

Spot 영상과 Kompsat-2 영상에서의 궤도 자세각 모델의 성능 비교

정재훈 · 김태정[†]

인하대학교 영상공학 연구실

Comparison of Orbit-attitude Model between Spot and Kompsat-2 Imagery

Jaehoon Jeong and Taejung Kim[†]

Image Engineering lab, Inha University

Abstract : This paper describes differences of performance when the orbit attitude model is applied to the respective images obtained from two different types of satellite. The one is Spot that rotates its pointing mirror and the other is Kompsat-2 that rotates its whole body when they obtain imagery for target. Our research scope is limited to the orbit-attitude model only as its good performance was proved in prior investigation. Model performances between two images were compared with sensor model accuracy and 3D coordinates calculation. The results show performances of the orbit-attitude model for each image type were different. For Spot imagery, the model required attitude angle to be included as adjustment parameters. For Kompsat-2 imagery, the model required high-order parameter for adjustment. This implies that satellite sensor model may be applied differently in accordance with platform's attitude control scheme and accuracy. Understanding of this information can be a base for improvement and development of model and application for new satellite images.

Key Words : Sensor model, Orbit-attitude model, Satellite imagery.

요약 : 이 논문은 엄격한 물리적 센서 모델인 궤도 자세각 모델이 위성체의 자세제어 방식이 다른 두 위성 영상에 적용한 경우 나타나는 성능의 차이를 기술한다. 영상 취득 시 Spot 위성은 거울 회전(mirror-tilt) 방식을 채택하고 있으며 Kompsat-2 위성은 몸통 회전(body-tilt) 방식을 채택하고 있다. 이 논문은 선행 연구에서 이미 우수한 성능이 검증된 궤도 자세각 모델로 연구의 범위를 제한하며 미지수 조합에 따른 센서 모델 정확도 및 3차원 좌표 산출 정확도를 통해 두 영상에서 나타나는 모델 성능의 차이를 비교한다. 실험 결과는 동일한 궤도 자세각 모델이 두 영상에 대해 다른 성능이 나타남을 보여주고 있으며 Spot 위성의 경우에는 자세 각 미지수가 포함된 모델을, Kompsat-2 영상의 경우에는 많은 개수의 미지수를 갖는 모델을 사용하는 것이 효율적임을 제한한다. 이는 동일한 모델이라 하더라도 센서의 영상 취득 방식과 그로 인한 자세 추정 정확도에 따라 다르게 적용되는 것이 효과적일 수 있음을 나타낸다. 이러한 차이를 이해하는 것은 향후 모델 정확도 개선과 새로운 영상에 대한 모델 적용을 위한 중요한 토대가 될 것이다.

접수일(2009년 4월 10일), 수정일(1차 : 2009년 4월 21일), 게재확정일(2009년 4월 21일).

[†] 교신저자: 김태정(tezid@inha.ac.kr)

1. 서론

위성 영상의 센서 모델링은 영상 좌표 계와 지상 좌표 계의 수학적 관계를 수립하는 것으로 설명할 수 있으며 이는 영상의 촬영 당시의 기하학을 복원하는 것을 의미한다. 위성 영상으로부터 정사 보정을 통한 지도 제작 및 위치 정보의 획득, 정밀 수치 표고 모델 제작 등을 수행하기 위해서는 센서 모델링이 수반되어야 하며 양질의 정보를 얻기 위해서는 영상 별로 최적의 정밀 센서 모델 기법이 적용되어야 한다. 지금까지 위성 영상의 센서 모델 수립을 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며 그와 동시에 다양한 센서 모델의 비교 분석에 관한 연구도 동시에 진행되어 왔다. 이는 영상 별로 사용 목적에 따라 최적의 센서 모델을 적용하기 위한 매우 중요한 연구라고 할 수 있으며 국내에서는 2000년도에 선형 Pushbroom 영상을 위한 대표적인 센서 모델링 알고리즘들에 대한 비교 연구가 수행된 바 있다(김태정 외, 2000). 그 후 2002년에는 IKONOS 영상을 위한 센서 모델 기법으로써 DLT와 RPC 모델을 구현하여 성능을 비교한 연구가 있으며 Spot 영상을 이용하여 물리적 모델과 RFM 모델을 비교한 연구 사례가 있다(조우석 외, 2002; Ahn, 2002). 또한 2003년에는 Quickbird 영상에 대해 RPC 모델과 물리적 모델의 위치 정확도를 비교하여 보고한 사례가 있다(Teo and Chen, 2003). 그리고 최근에는 Spot 영상을 활용하여 대표적인 물리적 모델인 위치 회전각과 궤도 자세각 모델을 비교한 연구가 수행되었다(김태정, 2006). 그 중 위성의 실제 물리적인 움직임을 고려한 궤도 자세각 모델은 위성의 센서 모델과 외부 표정 획득에 매우 우수한 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다. 특히 이러한 내용은 Spot-3 영상과 Kompsat-1 영상에 적용함으로써 보다 명확하게 검증되었다(Kim and Dowman, 2006). 또한 기존 연구에서 궤도 자세각 모델에 대해 이미 다양한 종류의 미지수가 제안되었으며 이러한 미지수 조합에 따른 모델의 성능 비교에 관한 연구도 진행되어 왔다(Radhadevi *et al*, 1998). 예컨대, 단영상 모델을 위해서는 많은 미지수를 갖는 모델을, 동일 궤도의 인접 궤도 영상의 모델을 위해서는 자세각의 bias만을 추정하는 모델을 사용하는 것이 최적의 방법임이 Spot 영상을 활용하여 증명된 바 있다(Kim *et al*, 2007). 이렇듯 사용 목적에 따라 동일한 센

서 모델에서 미지수 조합을 달리하면 그 성능을 극대화할 수 있다.

이 논문은 위성의 자세 제어 방식이 다른 Spot 영상과 Kompsat 영상에서 궤도 자세각 모델이 미지수 조합에 따라 각각 어떠한 성능을 보여주는가에 대해 분석하고 그 차이를 기술하고자 한다. 즉 알고리즘을 달리 하는 서로 다른 모델 사이의 비교가 아닌 이미 우수한 성능이 검증된 궤도 자세각 모델 기법에 논문의 범위를 제한하고자 한다. 실험을 위한 영상으로써 영상 촬영 시 거울 회전(mirror-tilt) 방식을 취하는 Spot-3, Spot-5 영상과 몸통 회전(body-tilt) 방식을 취하는 Kompsat-2 영상이 활용되며 모델의 성능 분석을 위해 GPS 측량을 통해 획득한 신뢰성 높은 기준점이 사용될 것이다. 사용된 모든 영상에 대해 센서 모델 정확도를 산출하고 정밀 DEM 생성 및 3 차원 지상좌표 산출 정확도가 분석될 것이다. 따라서 이 논문은 이에 대한 분석을 통해 두 영상에 대한 궤도 자세각 모델의 성능을 비교하며 이에 따라 적절한 미지수 조합을 갖는 모델을 제안하고자 한다.

2. 실험 내용 및 데이터

영상의 정밀 센서 모델을 위해서는 일반적으로 수학적 모델이나 추상적 모델 보다는 엄격한 물리적인 모델이 더 선호되는 편이며 이 중 궤도 자세각 모델은 위치 회전각 모델에 비해 위성 체의 실제 물리적인 움직임을 보다 정확하게 반영한 모델로 볼 수 있다(Kim and Dowman, 2006). 이미 선행 연구에서 Spot-3 영상과 Kompsat-1 영상을 통해 궤도 자세각 모델이 위치 회전각 모델에 비해 우수한 성능을 보여줄 수 있음이 증명되었다. 본 논문에서는 기존에 사용했던 Spot-3 영상과 함께 실험 데이터의 범위를 Spot-5와 Kompsat-2 영상으로 확대하고 이미 우수한 성능이 검증된 궤도 자세각 모델로 연구의 범위를 제한하였다. 본 연구는 궤도 자세각 모델이 두 영상에 대해 어떠한 성능의 차이를 나타내는가에 대해 분석하고자 하며 이를 토대로 각 영상에 적절한 미지수 조합을 갖는 모델을 제안한다. 이는 향후 더 발전된 센서 모델을 개발하고 적용하는데 중요한 자료가 될 것이다.

궤도 자세각 모델은 벡터 진행 모델로도 표현되며 위성의 위치 벡터, 속도 벡터, 자세 각을 외부 표정 요소로 추정하는 엄격한 물리적인 모델이다. 모델 수립에 대한 자세한 이론과 과정은 이미 선행연구에 많이 다루어졌으므로 이를 참고하기로 한다(Kim and Dowman, 2006; Radhadevi *et al.*, 1998; SPOT Image, 2002). Table 1은 실험에 사용한 미지수 조합에 따른 7가지 궤도 자세각 모델을 나타내었다. 앞서 언급하였듯 기존의 센서 모델 비교 연구는 서로 다른 모델끼리의 비교 분석에 관한 내용이 주를 이루었으며 그 이외의 동일한 모델 내에서의 조사는 모델 수립의 목적에 따라 미지수 조합을 달리해야 최적의 성능을 보여줄 수 있다는 것이 핵심이었다.

이 논문에서는 서로 다른 모델끼리의 비교나 사용 목적에 따른 분류가 아닌 영상에 따라 나타나는 성능의 차이를 비교하였다. 즉 동일한 센서 모델을 동일한 목적을 위해 적용하더라도 영상에 따라 다르게 적용해야 할 필요가 있음을 말한다. 실험을 위해 대전 지역을 촬영한 Spot-3, Spot-5 스테레오 영상을 사용하였으며 전남 일대 지역을 촬영한 Kompsat-2 스테레오 스트립 영상 중 일부를 사용하였다. 사용된 영상의 속성은 Table 2와 같다.

Table 1. List of unknown parameters

	미지수
OA 1	위치에러, 변화율, 가속도 및 자세에러
OA 2	위치에러, 변화율, 가속도 및 Yaw각과 각의 변화율, 가속도
OA 3	위치에러, 변화율, 가속도
OA 4	자세에러, 변화율, 가속도
OA 5	위치에러, 자세에러
OA 6	위치에러
OA 7	자세에러

Table 2. The properties of image used

Sensor	Spot-3	Spot-5	Kompsat-2
촬영 지역	대전	대전	광주
해상도	10 m	2.5 m	1 m
촬영 일자(좌측/우측)	1995/04/04 / 1995/01/28	2003/12/11 / 2003/12/20	2007/02/28 / 2007/02/26
영상 크기	6000×6000	24000×24000	15000×15500
자세 제어 방식	거울 회전 방식	거울 회전 방식	몸통 회전 방식
사용한 기준점 개수(모델 점 / 검사 점)	17 / 8	10 / 9	13 / 8

Table 2에 나타난 영상의 기본적인 속성 외에 표 3에 영상 촬영 시 획득한 자세 정보를 보여주었다. 이는 두 위성의 자세 방식의 차이를 설명하기 위한 것으로서 먼저 Spot 위성의 경우 영상이 촬영되는 동안 자세 각이 거의 0에 가까우며 그 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 Spot 위성이 거울 회전 방식을 채택하여 영상 촬영 시 위성체는 지구 중심을 바라보도록 제어하면서 거울을 회전하여 원하는 영상을 촬영하도록 설계되었기 때문이다(SPOT Image, 2002). 반면에 Kompsat-2 영상은 자세 각 Roll, Pitch, Yaw가 0이 아닌 큰 각을 가지며 시간에 따른 변화도 Spot에 비해 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Kompsat 위성의 경우는 Spot 위성과는 달리 영상 촬영 시 위성체 전체를 회전시키며 영상을 취득하는 몸통 회전 방식을 채택하고 있기 때문이다. 이러한 자세제어 방식의 차이는 센서 모델링의 성능에 영향을 주게 되며 이는 궤도 자세각 모델과 위치 회전각 모델을 비교한 선행 연구에서 면밀하게 검증되었다. Spot의 경우 자세각이 거의 0에 가깝기 때문에 실제 자세각을 고려한 궤도 자세각 모델과 자세각 대신 임의의 회전각을 고려한 위치 회전각 모델의 성능 차이를 거의 보여 주지 않으나, Kompsat 영상의 경우 실제 자세각의 변화가 크기 때문에 실제 자세각을 고려한 궤도 자세각 모델이 위치 회전각에 비해 크게 우수한 성능을 보여주었다(김태정, 2006).

본 논문은 보다 세부적인 연구로서 두 영상에서 모두 우수한 성능을 보여준 궤도 자세각 모델이 자세제어 방식이 다른 두 영상에서 미지수 조합에 따라 어떠한 차이를 보여주는가에 대해 비교하였다. 이를 위해 센서 모델 정확도를 산출하였으며 정밀 DEM 생성 및 3차원 좌표 산출을 수행하였다. 자세한 실험 결과는 다음 절에서 다루기로 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

이번 절에서는 먼저 센서 모델의 성능 분석을 위해 각 영상에 대한 단영상 모델 정확도를 산출하였다. 또한 영상 정합 결과를 산출하고 정밀 DEM을 생성하여 정확도 분석을 수행하였으며 Kompsat-2의 경우 추가 검증을 위해 스테레오 모델 수립을 통한 지상좌표 산출도 동시에 수행하였다. 미지수 조합에 따른 7가지 궤도 자세각 모델에 대해 Spot-3, Spot-5, Kompsat-2 위성 영상에 적용하여 산출된 결과를 비교 분석하였다. 실험 결과는 두 위성 영상에서 나타나는 궤도 자세각 모델의 성능의 차이를 보여줄 수 있을 것이다.

1) 단영상 센서 모델 정확도

먼저 단영상 모델 정확도를 산출하기 위해 GPS측량을 통해 획득한 기준점을 모델 점과 검사 점으로 구분하였다. 모델 수립에 사용된 기준점의 모델 점 오차와 모델 수립에 사용되지 않은 검사 점을 수립된 모델에 적용하여 얻은 검사 점 오차를 산출하였다. 모델 점과 검사 점은 영상 전역에 고르게 분포되도록 구분하였으며 각 영상 별로 사용된 기준점의 개수는 다음 Table 2에 제시하였다. 미지수 조합에 따라 7가지 모델로 나누어지는 궤도 자세각 모델에 대해 모델을 수립하여 정확도를 산출하였다. 스테레오 영상의 좌측 우측 영상에 대해 각각 단일 영상 센서 모델을 수립하였으며 영상 별로 산출된 센서 모델 정확도는 다음 Table 4~6과 같다('Col'은

Table 3. Information about attitude angle of images used for experiment

	Spot-3			Spot-5			Kompsat-2		
	Roll각	Pitch각	Yaw각	Roll각	Pitch각	Yaw각	Roll각	Pitch각	Yaw각
시작라인	-1.0E-8°	-2.3E-7°	0.0E-7°	7.58E-4°	-1.45E-4°	1.05E-3°	-21.3091°	-1.2169°	2.0547°
중심라인	-1.2E-5°	-1.2E-4°	-1.0E-6°	7.54E-4°	-1.45E-4°	1.05E-3°	-21.3089°	-1.2159°	2.0523°
끝라인	-7.3E-5°	-1.4E-5°	-2.6E-5°	7.51E-4°	-1.44E-4°	1.05E-3°	-21.3088°	-1.2149°	2.0490°

Table 4. Sensor model accuracy of Spot-3

	모델 점 오차 (RMS, pixel)						검사 점 오차 (RMS, pixel)					
	Left image			Right image			Left image			Right image		
	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag
OA1	0.62	0.58	0.85	0.76	0.82	1.12	0.71	0.74	1.03	0.85	0.92	1.25
OA2	0.64	0.58	0.86	0.87	0.82	1.20	0.65	0.74	0.98	0.83	0.84	1.18
OA3	0.65	1.86	1.97	0.87	1.70	1.91	0.64	1.59	1.71	0.84	1.78	1.97
OA4	1.18	0.58	1.31	0.95	0.82	1.25	1.01	0.74	1.25	0.96	0.84	1.28
OA5	0.68	0.58	0.89	0.91	0.88	1.27	0.67	0.72	0.98	0.96	0.76	1.22
OA6	0.69	1.87	1.99	0.93	1.72	1.96	0.64	1.52	1.65	1.01	1.80	2.06
OA7	1.19	0.58	1.32	0.97	0.87	1.30	0.96	0.73	1.21	1.01	0.83	1.31

Table 5. Sensor model accuracy of Spot-5

	모델 점 오차 (RMS, pixel)						검사 점 오차 (RMS, pixel)					
	Left image			Right image			Left image			Right image		
	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag
OA1	0.36	0.80	0.86	0.66	0.68	0.95	0.84	0.67	1.08	0.61	1.04	1.21
OA2	0.44	0.72	0.84	0.70	0.71	1.00	0.68	0.86	1.10	0.51	0.99	1.12
OA3	0.45	1.33	1.40	0.70	1.65	1.80	0.72	1.45	1.62	0.49	1.52	1.60
OA4	0.68	0.73	1.00	0.76	0.72	1.04	0.67	0.86	1.08	0.37	1.00	1.07
OA5	0.59	0.82	1.02	0.82	0.76	1.11	0.49	0.61	0.78	0.49	0.85	0.98
OA6	0.55	1.46	1.56	0.84	1.74	1.93	0.50	1.36	1.45	0.45	1.6	1.43
OA7	0.70	0.93	1.16	0.84	0.96	1.28	0.72	0.54	0.89	0.47	0.88	1.00

Table 6. Sensor model accuracy of Kompsat-2 image

Kompsat-2 스테레오 영상 (Scene ID: 62)												
	모델 점 오차 (RMS, pixel)						검사 점 오차 (RMS, pixel)					
	Left image			Right image			Left image			Right image		
	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag
OA1	0.46	0.62	0.77	0.66	0.56	0.87	1.43	1.01	1.75	0.96	1.04	1.41
OA2	0.46	0.56	0.72	0.67	0.51	0.84	1.44	1.02	1.76	1.08	0.92	1.42
OA3	0.46	0.90	1.01	0.67	1.01	1.21	1.44	0.87	1.68	1.10	1.28	1.69
OA4	1.20	0.56	1.33	1.12	0.50	1.22	1.67	1.02	1.96	0.95	0.90	1.31
OA5	0.47	0.75	0.88	0.72	0.76	1.04	1.39	0.85	1.63	1.13	0.82	1.39
OA6	1.73	1.10	2.05	0.76	1.79	1.94	2.29	1.15	2.57	1.02	1.39	1.72
OA7	1.91	0.90	2.11	1.12	1.66	2.00	2.39	1.19	2.67	0.89	1.63	1.86

Kompsat-2 스테레오 영상 (Scene ID: 63)												
	모델 점 오차 (RMS, pixel)						검사 점 오차 (RMS, pixel)					
	Left image			Right image			Left image			Right image		
	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag	Col	Row	Mag
OA1	0.83	0.85	1.19	0.47	1.06	1.16	1.15	0.79	1.40	0.67	0.91	1.13
OA2	0.83	0.92	1.24	0.59	0.63	0.86	1.13	0.60	1.28	0.77	1.19	1.42
OA3	0.83	1.05	1.34	0.59	1.29	1.42	1.13	0.82	1.40	0.77	1.10	1.35
OA4	1.15	0.93	1.47	1.09	0.64	1.26	1.29	0.58	1.42	0.91	1.21	1.51
OA5	1.06	1.19	1.59	0.84	1.10	1.38	1.07	0.62	1.24	0.72	0.91	1.17
OA6	1.64	1.15	2.00	0.87	1.98	2.16	1.71	0.62	1.82	0.96	1.77	2.01
OA7	1.80	1.13	2.12	1.11	1.86	2.17	2.19	0.57	2.26	1.03	1.54	1.85

Column을, 'Mag' 은 Magnitude를 의미함). 비교적 낮은 정확도를 보여주는 부분은 음영으로 구분하여 표시

하였다. 모델 간 정확도의 차이를 보다 쉽게 구별하기 위해 Fig. 1에 모델 별 오차를 그래프로 나타내었다.

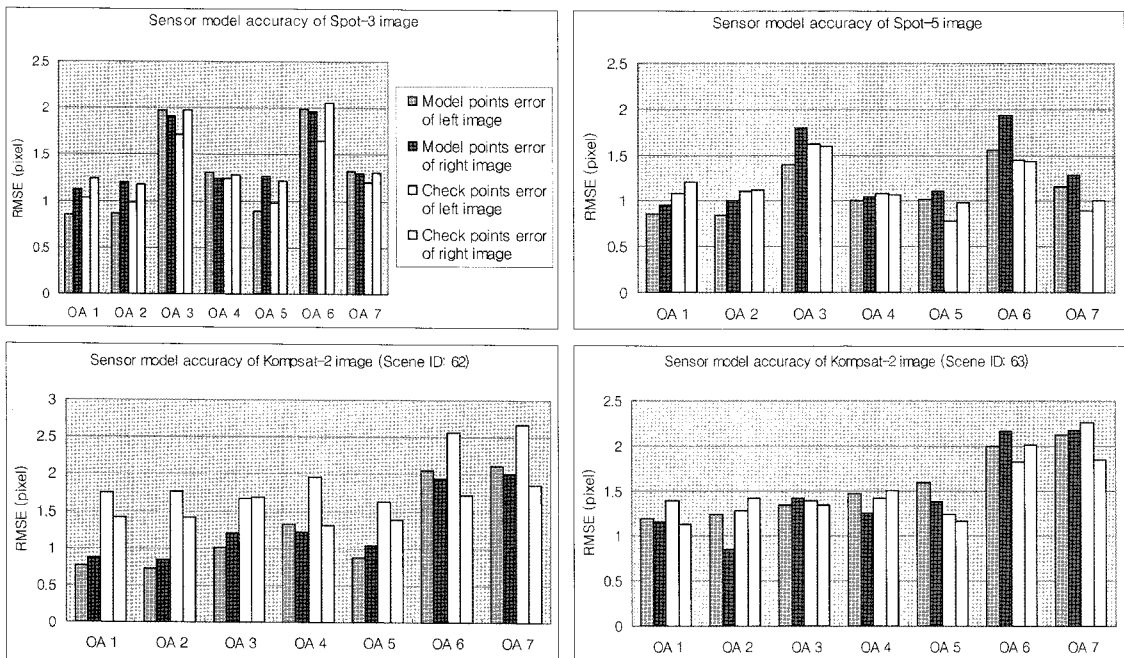


Fig. 1. Representations of sensor model accuracy for each satellite image.

이미 선행 연구에서 검증한 Spot-3 영상 외에 Spot-5와 Kompsat-2를 이용한 단영상 모델 결과에서도 궤도 자세각 모델은 모든 미지수 조합에 대해 대체적으로 양호한 성능을 보여준다. 하지만 영상에 따라 다소간의 모델 정확도의 차이를 보여준다. 먼저 Spot 영상의 실험 결과를 확인해 보면 OA3, OA6은 다른 모델에 비해 다소 낮은 정확도를 보여준다. 이러한 결과는 Spot-3 영상과 Spot-5 영상에서 동일하게 나타난다. 대부분의 경우의 1 픽셀에 근접한 정확도를 보여주나 OA3, OA6 모델은 2 픽셀 정도의 정확도가 산출되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 OA3, OA6 모델이 다른 모델과는 달리 자세 각을 추정하지 않고 있기 때문인 것으로 판단된다. 앞서 언급하였듯 Spot 위성은 자세 제어 방식 특성상 거울 회전 방식을 사용하고 있어 영상이 획득되는 동안 위성 체의 자세각의 변화가 거의 없으며 또한 Spot의 경우 정확도 높은 자세 정보 제공이 가능하도록 설계되었다(SPOT Image, 1997; SPOT Image, 2002). 따라서 정확한 모델 수립을 위해서는 자세 정보를 고려한 모델을 적용해야 할 필요가 있다. 기존 연구에서 자세 각만을 추정하는 OA7 모델을 이용하여 동일 궤도의 인접 영상 모델링을 기준점 없이 수행한 연구 사례는 이러한 사실을 잘 뒷받침한다(Kim and Dowman, 2006).

반면 Kompsat-2 영상에 대한 실험 결과는 Spot과는 다소 다르게 나타난다. 전체적으로 OA1, OA2 모델 등 많은 개수의 미지수를 가지는 모델에서 좋은 결과를 보여주며 OA6, OA7 모델은 2 픽셀 정도의 오차를 보이

며 다른 모델에 비해 낮은 정확도를 보여준다. 모델 점 오차도 다른 모델에 비해 수렴 성이 좋지 않은 것을 보여주며 수립된 모델의 신뢰성을 보여준다고 할 수 있는 검사 점 오차도 다소 낮게 나타난다. Kompsat-2 영상은 Spot 위성과는 달리 위성 체 자체가 회전하며 영상을 취득한다. 따라서 영상이 획득되는 동안 Table 3에서 확인할 수 있듯이 영상 취득 시 자세각이 큰 값을 가지며 그 변화가 Spot에 비해 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경우 자세각의 변화에 매우 민감하게 되어 정밀 센서 모델을 위해서는 높은 정확도의 정보가 요구된다. 그러나 이러한 자세제어 방식을 사용할 경우 안정적이고 정확도 높은 자세 정보를 제공하기 어려우며 그러한 Kompsat 위성의 자세 정보 추정 방식의 불안정성은 초기 센서 모델 오차 분석을 통해 확인할 수 있다. 초기 모델 오차는 위성에서 제공되는 궤도 정보의 순수 정확도를 의미한다. Table 7은 동일 궤도에서 촬영된 Spot-3 strip과 Kompsat-2 strip에서 각 Scene에 대한 초기 모델 정확도를 보여주며 Fig 2에는 오차의 추이를 나타내었다. Spot-3 strip은 총 7개의 단일 영상으로 이루어져있으며 Kompsat-2 strip은 10개로 이루어져 있다.

Fig. 2는 두 스트립의 초기 모델 오차 변화의 차이를 잘 보여주고 있다. 초기 모델 오차의 추이를 분석해 보면 Spot 영상의 경우 동일 궤도 스트립 상의 각 Scene에 대해 오차의 크기와 경향이 거의 일정한 것을 확인할 수 있다. 이는 동일 궤도에서 촬영된 영상은 거의 동일한 편차(Bias)를 가지고 있음을 의미한다. 이는 앞서 언

Table 7. Initial model accuracy of Spot-3 strip and Kompsat-2 strip

Scene ID	Spot-3 Strip (RMS, pixel)			Scene ID	Kompsat-2 Strip (RMS, pixel)		
	Col	Row	Mag		Col	Row	Mag
Scene 61	96.93	13.19	97.82	Scene 71	56.69	13.06	58.17
Scene 62	96.68	16.56	98.09	Scene 70	55.25	16.53	57.67
Scene 63	97.40	17.40	98.94	Scene 69	53.66	20.72	57.52
Scene 64	96.88	16.27	98.24	Scene 68	49.36	23.95	54.86
Scene 65	96.97	15.63	98.23	Scene 67	44.24	26.37	51.51
Scene 66	96.74	17.08	98.24	Scene 66	42.07	29.35	51.30
Scene 67	97.02	17.80	98.64	Scene 65	42.19	30.00	51.76
				Scene 64	42.39	30.36	52.14
				Scene 63	39.49	31.38	50.44
				Scene 62	34.67	33.00	47.87

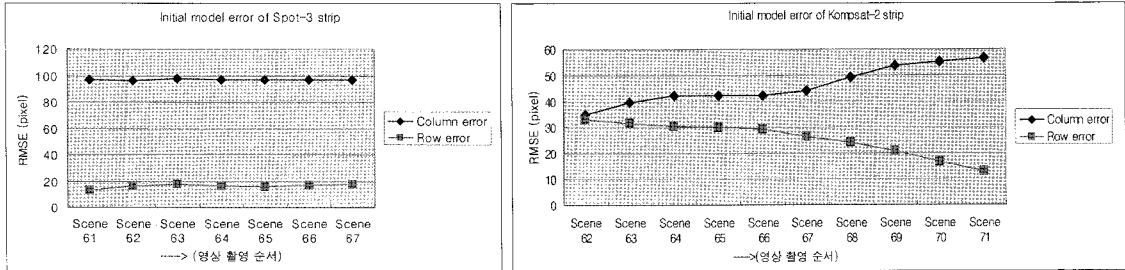


Fig. 2. Variations of initial model accuracy for each image strip.

급하였듯 선행 연구에서 자세 각만을 추정하는 OA7 모델을 이용하여 소수의 기준점으로 궤도 전체의 모델을 가능하게 했던 직접적인 근거이다. 반면 Kompsat-2 영상의 경우 초기 오차의 크기 자체는 Spot에 비해 크게 감소하였으나 동일 궤도 상에서 촬영한 영상임에도 불구하고 오차 경향이 서로 다르게 나타난다. 가장 먼저 촬영된 Scene 62와 가장 나중에 촬영된 Scene 71은 Column 방향의 초기 오차가 20 픽셀이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Spot-3에 비해 Kompsat-2 위성이 궤도 정보를 실제 값에 가깝게 추정하고는 있으나 궤도 정보 추정 방식이 다소 불안정적임을 확인시켜 주는 대목이다. 따라서 자세 각만을 추정하는 OA7 모델로는 높은 정확도를 얻기 어려우며 미지수 개수를 많이 갖는 모델을 사용하는 OA1, OA2 모델을 사용함으로써 모델의 수렴 성을 극대화할 필요가 있다고 판단된다. Spot 영상과 Kompsat-2 영상에서 나타나는 이러한 차이는 다음 절의 영상 정합 결과 및 3차원 위치 결정 정확도 분석을 통해 추가적으로 설명될 것이다.

2) 영상정합 및 3차원 위치결정의 정확도

앞서 센서 모델 정확도 분석을 통해 궤도 자세각 모델이 두 위성 영상에서 어떠한 차이를 보여주는가에 대해 기술하였다. 영상 정합 결과 및 정밀 DEM 생성 실험 결과도 이러한 차이를 잘 보여준다. 미지수 조합에 따른 7가지 모델을 적용하여 수립한 센서 모델 결과를 토대로 Spot-3, Spot-5, Kompsat-2 위성 영상에 대해 영상 정합을 수행하고 정밀 수치표고 모델을 생성하였다. 이를 위해 선행 연구에서 사용한 에피플라 기하학을 이용한 영상 정합 알고리즘을 사용하였다(Kim, 2000; Lee *et al*, 2003). 생성된 결과의 정확도 분석을 위해서는 이중 선형 보간 법을 이용하여 전체 높이 값을 USGS DTED와 비교하였다(정재훈 외, 2008). 먼저 Fig. 3은 Spot-3, Spot-5, Kompsat-2 영상으로부터 7가지 모델 별로 수행한 영상 정합 결과를 보여주며 정합 성공 점과 정합 실패 점을 산출하여 나타내었다. 자세한 결과를 Table 8에 나타내었다. 생성된 DEM 결과를 육안으로 확인하기 위해 Fig. 4에는 사용된 영상을, Fig. 5에는 생성된 DEM 결과를 각각 나타내었다. 7가

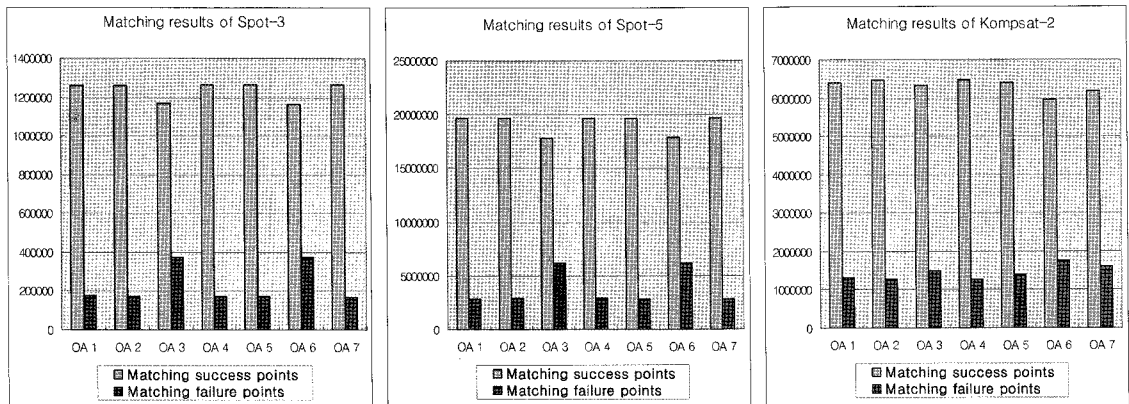


Fig. 3. Matching results of each stereo pairs.

Table 8. Detailed information of matching results

	Spot-3		Spot-5		Komsat-2	
	정합 성공점	정합 실패점	정합 성공점	정합 실패점	정합 성공점	정합 실패점
OA 1	1261173	176581	19653557	2843672	6396461	1331073
OA 2	1262749	173923	19634998	2903244	6463639	1286148
OA 3	1166998	374659	17796365	6203104	6325630	1485907
OA 4	1263536	172367	19631852	2914319	6477273	1273927
OA 5	1263575	172137	19653124	2859315	6395103	1394010
OA 6	1165027	374547	17871493	6167025	5965093	1757729
OA 7	1264398	170226	19661425	2830396	6175482	1616973

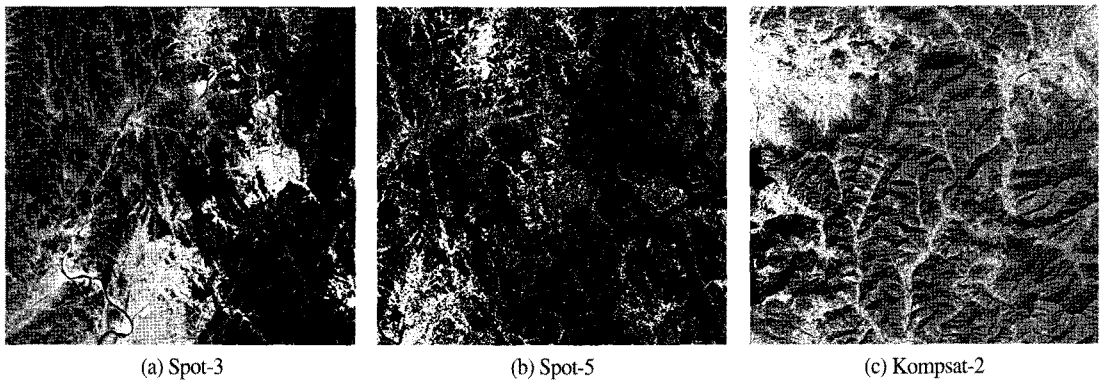


Fig. 4. Satellite images used for experiment.

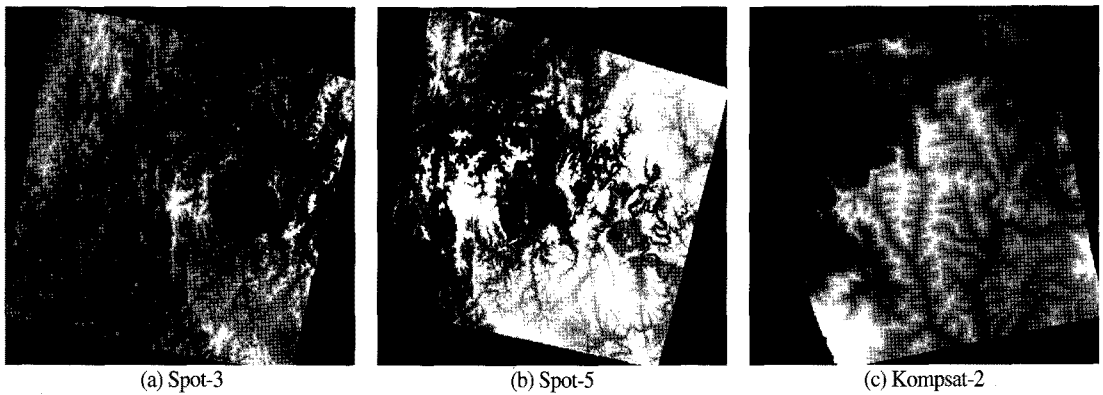


Fig. 5. DEMs generated from each image.

지 모델 별로 생성된 DEM의 결과는 정량적으로는 다소 차이를 보이고 있으나 육안 분석 시 거의 차이가 없어 OA1 모델을 적용하여 생성한 DEM을 대표적으로 제시 하였다. Table 9는 7가지 모델 별로 생성된 각각의 DEM에 대한 정확도 결과를 보여준다.

실험 결과는 앞서 수행한 센서 모델 정확도의 결과를 그대로 반영한다. 영상 정합 결과에서 확인할 수 있듯이

Spot의 경우 OA3, OA6 모델이 상대적으로 정합 성공 점이 적고 정합 실패 점이 많아 결과가 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. Komsat-2 결과 마찬가지로 앞서 추 론한 바와 같이 OA6, OA7 에서 좋지 않은 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 DEM 정확도 분석을 통해서도 나타난다. Spot 영상의 경우 마찬가지로 OA3, OA6 모 델을 적용한 DEM은 다른 DEM에 비해 낮은 정확도를

Table 9. Accuracy of DEM from Spot images

(MAE: Mean Absolute Error)

	Spot-3		Spot-5		Kompsat-2	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
OA 1	16.68 m	29.02 m	10.63 m	15.33 m	12.93 m	18.00 m
OA 2	16.08 m	27.59 m	10.85 m	15.62 m	12.77 m	16.85 m
OA 3	25.01 m	40.82 m	13.28 m	19.38 m	12.96 m	17.01 m
OA 4	18.63 m	28.46 m	10.55 m	15.24 m	12.85 m	17.15 m
OA 5	14.89 m	24.84 m	10.77 m	15.58 m	13.05 m	17.30 m
OA 6	25.47 m	41.16 m	13.64 m	19.77 m	13.33 m	18.31 m
OA 7	19.33 m	29.10 m	10.66 m	15.27 m	12.97 m	18.46 m

보이고 있음을 확인할 수 있다. 센서 모델 결과로부터 분석한 결과가 DEM 결과에도 반영되었다고 볼 수 있다. 또한 주목할 부분은 OA3, OA6 모델을 적용한 DEM의 경우 Spot-3은 다른 모델에 비해 10m 정도 수치의 차이를 보이고 있으나 Spot-5의 경우는 3~4m의 차이를 보여준다. 이는 DEM 정확도의 경우 절대 좌표 값을 비교하기 때문이다. 센서 모델 오차는 두 영상 모두 OA3, OA6 모델이 다른 모델에 비해 1 픽셀 정도의 차이를 보이고 있으나 Spot-3 영상의 경우 이가 10m에 해당하나 Spot-5의 경우 2.5m이기 때문에 절대 좌표 변환 시 이러한 결과가 반영되었다고 볼 수 있다. Kompsat-2 영상의 경우 1m 해상도를 갖고 있기 때문에 DEM 생성을 통한 절대 좌표 비교 시 모델 간의 차이가 더욱 작게 나타날 것으로 판단된다. 실제로 Table 9의 결과를 보면 모델 간의 DEM 정확도 차이가 매우 작은 것을 알 수 있다. 또한 DEM의 경우 정합 실패 점이나 오류 정합 점 등 오차가 매우 크게 나는 점의 영향을 받을 경우 모델 간의 작은 차이는 반영되기 어려울 수 있다는 점도 이러한 결과의 요인이 될 수 있다. 그러나 Spot 영상과는 달리 OA3 모델의 오차가 크지 않은 것

을 확인할 수 있으며 작은 차이기는 하나 OA6, OA7 모델의 정확도가 다른 모델에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3과 Table 8은 OA6, OA7 모델의 영상 정합 결과가 다른 모델에 비해 좋지 않음을 잘 보여주고 있다. 이를 바탕으로 볼 때 앞서 수행한 센서 모델 결과를 반영한다고 충분한 추론이 가능하나 DEM 정확도 차이가 작은 것을 감안해 Kompsat-2에 대해 추가적인 검증은 수행하였다. 스테레오 영상을 이용하여 스테레오 모델을 수립하고 3차원 지상좌표를 산출한 후 실제 GPS 측량 좌표와 비교하였다. 먼저 모델 점을 이용하여 스테레오 모델을 수립하고 검사 점의 Tiepoint를 수립된 모델에 적용하여 3차원 좌표를 산출하고 실제 측량된 좌표와 비교하였다. 모델 점과 검사 점의 개수는 앞서 Table 2에 제시한 것과 동일하게 적용하였으며 Table 9는 모델 점과 검사 점의 X, Y, Z 오차를 보여준다.

스테레오 모델 결과에서도 확인할 수 있듯이 OA6, OA7 모델이 다른 모델에 비해 다소 낮은 정확도를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이는 단영상 센서 모델 정확도에서 분석하였듯 Kompsat-2 영상의 경우 센서 모델을 위해서는 미지수의 개수를 많이 갖는 OA1, OA2

Table 10. Accuracy of Kompsat-2 stereo model

	모델 점 오차 (RMS, pixel)						검사 점 오차 (RMS, pixel)					
	Scene 62 stereo			Scene 63 stereo			Scene 62 stereo			Scene 63 stereo		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
OA1	0.64	0.73	0.41	0.81	1.22	0.99	0.87	1.35	1.19	1.15	1.30	1.16
OA2	0.62	0.71	0.45	0.77	1.20	0.98	1.05	1.23	0.95	0.99	1.42	1.49
OA3	0.66	0.72	0.55	0.86	1.23	1.13	1.09	1.29	0.97	1.20	1.35	1.23
OA4	0.90	1.39	0.48	1.10	1.48	1.07	0.80	1.31	1.07	1.21	1.64	1.38
OA5	0.70	0.79	0.41	1.23	1.35	1.15	1.06	1.02	0.97	0.97	1.48	1.18
OA6	0.88	2.23	2.35	1.22	2.29	2.40	0.71	2.32	2.16	1.22	1.94	2.15
OA7	0.99	2.45	2.35	1.28	2.55	2.57	0.54	2.41	2.57	1.32	2.13	2.28

모델 등이 적합함을 보여준다.

단 영상 센서 모델 정확도 분석, DEM 생성 실험, 스테레오 모델 정확도 실험을 통한 결과는 Spot 영상과 Kompsat 영상에서 나타나는 궤도 자세각 모델의 성능 차이를 잘 보여준다. 물론 실험에 사용한 기준점의 수가 다소 충분치 못하나 모두 현지 측량 후 DGPS 처리된 기준점이며 일련의 실험결과에서 일관적인 결과가 산출되었으므로 볼 때 매우 신뢰성 있는 결과로 보여진다. 이러한 실험 결과는 엄격한 물리적 모델로 분류되는 궤도 자세각 모델을 다양한 위성 영상에 적용시 유용한 정보라고 할 수 있다. 또한 앞으로 정확도 향상을 위한 모델의 개선과 새로운 위성 영상을 위한 센서 모델 개발에 있어, 이러한 영상에 따라 나타나는 모델의 성능의 차이를 이해하는 것은 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 대표적 물리적인 센서 모델 기법인 궤도 자세각 모델의 성능이 위성 자세 제어 방식이 다른 Spot과 Kompsat-2에 적용하였을 경우 나타나는 성능의 차이를 기술하였다. 이를 위해 센서 모델 정확도를 산출하였으며 생성한 정밀 DEM의 정확도 분석 및 스테레오 모델 정확도 분석을 수행하였다. 실험 결과는 두 영상에서 나타나는 물리적 센서 모델의 성능 차이를 잘 보여준다. 두 영상에서 나타나는 모델의 성능의 차이는 두 위성의 다른 자세제어 방식과 자세 추정 방식의 정확도 차이로부터 기인한다. 거울 회전 방식을 사용하는 Spot 영상의 경우 물리적 센서 모델 시 자세 정보를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 큰 차이를 보였다. Spot 영상의 경우 촬영 동안 거의 자세 변화를 하지 않는 거울 회전 방식의 택하며 정확도 높은 자세 정보를 제공하도록 설계되어 있어, 물리적 센서 모델 적용 시 위성의 자세 정보를 고려한 미지수 조합을 선택할 경우 가장 좋은 성능을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

반면 Kompsat-2의 경우 Spot과는 다소 다른 양상을 보이며 특히 Spot에서는 좋은 성능을 보여주었던 OA7 모델의 정확도가 Kompsat-2의 경우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 영상 취득 시 위성체 전체가 회전하는 몸통 회전 방식을 사용하는 Kompsat-2 영상

의 경우 영상을 촬영하는 동안 자세 정보의 변화가 Spot위성에 비해 크게 나타난다. 초기 모델 실험 결과 이러한 자세 제어 방식 특성으로 인해 자세 정보 추정이 다소 불안정적임을 확인할 수 있었다. Kompsat-2 영상의 경우 위치 또는 자세각만을 단순히 추정하는 OA6, OA7 모델로는 좋은 결과를 얻기 어려우며 따라서 미지수 개수를 많이 갖는 모델인 OA1, OA2 모델을 사용하는 것이 적절함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김태정, 2006. SPOT 위성영상에서의 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 비교, 한국측량학회지, 24(1): 47-55.
- 김태정, 김승범, 신동석, 2000. 대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구, 대한원격탐사학회지, 16(1): 73-86.
- 정재훈, 이태운, 김태정, 2008. 고해상도 위성영상을 이용한 정밀 DEM 생성 및 정확도 분석에 관한 연구, 26(4): 359-365.
- 조우석, 이동구, 2002. RFM을 이용한 고해상도 인공위성 센서모델링, 대한원격탐사학회지, 18(6): 337-344.
- Ahn, K. W., 2002. A Comparison of Rigorous Sensor Model and Rational Function Model for DEM Generation from Stereo SPOT Images, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 6(3): 321-327.
- Kim, T. and I. Dowman, 2006. Comparison of two physical sensor models for satellite images: position-rotation model and orbit-attitude model, *The Photogrammetric Record*, 21(114): 110-123.

- Kim, T., 2000. A Study on the Epipolarity of Linear Pushbroom Images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8): 961-966.
- Lee, H.-Y., T. Kim, W. Park, and H. K. Lee, 2003. Extraction of digital models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry, *Image and Vision Computing*, 21(9): 789-796.
- Teo, T. A. and L. C. Chen, 2003. Geometrical Comparisons between Rigorous Sensor Model and Rational Function Model for Quickbird Images, 대한원격탐사학회 03 Proceedings of ACRS 2003 ISRS, 2003 Nov. 03, 2003, 750-752.
- Radhadevi, P. V., R. Ramachandran, and A. S. R. K. V. Murali Mohan, 1998. Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(5): 262-271.
- Kim, T., H. Kim, and S. Rhee, 2007. Investigation of physical sensor model for modeling SPOT 3 orbits, *The Photogrammetric Record*, 22(119): 257-273.
- SPOT Image, 1997. The SPOT Scene Standard Digital Product Format, S4-ST-73-01-SI. 76 pages.
- SPOT Image, 2002. SPOT Satellite Geometry Handbook, S-NT-73-12-SI. 80 pages.