

고해상도위성영상을 이용한 3차원 지형좌표의 추출에 관한 연구

Extraction of the 3D Terrain Coordinates Using the High-resolution Satellite Images

이재빈*, 김민석**, 김용일***, 유기윤****

Lee, Jae Bin* · Kim, Min Suk** · Kim, Yong Il*** · Yu, Ki Yun****

1. 서 론

위성들에 의한 주기적이고 광범위한 지역에 대한 영상의 공급은 양적인 면에서 정보혁명을 일으켰다. 물론 기존에도, 여러 가지의 산업분야나 환경분야에 위성영상들을 이용하여 왔으나, 과거의 고해상도 영상들은 단지 비밀 군사/첩보 프로그램에 만 이용이 제한되어 있었다. 그러나, 현재는 상업적인 회사들의 기술발달과 자체적인 위성의 운용에 힘입어 1미터 정도의 해상도를 지닌 고해상도 위성영상들을 일반 사용자들도 획득이 가능하게 되었다. 2003년까지 적어도 5개의 나라들의 11개 사기업들에 의해서 우주궤도 위에 고해상도로 원거리를 감지할 수 있는 상업용 위성들이 존재하게 될 전망이다. 본 논문에서는 이러한 고해상도 위성영상의 활용분야를 증대시키기 위한 하나의 방편으로 최초의 상업용 고해상도 위성영상이라 할 수 있는 Space Imaging사의 IKONOS 위성영상을 이용하여 3차원 지형자료를 구축하기 위한 기본 알고리즘의 구현에 목적을 두고 있다. 이를 위해서 IKONOS 위성영상의 입체쌍과 영상의 RPC(Rational Polynomial Coefficients) 모델을 이용하여 3차원 지형좌표를 추출하기 위한 기본 알고리즘을 구현하였으며, 이를 시스템 상에 구현하였고, 12개의 검정점에 대해 3차원 지형좌표를 취득하고 정확도를 평가하였다.

2. 연구내용

2.1 사용데이터의 제원

본 연구에 사용된 IKONOS 위성영상의 제원은 다음의 표 1과 같다.

표 1 사용 데이터의 제원

	좌측영상	우측영상
Producer	Space Imaging	Space Imaging
Sensor	IKONOS-2	IKONOS-2
Aquisition Date	2000-07-02 02:03	2000-07-02 02:03
Project Name	Seoul Level 2 Pan/MSI (4 bands) stereo 11 bits TIFF	Seoul Level 2 Pan/MSI (4 bands) stereo 11 bits TIFF
Band used	Panchromatic	Panchromatic
Stereo Position	Left	Right
Resolution	1m	1m
Datum	WGS84	WGS84
Image Size	13252×10264	13252×10264

*회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 02-880-7371(E-mail:leejaebin@hanmail.net)
 **회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · 공학사 · 02-880-7371(E-mail:kimminsuki@hanmail.net)
 ***정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 · 공학박사 · 02-880-7364(E-mail:yik@snu.ac.kr)
 ****정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 전임강사 · 공학박사 · 02-880-1355(E-mail:kiyun@plaza.snu.ac.kr)

2.2 고해상도 위성영상을 이용한 3차원 지형좌표 추출 알고리즘

2.2.1 IKONOS 위성영상의 RPC모델

IKONOS 위성영상을 이용하여 3차원의 지형좌표를 추출하기 위해서는 우선 영상과 지상간의 관계를 표현하는 RPC 모델에 대한 해석이 필요하다. RPC 모델은 IKONOS 위성의 자세, 위치, 카메라정보 등으로부터 결정되는 물리적 모델로부터 추출된 다항식 모델이다. IKONOS 위성영상의 헤더정보로부터 제공되는 영상에 대한 RPC식은 일반적으로 영상 각각의 행과 열의 좌표에 대하여 3차 다항식의 분모와 분자를 가지는 분수함수의 형태로 표현되어진다. 그리고, 분모와 분자의 3차식을 구성하는 RPC 모델의 계수들은 영상의 열과 행 및 WGS84좌표계의 지형좌표 (ϕ , λ , h)에 각각 축척계수와 오프셋을 적용한 값들로부터 얻어진 계수들이다. 다음은 일반적인 RPC 모델을 표현한 식이다. 영상의 행에 대한 RPC 모델은 다음의 식 (1)과 같다.²⁾

$$r = \frac{Num_R(u, v, w)}{Den_R(u, v, w)} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Num_R(u, v, w) &= a_1 + a_2 \cdot v + a_3 \cdot u + a_4 \cdot w + a_5 \cdot v \cdot u + a_6 \cdot v \cdot w + a_7 \cdot u \cdot w \\ &+ a_8 \cdot v^2 + a_9 \cdot u^2 + a_{10} \cdot w^2 + a_{11} \cdot u \cdot v \cdot w + a_{12} \cdot v^3 + a_{13} \cdot v \cdot u^2 + a_{14} \cdot v \cdot w^2 \\ &+ a_{15} \cdot v^2 \cdot u + a_{16} \cdot u^3 + a_{17} \cdot u \cdot w^2 + a_{18} \cdot v^2 \cdot w + a_{19} \cdot u^2 \cdot w + a_{20} \cdot w^3 \\ Den_R(u, v, w) &= b_1 + b_2 \cdot v + b_3 \cdot u + b_4 \cdot w + b_5 \cdot v \cdot u + b_6 \cdot v \cdot w + b_7 \cdot u \cdot w \\ &+ b_8 \cdot v^2 + b_9 \cdot u^2 + b_{10} \cdot w^2 + b_{11} \cdot u \cdot v \cdot w + b_{12} \cdot v^3 + b_{13} \cdot v \cdot u^2 + b_{14} \cdot v \cdot w^2 \\ &+ b_{15} \cdot v^2 \cdot u + b_{16} \cdot u^3 + b_{17} \cdot u \cdot w^2 + b_{18} \cdot v^2 \cdot w + b_{19} \cdot u^2 \cdot w + b_{20} \cdot w^3 \end{aligned}$$

영상의 열에 대한 RPC 모델은 다음의 식 (2)와 같다.

$$c = \frac{Num_C(u, v, w)}{Den_C(u, v, w)} \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Num_C(u, v, w) &= c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot u + c_4 \cdot w + c_5 \cdot v \cdot u + c_6 \cdot v \cdot w + c_7 \cdot u \cdot w \\ &+ c_8 \cdot v^2 + c_9 \cdot u^2 + c_{10} \cdot w^2 + c_{11} \cdot u \cdot v \cdot w + c_{12} \cdot v^3 + c_{13} \cdot v \cdot u^2 + c_{14} \cdot v \cdot w^2 \\ &+ c_{15} \cdot v^2 \cdot u + c_{16} \cdot u^3 + c_{17} \cdot u \cdot w^2 + c_{18} \cdot v^2 \cdot w + c_{19} \cdot u^2 \cdot w + c_{20} \cdot w^3 \\ Den_C(u, v, w) &= d_1 + d_2 \cdot v + d_3 \cdot u + d_4 \cdot w + d_5 \cdot v \cdot u + d_6 \cdot v \cdot w + d_7 \cdot u \cdot w \\ &+ d_8 \cdot v^2 + d_9 \cdot u^2 + d_{10} \cdot w^2 + d_{11} \cdot u \cdot v \cdot w + d_{12} \cdot v^3 + d_{13} \cdot v \cdot u^2 + d_{14} \cdot v \cdot w^2 \\ &+ d_{15} \cdot v^2 \cdot u + d_{16} \cdot u^3 + d_{17} \cdot u \cdot w^2 + d_{18} \cdot v^2 \cdot w + d_{19} \cdot u^2 \cdot w + d_{20} \cdot w^3 \end{aligned}$$

위 식의 (r , c)와 (u , v , w)는 각각 영상의 행과 열의 좌표인 (R , C) 그리고, WGS84 타원체상의 좌표인 (ϕ , λ , h)에 축척계수와 오프셋을 적용한 좌표들이다. (r , c)와 (R , C) 그리고 (u , v , w)와 (ϕ , λ , h)의 좌표에 축척계수와 오프셋을 적용한 관계식들은 다음의 식 (3)~식 (7)과 같다.

$$u = (\phi - O_\phi) / SF_\phi \quad (3)$$

$$v = (\lambda - O_\lambda) / SF_\lambda \quad (4)$$

$$w = (h - O_h) / SF_h \quad (5)$$

$$r = (R - O_R) / SF_R \quad (6)$$

$$c = (C - O_C) / SF_C \quad (7)$$

여기서, O = offset, SF = 축척계수 이다.

위와 같은 RPC 식들이 n 개의 위성영상에 대하여 2개씩 총 $2n$ 개의 식이 존재하게 된다. 따라서, 하나의 지형좌표에 대응하는 영상의 매칭점들을 n 개의 영상에 대해 각각 결정하게 되면 (ϕ , λ , h) 3개의 미지수를 가진 $2n$ 개의 연립방정식을 얻을 수가 있다. 이 연립방정식의 해를 구함으로써 IKONOS 위성영상으로부터 3차원 지형좌표를 추출할 수 있다.

2.2.2 RPC 모델을 이용한 3차원 지형좌표 추출

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 3차원 지형좌표를 취득하기 위하여 테일러 이론을 적용하여 선형화된 식을 구한다. 그러나, RPC 모델은 n 개의 영상에 대하여 독립적으로 결정되는 식이므로 n 개의 영상에 대해 각각 축척계수와 오프셋의 값이 다르다. 따라서, n 개의 영상의 RPC 모델을 이용하여 3차원의 지형좌표를 추출할 경우에는 (u, v, w) 좌표로 구성된 RPC 모델을 (ϕ, λ, h) 좌표로 치환하여 테일러 이론을 적용하여야 한다. 다음의 식 (8)~식 (11)은 (u, v, w) 좌표로 구성된 RPC 모델을 (ϕ, λ, h) 좌표로 치환한 후 테일러 이론을 적용하여 구성한 관측방정식이다.^{1), 3)}

$$F_{1_0} + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \lambda}\right)_0 d\lambda + \left(\frac{\partial F_1}{\partial h}\right)_0 dh = r_1 \quad (8)$$

$$G_{1_0} + \left(\frac{\partial G_1}{\partial \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\partial G_1}{\partial \lambda}\right)_0 d\lambda + \left(\frac{\partial G_1}{\partial h}\right)_0 dh = c_1 \quad (9)$$

...

$$F_{n_0} + \left(\frac{\partial F_n}{\partial \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\partial F_n}{\partial \lambda}\right)_0 d\lambda + \left(\frac{\partial F_n}{\partial h}\right)_0 dh = r_n \quad (10)$$

$$G_{n_0} + \left(\frac{\partial G_n}{\partial \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\partial G_n}{\partial \lambda}\right)_0 d\lambda + \left(\frac{\partial G_n}{\partial h}\right)_0 dh = c_n \quad (11)$$

여기서, 첨자 1, 2, ..., n 은 각각 사용된 영상의 번호이다.

식 (8)~식 (11)을 이용하면 n 개의 영상의 매칭점에 대해 미지수가 3개이고 방정식이 $2n$ 개인 관측방정식들을 얻을 수가 있다. 다음 식 (12)는 이를 이용하여 관측행렬을 구성한 것이다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \phi} & \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_1}{\partial h} \\ \frac{\partial G_1}{\partial \phi} & \frac{\partial G_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial G_1}{\partial h} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \phi} & \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_2}{\partial h} \\ \frac{\partial G_2}{\partial \phi} & \frac{\partial G_2}{\partial \lambda} & \frac{\partial G_2}{\partial h} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_n}{\partial \phi} & \frac{\partial F_n}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_n}{\partial h} \\ \frac{\partial G_n}{\partial \phi} & \frac{\partial G_n}{\partial \lambda} & \frac{\partial G_n}{\partial h} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d\phi \\ d\lambda \\ dh \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 - (F_1)_0 \\ c_1 - (G_1)_0 \\ r_2 - (F_2)_0 \\ c_2 - (G_2)_0 \\ \dots \\ r_n - (F_n)_0 \\ c_n - (G_n)_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ \dots \\ v_{2n-1} \\ v_{2n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_{2n \times 3} \times X_{3 \times 1} = L_{2n \times 1} + V_{2n \times 1}$$

위의 관측행렬을 이용하여 잔차의 제곱합이 최소가 되게 하는 해가 최확치라는 최소제곱 조정의 원리를 이용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있게 된다.

$$\therefore X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (13)$$

위 식 (13)의 X 행렬의 원소 값이 임의의 임계값에 수렴할 때까지 반복 조정함으로써 3차원 지형좌표 (ϕ, λ, h) 의 값을 추출할 수 있게 된다.

3. 알고리즘의 적용 및 평가

3.1 3차원 지형좌표의 추출 및 정확도 평가

2장에서 제시한 알고리즘을 이용하여 3차원 지형좌표를 추출하였으며, 추출된 3차원 지형좌표의 정확도를 검증하기 위하여 GPS 측량과 삼각측량을 통하여 총 12점의 검사점을 취득하였다. GPS 측량시의 사용장비는 Trimble 사의 4800 시리즈 모델이며, 1시간 이상의 정지 측량을 실시하였다. 상대측위방식을 이용하였으며, 반송파를 이용한 측위를 실시하였다. 다음의 <표 2>는 GPS 측량과 삼각측량을 통하여 획득한 검사점의 3차원 지형좌표이다.

표 2 검사점의 좌표(WGS84 경위도좌표계)

번호	ϕ	λ	$h(m)$
1	37도31분03.96723초	127도05분10.77296초	36.804
2	37도31분05.02695초	127도05분10.63802초	37.683
3	37도31분05.16130초	127도05분12.80288초	35.975
4	37도31분04.10909초	127도05분12.92584초	37.360
5	37도31분03.26052초	127도05분07.53028초	34.381
6	37도31분04.31666초	127도05분07.41002초	34.841
7	37도30분54.90677초	127도05분23.16001초	51.565
8	37도30분53.93981초	127도05분18.82358초	54.416
9	37도30분50.09336초	127도05분16.57182초	49.977
10	37도30분51.95914초	127도05분18.34125초	50.010
11	37도30분51.91517초	127도05분19.34490초	52.036
12	37도30분26.02947초	127도05분01.80163초	56.123

다음의 <표 3>은 본 연구를 통하여 영상으로부터 추출된 3차원 지형좌표의 정확도를 검사점을 사용하여 평가한 표이다.

표 3 3차원 지형좌표 추출결과 및 오차

번호	ϕ	λ	$h(m)$	$\Delta\phi(\text{초})$	$\Delta\lambda(\text{초})$	$\Delta h(m)$
1	37도31분04.06992초	127도05분10.88749초	37.582	0.10269	0.11453	0.778
2	37도31분05.02835초	127도05분10.75157초	39.421	0.00140	0.11355	1.738
3	37도31분05.20017초	127도05분12.64878초	36.288	0.03887	-0.15410	0.313
4	37도31분04.24789초	127도05분12.82876초	37.030	0.13880	-0.09708	-0.330
5	37도31분03.42003초	127도05분07.55010초	36.976	0.15951	0.01982	2.595
6	37도31분04.40150초	127도05분07.44810초	36.977	0.08484	0.03808	2.136
7	37도30분54.93135초	127도05분23.30499초	54.500	0.02458	0.14499	2.935
8	37도30분54.47136초	127도05분18.60198초	56.188	0.53155	-0.22160	1.772
9	37도30분49.89672초	127도05분16.33706초	54.776	-0.19664	-0.23476	4.799
10	37도30분51.61279초	127도05분17.97206초	50.969	-0.34635	-0.36918	0.960
11	37도30분51.68875초	127도05분19.11980초	56.195	-0.22642	-0.22510	4.159
12	37도30분26.12492초	127도05분01.75016초	57.848	0.09545	-0.05147	1.725
			MAX.	0.53155	-0.36918	4.799
			MIN.	0.00140	0.01982	0.313
			MEAN	0.03402	-0.07686	1.965
			RMSE	0.21720	0.17698	2.434

본 연구에서 구축한 알고리즘을 통하여 추출한 3차원 지형좌표의 정확도평가 결과 위도에 대한 RMSE는 0.21720초이고 평균값은 0.03402초의 결과를 도출할 수 있었다. 경도에 대한 RMSE는 0.17698초이며, 평균값은 -0.07686초의 결과를 보였다. 그리고, 고도에 대한 RMSE는 2.434m이며, 평균값은 1.965m의 결과를 도출할 수 있었다.

3.2 본 연구의 알고리즘을 이용한 시스템의 구현

본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 다음 <그림 1>과 같은 시스템을 구현하였다. 본 시스템은 고해상도 위성영상의 RPC 모델을 이용하여 3차원 지형좌표를 추출하는 시스템이다. 사용자가 영상들의 매칭점을 결정하면 본 연구에서 구현한 알고리즘에 따라 3차원 지형좌표가 추출된다. 이 시스템을 이용하여 사용자는 손쉽게 고해상도 위성영상과 RPC 모델로부터 지형의 3차원 좌표를 추출할 수 있을 것이며 이는 고해상도 위성영상의 활용도를 더욱 증대시킬 것이라 사료된다.

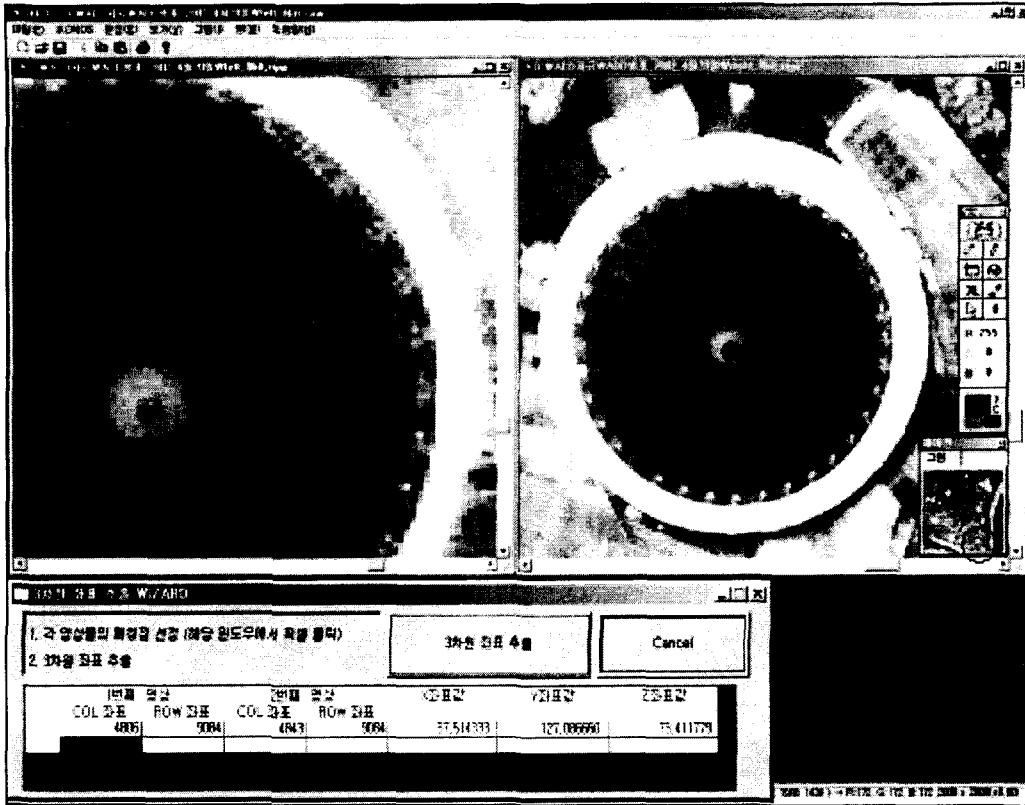


그림 1 고해상도 위성영상의 RPC 모델을 이용한 3차원 지형좌표 추출 프로그램

4. 결론

본 연구는 최초의 상업용 고해상도 위성영상인 IKONOS 위성영상을 사용하여 3차원 지형데이터를 구축하는 알고리즘의 구현에 목적을 둔다. 이를 위하여 IKONOS 위성영상의 입체쌍과 RPC 모델로부터 3차원 지형좌표를 추출하는 알고리즘을 구축하였다. 구축된 알고리즘을 적용하여 IKONOS 위성영상의 입체쌍과 RPC 모델을 이용하여 3차원 지형좌표를 추출한 결과 RMSE는 각각 위도 0.2172초, 경도 0.1770초, 고도 2.434m의 결과를 얻을 수 있었으며, 오차의 평균값은 각각 위도 0.0340초, 경도 -0.0769초, 고도 1.965m의 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대 자동제어특화센터의 연구비 지원에 의한 결과입니다.

참고문헌

- 1) Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, 2000, "ELEMENTS OF PHOTOGRAMMETRY With Applications in GIS 3rd edition", McGraw-Hill Companies, Inc.
- 2) Kaichang Di & Ruijin Ma & Ron Li, 2001, "Deriving 3-D Shorelines from High Resolution IKONOS Satellite Images with Rational Functions", ASPRS Annual Conference
- 3) Jacek Grodecki, 2001, "IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach", ASPRS 2001 Conference Proceeding, ASPRS, United State of America.