

RPC를 이용한 Stereo 영상으로부터의 3차원 좌표 추출

김 광 은

한국지질자원연구원

Computation of 3D Coordinates from Stereo Images with RPCs

Kwang-Eun Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract : RPC(Rational Polynomial Camera) models have become the replacement model of choice for a number of high resolution satellite imagery providers. RPCs(Rational Polynomial Coefficients) provide a compact accurate representation of the ground to image geometry, allowing users to perform full photogrammetric processing of satellite imagery including block adjustment, 3D feature extraction and orthorectification. This paper presents an algorithm for 3D feature extraction using downhill simplex method which requires only function evaluations, not derivatives. The algorithm was implemented as an executable software program and tested using stereo IKONOS images of Seoul city. The results showed that the proposed algorithm was fast and accurate enough to be used as a practical method for the 3D feature extraction from stereo images with RPCs.

Key Words : Stereo Imagery, RPC, 3D Feature Extraction, Downhill Simplex.

요약 : 최근 고해상도 영상의 공급에 있어 물리적 센서 모델의 대안으로서 RPC(Rational Polynomial Camera) 모델이 활발히 이용되고 있다. RPC 모델을 통하여 지상 좌표와 영상 좌표간의 기하 관계를 단순하고도 정확하게 묘사할 수 있어 과거 물리적 센서 모델을 통하여만 이루어질 수 있었던 정사보정, 스테레오 영상을 이용한 3차원 좌표 추출 등의 처리가 가능하게 되었다. 본 연구에서 사용하는 RPCs(Rational Polynomial Coefficients)가 주어진 스테레오 영상으로부터 3차원 좌표를 추출할 수 있는 매우 간단한 방법을 제안하고자 하였다. 제안된 방법은 Downhill Simplex 기법을 이용하는 방법으로서, Downhill Simplex 기법은 함수의 최소값을 찾는 데 있어 편미분 계산을 수행하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 제안된 Downhill Simplex 기법을 이용한 RPC 스테레오 영상으로부터의 3차원 좌표 추출 기법은 실제 사용이 가능한 소프트웨어 프로그램으로서 구현되었으며, 서울 지역의 스테레오 IKONOS 영상에 시험 적용되었다. 시험 적용 결과, 본 방법은 비교적 빠르게 3차원 좌표를 계산할 수 있는 것으로 평가되며, RPCs가 주어진 스테레오 영상으로부터 3차원 좌표를 추출할 수 있는 실제적 기술로서 사용이 가능할 것으로 기대된다.

1. 서론

스테레오 영상으로부터의 3차원 좌표 추출, 정사보정 등의 영상처리는 지상 좌표와 영상 좌표간의 관계를 나타낼 수 있는 센서 모델링 과정을 필요로 한다. 그러나 IKONOS, QuickBird 등의 최근 고해상도 위성에 탑재된 센서에 대한 물리적 모델은 매우 복잡한 것으로 알려져 있으며, 실제 이러한 고해상도 영상을 공급하는 측에서는 센서 모델링 과정을 필요로 하는 각종 영상 처리를 위하여 과거의 물리적 모델 대신에 수학적 모델인 RPC (Rational Polynomial Camera) 모델을 이용하여 사용자에게 정보를 제공하고 있다.

RPC 모델은 RFM(Rational Function Model)으로도 알려져 있으며, 지난 몇 년 동안 급속히 그 사용이 확대되고 있다. 많은 연구를 통해서 RPC 모델은 수학적으로 매우 단순함에도 불구하고 충분한 자유도를 가지고 있어(Lutes, 2004), 고해상도 위성영상의 사진측량학적 처리를 위하여 충분히 사용될 수 있을 정도의 정확도를 확보할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Tao and Hu, 2002, Fraser and Hanley, 2003). Grodecki(2001)는 IKONOS 영상에 대한 연구를 통하여 RPC 모델이 물리적 모델과 0.04 화소 이하의 오차를 보이며, 이 때 RMS 오차는 불과 0.01 화소 미만이었다고 보고하고 있다.

Tao and Hu(2002)는 Rational Polynomial Coefficients(RPCs)가 주어진 스테레오 영상을 이용하여 지상의 3차원 좌표를 계산하기 위한 Inverse RPC 모델에 대한 연구를 수행하였으며, Grodecki 등(2004)은 RPCs가 주어진 스테레오 영상을 이용하여 지상의 3차원 좌표를 계산하는 몇 가지 방법들에 대하여 수학적으로 고찰한 바 있다. 또한 최근의 상용 위성영상 처리 소프트웨어들도 대부분 RPCs가 주어진 스테레오 영상을 이용한 3차원 좌표 계산을 지원하고 있다. 하지만, 대부분의 방법들은 RPC 모델에 대한 편미분 계산을 필요로 한다.

본 연구에서는, Downhill Simplex 기법을 이용하

여 RPCs가 주어진 고해상도 스테레오 영상으로부터 지상의 3차원 좌표를 계산할 수 있는 매우 간단한 방법을 개발하고자 하였다. Downhill Simplex 기법은 다변량 함수의 최소값을 계산하는데 있어 함수의 편미분에 대한 계산과정을 필요로 하지 않으며, 단지 함수 값에 대한 계산만을 필요로 하므로 구현하기가 매우 간단하다는 장점을 가진다. 특히, 평가하고자 하는 함수가 수학적으로 복잡하지 않아 계산 시간이 많이 소요되지 않는 경우에 매우 효율적인 기법으로 알려져 있다(Press et al. 1986). RPC 모델은 다항식으로서 이루어진 분수 함수의 형태로서 수학적으로 계산이 매우 단순하므로 특히 Downhill Simplex 기법의 적용이 효율적일 것으로 판단된다.

2. Rational Polynomial Camera 모델

Rational Polynomial Camera 모델은 지상 좌표와 영상 좌표간의 관계를 나타낸다. RPC 모델은 기본적으로 분수 함수(Rational Function) 형태로서, 분모와 분자 모두 20개의 계수를 가지는 3원 3차 다항식으로 이루어진다. 이 때, 이 다항식의 계수를 Rational Polynomial Coefficients라 한다. RPC 모델은 지상 좌표(X, Y, Z)와 영상 좌표(L, S)간의 관계를 나타내며 영상 좌표 중 행(Line) 좌표 L 과 열(Sample) 좌표 S 는 각각 별도의 분수 함수로서 표현된다. 식 (1)은 RPC 모델을 나타내는 분수 함수로서, 행 좌표 L 에 대한 분수 함수 $p(X, Y, Z)$ 는 $f_L(X, Y, Z)$ 과 $g_L(X, Y, Z)$ 의 두 개의 3원 3차 다항식으로 구성되며, 열 좌표 S 에 대한 분수 함수 $q(X, Y, Z)$ 는 $f_S(X, Y, Z)$ 와 $g_S(X, Y, Z)$ 의 또 다른 두 개의 3원 3차 다항식을 각각 분자와 분모로 한다. 하나의 영상 자료는 행 좌표 계산을 위한 두 개의 3원 3차 다항식에 대한 계수 40개($a_1 \sim a_{20}, b_1 \sim b_{20}$)와 열 좌표 계산을 위한 두 개의 3원 3차 다항식에 대한 계수 40개($c_1 \sim c_{20}, d_1 \sim d_{20}$) 등 총 80개의 계수가 RPC 모델을 구성하는 요소로서 제공된다.

$$L = p(X, Y, Z) = \frac{f_L(X, Y, Z)}{g_L(X, Y, Z)}$$

$$S = q(X, Y, Z) = \frac{f_S(X, Y, Z)}{g_S(X, Y, Z)} \quad (1)$$

여기에서,

$$f_L = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z + a_5XY + a_6XZ + a_7YZ + a_8X^2 + a_9Y^2 + a_{10}Z^2 + a_{11}XYZ + a_{12}X^3 + a_{13}XY^2 + a_{14}XZ^2 + a_{15}X^2Y + a_{16}Y^3 + a_{17}YZ^2 + a_{18}X^2Z + a_{19}Y^2Z + a_{20}Z^3$$

$$g_L = b_1 + b_2X + b_3Y + b_4Z + b_5XY + b_6XZ + b_7YZ + b_8X^2 + b_9Y^2 + b_{10}Z^2 + b_{11}XYZ + b_{12}X^3 + b_{13}XY^2 + b_{14}XZ^2 + b_{15}X^2Y + b_{16}Y^3 + b_{17}YZ^2 + b_{18}X^2Z + b_{19}Y^2Z + b_{20}Z^3$$

$$f_S = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}X^3 + c_{13}XY^2 + c_{14}XZ^2 + c_{15}X^2Y + c_{16}Y^3 + c_{17}YZ^2 + c_{18}X^2Z + c_{19}Y^2Z + c_{20}Z^3$$

$$g_S = d_1 + d_2X + d_3Y + d_4Z + d_5XY + d_6XZ + d_7YZ + d_8X^2 + d_9Y^2 + d_{10}Z^2 + d_{11}XYZ + d_{12}X^3 + d_{13}XY^2 + d_{14}XZ^2 + d_{15}X^2Y + d_{16}Y^3 + d_{17}YZ^2 + d_{18}X^2Z + d_{19}Y^2Z + d_{20}Z^3$$

X, Y, Z 는 -1.0과 1.0 사이의 값으로 정규화된 지상 좌표 값으로서 IKONOS 영상의 경우 각각 경도, 위도 및 고도를 나타낸다. L, S 는 각각 행과 열을 나타내는 영상좌표로서 역시 -1.0과 1.0 사이의 값으로 정규화된 값이 사용되며, 정규화를 위한 Offset과 Scale 값이 RPCs와 함께 제공된다. RPC 모델에 대해서는 Tao and Hu(2001)가 매우 자세하게 설명한 바 있으며, 특히 IKONOS 영상의 RPC 모델에 대하여는 매우 많은 연구가 이루어진 바 있다(Grodecki, 2001; Tao and Hu, 2002; Fraser and Hanley, 2003; Grodecki et al., 2004).

3. RPC를 이용한 3차원 좌표 추출

물리적 센서 모델을 이용하여 스테레오 영상으로부터 지상의 3차원 좌표를 추출하는 기술은 이미 SPOT, KOMPSAT 영상 등의 활용을 위하여

매우 많이 개발되고 발전되어 왔다. IKONOS나 QuickBird 영상과 같이 RPCs가 제공되는 고해상도 영상에 대한 3차원 좌표 추출 기술도 2000년대 초반 이미 개발되어(Tao and Hu, 2002) 상용 소프트웨어들에 그 기능이 탑재되어 있다.

RPC 스테레오 영상에서의 3차원 좌표 추출은 동일 목표에 대하여 각각의 영상으로부터 추출된 영상 좌표 L_1, S_1 및 L_2, S_2 로부터 각각의 영상에 대한 RPC 모델을 만족시키는 지상 좌표 X, Y, Z 를 찾는 과정이 된다. Tao and Hu(2002)는 식 (1)에 나타난 지상 좌표로부터 영상 좌표를 계산하는 과정을 Forward RPC 모델링이라 불렀으며, 영상 좌표 L_1, S_1 및 L_2, S_2 로부터 지상 좌표 X, Y, Z 를 계산하는 과정을 Inverse RPC 모델링이라고 하고, Inverse RPC 모델을 계산하는 방법을 개발하였다고 발표한 바 있으나, 계산 과정 및 결과식에 대한 자세한 내용은 공개되고 있지 않다. Grodecki 등(2004)은 IKONOS 스테레오 영상으로부터 3차원 지상 좌표를 계산하는 각종 수학적 방법들을 정리하여 보고한 바 있으나, 대부분의 방법들은 식 (1)의 분수 함수에 대한 편미분 계산 과정을 필요로 하며 이는 실제 프로그램으로의 구현에 있어 매우 복잡한 수치 처리 과정을 요구한다.

본 연구에서는, 임의의 지상 좌표 X, Y, Z 로부터 계산되는 스테레오 영상에서의 영상 좌표 $p(X, Y, Z), q(X, Y, Z)$ 와 실제 영상좌표 L_1, S_1 및 L_2, S_2 간의 오차를 다음과 같이 지상 좌표 X, Y, Z 의 함수로서 구성하고 반복적인 방법으로 이 오차 함수 $E(X, Y, Z)$ 를 최소화하는 X, Y, Z 값을 찾아가는 방법을 제안한다.

$$E(X, Y, Z) = \sum_{k=1}^2 (L_k - p_k(X, Y, Z))^2 + \sum_{k=1}^2 (S_k - q_k(X, Y, Z))^2 \quad (2)$$

이 때, 오차 함수 $E(X, Y, Z)$ 를 최소화하는 X, Y, Z 값을 찾는 데 있어, 함수 값의 최소화를 위한 해를 찾는 기법으로서 흔히 사용되는 Downhill Simplex 기법을 사용하였다. Downhill Simplex 기법은 최소화하고자 하는 함수에 대한 편미분 계산을 필

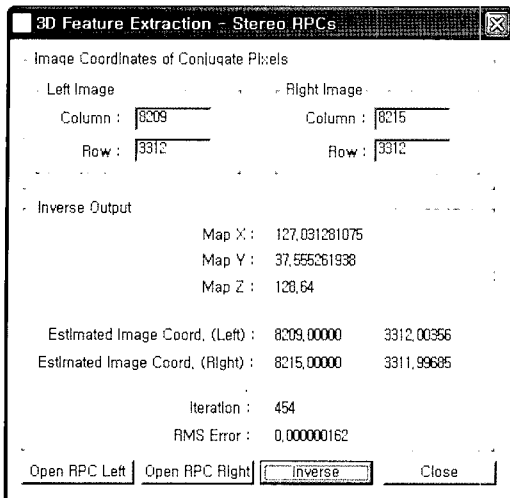


Fig. 1. The interface of the executable software program for 3D feature extraction using stereo RPCs developed in this study.

요로 하지 않으며 단지 $E(X,Y,Z)$ 에 대한 계산만을 필요로 함으로써, 구현이 매우 간단할 뿐 아니라 정확하고 확실하게 해를 찾을 수 있는 방법으로 알려져 있다(Press *et al.*, 1986). Downhill Simplex 기법에서는 구하고자 하는 변수들이 -1.0과 1.0 사이의 값으로 정규화되어 사용되며, 각 변수별로 -1.0 아니면 1.0의 값이어서 초기화된다. 또한 Downhill Simplex 기법에서는, 해를 구하기 위하여 하나의 초기값이 설정되는 것이 아니라, 구

하고자 하는 변수의 개수보다 1개 더 많은 초기값 세트가 사용된다. 즉 본 연구에서와 같이 구하고자 하는 변수가 X, Y, Z 의 3개인 경우 4개의 X, Y, Z 값 세트가 초기값이어서 사용된다.

제안된 방법은 C++ 언어를 이용하여 누구나 쉽게 사용할 수 있는 형태의 소프트웨어 프로그램으로서 구현되었으며, 그림 1은 본 연구에서 개발된 프로그램의 사용 환경을 보여주고 있다.

4. 실험 및 토의

개발된 3차원 좌표 추출 기법의 적용성 시험을 위하여 서울 지역의 IKONOS 스테레오 영상이 사용되었다. 이 영상은 IKONOS 스테레오 영상의 활용 확대를 위하여 샘플 영상으로서 RPC 정보와 함께 일반에게 제공된 것으로서 2000년 7월 2일에 촬영된 영상이다.

그림 2는 사용된 IKONOS 스테레오 영상의 일부를 보여주고 있으며, 서울시 성동구 행당동의 주거 지역이다. 적용성 시험을 위하여 영상으로부터 4개의 지점이 선택되었으며(A, B, C, D), 지점 A와 지점 B는 각각 아파트 건물의 모서리 상단 및 하단으로서 동일한 수평 좌표(X, Y)를 가지고 있다. 지점 C와 지점 D도 다른 아파트 건물의 모

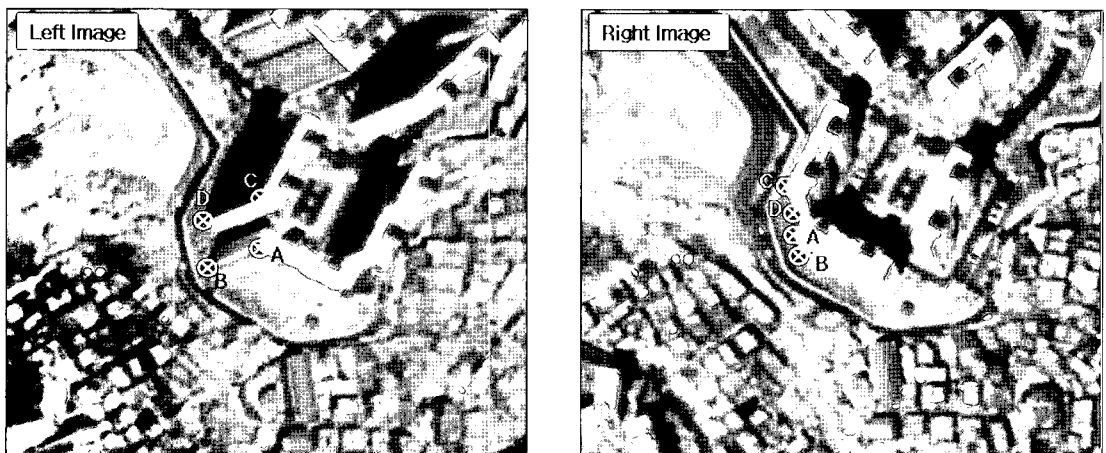


Fig. 2. IKONOS stereo images of HaengDang-Dong, SeongDong-Ku, Seoul City. Four points(A, B, C, D) were selected from the stereo images for the 3D object space coordinates estimation experiments.

Table 1. Image coordinates of the selected target points for the experiments.

Target Point	Image coordinate in left scene		Image coordinate in right scene	
	Sample	Line	Sample	Line
A	8210	3312	8214	3312
B	8184	3323	8219	3323
C	8210	3287	8210	3287
D	8181	3299	8213	3299

서리 상단 및 하단으로 선택되었다.

표 1은 선택된 4개의 지점에 대한 각각의 영상에서의 영상 좌표 값을 보여주고 있다. 각각의 영상에서 해당 지점에 대한 영상 좌표 값은 육안 확인을 통하여 추출되었는데, 해상도 1미터의 Panchromatic 영상임에도 불구하고 모서리에 대한 정확한 영상 좌표의 추출은 어려웠으며 약 ± 0.5 화소 정도의 오차를 포함하고 있다고 판단된다.

영상에서 선택된 시험 지점들에 대한 실제 지상 좌표값은 1:1,000 축척의 수치 지형도로부터 추출되었다. 그림 3은 시험 지점 A, B, C, D의 위치가 표시된 수치 지형도를 보여주고 있으며, 표 2에는 각 지점에 대하여 추출된 지상 좌표값을 나타냈다.

각 지점에 대한 수평 좌표(X, Y)값은 수치 지형도에서 해당 건물을 나타내는 폴리곤으로부터 직접 추출되었으며, 앞서 언급하였듯이 지점 A와

지점 B, 그리고 지점 C와 지점 D는 각각 건물 모서리의 상단과 하단으로서 수평 좌표(X, Y)값은 동일하다. 한편, 건물의 상단에 해당되는 지점 A 및 지점 C에 대한 높이 값 정보는 수치 지형도에 포함되어 있지 않으며, 건물의 하단 모서리에 해당하는 지점 B와 지점 D에 대한 높이 값은 주변의 등고선 값을 이용하여 추출하였으므로 최대 약 1미터 정도의 오차가 포함될 수 있다. 표 2에 나타난 지점 A, B, C, D에 대하여 추출된 지상 좌표 값은 중부원점의 Bessel TM 좌표계에서의 좌표 값이다.

본 연구는 RPC가 제공되는 스테레오 영상으로부터의 3차원 좌표 값을 추출하는 기법에 대한 연구가 주 목표로서, 정확도에 대한 정밀한 평가는 이루어지지 않았다. 이를 위해서는 사실 본 연구에서 사용된 RPC의 정확도에 대한 평가 작업과,

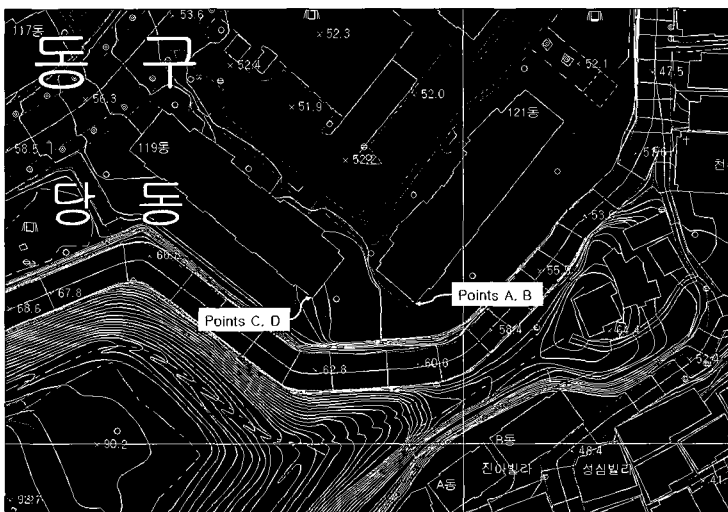


Fig. 3. 1:1,000 scale topographic map of the target points area.

Table 2. Map coordinates of the selected target points from topographic map. Height values were estimated from the contour lines.

Target Point	Map Coordinates (Bessel TM)		
	X	Y	Height
A	202689.6	450330.34	-
B			53m
C	202667.36	450331.51	-
D			56m

RPC의 오차에 따른 스테레오 영상을 이용한 3차원 좌표 값의 오차 평가 및 보정 등 많은 지상기준점의 확보와 함께 수반되는 심도 깊은 연구가 요구된다.

표 3은 본 연구에서 개발된 방법을 통하여 IKONOS RPC 스테레오 영상으로부터 계산된 각 지점들의 좌표이다. IKONOS 영상의 RPC 모델은 WGS84 Geographic 좌표 체계를 사용하고 있으며 따라서, 계산되는 수평 좌표값들은 모두 위도 및 경도로서 나타내지고, 고도 값은 WGS84 기준면에 대한 높이 값이 된다. 앞서 1:1,000 축척의 수치 지형도로부터 추출된 지도 좌표 값들과의 비교

를 위하여 스테레오 영상으로부터 계산된 WGS84 Geographic 좌표 체계의 좌표값들은 모두 중부원점의 Bessel TM 좌표 값으로 변환되었으며, 그 결과를 표 4에 나타냈다.

지점 A에 대한 결과를 보면, 스테레오 영상으로부터 계산된 좌표 값은 $X=202694.67$, $Y=450331.44$, $Z=109.66$ 로서 수치 지형도에서 추출된 수평 좌표 값 $X=202689.6$, $Y=450330.34$ 와는 동서 방향으로 5.07m, 남북 방향으로 1.1m의 차이를 보이고 있다. 동서 방향으로의 오차가 약간 크나, 스테레오 영상으로부터 계산된 좌표 $X=202694.67$, $Y=450331.44$, $Z=109.66$ 를 식(1)에 대입하여 각각의 영상에서의 영상좌표를 계산하여 보면, 왼쪽 영상에 대하여 $L=8210.0$, $S=3312.00238$, 그리고 오른쪽 영상에 대하여 $L=8214.0$, $S=3311.9979$ 로서 표 1에 나타냈던 당초 사용되었던 영상 좌표 값들(8210, 3312; 8214, 3312)과 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안하고 있는 방법이 주어진 스테레오 영상의 영상 좌표 값에 충실하게 지상 좌표 값을 계산하고 있음을 나타낸다.

스테레오 영상으로부터 지점 B의 지상 좌표는

Table 3. Extracted 3D coordinates of the selected target points by the proposed method.

Target Point	Extracted Object Space Coordinates (WGS84)			RMS Error
	Latitude	Longitude	Height	
A	37.555254183	127.031287064	132.11	1.08E-7
B	37.555260595	127.031290125	78.35	9.46E-7
C	37.555269750	127.031017900	139.05	0.0
D	37.555256101	127.031022885	83.57	8.66E-7

Table 4. Extracted 3D coordinates of the selected target points in Bessel TM.

Target Point	Extracted Coordinates(Bessel TM)			Coordinates from 1/1,000 Digital Topographic Map		Differences	
	X	Y	Z	X	Y	ΔX	ΔY
A	202694.67	450331.44	109.66	202689.60	450330.34	5.07	1.10
B	202694.94	450332.15	55.90	202689.60	450330.34	5.34	1.81
A-B	-0.27m	-0.71m	53.76m	-	-	-	-
C	202670.83	450333.16	116.60	202667.36	450331.51	3.47	1.65
D	202671.33	450331.65	61.12	202667.36	450331.51	3.97	0.14
C-D	-0.5m	1.51m	55.48m	-	-	-	-

$X=202694.94$, $Y=450332.15$, $Z=55.90$ 로 계산되었으며, 수치 지형도로부터 추출되는 좌표 값과는 동서 방향으로 5.34m, 남북 방향으로 1.81m의 차이를 보이고 있다. 스테레오 영상으로부터 계산된 지점 B의 지상 좌표 값 $X=202694.67$, $Y=450331.44$, $Z=109.66$ 를 이용하여 각각의 영상에서의 영상좌표를 계산하여 보면, 왼쪽 영상에 대하여 $L=8184.00002$ $S=3323.02077$, 그리고 오른쪽 영상에 대하여 $L=8218.99998$ $S=3322.98165$ 로서 표 1에 나타냈던 당초 사용되었던 영상 좌표 값들(8184, 3323; 8189, 3323)과 거의 동일하다. 한편, 지점 B의 높이 값은 55.9m로서 수치 지형도에서 등고선으로부터 유추된 높이 값 53m와는 약 2.9m의 차이를 보이고 있다.

앞서 언급했듯이 지점 A와 지점 B는 건물 모서리의 상단과 하단으로서 수평 좌표 값은 동일해야 한다. 스테레오 영상으로부터 계산된 지점 A와 지점 B간의 수평 좌표 값의 차이는 $\Delta X=0.27\text{m}$ 이고 $\Delta Y=0.71\text{m}$ 로서 오차가 매우 작게 나타나고 있어 본 방법의 정확도를 간접적으로 보여주고 있다.

지점 C는 다른 건물의 모서리 상단으로서, 스테레오 영상으로부터 $X=202670.83$, $Y=450333.16$, $Z=116.6\text{m}$ 의 지상 좌표값을 가지는 것으로 계산되었다. 수치 지형도에서 추출된 수평 좌표 값 $X=202667.36$, $Y=450331.51$ 과는 동서 방향으로 3.47m, 남북 방향으로 1.65m의 차이를 보이고 있어 동서 방향으로의 오차가 남북 방향으로의 오차보다 약간 큼을 알 수 있다. 스테레오 영상으로부터 계산된 좌표 $X=202670.83$, $Y=450333.16$, $Z=116.6$ 를 식(1)에 대입하여 각각의 영상에서의 영상좌표를 계산하여 보면, 왼쪽 영상에 대하여 $L=8210.0$, $S=3287.0$, 그리고 오른쪽 영상에 대하여 $L=8210.0$, $S=3287.0$ 로서 표 1에 나타냈던 당초 사용되었던 영상 좌표 값들(8210, 3312; 8214, 3312)과 완전히 동일하여 RMS error가 0.0임을 알 수 있다.

지점 D의 지상 좌표는 스테레오 영상으로부터 $X=202671.33$, $Y=450331.65$, $Z=61.12$ 로 계산되었으며, 수치 지형도로부터 추출된 수평 좌표 값과는 동서 방향으로 3.91m, 남북 방향으로 0.14m의 차이를 보이고 있다. 지점 D는 수치 지형도에서의 등

고선을 통하여 그 고도 값이 약 56m로서, 본 방법에서 계산된 고도 값 61.12m와는 약 5.12m의 차이를 보이고 있다. 스테레오 영상으로부터 계산된 지점 D의 지상 좌표 값 $X=202671.33$, $Y=450331.65$, $Z=61.12$ 를 이용하여 각각의 영상에서의 영상좌표를 계산하여 보면, 왼쪽 영상에 대하여 $L=8181.00002$ $S=3299.01901$, 그리고 오른쪽 영상에 대하여 $L=8212.99998$ $S=3298.98322$ 로서 표 1에 나타냈던 당초 사용되었던 영상 좌표 값들(8181, 3299; 8212, 3299)과 거의 동일함을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서 제안하고 있는 방법에 대한 정밀한 정확도 평가는 이루어지지 않았으나, 사용된 RPC 모델과 수치 지형도간의 상대적 정확도를 살펴봄으로써, 앞서 분석에서 스테레오 영상으로부터 계산된 지상 좌표 값과 수치 지형도로부터 추출된 지상 좌표 값과의 차이가 발생하는 원인에 대한 간접적 분석을 시도하고 하였다. RPCs와 수치 지형도간의 상대적 위치 정확도가 매우 높다면, 수치 지형도에서 특정 지점에 대하여 추출된 지상 좌표값을 식 (1)에 대입하여 구하여진 영상 좌표 값은 영상에서 정확히 해당 지점을 가리켜야 한다.

이를 위하여 그림 4에 나타난 것과 같이 지점 D의 수치 지형도에서의 지상 좌표 값 $X=202670.83$, $Y=450333.16$, $Z=56\text{m}$ 를 식(1)에 대입하여 각각의 영상에서의 영상 좌표 값을 계산하여 보았다. RPC와 수치 지형도 모두가 정확하다면 표 1에 나타낸 지점 D의 영상 좌표 값(8181, 3299)와 (8212, 3299)가 얻어져야 하며, 영상에서는 정확히 해당 건물 모서리의 하단에 위치해야 한다. 그림 4에서 보듯이 계산 결과 얻어진 영상 좌표 값이 가리키는 지점은 건물 모서리의 하단에 위치하지 않고 있으며, 그 오차는 최대 약 3.56 화소에 달한다(표 5).

RPC 모델 자체가 물리적 센서 모델과의 오차는 거의 없다는 것이 많은 연구를 통하여 보고된 바 있으나, 이는 RPC 모델의 계수 자체가 정확하다는 것을 의미하지는 않으며, 계수의 정확도는 각각의 영상에 대하여 다를 수 있으므로, RPC 모델의 실제 사용을 위해서는 주어진 RPC 모델의 위치 정확도에 대한 검증 및 향상을 위한 보정 과

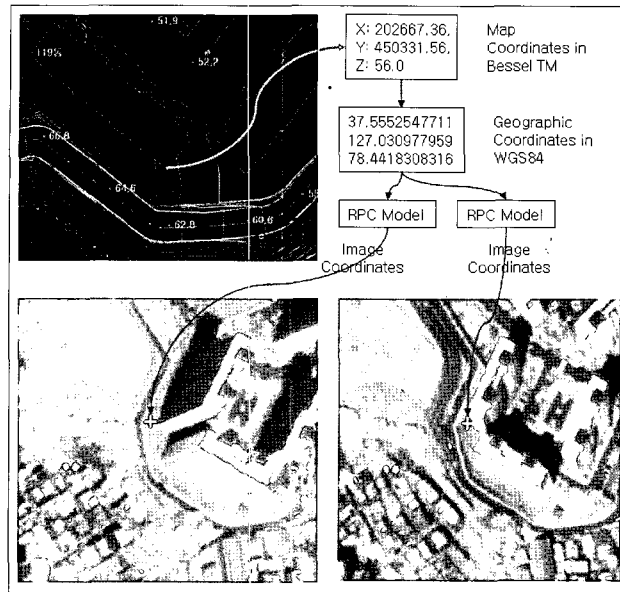


Fig. 4. The RPC forward modeling for the investigation of relative accuracy of RPCs and digital map. The calculated image coordinates dose not indicate the coner edge of the building in the imagery.

Table 5. The RPC forward modeling results of the point D (X=202667.36, Y=450331.56, Z=56m).

Image Coordinates		Calculated using RPC	Extracted by Visual Interpretation	Difference(pixels)
Sample	Left Image	8177.44	8181	-3.56
	Right Image	3296.21	3299	-2.79
Line	Left Image	8212.40	8213	-0.60
	Right Image	3296.17	3299	-2.83

정이 필요한 것으로 알려져 있다.

5. 결론

본 연구에서는 RPC가 주어진 스테레오 영상으로부터 3차원 좌표를 추출할 수 있는 매우 간단한 방법을 개발하였다. 본 방법은 Downhill Simplex 기법을 이용하는 방법으로서, 최소화하고자 하는 함수에 대한 편미분 계산이 필요 없는 등 수학적으로 매우 단순하여 구현이 용이하다는 장점을 가진다. 본 연구에서 제안된 Downhill Simplex 기법을 이용한 RPC 스테레오 영상으로부터의 3차원 좌표 추출 기법은 실제 누구나 사용이 가능한 소

프트웨어 프로그램으로써 구현되었으며, 서울 지역의 스테레오 IKONOS 영상에 시험 적용결과, 비교적 빠르게 3차원 좌표를 계산할 수 있는 것으로 평가되어 정확도에 대한 검증이 이루어진다면 RPC가 주어진 스테레오 영상으로부터 3차원 좌표를 추출할 수 있는 실제적 기술로서 사용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

Tao, C. V. and Y. Hu, 2001. A comprehensive study of the Rational Function Model for photogrammetric processing, *Photo. Eng. and*

- Remote Sensing*, 67: 1347-1357.
- Tao, C. V. and Y. Hu, 2002. 3D reconstruction of the Rational Function Models for photogrammetric processing, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, 68: 705-714.
- Fraser, C. S. and H. B. Hanley, 2003. Bias compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery, *Photo. Eng. and Remote Sensing*, 69: 53-57.
- Lutes, J., 2004. Accuracy analysis of Rational Polynomial Coefficients for IKONOS imagery, *Proceedings of ASPRS 2004*, Denver, May 23-28, 2004.
- Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, 1986. *Numerical Recipes*, Cambridge University Press.
- Grodecki, J., 2001. IKONOS stereo feature extraction-RPC approach, *Proceedings of ASPRS 2001*, St. Louis, April 23-27, 2001.
- Grodecki, J., G. Dial, and J. Lutes, 2004. Mathematical model for 3D feature extraction from multiple satellite images described by RPCs, *Proceedings of ASPRS 2004*, Denver, May 23-28, 2004.