

연구논문

# 궤도기반 센서모델을 이용한 SPOT 위성 궤도모델링 정확도 분석 Accuracy analysis of SPOT Orbit Modeling Using Orbit-Attitude Models

김현숙\* · 김태정\*\*  
Kim, Hyun Suk · Kim, Tae Jung

## 要 旨

현재 위성영상에서 정확한 위치정보를 얻고자 할 때 일반적으로 위성영상에 대응되는 지상에서의 위치 정보, 즉 지상기준점이 필요하다. 이 논문에서는 지상기준점 없이 영상의 위치 정보를 얻기 위하여 동일궤도에서 연속적으로 촬영한 위성영상들 중에서 한 위성영상의 획득한 기준점으로 모델을 수립한 뒤, 수립된 센서모델을 동일궤도상의 다른 영상에 적용할 때의 센서모델의 정확도를 분석하고자 한다. 분석에 사용한 센서모델은 궤도기반센서모델을 사용하며, 여러 위성의 위치·자세 내삽법 및 미지수조합을 시험하여 궤도모델링에 적합한 내삽법(interpolation)과 최적의 미지수 조합을 알아보고자 했다. 실험은 총 420Km의 길이에 해당하는 SPOT-3의 영상 7장과 GPS수신기에서 취득한 기준점을 사용하였다. 실험결과 단일영상에서는 내삽법과 미지수 조합에 따른 결과의 차이는 크게 나타나지 않았으나 궤도모델링 시에는 미지수 조합과 자세와 위치의 내삽법에 따라 다양한 결과가 나타남을 알 수 있다. 또한 적절한 미지수조합과 내삽법을 사용하면 한 영상에서 추출한 기준점만으로 총 420Km의 궤도를 정확하게 모델 할 수 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 센서모델, 궤도기반센서모델, 내삽법, SPOT-3

## Abstract

Conventionally, in order to get accurate geolocation of satellite images we need a set of ground control points with respect to individual scenes. In this paper, we tested the possibilities of modeling satellite orbits from individual scenes by establishing a sensor model for one scene and by applying the model, which was derived from the same orbital segment, to other scenes that has been acquired from the same orbital segment. We investigated orbit-attitude models with several interpolation methods and with various parameter sets to be adjusted. We used 7 satellite images of SPOT-3 with a length of 420km and ground control points acquired from GPS surveying. Results of the conventional individual scene modeling hardly introduced differences among different interpolation methods and different adjustment parameter sets. As the results of orbit modeling, the best model was the one with Lagrange interpolation for position/velocity and linear interpolation for attitude and with position/angle bias as parameter sets. The best model showed that it is possible to model orbital segments of 420km with ground control points measured within one scene (60km).

**Keywords :** sensor model, orbit-attitude model, interpolation, SPOT-3

## 1. 서 론

2006년 7월 29일 우리나라 다목적 실용위성2호가 발사되었다. 이 위성은 우리나라의 두 번째 원격탐사용 위성으로 1m급 고해상도 카메라가 탑재되어있다. 앞으로 고해상도 위성영상을 이용한 지구 관측과 국토모니터링, 국가지리정보시스템 구축, 자원탐사, 재해감시, 환경감시 등의 여러 분야에서 정보 활용 가치가 높아질 것이다. 위

성영상의 위치정보는 센서모델의 정확도에 따라 그 정확도가 좌우되므로 센서모델의 정확도는 매우 중요하다. 1m급 고해상도 위성영상의 경우 정확도 높은 센서모델 수립이 정확한 지리정보의 획득여부에 영향을 끼칠 것이다. 따라서 위성영상에서 3차원 지형정보를 얻기 위한 센서모델의 기술 확보가 중요해질 것이다.

센서모델은 모델수립시 물리적인 파라미터 고려 여부에 따라 크게 물리적인 모델과 일반적인 모델로 구분할

2006년 9월 12일 접수, 2006년 10월 19일 채택

\* 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 석사과정 (sie06@inhaian.net)

\*\* 교신저자·정회원·인하대학교공과대학 지리정보공학과 조교수 (tezid@inha.ac.kr)

수 있다. 물리적인 모델은 센서의 초점거리(focal length), 카메라 내부의 CCD 화소의 크기 등의 위성의 센서정보와 위성이 영상을 촬영할 때의 궤도정보, 자세정보 등의 파라미터로 센서모델을 수립한다(김태정, 2005). 대표적인 물리적 모델은 항공영상의 공선방정식을 위성영상에 맞도록 변형한 공선방정식 기반 모델(Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994)과 위성의 궤도 및 자세각을 주요인자로 하는 궤도기반모델이 있다(Wolff, 1985; Radhadevi et al.,1998; SPOT Image, 2002). 일반적인 모델은 위성의 물리적인 특징이 아닌 일반적인 다항식으로 모델한 것이다. 일반적인 모델로는 DLT 모델(Direct Linear Transform; Gupta and Hartley, 1997)과 RFM 모델(Rational Function Model; Tao, 2001)이 있다.

센서모델은 위성영상의 위치와 실제 지상위치의 기하학적 관계를 수학적으로 정밀하게 나타내는 것이기 때문에 위성에 적합한 센서모델을 수립하는 것이 중요하다. 센서모델의 정확도는 위성에서 제공하는 궤도 및 자세정보와 위성영상의 위치에 대응되는 지상점, 즉 지상기준점의 위치정확도 등에 좌우된다. 지상기준점은 위성의 센서모델의 정확도 판단에 영향을 주기 때문에 기준점의 정확도가 중요하다. 또한 기준점은 센서모델의 수립과 검증에 위해 가능한 영상 내에 널리 분포되도록 해야 한다. 따라서 영상점에 대응되는 지상점의 정확한 위치를 얻기 위해 흔히 GPS측량을 하게 된다. 그러나 이러한 기준점 확보방식은 많은 시간과 비용이 소요되며 GPS측량이 어려운 지역을 촬영한 영상의 경우는 지상기준점의 위치 정확도가 매우 떨어지게 된다.

이 논문에서는 이러한 문제점을 극복하고 기준점 없이 영상의 위치정확도를 얻기 위한 하나의 방안으로, SPOT 영상을 물리적인 센서모델인 궤도기반모델에 적용하여 궤도모델링여부를 실험하였다. 즉, 동일궤도상에서 연속적으로 촬영한 위성 영상들 중에서 한 영상에서 취득한

기준점으로 센서모델을 수립하고 이를 동일한 궤도상의 다른 영상에 적용하여 센서모델의 정확도를 분석한다.

본 연구에서 실험데이터로 SPOT 영상을 사용하였으며, 지상기준점은 위에서 언급한 사항을 고려하여 GPS측량으로 확보하였다. 이때 SPOT 위성은 선형 푸시브룸 방식으로 영상을 촬영하므로 영상의 라인별로 카메라의 위치와 자세가 변하게 된다. 따라서 선형 푸시브룸 방식의 SPOT위성은 영상의 라인별로 위성의 위치, 속도, 자세 등의 외부표정요소를 내삽하는 여러 방법이 있을 수 있다. 이 논문에서는 여러 SPOT위성의 위치와 자세 내삽법을 실험하여 적합한 방법을 알아보았다. 또한 이 논문에서는 궤도기반모델에 포함된 외부표정요소인 위성의 위치, 속도, 자세에 존재하는 오차를 일곱 가지의 경우로 가정하여 각각의 경우에 오차를 제거할 수 있는 미지수 조합을 선택하여 궤도모델링 실험을 반복하였다. 이를 통하여 궤도모델링에 적합한 미지수 조합을 찾고자 하였다.

## 2. 궤도 기반 모델

### 2.1 궤도 기반 모델

궤도기반모델은 위성의 궤도와 자세 제어 방식에 기반한 물리적인 모델이다. 위성의 궤도 좌표계는 시간에 따라 위성의 위치와 속도벡터로 정의되며 이 좌표계를 기준으로 위성의 자세를 제어한다. 위성의 자세정보는 위성의 실제 좌표계와 궤도좌표계간의 회전이동각 Roll, Pitch, Yaw로 표시된다. SPOT 위성의 궤도 좌표계는 위성의 위치벡터 P와 속도벡터 V, 이 두 벡터에 수직인 벡터로 구성된다. 위치벡터 P는 지구중심으로부터 위성을 나타내는 방향으로 Yaw축을 나타낸다. 속도벡터 V는 궤도평면상에서 위치벡터 P를 직각으로 투영시킨 방향으로 Roll축을 나타낸다. 위성의 위치벡터 P와 속도벡터 V에 수직인 벡터를 Pitch 축은 정의한다(SPOT Image, 2002).

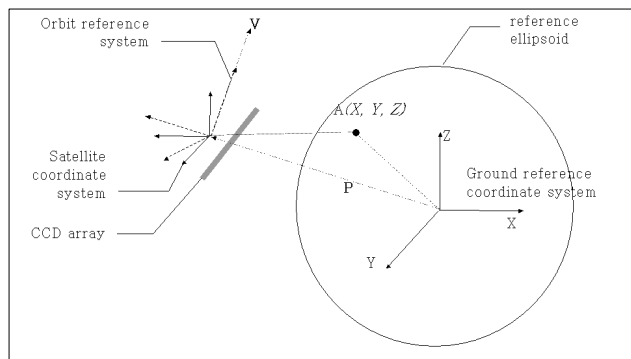


그림 1. 위성좌표계와 궤도좌표계와 지상좌표와의 관계(김태정, 2006)

궤도기반모델을 간단하게 행렬의 형태로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{pp}^T \mathbf{R}_{p,v}^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서  $(x, y)$ 는 센서좌표,  $f$ 는 센서의 초점거리,  $\lambda$ 는 비례상수,  $(X, Y, Z)$ 은 지상좌표를 의미하며,  $(X_s, Y_s, Z_s)$ 는 위성의 위치를 나타내는 외부표정요소이다.  $\mathbf{R}_{pp}$ 는 위성의 궤도좌표계와 실제 위성좌표계간의 위성의 자세각인 Roll, Pitch, Yaw각으로 정의되는 회전이동 행렬이다.  $\mathbf{R}_{p,v}$ 는 위성의 위치벡터  $\mathbf{P}$  및 속도벡터  $\mathbf{V}$ 에 의해서 정의되는 회전이동 행렬이다.  $\mathbf{R}_{p,v}$ 는 위성의 궤도좌표계로부터 지상좌표계로의 회전행렬을 나타낸다. 위에서 언급한 것과 같이  $\mathbf{R}_{pp}$ ,  $\mathbf{R}_{p,v}$ 의 정의는 위성마다 정의된 고유의 위성의 궤도좌표계 및 자세각에 따라 다르다. 실험에 사용된 SPOT 위성의  $\mathbf{R}_{pp}$ 와  $\mathbf{R}_{p,v}$ 는 식 (2)와 식 (3)으로 정의된다.

$$\mathbf{R}_{pp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos Pitch & \sin Pitch \\ 0 & -\sin Pitch & \cos Pitch \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos Roll & 0 & -\sin Roll \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin Roll & 0 & \cos Roll \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos Yaw & -\sin Yaw & 0 \\ \sin Yaw & \cos Yaw & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{p,v} = \begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x \\ X_y & Y_y & Z_y \\ X_z & Y_z & Z_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X_x \\ X_y \\ X_z \end{pmatrix} = \mathbf{X} = \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{Z}}{\|\mathbf{V} \times \mathbf{Z}\|}, \quad \begin{pmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{pmatrix} = \mathbf{Y} = \frac{\mathbf{Z} \times \mathbf{X}}{\|\mathbf{Z} \times \mathbf{X}\|}, \quad \begin{pmatrix} Z_x \\ Z_y \\ Z_z \end{pmatrix} = \mathbf{Z} = \frac{\mathbf{P}}{\|\mathbf{P}\|} \quad (4)$$

선형푸시브룸 위성영상은 위성이 궤도상에서 이동하면서 영상을 촬영한다. 이때 영상의 각 라인별로 각각의 위성의 위치벡터와 속도벡터, 위성의 자세각이 존재한다. 따라서 앞서 설명한 궤도기반모델을 적용하기 위해서는 영상의 모든 라인에 대해서 위성의 위치, 속도 및 자세각을 산출하는 과정이 필요하다. 다음 절에서 이를 위한 내삽법에 대해서 설명한다.

## 2.2 위성의 위치/속도벡터 내삽법과 위성의 자세 내삽법

실험에 사용한 SPOT 위성을 포함한 많은 위성들은 영상 촬영 당시의 위성의 위치·속도 및 자세각을 영상과 함께 제공해준다. 그러나 센서모델수립을 위해서는 매 영상라인별로 이 값들이 필요하다. 실제 제공되는 값은 특정한 시간간격을 가지고 제공된다. 따라서 각 영상라인별 위성의 위치·속도·자세각을 결정하기 위한 내삽방법이 필요하게 된다. 먼저 위성의 위치와 속도벡터를 내

삽하기 위한 방법으로는 2가지가 사용되고 있다. 첫번째 방법은 센서의 위치와 속도벡터를 시간 또는 영상좌표에 대한 2차식으로 내삽하는 방법이다(Gugan and Dowman, 1988). 이 방법은 지금까지 많은 논문에서 사용하는 방식으로 이 방식을 사용하기 위해서는 먼저 위성체에서 제공하는 궤도정보(Ephemeris Data)를 이용하여 영상의 시작 라인, 중간라인 및 끝라인에서의 위성의 위치 및 속도를 구한다. 구해진 값을 이용하여 특정라인  $x$ 에서의 위성의 위치( $X_s, Y_s, Z_s$ )와 속도( $V_x, V_y, V_z$ )를 시간에 대한 2차식을 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1x + b_1x^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2x + b_2x^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3x + b_3x^2 \\ V_x &= V_{x0} + a_4x + b_4x^2 \\ V_y &= V_{y0} + a_5x + b_5x^2 \\ V_z &= V_{z0} + a_6x + b_6x^2 \end{aligned} \quad (5)$$

두번째 방법은 라그랑제 다항식(Lagrange Polynomial)을 이용하여 내삽하는 방식이다(SPOT Image, 2002). SPOT 위성의 경우, 위성이 영상을 촬영할 때의 시각을 전후로 하여 1분 간격으로 측정된 8개의 위성의 위치벡터와 속도벡터 등의 정보가 존재하는 궤도정보를 제공한다. 이 값을 이용하여 특정 시각  $t$ 에서의 위성의 위치와 속도 값을 식 (6)과 같은 방정식을 이용하여 내삽할 수 있다(SPOT Image, 2002).

$$\begin{aligned} \vec{P}(t) &= \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{P}(t_j) \times \prod_{i=1, i \neq j}^8 (t-t_i)}{\prod_{i=1, i \neq j}^8 (t_j-t_i)} \\ \vec{V}(t) &= \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{V}(t_j) \times \prod_{i=1, i \neq j}^8 (t-t_i)}{\prod_{i=1, i \neq j}^8 (t_j-t_i)} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 수식에서  $\mathbf{P}(t_i)$ 는 시각  $t_i$ 에 측정된 위성의 위치값,  $\mathbf{V}(t_i)$ 는 시각  $t_i$ 에 측정된 위성의 속도벡터이다.

위성의 위치/속도벡터와 같이 자세각도 두 가지방식으로 내삽할 수 있다. 첫번째는 위성의 위치/속도벡터 내삽법에서 사용한 방법(Gugan and Dowman, 1988)과 유사하게 자세각을 시간에 대한 시간에 대한 2차식으로 모델링하는 방법이다. 이때의 수식은 식 (7)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} R &= R_0 + a_7t + b_7t^2 \\ P &= P_0 + a_8t + b_8t^2 \\ \Psi &= \Psi_0 + a_9t + b_9t^2 \end{aligned} \quad (7)$$

두번째 방법은 자세각을 구간선형(piecewise-linear)로 모델하는 방법이다(SPOT Image 2002). SPOT 위성의 경우, 약 8Hz의 간격으로 영상의 특정라인에서 Roll, Pitch, Yaw 각의 변화율(rate)을 제공한다. 영상의 시작라인에서의 자세각을 '0'으로 가정한 후, 자세각 변화율을 이용하여 시간에 대하여 적분하여 자세각 변화율이 측정된 라인에서의 자세각을 계산할 수 있다. 계산된 특정라인에서의 자세값들을 이용하여 나머지 라인에서의 자세값을 구간선형(piecewise-linear)으로 내삽할 수 있다.

자세각의 구간선형은 다음의 식 (8)과 식 (9)의 과정으로 이루어진다.

$$\begin{aligned}
 P(t_i) &= (P)_1 + \sum_{j=2}^i [P'(t_j) \times (t_j - t_{j-1})] \\
 R(t_i) &= (R)_1 + \sum_{j=2}^i [R'(t_j) \times (t_j - t_{j-1})] \\
 \Psi(t_i) &= (\Psi)_1 + \sum_{j=2}^i [\Psi'(t_j) \times (t_j - t_{j-1})]
 \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)에서  $[(P)_1, (R)_1, (\Psi)_1]$ 는 영상의 시작 라인에서의 자세각으로 0으로 가정한다.  $[P'(t), R'(t), \Psi'(t)]$ 는 특정라인에서 Roll, Pitch, Yaw 각의 시간에 따른 변화율(rate)이다. 각각 특정라인에서 Roll, Pitch, Yaw 각의 시간에 따른 변화율(rate)을 적분하여 특정 라인에서의  $[P(t), R(t), \Psi(t)]$ 값을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(t) &= P(t_i) + (P(t_{i+1}) - P(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \\
 R(t) &= R(t_i) + (R(t_{i+1}) - R(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \\
 \Psi(t) &= \Psi(t_i) + (\Psi(t_{i+1}) - \Psi(t_i)) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}
 \end{aligned} \tag{9}$$

이때의 영상의 시작 라인에서의 자세각으로 0으로 가정했을 때, 전후 시간에 따른 자세각 변화율을  $[P(t), R(t), \Psi(t)]$ 과  $[P(t_{i+1}), R(t_{i+1}), \Psi(t_{i+1})]$ 로 계산된 값으로 구간선형하여  $[P(t), R(t), \Psi(t)]$ 을 구한다. 식 (9)에 대입하여 위의 수식과 같은 방법으로 계산하여 위에서 언급한 것과 같이 시간에 따른 각각의 라인에서 자세각을 계산할 수 있다.

이 논문에서는 위성의 위치와 속도를 내삽하는 두가지 방식과 자세각을 내삽하는 두가지 방식에 대해서 실험을 통해서 결과를 비교하였다.

### 2.3 미지수 종류에 따른 궤도기반 센서모델

궤도기반모델은 모델을 나타내는 다항식에서 어떤 계수를 미지수로 하여 최소자승법에 의해 해당 계수값을

조절하는 지에 따라서 여러가지 특성을 나타낼 수 있다. 이 논문에서는 여러가지 미지수의 조합으로 실험하여 궤도기반 센서모델의 성능을 분석하기로 한다.

궤도 기반 모델에서 위성의 위치와 속도, 자세를 표현하는 방정식의 계수 중 미지수를 선정하여 여러 방식의 미지수로 조합하여 표 1과 같이 나타내었다. 각각의 미지수들은 궤도와 자세 정보의 오차 특성이 존재함을 가정한다.

OA-1 모델은 12개의 미지수로 위성의 위치, 위치 변화율 및 위치 가속도와 자세각으로 정의 하였다. OA-2 모델은 위성의 위치, 위치 변화율 및 위치 가속도와 자세각 중 Yaw의 각과 변화율, 가속도항을 미지수로 하였다. OA-3 모델은 위성은 위치정보에 오차가 존재하고 위성의 자세각 정보의 오차를 무시하는 모델이다. 이에 OA-3 모델은 위성의 위치, 위치 변화율 및 가속도항을 미지수로 한다. OA-4 모델은 위성의 위치오차를 무시하고 위성의 자세오차를 고려하여 위성의 회전각 또는 자세각과 변화율, 가속도항을 미지수로 한다. OA-5 모델은 위성의 위치 오차와 자세각 오차를 미지수로 나타낸 모델로 Radhadevi et al. (1998)이 제시한 모델의 미지수와 같다. OA-6 모델은 위성의 위치의 상수항만을 미지수로 가정한 모델이고, OA-7 모델은 위성의 자세각만을 미지수로 나타낸 모델이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 실험 데이터 및 실험 과정

실험에 사용한 위성영상은 SPOT-3위성으로 동일궤도에서 연속적으로 촬영한 7개의 영상으로 구성된 2개의 스트리프이다. 각각의 스트리프는 스테레오 영상으로 이루어져있다. 한 영상이 포함하는 지역은 60Km로 1개의 스트

표 1. 실험에 사용한 궤도 기반 모델에서의 미지수 종류

Orbit-Attitude 모델	미지수
OA-1	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, R_0, P_0, \Psi_0$
OA-2	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \Psi_0, a_9, b_9$
OA-3	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3$
OA-4	$R_0, \dot{R}, \ddot{R}, P_0, \dot{P}, \ddot{P}, \Psi_0, \dot{\Psi}, \ddot{\Psi}$
OA-5	$X_0, Y_0, Z_0, R_0, P_0, \Psi_0$
OA-6	$X_0, Y_0, Z_0$
OA-7	$R_0, P_0, \Psi_0$

립의 범위는 약 420Km이다. 그림 2과 같이 스트립의 가장 윗부분에 위치한 지역은 춘천지역이며, 6개 영상이 포함하는 지역은 양평, 천안, 대전, 전주, 광주, 나주이다.

SPOT 위성은 태양의 이동방향과 일치하는 태양 동기 궤도(sun-synchronous)의 특징을 가지고 있다. 이때 위성 영상의 촬영방향이 우리나라를 기준으로 할 때 위에서 아래로 내려오는 방향인 Descending node로 촬영한다. 따라서 스트립의 위치가 서쪽방향으로 기울어져있다. Strip-1은 동쪽으로 +19.8°, Strip-2는 서쪽으로 -23.4°의 경사각을 가지고 촬영되었다.

실험을 위하여 사용한 총 지상기준점(GCP, Ground Control Points)은 Strip-1, Strip-2 각각 157, 153개이며, 지상기준점 획득을 위해 GPS 측량을 하였다. 표 2에서 각각의 지역의 지

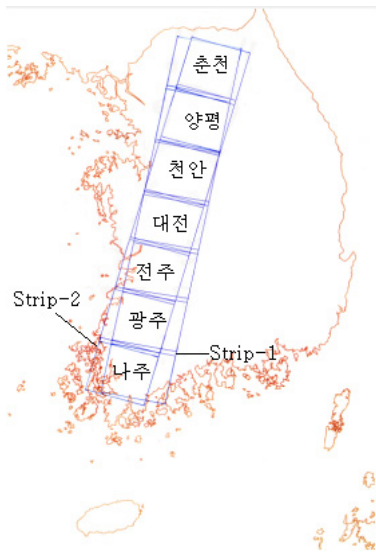


그림 2. 실험에 사용한 위성영상

표 2. 실험에 사용한 SPOT 영상의 특징

ID	Strip-1	Strip-2
Satellite	SPOT3	SPOT3
Date of Acquisition	4 April 1995	28 Jan 1995
Tilt Angle	+19.8°	-23.4°
No of GCPs(춘천)	16	15
No of GCPs(양평)	22	20
No of GCPs(천안)	26	25
No of GCPs(대전)	27	27
No of GCPs(전주)	25	25
No of GCPs(광주)	23	23
No of GCPs(나주)	18	18

상기준점 총 개수를 나타낸다. Strip-1을 위한 기준점들은 춘천은 16점, 양평은 22점, 천안은 26점, 대전은 27점, 전주는 25점, 광주는 23점, 나주는 18점이다. Strip-2의 각 지역에 따른 기준점은 표 2와 같다. Strip-1영상의 지상 기준점의 위치를 그림 3에서 확인해 볼 수 있다.

Strip-1영상의 춘천 16개의 기준점들 중에서 8개의 점들은 궤도기반센서모델 수립에 사용하였고, 나머지 8개의 점들은 궤도기반센서모델의 정확도 분석에 사용하였다. 센서모델 수립에 사용된 춘천지역을 제외한 양평, 천안, 대전, 전주, 광주, 나주 지역의 기준점들은 춘천을 제

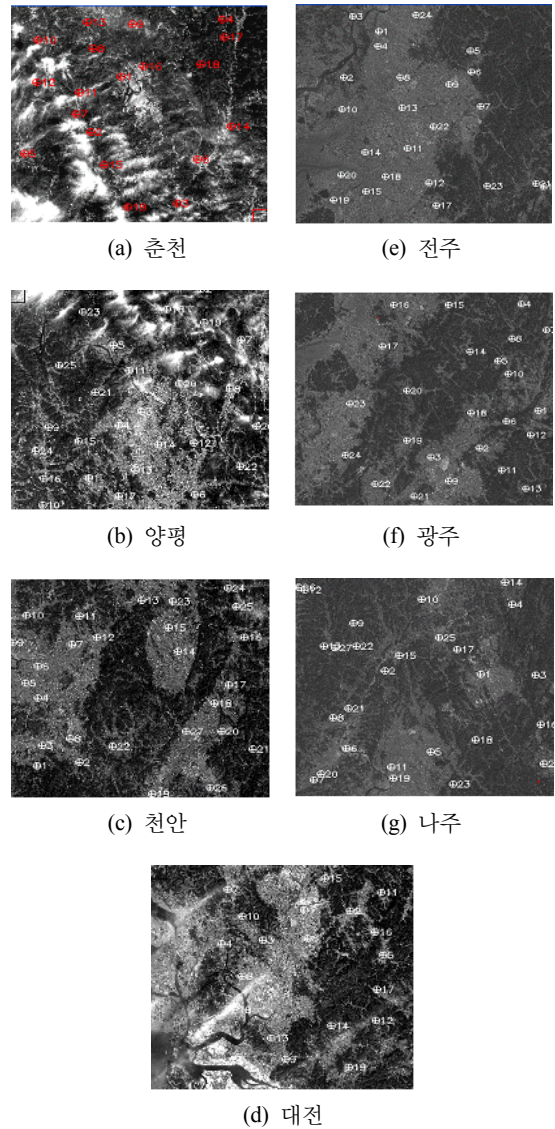


그림 3. SPOT 위성의 7개 영상에서의 지상기준점의 위치

외한 인접 지역에 센서 모델을 적용했을 때의 정확도 분석을 위해 사용하였다. Strip-2영상의 춘천 15개의 기준점들 중에서 8개의 점들은 궤도기반센서모델 수립에 사용하였고, 나머지 7개의 점들은 궤도기반센서모델의 정확도 분석에 사용하였다. 춘천지역을 제외한 영상의 기준점들은 Strip-1의 실험방법과 동일한 방식으로 수립된 센서모델의 정확도 분석에 사용하였다.

### 3.2 위성의 위치/속도벡터와 자세각의 각각의 내삽방식과 결과 비교

앞 절에서 위성의 위치와 속도벡터 내삽법을 시간에 대한 2차식으로 내삽하는 방법과 라그랑제 다항식(Lagrange Polynomial)으로 내삽하는 2가지 방법을 소개하였다. 또한, 자세각 내삽방식으로는 자세각에 대하여 시간 t에 대하여 2차식으로 내삽하는 방법과 구간선형으로 내삽하는 2가지 방법을 소개하였다.

이 절에서는 가장 적절한 내삽법에 대해 알아보려고 각각의 위치와 속도벡터 내삽방식과 자세내삽방식을 조합하여 실험하였다. 다음의 표 3과 표 4는 각각 이때의 Strip-1과 Strip-2의 실험결과를 나타내었다. 이때 수립된 모델은 기준영상인 춘천영상의 기준점을 사용했으며 동일한 궤도상에서 촬영한 다른 영상에 이 모델을 적용하여 궤도모델링의 정확도를 판별할 수 있다.

실험결과 궤도기반 모델은 위성의 위치/속도와 자세 내삽방식에 따라 실험결과가 매우 민감함을 알 수 있었다. 위성의 위치 내삽법으로는 라그랑제 다항식으로 내삽했을 때 모델의 성능이 좋았다. 그러나 표 3, 4에 나타난 것과 같이 자세를 구간선형으로 내삽할 경우는 위치의 내삽법으로 2차식으로 했을 때 200Km이내의 궤도모델링에서는 사용이 가능하다. 또한 자세내삽법은 2차식내

표 3. Strip -1에서 OA-7모델로 궤도모델링했을 때의 내삽법 비교

Scene ID	OA-7(pixels, rmse)			
	2차식	라그랑제	2차식	라그랑제
위치 내삽법				
자세 내삽법	2차식	2차식	구간선형	구간선형
춘천	4.149	1.326	1.137	1.162
양평	64.991	6.687	1.408	1.392
천안	265.544	21.148	1.436	1.405
대전	741.087	45.741	1.985	1.421
전주	1512.707	79.961	4.561	1.532
광주	2354.245	121.421	8.736	1.603
나주	4521.216	170.532	14.664	1.708

삽법보다는 구간선형내삽법을 사용해야 하는 것으로 나타났다.

Strip-1에서 OA-7 모델의 위성의 위치와 자세의 내삽방식에 따른 궤도 기반 모델의 성능을 그림 4에 나타내었다.

위성의 위치 내삽법에는 라그랑제 다항식이 좋고, 위성의 자세 내삽법에는 시간에 대한 2차식보다는 구간선형 내삽법이 탁월하게 좋다. 따라서 자세 내삽 방식에는 반드시 구간 선형방식을 사용해야 한다.

### 3.3 미지수 종류에 따른 궤도기반 모델 결과 비교

앞 절에서는 궤도기반모델의 위성의 위치와 자세각을 내삽하여 나타난 실험결과를 비교분석하여 적합한 내삽법을 알아보았다. 앞 절의 실험결과 위성의 위치내삽법과 자세각내삽법의 최적의 조합은 라그랑제와 구간선형으로 나타났다. 이 절에서는 최적의 내삽법을 사용하여 궤도기반모델에서의 적합한 미지수 조합을 실험을 통해 알아보았다.

표 4. Strip -2에서 OA-7모델로 궤도모델링했을 때의 내삽법 비교

Scene ID	OA-7(pixels, rmse)			
	2차식	라그랑제	2차식	라그랑제
위치 내삽법				
자세 내삽법	2차식	2차식	구간선형	구간선형
춘천	2.694	2.692	2.215	2.213
양평	8.873	8.962	1.815	1.806
천안	30.857	31.456	1.811	1.741
대전	66.203	68.302	2.430	1.632
전주	112.270	117.227	4.961	1.287
광주	166.652	176.055	9.298	1.487
나주	231.832	247.863	15.584	1.309

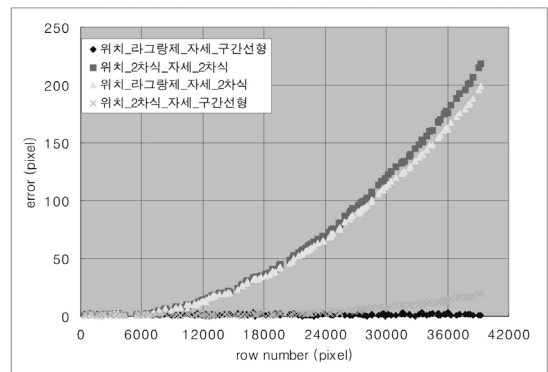


그림 4. Strip -1에서 OA-7모델의 내삽법 비교

궤도기반모델의 7가지의 미지수 조합의 자세한 설명은 표 1에서 자세히 설명하였다. Strip-1과 Strip-2에서 정의된 미지수의 조합에 따라 7개의 궤도기반모델을 수립하여 실험결과를 표 5와 표 6에 나타내었다.

여러 가지 미지수 조합에 따른 궤도모델링의 결과, Strip-1과 Strip-2에서 모두 춘천지역영상에서의 센서모델링 정확도는 미지수 조합에 관계없이 모두 3픽셀이내로 오차를 나타내고있다. 보통 모델 수립 결과 3픽셀이내로 모델의 오차가 나타나면 적합한 모델로 구분할 수 있기 때문에 단일영상모델링에서의 결과, 미지수 조합에 관계없이 궤도기반모델이 수립되었다고 볼 수 있다. 그러나 춘천지역으로부터 점차 먼 지역의 영상으로 수립된 센서모델을 적용했을 때의 정확도는 사용한 미지수조합에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그림 5는 각각 정의된 미지수 조합에 따른 7개 모델들의 궤도모델링 성능을 나타내었다.

궤도모델링의 우수한 결과를 나타내주는 모델은 미지수 간의 관계가 위성의 위치의 상수항을 미지수로 가정한 OA-6과 위성의 자세각만을 미지수로 가정한 OA-7모델이며, OA-7모델이 OA-6모델보다 모델수립시의 오차가 적다. 이 두 모델들은 나주지역에서의 궤도모델링시 100픽셀 이상의 오차를 보여주는 OA-1~4모델들과 달리 오차가 3픽셀이내로 궤도모델링시 적합한 모델들임을 보여준다.

OA-5모델도 궤도모델링시 기준영상에서 멀어질수록 모델의 오차가 크게 나타나지만, 춘천에서 양평으로 이어지는 궤도 모델링에서는 어느 정도는 수립한다고 볼 수 있다.

OA-1은 2차 미지수를 포함하는 모델로 모델 중에 미지수를 많이 포함하고 있다. 다른 모델에 비해 많은 미지수들은 모델의 관계를 세밀하게 정의하여 외부표정요소를 구할 때 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실제로 이 실험결과처럼 미지수의 관계가 좀더 세밀하게 정의된 모델

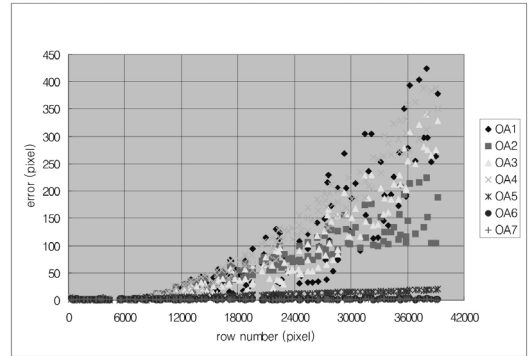


그림 5. Strip-1의 미지수 종류에 따른 궤도 기반 모델의 성능 비교

표 5. Strip-1의 최적의 내삽법을 사용한 미지수 종류에 따른 궤도모델링의 결과

Scene ID	OA-1 (pixels, rmse)	OA-2 (pixels, rmse)	OA-3 (pixels, rmse)	OA-4 (pixels, rmse)	OA-5 (pixels, rmse)	OA-6 (pixels, rmse)	OA-7 (pixels, rmse)
춘천	2.655	2.609	2.698	2.732	1.629	1.416	1.162
양평	8.657	8.796	5.939	9.753	3.729	1.895	1.392
천안	31.950	21.754	22.085	34.861	6.100	2.260	1.405
대전	68.503	63.031	51.969	86.230	8.869	2.124	1.421
전주	105.312	93.671	90.177	155.478	11.978	2.081	1.532
광주	189.345	125.219	161.116	218.920	15.129	2.823	1.603
나주	291.169	153.452	260.619	327.090	17.484	2.901	1.708

표 6. Strip-2의 최적의 내삽법을 사용한 미지수 종류에 따른 궤도모델링의 결과

Scene ID	OA-1 (pixels, rmse)	OA-2 (pixels, rmse)	OA-3 (pixels, rmse)	OA-4 (pixels, rmse)	OA-5 (pixels, rmse)	OA-6 (pixels, rmse)	OA-7 (pixels, rmse)
춘천	1.442	1.373	2.202	1.645	1.718	2.450	2.009
양평	11.614	18.948	9.851	17.136	2.490	2.128	1.787
천안	39.818	94.918	35.904	82.377	3.331	3.309	1.648
대전	88.041	255.494	83.545	220.959	4.566	4.023	1.479
전주	163.025	573.180	158.787	485.750	6.158	4.698	1.510
광주	218.250	967.075	227.280	908.969	7.362	5.131	1.582
나주	340.834	2308.834	354.005	2095.467	8.701	6.387	1.454

이 좋은 결과를 항상 가져오는 것은 아니다. 궤도모델링의 경우 한 영상에서 수립된 모델을 동일한 궤도상의 영상에 모델을 적용하는 것으로 모델 관계가 복잡할수록 오차전파가 발생되어 단순한 모델인 OA-7이 좋은 결과를 나타내는 것이다.

궤도기반 모델 중 궤도모델링시 가장 적은 오차를 나타내는 OA-7 모델의 오차의 상대적인 크기 및 방향을 그림

6에 나타내었다. 왼쪽 그림은 위성영상에서 측량한 지상점의 위치를 나타냈으며 그때의 위치에서 오차가 나타내는 방향을 지상기준점의 위치는 점으로 오차가 나타내는 방향을 직선으로 나타내어 오차의 방향성을 나타내었다.

SPOT 위성영상에서의 미지수 종류에 따른 궤도 기반 모델 실험 결과, 미지수 조합을 단순한 모델일수록 모델의 성능이 좋으며, 위성의 자세각만을 미지수로한 OA-7

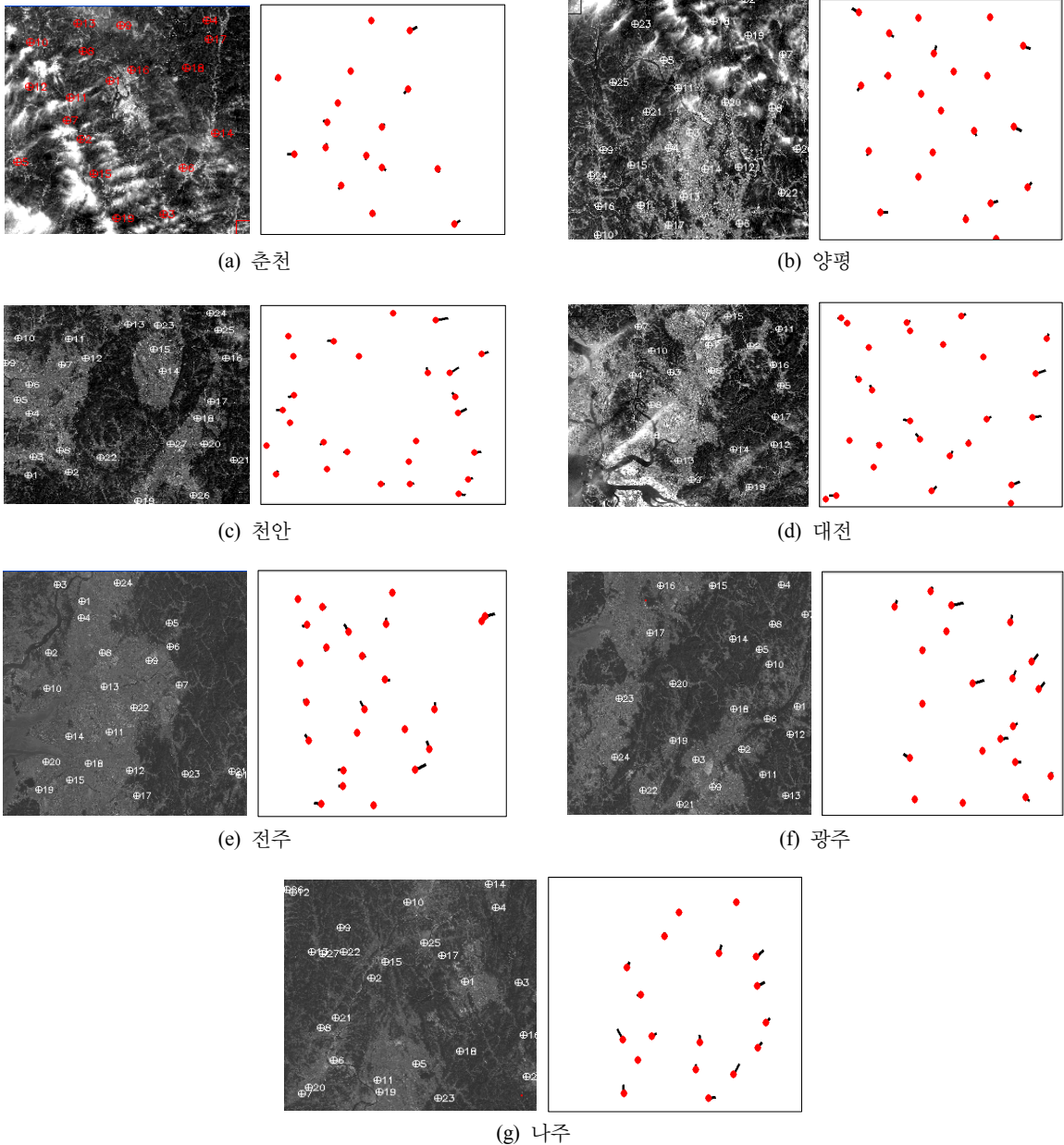


그림 6. Strip-1의 OA7의 센서모델의 오차 벡터 맵(행/열의 오차배율:100)



모델의 궤도모델링시 모델의 오차율이 가장 안정적이며, 가장 적합한 모델이다.

**3.4 궤도기반센서모형의 기준영상의 위치에 따른 실험 결과**

앞 절에서는 춘천 지역의 위성영상에 대하여 여러 센서 모델을 수립한 후, 인접지역인 양평, 천안, 대전, 전주, 광주, 나주 등의 영상의 기준점을 이용하여 센서 모델의 정확도를 분석하였다. 이 절에서는 앞서 실험한 Strip-1과 Strip-2의 맨 윗부분의 춘천지역이 아닌 맨 아래부분인 나주지역에서 센서 모델을 수립한 후 나주지역의 윗쪽에 위치한 다른 6개의 인접지역에 센서모형을 적용하여 실험하였다. 이때의 실험결과를 표 7과 표 8에 나타내었다.

Strip-1과 Strip-2에서 나주지역의 단일영상에 의한 모델링 실험 결과도 춘천지역의 실험결과와 같이 미지수 조합에 관계없이 모델이 수립된다. Strip-1의 나주지역을 기준영상으로 하고 다른 지역에 모델을 적용했을 때에는 기준영상의 위치에 관계없이 OA-6, OA-7모델들의 궤도 모델링의 결과는 3픽셀이내의 모델의 오차율을 나타낸다. Strip-2의 경우는 OA-7모델과 OA-6모델 간의 궤도 모델링의 차이가 존재하며, OA-7모델의 궤도모델링의

결과가 좋다. Strip-1과 Strip-2에서 OA-7모델에서는 2픽셀이내의 결과를 나타내지만 OA-6모델은 2~5이내의 픽셀의 차이를 보여주고 있다. 이는 SPOT-3영상의 1 픽셀의 공간해상도가 10m임을 고려할 때 약 20m~50m 이내의 거리 오차가 나타나는 것으로 OA-7모델이 OA-6모델보다 궤도모델링에 적합하다고 볼 수 있다. 그림 7에 Strip-1의

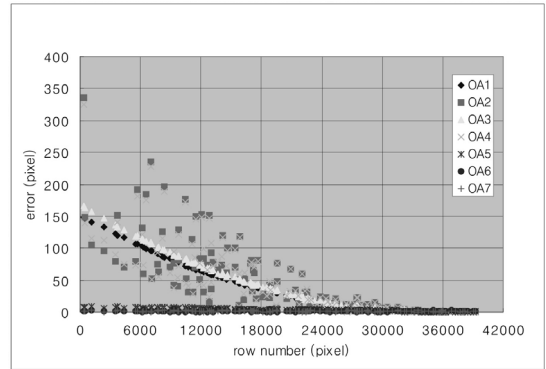


그림 7. Strip-1의 최적의 내삽법에서의 미지수 조합에 따른 7개의 센서 모델의 정확도

표 7. Strip-1에서 나주지역을 기준영상으로 했을 때 미지수 조합에 따른 실험결과

Scene ID	OA-1 (pixels, rmse)	OA-2 (pixels, rmse)	OA-3 (pixels, rmse)	OA-4 (pixels, rmse)	OA-5 (pixels, rmse)	OA-6 (pixels, rmse)	OA-7 (pixels, rmse)
춘천	129.734	156.348	144.867	154.102	7.793	1.878	1.764
양평	85.346	117.611	95.341	114.518	6.514	1.973	1.794
천안	54.955	84.862	61.316	85.759	5.237	2.291	1.693
대전	29.524	43.182	32.813	44.489	3.782	2.099	1.451
전주	12.058	12.925	13.354	13.338	2.957	2.133	1.668
광주	3.099	6.132	4.184	6.154	2.080	1.679	1.495
나주	0.957	0.940	1.378	1.158	0.982	1.412	1.219

표 8. Strip-2에서 나주지역을 기준영상으로 했을 때 미지수 조합에 따른 실험결과

Scene ID	OA-1 (pixels, rmse)	OA-2 (pixels, rmse)	OA-3 (pixels, rmse)	OA-4 (pixels, rmse)	OA-5 (pixels, rmse)	OA-6 (pixels, rmse)	OA-7 (pixels, rmse)
춘천	66.887	335.456	71.441	410.677	3.338	5.996	2.431
양평	45.666	239.180	53.017	272.426	3.132	5.384	2.032
천안	29.818	136.673	39.492	147.182	2.473	3.925	1.750
대전	20.358	83.610	23.770	86.232	1.973	3.314	1.708
전주	8.581	23.178	10.874	22.520	1.801	2.000	1.402
광주	3.416	10.798	3.746	10.581	1.737	2.174	1.700
나주	1.065	1.061	1.542	1.098	1.166	1.577	1.180

7가지 미지수 조합에 따른 궤도모델링의 결과를 나타내었다.

이 절의 궤도모델링 실험으로 춘천지역실험 결과와 같이 특정영상에서 얻은 기준점으로 전체궤도모델링이 가능함을 보여준다. 특히 스트립의 윗부분에 위치한 기준영상만이 인접한 영상에 적용했을 때 모델의 성능이 우수한 것으로 나타날 뿐 아니라 스트립의 아래에 위치한 영상도 모델 성능이 우수한 것으로 나타난다. 이는 기준영상의 위치에 따라 센서모델 성능이 영향 받지 않는다는 것을 의미함으로써 이 실험 결과는 이 실험의 목적에 상당히 부합하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 어느 한 지역에서 궤도기반모델을 수립한 후 동일궤도상의 다른 지역에 모델을 적용했을 때의 가능성에 대하여 알아 보았다. 먼저 이를 위해 실험에 사용한 영상은 동일한 궤도상에 촬영한 7개의 다른 영상으로 구성된 스테레오 Strip-1, Strip-2를 사용하였다. 궤도모델링이 기준영상의 위치에 관계없이 성립하는 것을 알아보기 위해 춘천과 나주지역을 기준영상으로 실험하였다. 궤도모델링을 위해 사용한 센서모델은 궤도기반모델을 이루는 미지수들을 조합하여 7개의 모델을 구성하고 위성의 위치/속도와 자세에 대한 내삽법도 라그랑제 다항식과 2차식, 구간선형과 2차식으로 실험하였다.

실험결과 미지수 조합에 따른 궤도기반모델의 성능은 Strip-1, Strip-2의 단일 영상에서 미지수 종류에 따라 거의 차이가 나타나지 않는다. 또한 단일영상에서의 내삽방식에 따른 성능의 차이도 크게 나타나지 않는다. 그러나 수립한 센서모델을 동일한 궤도상의 다른 지역에 적용하였을 때 내삽방식과 미지수 조합에 따라 궤도모델의 성능이 민감하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 궤도모델링의 최적의 내삽법으로 라그랑제 다항식과 구간선형이며, 미지수간의 관계를 단순화시킨 OA-7모델이 최적의 센서모델이다. Strip-1과 Strip-2에서 기준영상의 위치를 변화시켜 궤도모델링한 결과 적절한 내삽법과 미지수조합을 사용하면 기준영상의 위치에 관계없이 약 420Km의 궤도모델링이 가능한 것으로 나타났다.

이 논문에서는 궤도모델링을 위하여 한 영상에서 센서모델을 수립한 후 동일한 궤도상의 다른 영상에 대한 센서모델의 적용타당성을 검토하기 위하여 약 420Km길이의 스트립을 사용하였다. 향후 지속적인 연구로 보다 긴 길이의 스트립에서의 궤도모델링 실험, 그리고 SPOT 영

상이 아닌 다른 위성영상에 대한 궤도모델링 실험 등을 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 김태정, 2005. "선형 푸시브룸 센서모델의 번들조정 정확도 및 외부표정요소추정 정확도 분석", *한국측량학회지*, 23(2):137-145.
2. 김태정, 김승범, 신동석, 2000. "대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구", 16(1):73-86
3. 신동석, 이영란, 1997. "선형 CCD카메라 영상의 기하학적 모델 수립 및 좌표변환", *대한원격탐사학회지*, 13(2):85-98
4. ASPRS, 2004. "Manual of Photogrammetry (5<sup>th</sup> Edition)", J.C. McGlone(Editor)
5. Gagan, D.J. and Dowman, I.J., 1988. "Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery", *Photogrammetric Record*, 12(72): 787-796.
6. Gupta, R. and Hartley, R., 1997. "Linear pushbroom cameras", *IEEE Trans, PAMI*, 19(9): 963-975.
7. Kim, T., 2006. "Modeling Satellite Orbital Segments using Orbit-Attitude Models", *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(1):63-73.
8. Kim, T. and Dowman, I.J., 2006. "Comparison of Two Physical Sensor Models for Satellite Images: Position-Rotation Model and Orbit-Attitude Model", *The Photogrammetric Record*, 21(114): 110-123.
9. Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H. and Kruck, E., 1987. "Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(9):1223-1230.
10. Orun, A. B. and Natarajan, K., 1994. "A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and Photography: Tradeoff", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12): 1431-143.
11. Radhadevi, P.V., Ramachandran, R., and Mohan, M., 1998. "Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(1998): 262-271.
12. SPOT Image, 1997. "The SPOT Scene Standard Digital Product Format", S4-ST-73-01-SI.
13. SPOT Image, 2002. "SPOT Satellite Geometry Handbook", S-NT-73-12-SI
14. Wolff, T., 1985. "An Image Geometry Model for METEOSAT", *Int. J. Remote Sensing*, 6(10): 1599-1606.