심점으로부터의 이탈거리를 계산하기 위한 보조 파라미터로 사용하였다.

그림 4는 영상지향오차를 계산하는 방법을 도식한 것이다. 그림에서 영상획득 범위는 실제 영상이 획득된 경계선을 나타내며, 파란색 점이 실제 영상의 중심점이 된다. 또한, 실제 Target은 원래 계획했었던 목표지점을 의미한다. 따라서 실제 Target이 중심점에 근접할수록 영상지향 정밀도가 높다고 할 수 있다. 여기서 L_{Swath} 는 위성의 롤 기동 각도에 따라 달라지며 STK 시뮬레이션을 이용하여 획득하였다.

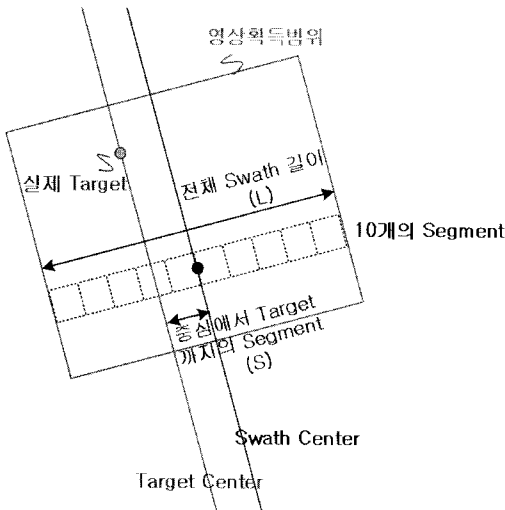


그림 4. 영상지향오차 계산 방법

표 3. 영상지향오차 계산결과

Imaging Date	Roll Tilt (Deg.)	Offset Direction	Deviation (km)
2007-02-05	-1.2413	Left	1.07
2007-01-21	18.5949	Left	2.21
2007-01-27	-8.2647	Left	1.87
2007-01-29	8.9204	Left	1.56
2007-01-29	-8.7463	Left	1.42
2007-01-29	4.2179	Left	2.0

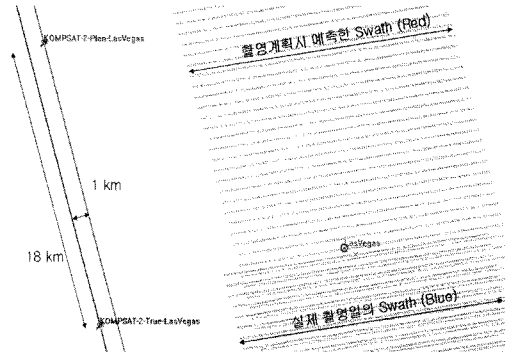


그림 5. 계획시점 및 실제촬영일의 궤도

표 3에 그림 4의 자료와 앞에서 기술한 방법을 이용하여 영상지향오차를 계산한 결과를 나타내었다. 전체적으로 평균 지향오차는 약 1.7km이며, 지향 방향이 모두 왼쪽으로 치우치는 이유는 임무계획 시 사용되는 궤도정보(Epoch)가 실제 촬영일보다 약 2일에서 4일 정도 이전의 값이기 때문이다. 또한, 이 오차 값은 아리랑위성 1호의 평균 지향오차(약 2km)와 유사하다[3,4].

그림 5는 촬영계획 시점의 궤도와 실제 촬영일의 궤도의 차이가 얼마나 발생하는지를 확인하기 위해 Las Vegas 촬영임무(2007-02-05)에 대한 촬영계획 시점과 실제 촬영일의 궤도 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 빨간색 실선은 촬영계획 시점의 궤도정보(2007-02-01)를, 파란색 점선은 촬영당일의 궤도정보(2007-02-05)를 이용한 것이다. 그림에서 보듯이, 두 궤도간의 In-track 방향으로는 약 18 km의 오차가 발생하지만, 롤 기동과 관련된 Cross-track 방향의 오차는 약 1 km로 표 3에서 계산한 값과 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 아리랑위성 2호의 영상촬영계획 절차를 바탕으로 각 단계에서 발생할 수 있는 궤도예측 오차를 분석하였다. 사용자가 요구하는 목표지점을 이용하여 영상촬영 계획을 수립하는 PSS는 궤도전파 알고리즘으로 SGP4를 사용하는 반면에 실제 위성에 송신할 명령계획을 작성하는

MAPS는 보다 정밀한 궤도전과기를 이용하기 때문에 두 시스템에서 계산되는 자세정보(Roll Tilt Angle)는 약 1.54 km (0.12895 Deg.)의 차이를 갖는다. 따라서 명령 계획자(Mission Planner)는 PSS로부터 전달된 SRF 파일을 이용하여 최종적으로 위성에 전송될 자세정보를 재계산한 후 이 값이 오차범위 내에 있는지를 확인하여야 한다. 또한, PSS에서 촬영계획 시 최신 TLE가 아닌 이전 TLE를 사용하면 지향 오차가 점차 증가하게 되어 1주일 전 이상의 이전 TLE를 이용할 경우 약 2 km 이상의 오차가 추가로 발생하므로 최대 1주일 이상 궤도예측을 수행하여 영상촬영을 계획하는 것은 지양해야 한다. 참고로 본 논문에서 분석한 궤도예측 시기는 태양활동 저조기 이므로 궤도예측 성능이 상대적으로 우수하지만, 태양활동이 증대되는 시기에는 궤도예측 오차가 더욱 커지게 되므로 주의해야 한다.

영상촬영 계획은 실제 촬영일보다 이전에 수행되므로 궤도예측 오차를 어느 정도 포함하게 되어 실제 촬영된 영상의 중심점과 미리 계획된 목표지점 사이의 이탈거리가 발생한다. 아리랑 위성 2호의 영상자료와 궤도정보를 이용하여 이탈 거리를 계산한 결과 평균 지향오차가 약 1.7 km이며 이 값은 아리랑 위성 1호의 경우와 유사한 결과임을 확인하였다. 또한, 이 값은 롤 기동 각도에 따라 달라질 수 있으므로, 영상촬영 계획 시 전체 촬영폭(Swath)의 약 12% Margin을 적용해야 할 것으로 판단된다. 향후에는 보다 정확한 분석을 위해 보다 많은 영상자료를 이용하여 다양한 조건에 대한 통계분석을 수행할 예정이다.

- 2권 제 2호, 한국항공우주연구원, 2005.
4. 박선주, 김해동, 김은규, "아리랑 1호 전자광학 카메라(EOC) 촬영각 오차 변화 분석", KARI-MOG-2004-033, 한국항공우주연구원, 2004.

참 고 문 헌

1. 김해동, 정옥철, 김은규, 방효충, "자동 궤도운용 시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제 35권 제 9호, 2007.
2. Satellite Tool Kit, <http://www.agi.com>, AGI.
3. 전갑호, 김윤수, 서두천, "아리랑 위성 1호 EOC 영상촬영의 지향정확도 분석", 항공우주기술 제