

상관도 분석을 통한 RFM의 위치 정확도 분석 및 수치표고모형의 제작

Positional Precision Improvement of RFM by the correlation analysis and Production of DEMs

손흥규 · 손덕재 · 박정환 · 유형욱 · 피문희

Sohn, Hong-Gyoo · Sohn, Duk-Jae · Park, Choung-Hwan · You, Hyung-Uk

연세대학교 사회환경시스템 공학부 조교수 · e-mail:sohn1@yonsei.ac.kr

대진대학교 토목공학과 교수 · e-mail:djsohn@road.daejin.ac.kr

연세대학교 사회환경시스템 공학부 박사과정 · e-mail:c142520@yonsei.ac.kr

연세대학교 사회환경시스템 공학부 석사과정

요 旨

최근 들어 다항식비례모형(RFM: Rational Function Model)은 비전문가에게 있어서 지형보정을 위한 정확도 문제를 해결함과 동시에 센서 종류에 상관없이 적용 가능한 범용적인 센서모델링 기법으로 각광을 받고 있다. 그러나 엄밀(physical) 모델이 없는 센서 혹은 위성의 궤도력 자료를 제공하지 않는 센서의 경우 다항식비례모형의 적용을 위해서는 다수의 매개변수 사용으로 인한 계수들 간의 상관성을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 2차 다항식비례모형에 기초하여 전방 다항식비례모형(Forward RFM)과 상관도 분석을 통한 전방 다항식비례모형의 이론 및 위치정확도에 관한 연구를 수행하였다. 대상연구지역은 KOMPSAT(Korea Multi-Purpose Satellite)과 SPOT으로 촬영한 대전광역시와 그 주변지역으로 SPOT과 KOMPSAT 모두 상관성 분석 전에는 대략 50% 정도의 검사점에 대해 과대오차(>100m)가 얻어졌으며, 이 점들을 제외한 검사점에 대해서도 SPOT은 평균수평오차 20-24m, 평균표고오차 25m, KOMPSAT은 평균수평오차 15-24m, 평균표고오차 30m를 나타내었다. 전방 다항식비례모형에 대하여 상관성 분석을 수행한 후에는 검사점에 대한 모든 과대오차 조정결과가 소거되었고 검사점에 대해서 SPOT은 평균수평오차 8.8m, 평균표고오차 25.2m, KOMPSAT은 평균수평오차 8.4m, 평균표고오차 14.5m를 나타내었다. 최종적으로 연구지역에 대한 수치표고모형의 제작을 통해 상관도 분석을 통한 다항식비례모형의 실제 적용 가능성을 보여주었다.

1. 서론

고해상도 위성영상의 활용분야가 점차 확대됨에 따라 위성영상과 실제지상간의 기하학적 관계를 규명하여 지형보정을 수

행하는 센서모델링에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 특히, 최근에는 전문가적인 지식이 요구되는 복잡한 수학적 모형을 요구하는 알고리즘보다는 이에 근접하는 정확도를 유지하면서 간단한 수학

적 해법으로 규명되는 다항식비례모형(RFM: Rational Function Model)에 관한 연구가 국외 및 국내에서 연구되고 있다. 다항식비례모형은 위성영상과 지상간의 기하학적인 관계를 간단한 구면이나 평면으로 표현이 가능하다는 가정 하에 그 관계를 여러 개의 다항식으로 표현하여 해석하고자 한 방법이다.(Tao and Hu, 2000).

센서모델링 기법은 크게 물리적 센서모형(physical sensor model)과 일반적 센서모형(generalized sensor model)으로 나누어진다(McGlone, 1996). 최근 이러한 일반적 센서모형이 기존의 물리적 센서모델링 기법을 대체하고 있는 가장 큰 이유는 센서의 종류에 상관없이 사용가능하고, 적절한 정확도를 얻을 수 있으며 실시간 계산이 가능하기 때문이다(Madani, 1996; Dowman and Dolloff, 2000; Tao and Hu, 2001(a)). 그러나 다항식비례모형의 적용을 위해서는 센서의 물리적 모형을 기반으로 하여 처리된다는 단점이 있다. 따라서 센서의 물리적 모형이 없을 경우엔 센서모델링에 사용되는 지상기준점의 분포, 수, 정확도에 따라 정규행렬의 불안정화가 발생하기도 하며 센서모델링의 정확도 역시 불규칙적인 분포를 나타낼 수 있다(손홍규 등, 2001). 이러한 문제에 대하여 Tao와 Hu는 지상기준점의 분포와 수가 충분해야 하며 또한, 정규행렬의 조직화, 반복풀이에 의한 계수의 계산 등의 방법이 필요하다고 제시하였다(Tao and Hu, 2001(b)).

현재 이루어지고 있는 다항식비례모형에 관한 대부분의 연구가 센서의 물리적 모형이 있는 경우에 초점이 맞추어져 있으나 실질적으로 비전문가 집단의 위성영상 활용도를 높이기 위해서는 센서의 물리적 모형이 없는 경우에 다항식비례모형의 정확도를 어떻게 유지할 것인가에 관한 연구들이 필요한 실정이다. 따라서 본

연구에서는 센서의 물리적 모형이 없다는 가정 하에 전방 다항식비례모형을 충청남도 대전 지역의 SPOT 영상과 KOMPSAT 영상에 적용하여 다항식 비례모형의 3차원 위치정확도를 검정하였고, 센서의 물리적 모형이 없을 때 발생할 수 있는 문제점 해결을 위해 기존의 연구방법과는 달리 다항식비례모형 계수간의 상관성 분석을 수행함으로써 최적의 다항식비례모형을 산정하고 이에 따른 위치정확도의 향상을 확인하였다.

2. 상관도 분석을 이용한 3차원 위치결정

전방 다항식비례모형(Forward RFM)은 영상좌표 x_n, y_n 를 지상좌표 X, Y, Z 의 다항식형태로 나타내며, 기본적으로 식 (1)과 같은 형태를 나타내고 있다(OGC, 1999; Tao and Hu, 2000).

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{A(X_n, Y_n, Z_n)}{B(X_n, Y_n, Z_n)} \\ y_n &= \frac{C(X_n, Y_n, Z_n)}{D(X_n, Y_n, Z_n)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_n, y_n 은 해당 영상좌표의 행, 열 값이며, X_n, Y_n, Z_n 은 영상좌표에 대응하는 공간상의 3차원 지상좌표이다. A, B, C, D 는 각각의 다항식으로 다음과 같은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} x^i y^j z^k \\ B &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} x^i y^j z^k \\ C &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} x^i y^j z^k \\ D &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} x^i y^j z^k \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ 은 다항식비례모형의 계수값, m_1, m_2, m_3 는 사용하고자 하는 다항식비례모형의 차수를 의미한다.

최소제곱법을 사용하여 다항식비례모형의 계수를 구하기 위해서는 식 (1)을 이용하여 영상좌표와 지상좌표의 관측방정식을 구성하여 해를 구하게 된다(Tao and Hu, 2000; 손홍규 등, 2000). 계산된 다항식비례모형 계수를 사용하면 해당 지상좌표에 대응하는 영상좌표의 계산이 가능하며, 수치표고모형이 있는 경우엔 정사영상의 제작이 가능하다.

전방 다항식비례모형을 이용하여 3차원 위치를 결정하기 위해서는 식 (1)을 Taylor 전개를 통해 선형화해야 한다. 식 (3)과 식 (4)는 각각의 영상좌표에 관한 관측방정식을 나타내고 있다.

$$v_x = \left[\frac{\partial x}{\partial X} \quad \frac{\partial x}{\partial Y} \quad \frac{\partial x}{\partial Z} \right] \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} - (x - x_0) \quad (3)$$

$$v_y = \left[\frac{\partial y}{\partial X} \quad \frac{\partial y}{\partial Y} \quad \frac{\partial y}{\partial Z} \right] \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} - (y - y_0) \quad (4)$$

여기서, x_0, y_0 는 초기영상좌표, v_x, v_y 는 잔차, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 는 지상좌표에 대한 미세증가량을 의미한다.

대상 센서에 대한 물리적 모형이 없는 경우 다항식비례모형은 지상기준점의 분포, 수, 정확도에 따라 검사점의 3차원 위치정확도가 상당부분 부정확한 결과를 나타낼 수 있다(손홍규 등, 2001). 따라서 이러한 불확실성을 제거시키기 위해서 지상기준점의 수평적, 수직적 배치를 최적화하여 다항식비례모형에 적용하는 방법, 정규행렬의 규칙화를 통해 다항식비례모형의 계수를 구하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하는 방법 등이 제안되었다(Tao and Hu, 2001(b)). 그러나 본 연구에서는 상관성 분석을 통해 최적의 다항식비례모형계수를 선택하는 접근방법으로 센서모델링의 정확도를 향상시키고자 한다. 일반적으로 다항식비례모형의 계수가

계산되면 이에 대한 분산-공분산 행렬을 구할 수 있다. 분산-공분산 행렬을 구체적으로 살펴보면 식 (5)와 같다.

$$DI = \begin{bmatrix} Da_{00} & Ca_{0,a_1} & Ca_{0,a_2} & \dots & Ca_{0,d_{19}} \\ Ca_{1,a_0} & Da_{11} & Ca_{1,a_2} & \dots & Ca_{1,d_{19}} \\ Ca_{2,a_0} & Ca_{2,a_1} & Da_{22} & \dots & Ca_{2,d_{19}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cd_{19,a_0} & Cd_{19,a_1} & Cd_{19,a_2} & \dots & Dd_{19,d_{19}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

분산-공분산행렬로부터 각 계수간의 상관계수는 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$\rho_{a_1, a_2} = \frac{\sigma_{a_1, a_2}}{\sigma_{a_{11}} \cdot \sigma_{a_{22}}} = \frac{Ca_{1, a_2}}{\sqrt{Da_{11}} \cdot \sqrt{Da_{22}}} \quad (6)$$

고차의 다항식비례모형을 사용할수록 계수들 간의 높은 상관성으로 인해 계산된 3차원 좌표에 대한 불확실성이 크게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 처음 계산된 다항식비례모형 계수들 간의 상관계수를 구하여 0.9이상의 상관계수를 갖는 계수들의 수와 만약 계수의 수가 같을 경우엔 0.9이상의 상관계수의 합을 지표로 삼아서 최적의 다항식비례모형을 제안하고자 하였다. 이러한 과정은 검사점에 대한 일정한 정확도가 확보될 때까지 혹은 0.9 이상의 상관계수를 갖는 계수들이 소거될 때까지 반복 수행되었으며, 최종적으로 연구지역에 적합한 계수만으로 구성된 다항식비례모형을 형성할 수 있었다.

3. 자료처리 및 결과

3.1 연구대상지역

본 연구에서는 충청남도 대전지역의 SPOT 영상과 KOMPSAT 영상을 이용하여 전방 다항식비례모형과 상관도 분석을 통한 전방 다항식비례모형의 3차원 위치 결정을 수행하였으며 연구에 사용된 영상

은 다음의 그림 1과 그림 2와 같다.

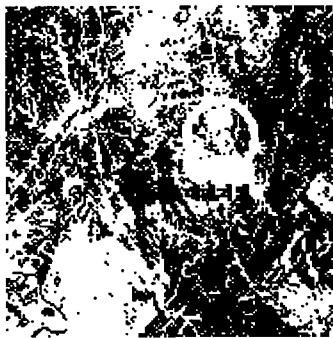
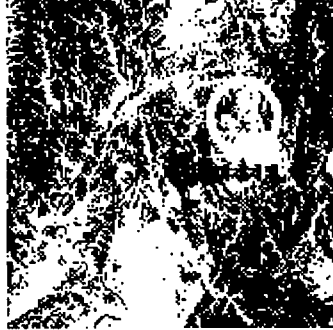


그림 1. 대전지역의 SPOT(Panchromatic) 영상(6000×6000, 해상도: 10m)

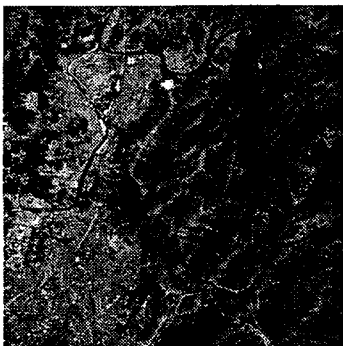


그림 2. 대전지역의 KOMPSAT 영상

(상:2796×2592, 하:2798×2592, 해상도:6.6m)

그림 1과 2에서 보듯이 SPOT 영상의 경우 촬영영역이 60km×60km 지역으로 대전과 대전주변 지역을 모두 포함하고 있으며 하얀색 원으로 그려진 부분이 대전광역시, 그 이외 지역은 대부분 산악지형을 이루고 있다. 또한 KOMPSAT 영상은 17km×17km로 주로 대전광역시를 중심으로 촬영되었다.

실험에 사용된 기준점은 SPOT의 경우 총 36점으로 GPS 측량을 통해 취득했으며 KOMPSAT의 경우는 총 38점을 1/5,000 수치지도를 이용하여 취득하였다. 사용된 기준점의 분포는 SPOT과 KOMPSAT 모두 영상 전반에 걸쳐 수평뿐만 아니라 수직적으로도 균등한 분포를 나타내도록 선정하였다. 각각의 영상에 나타난 지역에 대한 표고값은 SPOT의 경우 1.9m~351.7m, KOMPSAT의 경우 29.9m~131.1m의 분포를 갖는다.

3.2 연구결과

먼저 정규화된 지상기준점 및 영상좌표를 사용하여 전방 다항식비례모형의 일반적인 정확도를 검정하였다. 본 연구에서는 지상기준점을 각각 38점, 36점밖에 취득하지 못한 이유로 3차 다항식비례모형의 적용이 원활하지 못하여 2차 다항식비례모형을 기준으로 하였다.

그림 3과 그림 4는 SPOT과 KOMPSAT에 대하여 전방 다항식비례모형을 적용하였을 때의 결과를 보여주고 있다. case 1은 $p_3 \neq p_4$ 인 경우, case 2는 $p_3 = p_4$ 인 경우, case 3는 $p_3 = p_4 = 1$ 인 경우를 의미하며 검사점 중 편차가 10 영상소 이상인 점은 과대오차라고 명시하여 제외하고 나타낸 결과이다. 표 1과 2는 각각의 경우에 나타난 과대오차를 보이는 점의 개수를 나타내

고 있다.

표 1. 전방 다항식비례모형에 나타난 과대오차를 보이는 검사점의 수(SPOT)

	case1	case2	case3
기준점	19	15	10
검사점	17	21	26
과대오차점	11	6	0

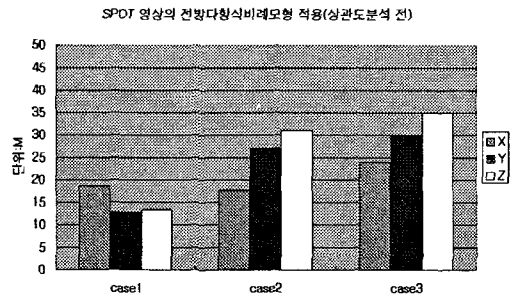


그림 3. SPOT 영상의 전방 다항식비례모형의 결과

표 2. 전방 다항식비례모형에 나타난 과대오차를 보이는 검사점의 수(KOMPSAT)

	case 1	case 2	case 3
기준점	19	15	10
검사점	19	23	28
과대오차점	10	13	0

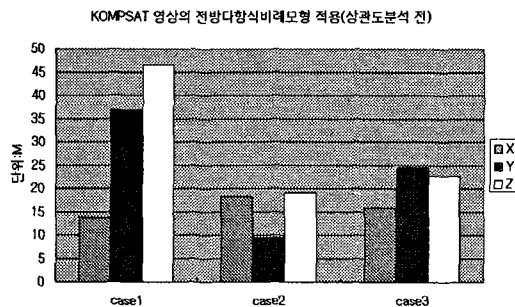


그림 4. KOMPSAT 영상의 전방 다항식비례모형의 결과

그림 3에 나타난 바와 같이 SPOT의 경우 과대오차를 보이는 점을 제외하고도 22m 정도의 평균수평오차와 25m 정도의 평균 표고오차를 나타내고 있으며, 그림 4의 KOMPSAT의 경우는 19m의 평균수평오차와 30m의 평균표고오차를 보이고 있다.

이는 앞에서도 언급했듯이 센서의 물리적 모형 없이 다항식비례모형을 적용하게 되면 사용된 기준점의 분포, 수, 정확도에 따라 결과 자체에 상당한 과대오차를 포함될 수 있음을 보여주고 있다.

다음으로 상관성 분석을 통한 최적 계수만을 선택하여 구성된 전방 다항식비례모형을 이용하여 검사점에 대한 정확도를 분석하였다. 본 연구에서는 많은 계수로 인해 일반적인 다항식비례모형에 비해 정확도가 현저히 떨어졌던 case1과 case2에 대하여 상관성 분석을 수행하였다. 특히, 연구대상 지역 중 대전광역시와 주변의 산악지역까지 포함한 SPOT 영상에 대한 상관성 분석결과 분모에 포함된 저차의 다항식비례모형 계수와 분자에 포함된 고차의 다항식비례모형 계수간의 상관성이 높게 나타났으며 이는 유사한 지형을 갖는 다른 지역에 대한 실험결과와도 동일한 결과이다(손홍규 등, 2001).

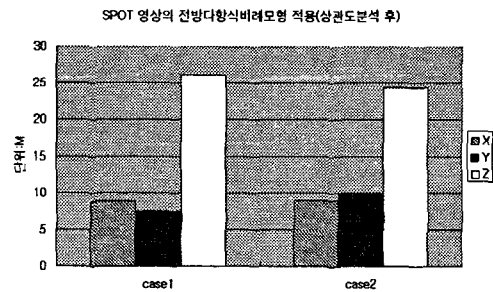


그림 5. 상관성 분석을 통한 SPOT 영상의 전방 다항식비례모형의 결과

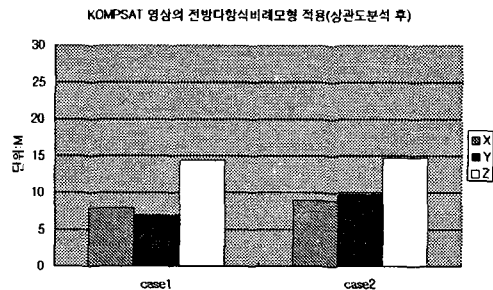


그림 6. 상관성 분석을 통한 KOMPSAT 영상의 전방 다항식비례모형의 결과

그림 5와 6은 SPOT과 KOMPSAT 2종류 영상에 대하여 상관성 분석 후 전방 다항식비례모형을 적용한 결과를 보여주고 있다. 그림 5와 6에서 보듯이 상관성 분석을 수행 한 후에는 SPOT의 경우 평균수평오차는 8.8m, 평균표고오차는 25.2m를 나타내었으며 KOMPSAT의 경우는 평균수평오차 8.3m, 평균표고오차 14.5m를 보였다. 즉, SPOT, KOMPSAT 모두 거의 1 영상소 정도에 해당하는 수평위치 정확도를 얻을 수 있었다.

최종적으로 상관도 분석을 통해 얻어진 전방다항식비례모형의 계수를 적용하여 제작한 대상지역의 수치표고모형은 그림 7과 같다.

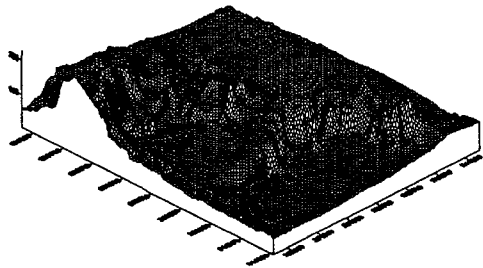


그림 7. 대상지역의 수치표고모형
(6km×6km, 격자간격:30m)

4. 결 론

센서의 물리적 모형이 없다는 가정 하에 다항식비례모형을 적용하여 위치정확도를 검정하여 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 영상가공자가 제공하는 물리적 센서 모형에 기반을 둔 다항식비례모형 계수와는 달리 물리적 센서모형이 없는 다항식비례모형의 경우 사용된 기준점의 분포, 수, 정확도에 따라 모델링 결과에 상당부분의 과대오차가 포함할 수 있으며 또한,

사용된 다항식비례모형 계수들 간의 과도한 매개변수선정(over-parameterization)으로 인해 발생하는 상관성을 분석하지 않고는 범용적인 목적의 센서모델링 기법으로 부적절하다는 사실을 확인할 수 있었다.

둘째, 상관성 분석을 통한 전방 다항식비례모형을 적용했을 때 SPOT의 경우 8.8m의 평균수평오차, 25.2m의 평균표고오차, KOMPSAT의 경우 8.4m의 평균수평오차, 14.5m의 평균표고오차를 나타내었다. 또한 상관성 분석 전 나타났던 검사점의 50% 정도에 해당하는 과대오차 점들이 모두 제거되었다.

참고문헌

1. 손홍규, 정진석, 박정환, 윤공현, 2000, "RFM을 이용한 고해상도 위성영상의 지형보정", 한국지형공간정보학회 학술발표회, 한국지형공간정보학회, pp.77-83.
2. 손홍규, 박정환, 송영선, 정진석, 2001, "고해상도 위성영상을 이용한 3차원 위치결정 정확도에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회, 대한토목학회.
3. Dowman, I. and J. T. Dolloff, 2000, An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, Part B3, pp.254-266.
4. McGlone, C., 1996, "Sensor Modeling in Image Registration", *Digital Photogrammetry: An Addendum*, ASPRS, pp.115-123.
5. OGC(OpenGIS Consortium), 1999,

"The OpenGIS Abstract Specification-
Topic 7 : The Earth Imagery Case",
URL:[www.opengis.org/public/abstract/99-107.
pdf](http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf).

6. Tao, C. V. and Y. Hu, 2000, "Image
Rectification Using a Generic Sensor
Model-Rational Function Model",
*International Archives of
Photogrammetry and Remote Sensing*,
Amsterdam, Part B3, pp.874-881.

7. Tao, C. V. and Y. Hu, 2001(a), "3-D
Reconstruction Algorithms with the
Rational Function Model and Their
Applications for IKONOS Stereo Imagery",
*Proceedings of Joint ISPRS Workshop on
"High Resolution Mapping from Space
2001"*, Hannover, Germany, unpagged.

8. Tao, C. V. and Y. Hu,
2001(b), "Comprehensive Study of the
Rational Function Model for Photogrammetric
Processing", *PE & RS*, 67(12),
pp.1347-1357.