

## RFM을 이용한 고해상도 인공위성 센서모델링

조우석 · 이동구  
인하대학교 토목공학과

### RFM for High Resolution Satellite Sensor Modeling

Woo-Sug Cho and Dong-Goo Lee  
Department of Civil Engineering, Inha University

**Abstract :** In general, in order to obtain position information from satellite images, satellite sensor model which represents the geometric relationship between sensor and targeted area should be established in the first place. However, it is not simple for modelling pushbroom satellite sensor due to the image capturing process. In recent development of new generation imaging sensors, a generic sensor model, which is applicable to all types of sensors such as frame, pushbroom, whiskbroom, and SAR is in great need to the remote sensing and photogrammetry community. In this paper, the RFM as sensor model was implemented with KOMPSAT EOC and SPOT satellite images and analyzed in cases where the number and distribution of ground control points were varied. The test results of RFM were presented and compared with those of Direct Linear Transformation(DLT).

**Key Words :** Sensor Model, RFM, DLT, SPOT, KOMPSAT-EOC, High Resolution.

**요약 :** 일반적으로 위성영상으로부터 위치정보를 획득하기 위해서는 센서와 촬영대상간의 기하학적 관계를 규명하는 센서모델링이 선행되어야 한다. 그러나 Linear CCD (Charge Coupled Device) 배열에 의해 얻어지는 Pushbroom 위성영상은 Frame 센서에 의해 얻어지는 영상과 달리 영상을 획득하는 동안에 투영중심의 위치와 자세가 시간에 따라 변하기 때문에 정확한 센서모델링에 어려움이 있다. 또한 영상에 대한 궤도정보가 알려지지 않거나 불확실한 경우에는 물리적 센서모델의 적용에 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 논문에서는 인공위성의 궤도정보가 알려지지 않거나 불확실한 경우에 Frame, Pushbroom, Whiskbroom, SAR 영상 등 다양한 영상자료에 적합한 센서모델로서 RFM(Rational Function Model)의 적용가능성을 검토하였다. 이를 위해서 KOMPSAT EOC 영상과 SPOT영상에 RFM을 적용하였으며, 지상기준점을 20개, 30개, 40개, 50개, 60개, 70개의 경우로 나누어 지상기준점의 개수와 배치 및 RFM 계수의 차수변화에 따른 RFM의 정확도를 분석하였다. 또한 수학적 모델 중에 하나인 DLT를 구현하여 RFM과 비교하였다.

## 1. 서론

Pushbroom 센서에 의해 얻어진 위성영상으로부터 3차원 지형정보를 획득하기 위해서는 센서모델링이 반드시 필요하다. 일반적으로 센서모델은 물리적 모델(physical model)과 수학적 모델(mathematical model)로 구분할 수 있으며, 물리적 센서모델은 수학적 센서모델에 비해 상대적으로 정확하지만 인공위성의 궤도정보와 센서에 대한 정보 등이 필수적이라는 단점이 있다. 반면에 수학적 센서모델은 인공위성의 궤도정보를 얻을 수 없거나 불확실한 경우에 쉽고 빠르게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 영상 전체에 잘 분포된 많은 수의 지상기준점이 필요하다는 단점이 있다.

OGC(The OpenGISTM Consortium)에서는 4 종류의 기하모델 즉, Polynomial model, Grid interpolation model, Rational Function Model (RFM), Universal real-time image geometry model 을 정의하였다. 이 중 RFM은 실시간 사용에 적합한 일반적인 모델(generic model)로서 Frame, Pushbroom, Whiskbroom, SAR 영상 등 다양한 영상자료에 신속하고 용이하게 적용할 수 있다. 실질적으로 OGC에서 제안한 RFM은 센서모델 보다는 image transfer standard로 다양한 물리적 모델과 수학적 모델을 RFM으로 변환하여 센서모델에 대한 전문지식이 없는 사용자를 위해 제안된 일반적인 모델이다. 그러나 본 논문에서는 센서모델로서 RFM의 적용가능성을 검토하기 위하여 KOMPSAT-1 EOC 영상과 SPOT 영상에 RFM을 적용하여 정확도를 분석하였으며, 수학적 센서모델 중에 하나인 DLT(Direct Linear Transformation)와 비교하였다. 또한 지상기준점의 개수와 배치, 그리고 RFM 계수의 변화에 따른 RFM의 정확도를 분석하였다.

## 2. Rational Function Model(RFM)

### 1) RFM의 기본식

RFM은 다항식비례모델로 분모와 분자가 고차함수의 다항식으로 구성되어 있다. 즉, RFM은 영상내의 임의의 점과 이에 대응하는 지상점과의 관계를 고차함수의 다항식 형태로 식(1)과 같이 표현된다.

$$r_n = \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{P_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_2} \sum_{k=0}^{n_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (1)$$

식(1)에서 지상좌표  $(X_n, Y_n, Z_n)$ 와 영상좌표  $(r_n, c_n)$ 는 모두 -1.0과 1.0사이의 범위로 정규화된 좌표로서, 지상좌표  $X, Y, Z$ 의 고차함수로 구성된 다항식  $P_1(X_n, Y_n, Z_n)$ 을 자세히 표현하면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k \\ &= a_0 + a_1 Z + a_2 Y + a_3 X + a_4 ZY + a_5 ZX \\ &\quad + a_6 YX + a_7 Z^2 + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} ZXY \\ &\quad + a_{11} Z^2 Y + a_{12} Z^2 X + a_{13} Y^2 Z + a_{14} Y^2 \\ &\quad + a_{15} ZX^2 + a_{16} YX^2 + a_{17} Z^3 + a_{18} Y^3 + a_{19} X^3 \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서  $a_0 \sim a_{19}$ 는 Rational Function Coefficient (RFC) 또는 Rational Polynomial Coefficient(RPC)의 일부이며, 각각의 지상점  $X, Y, Z$ 는 최대 3차 이하이고  $X, Y, Z$ 의 각각 합도 3차 이하로 제한된다.

RFM에서 영상좌표와 지상좌표를 모두 정규화한 이유는 image transfer standard로 일반 사용자들이 좌표체계와 무관하게 사용할 수 있도록 하기 위함이며, RFM계수를 결정하는 과정을 단순하고 간단하게 처리하기 위해 필요하다.

### 2) RFM 계수(RFC) 결정

본 논문에서 RFM의 계수(RFC 또는 RPC)는 최소제곱법을 반복적으로 적용하여 결정하였다. 먼저 비선형의 RFM을 편미분하여 선형화하면 식

(3)과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_r &= \left[ \frac{1}{B} \frac{Z}{B} \dots \frac{X^3}{B} - \frac{rZ}{B} \dots \frac{rX^3}{B} \right] \cdot J - \frac{r}{B} \\ V_c &= \left[ \frac{1}{D} \frac{Z}{D} \dots \frac{X^3}{D} - \frac{cZ}{D} \dots \frac{cX^3}{D} \right] \cdot K - \frac{c}{D} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서, } B &= (1ZY \dots Y^3Z^3) \cdot (1b_1 \dots b_{19})^T \\ D &= (1ZY \dots Y^3Z^3) \cdot (1d_1 \dots d_{19})^T \\ J &= (a_0, a_1 \dots a_{19}, b_1 \dots b_{19})^T \\ K &= (c_0, c_1 \dots c_{19}, d_1 \dots d_{19})^T \text{이다.} \end{aligned}$$

식(3)에서 RFC는 총 78개이므로 최소제곱법을 적용하여 RFC를 결정하기 위해서는 최소 39개 이상의 지상기준점이 있어야 한다. 식(3)을 행렬로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M & 1 & 0 \\ 0 & 1 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J \\ K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ C \end{bmatrix} \\ V &= A \cdot X - L \end{aligned} \quad (4)$$

위의 관측방정식에 최소제곱법을 적용하면 식(5)의 정규방정식에 의하여 RFC를 결정할 수 있다.

$$A^T W A \hat{X} - A^T W L = 0 \quad (5)$$

여기에서,  $W = \begin{bmatrix} W_r & 0 \\ 0 & W_c \end{bmatrix}$ 는 중량행렬이며, 다음 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} W_r &= \begin{bmatrix} \frac{1}{B_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{B_1^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{B_n^2} \end{bmatrix} \\ W_c &= \begin{bmatrix} \frac{1}{D_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_1^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{D_n^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

위와 같은 방법으로 결정된 RFC를 이용하여

관측방정식을 재구성하고 최소제곱법을 반복적으로 적용하여 최종적으로 수렴한 RFC를 결정한다. 그러나 RFM에 대한 정규방정식의 계수행렬(ATWA)은 RFC간의 종속성(dependency)으로 인하여 거의 불량조건(ill-condition) 행렬이다. 다시 말해서 반복 계산시 진동하거나 발산하는 불안정한 행렬이다.

이와 같이 진동하거나 발산하는 positive semidefinite 행렬을 수렴할 수 있도록 하기 위해서는 정규방정식 계수행렬의 condition number를 향상시켜야 한다. 본 논문에서는 정규방정식 계수행렬의 condition number를 줄이기 위하여 Tikhonov Regularization을 적용하였다. 식(7)은 본 연구에서 Tikhonov Regularization을 적용한 방법이다.

$$(A^T W A + h^2 E) \hat{X} - A^T W L = 0 \quad (7)$$

식(7)에서  $E$ 는 단위행렬(identity matrix)이며  $h$ 는 Tikhonov Regularization 매개변수이다. 위에서 설명한 Tikhonov Regularization과 최소제곱법을 반복적으로 적용하여 RFM의 RFC를 계산하는 과정은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{(0)} &= X^0 \\ \hat{X}_{(1)} &= \hat{X}_{(0)} + (A^T W_{(0)} A + h^2 E)^{-1} \cdot (A^T W_{(0)} V_{(0)}) \\ \hat{X}_{(2)} &= \hat{X}_{(1)} + (A^T W_{(1)} A + h^2 E)^{-1} \cdot (A^T W_{(1)} V_{(1)}) \\ &\vdots \\ \hat{X}_{(s)} &= \hat{X}_{(s-1)} + (A^T W_{(s)} A + h^2 E)^{-1} \cdot (A^T W_{(s)} V_{(s-1)}) \\ &\vdots \\ \hat{X}_{(n)} &= \hat{X}_{(n-1)} + (A^T W_{(n)} A + h^2 E)^{-1} \cdot (A^T W_{(n)} V_{(n-1)}) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서  $V_{(0)} = L$ 이며  $V_{(s)} = L - A X_{(s)}$ 이다.

### 3. 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 센서모델로서 RFM의 적용가능성을 검토하기 위해서 식(1)을 구성하는 다항식에 대해 Table 1과 같이 여러 가지 경우별로 나누어 RFC를 결정하였으며 정확도를 검토하였다. 또한 수학적 센서모델 중에 하나인 DLT(Direct Linear Transformation)와 RFM을 비교·분석하였다

Table 1. Types of RFM for experiments.

Order	Type	RFC Num.	Min. Num. of GCPs
2nd	$P_2 = P_4$ case 1	29	15
	$P_2 \neq P_4$ case 2	38	20
3rd	$P_2 = P_4$ case 3	59	30
	$P_2 \neq P_4$ case 4	78	39

1) 실험데이터

본 논문에서 이용한 실험데이터는 SPOT 영상과 KOMPSAT EOC 영상이며, 다양한 지상기준점의 개수와 배치에 따른 정확도를 검증하였다. SPOT 영상은 각각 서로 다른 날짜에 경인지역을 촬영한 입체영상으로 Fig. 1과 같으며, 제원은 Table 2에 나타나 있다. SPOT 입체영상의 중복도는 약 70%이며, DGPS측량으로 측정된 12점의 지상기준점을 이용하였다.

논산지역과 부산지역의 KOMPSAT EOC 영상은 서로 다른 날짜에 촬영된 입체영상이다. Fig. 2

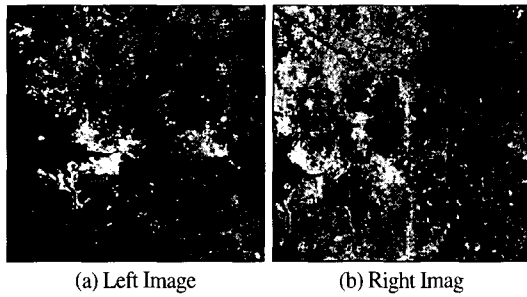
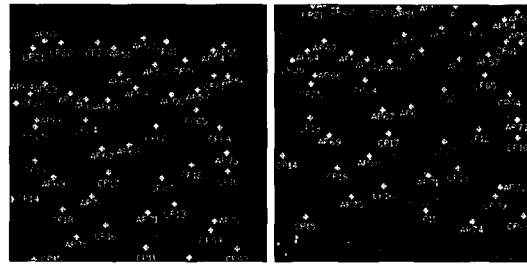


Fig. 1. SPOT stereo-images.

Table 2. Characteristics of SPOT images.

	Left	Right
Sensor	HRV	HRV
Date	1997. 8.24	1997. 3. 1
Preprocessing	Level 1A	Level 1A
Mode	Panchromatic	Panchromatic
Image Size	6000 × 6000	6000 × 6000
Image Center	4584637.37,	4622419.75,
Location	6082950.69	6070884.18
Altitude	832km	832km
Focal Length	1082mm	1082mm
CCD pixel	13μm*13μm	13μm*13μm

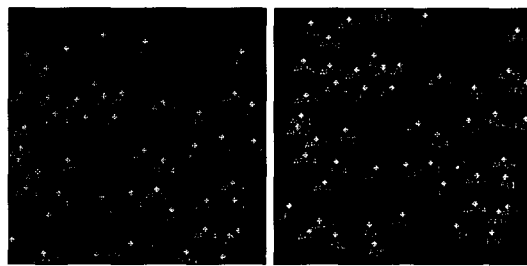


(a) Left Image (b) Right Image

Fig. 2. EOC stereo-images over Nonsan area.

Table 3. Characteristics of EOC stereo-images over Nonsan area.

	Left	Right
Sensor	EOC	EOC
Date	2000. 5. 1	2000. 4.28
Preprocessing	Level 1R	Level 1R
Mode	Panchromatic	Panchromatic
Image size	2592 × 2797	2592 × 2797
Image Center	326264.21,	332205.31,
Location	4020526.23	4017801.30
Altitude	685km	685km
Focal length	1045mm	1045mm
CCD pixel	10μm*10μm	10μm*10μm



(a) Left Image (b) Right Image

Fig. 3. EOC stereo-images over Pusan area.

Table 4. Characteristics of EOC stereo-images over Pusan area.

	Left	Right
Sensor	EOC	EOC
Date	2000.10. 9	2000.10. 6
Preprocessing	Level 1R	Level 1R
Mode	Panchromatic	Panchromatic
Image size	2592 × 2799	2592 × 2796
Image Center	337041.88,	713348.53,
Location	3990431.77	3889855.35
Altitude	685km	685km
Focal length	1045mm	1045mm
CCD pixel	10μm*10μm	10μm*10μm

와 Fig. 3은 약 70%의 중복도를 가지는 논산과 부산지역의 EOC 입체영상을 보여주며, 제원은 각각 Table 3과 Table 4와 같다. KOMPSAT EOC 영상에 대한 지상기준점은 항공우주연구원에서 DGPS 측량으로 측정한 논산영상 25점과 부산영상 26점을 이용하였다.

SPOT영상의 경우 12점, KOMPSAT EOC 논산 25점 및 부산 26점의 지상기준점이 지상측량에 의하여 정밀하게 측정되었다. 측정된 지상기준점의 개수는 RFM을 적용하기에 부족하며, 지상기준점의 배치 및 개수에 따른 영향을 분석하기 위하여 지상측량에 의해 측정된 지상기준점을 확장하였다. 지상측량에 의해 측정된 지상기준점을 바탕으로 SPOT영상의 경우에는 Intergraph ImageStation을 이용하였으며, KOMPSAT EOC 영상의 경우에는 인공위성영상에 일반적으로 적용되는 공선조건식기반의 센서모델을 이용하여 지상기준점을 확장하였다. 각각의 영상에 대하여 지상기준점 개수를 20, 30, 40, 50, 60, 70개의 경우로 나누어 지상기준점을 배치하여 실험하였다.

## 2) RFM의 정확도 결과 및 분석

본 연구에서는 DLT와 RFM을 SPOT과 KOMPSAT-1 EOC 영상에 적용하였으며, 지상기준점의 개수와 배치에 따른 정확도를 분석하였다.

센서모델에 대한 정확도를 분석하기 위하여 지상측량에 의해 정밀하게 측정된 지상기준점 중에서 몇 점을 검사점으로 선택하여 정확도를 분석하였으나 지면 관계상 생략하고, 센서모델의 정확도에 대한 결과와 분석만을 설명하고자 한다.

Fig. 4에서부터 Fig. 8까지는 DLT와 4가지 유형의 RFM 센서모델의 지상기준점 개수와 배치에 따른 표준편차를 보여준다.

그림에서 나타난 바와 같이 DLT 및 RFM 센서모델의 경우 지상기준점의 개수가 증가할수록 대부분의 경우 정확도가 향상되었다. DLT 센서모델의 경우 SPOT과 KOMPSAT EOC 영상에서 모두 1 pixel 이하의 좋은 정확도를 보였다. 또한 지상기준점이 30개 이상부터는 지상기준점의 배치가 골고루 분포되어 있어 지상 기준점이 50개, 60개, 70개를 사용했을 때의 정확도와 비교해 볼 때 별 차이를 보이지 않았다.

RFM 센서모델의 경우에는 사용된 RFC의 개수에 따라 약간의 차이를 보였으나 대부분의 경우 모두 1 pixel 이하의 좋은 정확도를 보였다. 그러나 RFM의 2차항 만을 적용한 경우, case 1이 case 2보다 약간 안정적으로 나타났으나, 3차항까지 적용한 경우에는 case 3보다 case 4가 더욱 안정적이었다. 이와 같은 결과는 RFC간의 종속성으로 인한 정규방정식의 계수행렬의 불량조건에서 기

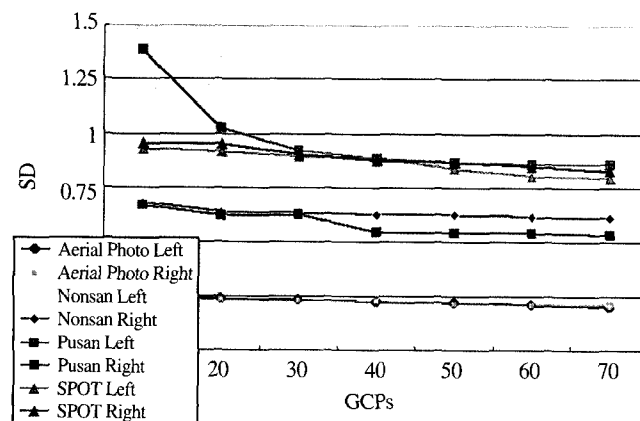


Fig. 4. Accuracy of DLT (RMS error).

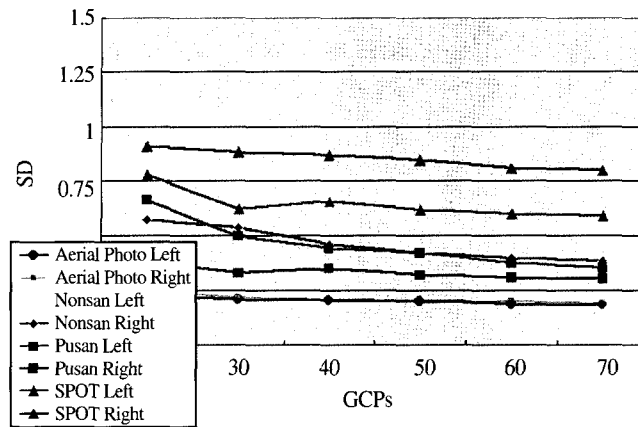


Fig. 5. Accuracy of RFM in case of 2<sup>nd</sup> order and  $P_2 = P_4$  (RMSE).

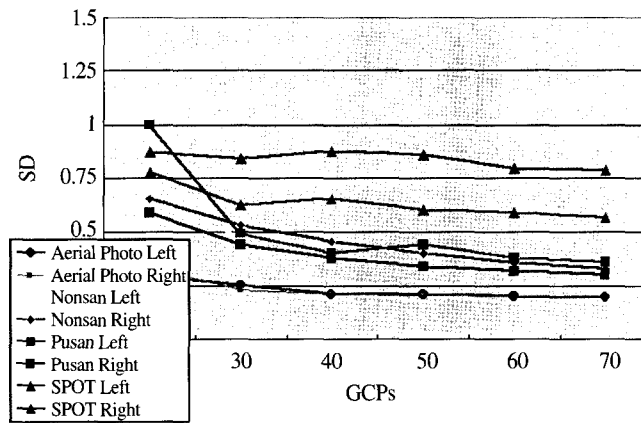


Fig. 6. Accuracy of RFM in case of 2<sup>nd</sup> order and  $P_2 \neq P_4$  (RMSE).

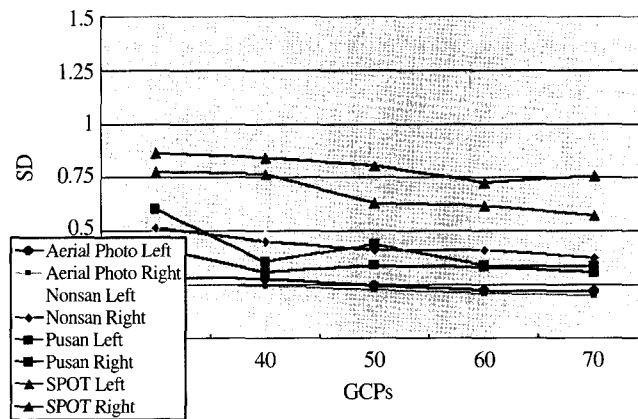


Fig. 7. Accuracy of RFM in case of 3<sup>rd</sup> order and  $P_2 = P_4$  (RMSE).

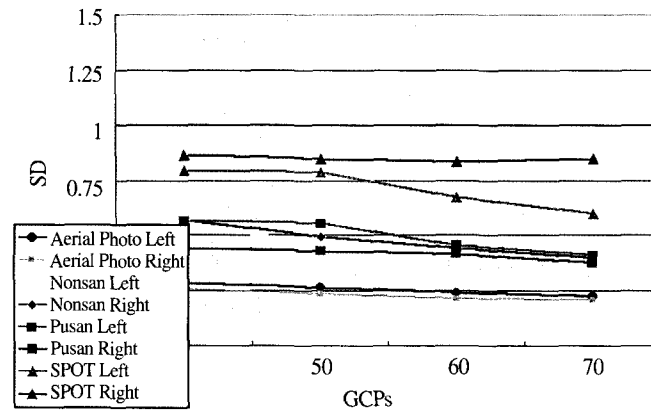


Fig. 8. Accuracy of RFM in case of 3<sup>rd</sup> order and  $P_2 \neq P_4$  (RMSE).

인한 것으로 판단된다. 또한 KOMPSAT EOC는 산영상보다 부산영상의 정확도가 지상기준점의 개수와 배치에 따라서 진동하는 이유는 영상을 촬영할 당시의 기하구조가 상대적으로 불량하여 나타난 결과로 판단된다. 따라서 수학적모델은 촬영 기하가 불량한 경우 지상기준점의 배치 및 개수에 더욱 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고해상도 인공위성의 센서모델로 OGC에서 제안한 일반적 모델인 RFM을 적용하여 가능성을 검토하였다. RFM의 계수 즉 RFC 간에 종속성으로 인하여 정규방정식이 수렴하지 않고 발산하였으며, 이를 해결하기 위한 방법으로 Tikhonov Regularization을 적용하였다. 그러나 Tikhonov Regularization 매개변수에 따른 차이가 발생하므로 이에 대한 연구가 요구된다. 실험결과에서 나타난 것처럼 센서모델로서 DLT는 지상기준점의 개수 및 배치에 따라 안정적인 결과를 제공하였다. 지상기준점의 개수가 증가하면서 정확도가 향상되었으며, 지상기준점이 30개 이상부터는 거의 비슷한 정확도를 보였다.

RFM의 경우에는 RFC의 개수에 따라 약간의 차이를 보였으나 대부분의 경우 모두 좋은 정확도를 보였다. 그러나 DLT와는 달리 지상기준점 개수의 증가에 따른 안정적인 결과를 제공하지 못하였으며, RFC의 개수에 따른 일정하지 않은 결과를 제공하였다. 더불어 본 연구에서 사용한 지상기준점은 지상측량에 의하여 정확하게 측정된 점과 확장된 지상기준점을 함께 이용하므로 인한 문제점을 안고 있다. 비록 본 연구에서 다양한 많은 인공위성 영상데이터를 사용하지 않았지만 DLT보다 훨씬 많은 계수를 갖고 있는 RFM은 지상기준점의 개수와 배치 및 촬영시의 기하구조에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

결론적으로 RFM은 인공위성영상의 센서모델로서 적용이 가능하지만 센서모델로서의 안정성에 문제가 있으며, 다수의 지상기준점이 필요하다는 단점이 있다. 그러나, RFM은 OGC에서 제안한 image transfer standard로서 다양한 사용자의 요구사항을 만족시킬 수 있는 일반적인 모델(generic model)로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 가상기준점으로 이루어진 3D Cube와 지상기준점을 동시에 사용하여 RFM의 RFC를 결정하는 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2000년도 과학기술처 원격탐사기술 개발사업의 일부로서 한국항공우주연구원과 공동으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김태정, 김승범, 신동석, 2000. 대표적 위성영상 센서모델링 알고리즘들의 비교 연구, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 16(1): 73-86.
- 방기인, 2001. 비접근 지역에 대한 위성영상의 Pseudo영상 구성 및 센서 모델 분석, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 4-25.
- 신동석, 이영란, 1997. 선형 CCD센서 영상의 기하학적 모델 수립 및 좌표 변환, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 13(2): 85-98.
- 조기성, 1991. SPOT 위성영상의 외부표정요소 결정에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교, pp. 7-48.
- 한국과학기술원 인공위성연구센터, 1998. EOC 영상 자료 처리 및 활용 기술 개발, pp. 18-36.
- Dowman I. and J. T. Dolloff, 2000. An Evaluation of Rational Function for Photogrammetric Restitution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3): 254-266.
- Fraser, C. S., 2000. High-Resolution Satellite Imagery: A Review of Metric Aspects, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B7).
- Fritsch D. and D. Stallmann, 2000. Rigorous Photogrammetric Processing of High Resolution Satellite Imagery, *International Archives of Photo grammetry and Remote Sensing*, 33(B1).
- Gupta, R. and R. I. Hartley, 1997. Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 19(9): 963-975.
- Ji, M. and J. R. Jensen, 2000. Continuous Piecewise Geometric Rectification for Airborne Multispectral Scanner Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(2): 163-171.
- Lee, C., H. J. Theiss, J. S. Bethel and E. M. Mikhail, 2000. Rigorous Mathematical Modeling of Airborne Pushbroom Imaging System, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(4): 385-392.
- OpenGIS consortium, 1999. The OpenGISTM Specification Model Topic 7: The Earth Imagery Case Version 2.0, <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>, pp. 2-23.
- Tao, C. V. and Y. Hu, 2000. Image Rectification Using A Generic Sensor Model -Rational Function Model, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3): 874-881.
- Tao, C. V. and Y. Hu, 2000. Investigation of the Rational Function Model, *Proc. of ASPRS*, Washington D.C, May 22-26.
- Yang, X., 2000. Accuracy of Rational Function approximation in digital photogrammetry, *Proc. of ASPRS*, Washington D.C, May 22-26.