

다항식비례모형기반의 영상정합을 활용한 수치고도모형 제작

RFM Based Image Matching for DEM Generation

손홍규* · 박정환**

Sohn, Hong Gyoo · Park, Choung Hwan

1. 서론

다항식비례모형(RFM: Rational Function Model)은 일련의 사진측량학적 처리를 간단히 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 기존의 복잡한 센서모델이 없더라도 다항식을 통해 3차원 위치의 결정이 가능하며, 수치고도모형, 정사사진 등과 같은 3차원 지형자료의 생성도 기존의 처리과정보다 빠르게 생성할 수 있다. 그러나 다항식비례모형은 이 같은 장점에도 불구하고 영상공급자(vendor)로부터 제공되는 다항식비례모형계수(RFCs: Rational Function Model Coefficients)의 정확도 수준에 따라 생성된 지형정보의 정확도가 결정되는 단점을 가지고 있다. 즉, 해상도 수준의 다항식비례모형계수가 제공되지 않는 이상 1m 급의 고해상도 위성 영상이라도 생성되는 지형자료는 그 이하의 정확도를 갖게 된다. 또한 아직까지 수치고도모형과 같은 3차원 지형자료와 관련된 자세한 처리과정이 알려진바 없다. 특히, 수치고도모형의 제작에 있어 중요한 처리과정인 영상정합과 관련되어서는 다항식비례모형의 활용과 관련된 연구가 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 다항식비례모형을 기하학적 모델로 정합영역의 제약조건(constraints)을 부여하는 영상정합법을 제안하고, 현재까지 다항식비례모형을 센서모델로 채택하고 있는 고해상도 위성영상의 경우 자세한 처리과정이 알려지지 않았던 수치고도모형의 제작과정을 소개하고자 한다. 제작된 연구지역의 수치고도모형은 ERDAS imagine 8.5의 엄밀센서모형을 통해 생성된 수치고도모형과 3 arc-second DTED를 통해 제작된 기준 수치고도모형과의 비교를 통해 상대 및 절대위치 정확도를 제시하였다.

2. RFM 기반 영상정합법

일반적인 항공사진과 달리 위성영상의 경우 off-nadir 현상으로 인해 동일 영상내의 공칭 해상도가 달라질 수 있으며, 또한 관측각에 따라 심한 기하학적 왜곡이 발생할 수 있기 때문에 일반적인 영상기반 정합방법으로는 그 한계를 가지고 있다(정수 등, 1993). 따라서 이러한 정합문제의 해결을 위해 본 연구에서는 다항식비례모형을 기하학적 모형으로 채택하고 지상의 고도정보를 제약조건으로 활용하였다.

2.1 영상-대상공간 변환

영상과 대상공간간의 기하는 다항식비례모형을 이용하여 식 (1)과 같이 표현되어 질 수 있다. 본 연구에서는 전방 다항식비례모형(forward RFM)을 기본형태로 선택하였으며 이는 일반적으로 후방 다항식비례모형(backward RFM)보다는 높은 정확도를 나타낸다고 알려져 있다(Tao and Hu, 2002(a)).

$$r = \frac{p1(X, Y, Z)}{p2(X, Y, Z)}, \quad c = \frac{p3(X, Y, Z)}{p4(X, Y, Z)} \quad (1)$$

다항식비례모형계수를 직접 구하거나 제공되는 경우 모두 영상과 대상공간의 변환관계를 하나의 광선(ray)만을 가지고 표현하는 것은 불가능하다. 하지만 대상지역의 고도 정보를 알고 있다면 대략적인 변환관계를 정의할 수 있다. 먼저 좌측 영상좌표와 이에 해당하는 지상좌표에 대해 식 (2)와 같은 관측방정식을 구성할 수 있다.

* 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목·환경전공 조교수, 전화: 2123-2809, e-mail:sohn1@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목·환경전공 박사과정, c142520@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 사회환경시스템 공학부 토목·환경전공 박사과정, jonghyun@yonsei.ac.kr

$$f(r)_{left} = \frac{p1(X,Y,Z_i)}{p2(X,Y,Z_i)} - r_{left}, \quad f(c)_{left} = \frac{p3(X,Y,Z_i)}{p4(X,Y,Z_i)} - c_{left} \quad (2)$$

여기서, Z_i 는 대상지역의 고도 분포를 나타낸다. 일반적으로 대상지역에 대한 고도 정보를 전혀 모르는 경우 대강의 고도 값을 가정하여 사용해도 무방하다.

식 (2)의 관측방정식은 식 (3)과 같이 행렬형태로 다시 표현할 수 있으며 최소제곱조정법을 통해 고도에 따른 가상의 지상좌표를 계산하게 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{r_left} \\ v_{c_left} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(r)_{left}}{\partial X} \frac{1}{X_{SCALE_left}} & \frac{\partial f(r)_{left}}{\partial Y} \frac{1}{Y_{SCALE_left}} \\ \frac{\partial f(c)_{left}}{\partial X} \frac{1}{X_{SCALE_left}} & \frac{\partial f(c)_{left}}{\partial Y} \frac{1}{Y_{SCALE_left}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_G \\ \Delta Y_G \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{left} - \hat{r}_{left} \\ c_{left} - \hat{c}_{left} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 대상공간-영상 변환

고도 값에 따라 변화되는 가상의 지상좌표를 우측영상으로 재투영하는 변환관계는 우측영상의 다항식비례 모형 계수를 통해 간단히 정의될 수 있다. 본 연구에서는 좌측영상에서 Canny 연산자를 통해 추출된 시작점 (seed points)에 대하여 대상공간의 고도 분포를 고려함으로써 정합시 해당 공액점의 탐색영역을 제한하고자 하였다. 즉, 대상지역의 고도 값의 범위를 여러 개의 구간으로 나누고 각 구간별 탐색구간을 선형으로 가정함으로써 구간별 예상 공액점의 위치를 제한된 범위 내에서만 탐색하게 된다. 포물선 형태의 복잡한 위성영상 에피폴라곡선(epipolar curve)를 직접 계산하여 정합을 수행하는 것보다는 고도 값에 따라 재투영 가능성이 있는 개별정합선(PML: Piecewise Matching Line)을 따라 정합하는 방법이 훨씬 효율적이라고 판단된다. 그림 1은 임의의 시작점에 대한 영상-대상공간, 대상공간-영상간의 기하학적 관계를 보여주고 있다.

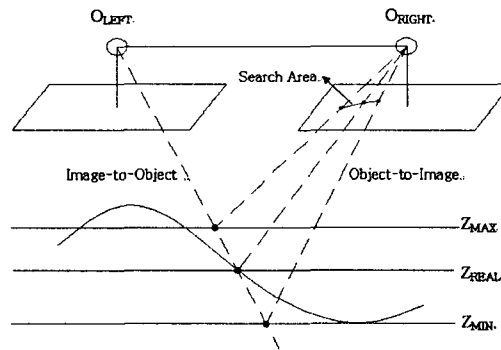


그림 1. 영상-대상공간의 상호변환관계

본 연구에서는 대상지역에 대하여 가정된 여러 개의 고도 값에 따라 취득된 우측영상 내의 영상좌표를 기준으로 각 구간별 직선의 방정식을 구하고, 기울기를 따라 이동하면서 영상정합을 수행하였다.

3. 실험영상 및 연구대상지역

본 연구에서 사용한 영상자료는 SPOT-3 입체영상과 IKONOS-2 입체영상으로 그림 2와 같다. 대전광역시와 그 주변을 포함하는 SPOT-3 입체영상과 대전광역시만을 촬영한 IKONOS-2 입체영상을 실험자료로 활용하였으며, 흰색의 사각형은 원영상 중 연구대상지역으로 추출된 영역을 나타내고 있다. SPOT-3의 연구대상지역은 평균고도 90m, 최대고도 390m의 분포를 갖는 곳으로 구릉지와 낮은 산지가 포함되어 있는 지형적 특성을 갖고 있으며, IKONOS-2 영상에서 추출한 연구지역은 최대고도 110m의 완만한 구릉지와 평지로 구성되어 있다.

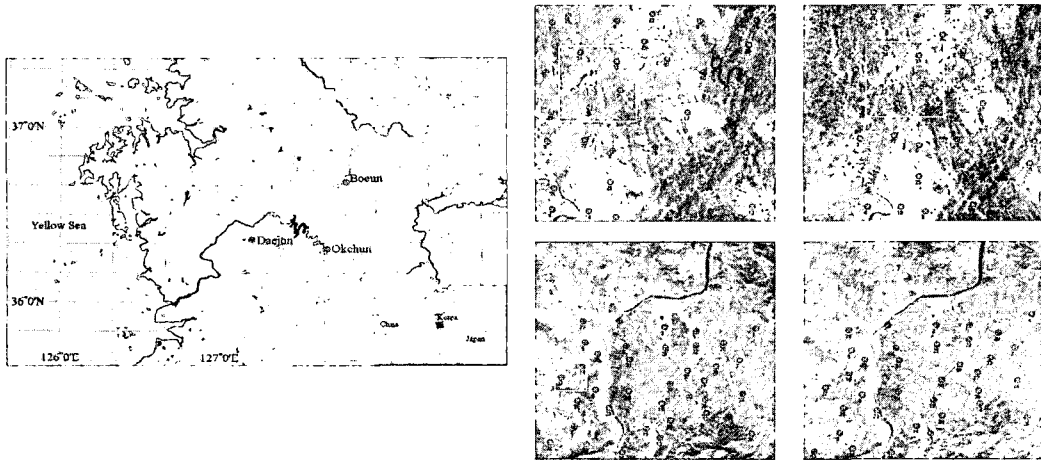


그림 2. SPOT-3 입체영상과 IKONOS-2 입체영상(흰색 사각형: 연구대상지역)

3.1 다항식비례모형계수의 산정

3.1.1 SPOT-3

본 연구에서는 일반적으로 대체센서모델에 적용되는 terrain-independent 알고리즘을 통해 다항식비례모형 계수를 취득하였다. 총 36점의 GPS 기준점을 이용하여 SPOT-3 입체영상에 대한 엄밀센서모형을 결정하고 고도 -50m~450m까지 100m 간격으로 총 6개의 레이어(layer)에 걸쳐 11×11 크기의 가상 기준점들을 취득하였다. 준비된 총 726점(11×11×6)의 가상 기준점에 대한 최소제곱조정을 통해 좌·우 영상에 대한 다항식비례모형 계수를 취득하였다. 계산된 다항식비례모형 계수의 정확도 판단을 위해서 본 연구에서는 특징점 연산자(interest operator)에 의해 추출된 총 1,543점의 공액점에 대하여 엄밀센서모형을 활용한 결과와 비교하였다. 그림 3은 여러 경우의 다항식비례모형에 대하여 엄밀센서모형으로 계산된 공액점의 수평좌표와 고도값에 대한 오차분포를 보여주고 있다. 그림 3에서 case 1은 식 (1)에 대한 $p_2 \neq p_4$ 를 의미하며, case2는 $p_2 = p_4$, case3는 $p_2 = p_4 = 1$ 을 의미한다.

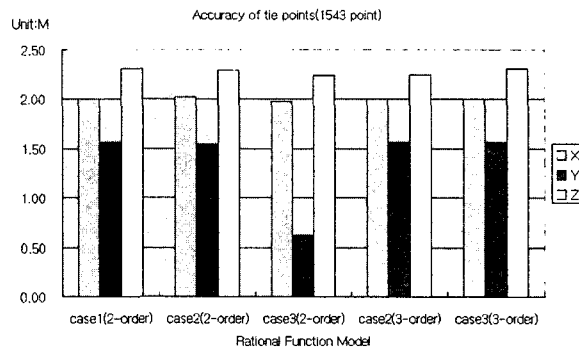


그림 3. 다항식비례모형과 엄밀센서모형과의 정확도 비교

그림 3을 보면 최대 오차가 10m(1 pixel)를 벗어나지 않고 있기 때문에 본 연구에서 취득된 다항식비례모형 계수는 대체센서모형으로서 활용될 수 있는 최소한의 정확도를 유지하고 있다고 판단된다. 3차의 case1의 경우는 너무 많은 매개변수들과 변수들 간의 상관관계 등으로 조정과정 중 수렴이 되지 않아 계수를 획득할 수 없었으며 최종적으로 SPOT-3 입체영상에 대하여 총 5가지 경우의 다항식비례모형을 취득할 수 있었다.

3.1.2 IKONOS-2

IKONOS-2 입체 영상을 제공하는 Space Imaging사는 위성의 궤도정보를 제공하지 않는 대신 일반사용자들의 위성영상처리를 위해서 RPCs(Rational Polynomial Coefficients)를 제공하고 있다. 제공되는 RPC는

90%의 오차범위로 25m 수준의 정확도를 제공하고 있다(Geodecki and Dial, 2001). RPC 파일은 각각의 영상에 대하여 총 59개의 다항식 형태의 계수를 포함하고 있으며(78개가 제공되고 있지만 실제로는 분모의 형태가 동일한 3차 case2 형태로 제공된다) 좌표계는 WGS-84 기준의 경위도 좌표계를 기준으로 하고 있다.

본 연구에서는 IKONOS-2에서 기본적으로 제공하는 RPC 파일을 본 영상정합에 적합한 수준의 정확도를 갖도록 갱신하였다. 이는 제공되고 있는 RPC의 정확도가 20m 수준으로 본 연구에서 수행하는 영상정합 알고리즘에 적용하기에는 상당히 부정확하다고 판단되었기 때문이다. 일반적으로 RPC를 갱신하는 방법은 크게 2가지로 나뉘어진다. BILS(Batch Iterative Least-Squares)와 IDKF(Incremental Discrete Kalman Filtering)로 구분되며, 전자는 간단하지만 원 RPC를 구할 때 사용된 지상기준점의 정보를 사전에 알고 있어야 활용이 가능하고 후자는 전자에 비해 조금은 복잡한 과정을 통해 RPC가 갱신된다(Hu & Tao, 2002(b)). 또한 BILS 방법의 경우는 IKONOS vendor외에는 실질적으로 활용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 BILS 방법의 이 같은 제한을 극복하고 일반 유저들도 손쉽게 사용이 가능한 가상기준점을 활용한 갱신 방법을 통해 고품질의 RPC 자료를 취득하였다.

3.2 대상공간영상정합의 수행

3.2.1 SPOT-3

총 5개의 다항식비레모형(2차 case1, 2, 3; 3차 case2, 3)을 기하모형으로 활용하여 SPOT 위성영상에 대한 영상정합실험이 이루어졌다. 대상지역에 대하여 -50m부터 450m까지 150m 간격으로 4개의 구간으로 나누어 개별정합선을 결정하였다. 시뮬레이션 실험결과 본 연구의 가정사항(고도에 따른 개별정합선을 따라 정합하더라도 에피폴라라인(epipolar line)과의 정확도 측면에서 큰 차이가 없을 것이다)이 크게 벗어나지 않고 있음을 확인할 수 있었으며 여러 구간별로 나뉘어진 탐색라인을 따라 영상정합을 수행하는 방법이 보다 간단하면서 효율적임을 알 수 있었다. 구간별 정합결과는 다음의 표 1과 같다.

표 1. 구간별 대상공간영상정합 결과(SPOT-3)

	2nd case1		2nd case2		2nd case3	
	정합점	불량정합점	정합점	불량정합점	정합점	불량정합점
시작점의 수	222445					
구간 1	193058	2489	193096	2487	193047	2487
구간 2	20202	4325	20029	4309	20146	4300
구간 3	5820	3430	5797	3423	5790	3421
구간 4	4406	3355	4402	3356	4346	3324
	3rd case2		3rd case3			
	정합점	불량정합점	정합점	불량정합점		
시작점의 수	222445					
구간 1	193060	2488	193060	2488		
구간 2	20180	4325	20192	4326		
구간 3	5817	3429	5821	3431		
구간 4	4412	3357	4407	3356		

표 1에서 알 수 있듯이 연구지역은 대부분 고도 150m 이하의 낮은 구릉지대와 산지로 구성이 되어있음을 확인할 수 있었으며 구간 (1)에서 대부분의 시작점이 정합되었다. 구간 (2)~구간 (4)에서 정합된 부분의 일부는 불량 정합점으로 판별되었으며 대체적으로 높은 고도로 가정하고 정합이 이루어진 구간 (3)과 (4)에서는 상대적으로 많은 불량 정합점이 검출되었다. 이러한 결과로 판단해 볼 때 본 연구에서 제안한 대상공간영상정합의 적절함을 확인할 수 있었고 또한 다항식비레모형이라는 기하학적 모델이 영상정합에 있어 효율적으로 사용될 수 기하학적 조건임을 확인할 수 있었다.

3.2.2 IKONOS-2

IKONOS 역시 시뮬레이션 실험을 통해 갱신된 RPC를 이용하여 새로이 생성된 개별정합선의 적합성을 확인하였으며 표 2는 연구 대상지역에 대하여 0m~200m까지 4구간으로 나누어져 수행된 정합결과를 보여주고 있다. SPOT의 경우와 마찬가지로 실제지형의 고도에 해당하는 50m~100m의 구간 (2)에서 정합결과가 우수했으며 나머지 구간에서는 불량 정합점들이 많은 수를 차지하고 있었다.

표 2. 구간별 대상공간영상정합 결과(IKONOS-2)

	갱신된 RPC	
	정합점	불량정합점
시작점의 수	109039	
구간 1	3873	3367
구간 2	59312	2110
구간 3	13365	10746
구간 4	3833	3478

3.3 수치고도모형의 제작

3.2.1 SPOT-3

최종적으로 얻어진 영상정합점들을 다항식비례모형의 전방교선법(intersection)을 통해 3차원 지상좌표로 계산하고 이를 다시 재배열 및 보간함으로써 연구지역에 대한 수치고도모형을 제작할 수 있었다. 그림 4는 본 연구를 통해 제작된 수치고도모형과 전통적인 임밀센서모형에 의해 제작된 동일지역의 수치고도모형을 나타내고 있다.

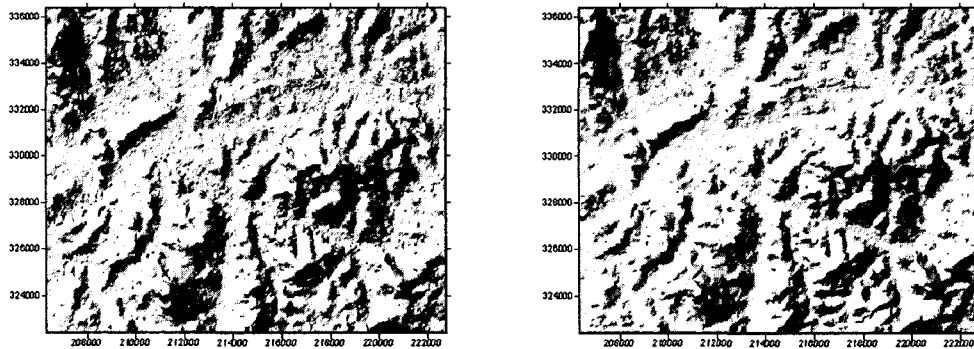


그림 4. 본 연구에서 제작된 수치고도모형(좌)과 임밀센서모형에 의해 제작된 수치고도모형(우)
(50m, 281×331, Bessel-TM127)

표 3. 제작된 수치고도모형의 고도값 오차(단위: m)

RFM-임밀센서	RMSE	Mean Error	Max. Error
고도	7.505	5.247	143.553
RFM-기준자료(DTED)	RMSE	Mean Error	Max. Error
고도	16.49627	15.12587	229.0362

3.2.1 IKONOS-2

그림 5는 본 연구를 통해 제작된 수치고도모형과 1:5000 수치지도를 통해 제작된 기준 수치고도모형을 보여주고 있다.

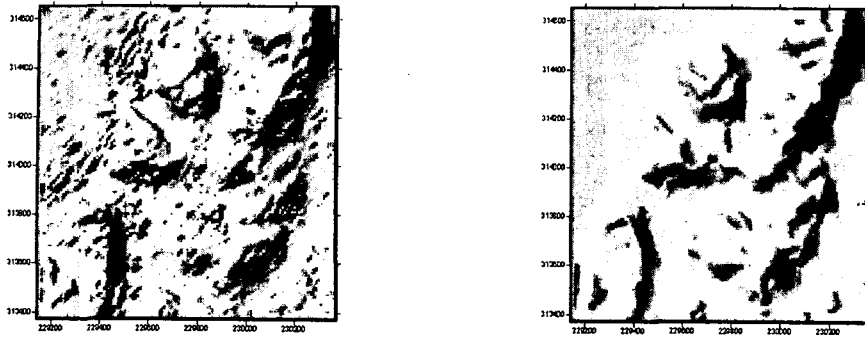


그림 5. 본 연구에서 제작된 수치고도모형(좌)과 1 : 5000 수치지도로 제작된 기준수치고도모형(우)
(10m, 130×125, WGS-84 UTM Zone 52)

표 4. 제작된 수치고도모형의 고도값 오차(단위: m)

RFM-기준자료(수치지도)	RMSE	Mean Error	Max. Error
고도	3.841	2.159	40.226

4. 결 론

본 연구에서는 pushbroom 방식의 대표적인 센서인 SPOT과 starring 방식의 IKONOS를 대상으로 다항식 비례모형을 기하학적 모형으로 사용한 영상정합법을 제안하였으며, 대상지역에 대한 실제 실험결과 고도값에 대하여 SPOT은 기준자료와 16.5m의 RMSE, IKONOS는 3.8m의 RMSE의 오차분포를 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 유사한 선행연구(SPOT: Baltasvias(1993), IKONOS: Zhang et al(2003))와도 큰 차이가 없었으며 다항식비례모형의 범용성과 신속성을 고려한다면 보다 효율적인 정합방법이라고 사료된다. 또한 본 연구를 통해 대상공간영상정합에 있어 다항식비례모형의 적합성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 정수, 박정환, 유복모, 1999, 상호표정자동화를 위한 대상공간영상정합, 대한토목학회논문집, pp. 313-323.
2. Baltasvias, E. P., Stallmann, D., 1993, SPOT stereo matching for digital terrain model generation, Proc. of 2nd swiss symposium on patten recognition and computer vision, Zurich, Swiss, pp. 61-72.
3. Grodecki, Jack, and Gene Dial, 2001, IKONOS geometric accuracy, Proceedings of Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from SPACE 2001", 19-21 September, Hannover, Germany, pp. 77-86.
4. Kim, T., 2000, A study on the epipolarity of linear pushbroom images, PE&RS, 66(8), pp. 961-966.
5. Li Zhang, Maria Pateraki, Emmanuel Baltasvias, 2003, Matching of IKONOS stereo and multitemporal GEO images for DSM generation, Map Asia 2003, 17-19 July, Kuala Lumpur, Malaysia, CD-ROM.
6. Tau, C. V., and Y. Hu, 2001, A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, PE&RS, 67(12), pp. 1347-1357.
7. Tau, C. V., and Y. Hu, 2002(a), 3D reconstruction methods based on the rational function model, PE&RS, 68(7), pp. 705-714.
8. Y. Hu and Tau, C. V., and, 2002(b), Update solutions of the rational function model using additional control information, PE&RS, 68(7), pp. 715-723.
9. Zhang, Y., 1991, Matching in image/object dual spaces, SPIE Vol. 1526 Industrial Vision Metrology.