

고해상도 위성영상 GeoEye-1과 WorldView-2의 RPC 블록조정모델 정확도 분석

Accuracy Investigation of RPC-based Block Adjustment Using High Resolution Satellite Images GeoEye-1 and WorldView-2

최선용¹⁾ · 강준묵²⁾

Choi, Sunyong · Kang, Junmook

Abstract

We investigated the accuracy in three dimensional geo-positioning derived by four high resolution satellite images acquired by two different sensors using the vendor-provided rational polynomial coefficients(RPC) based block adjustment in this research. We used two in-track stereo pairs of GeoEye-1 and WorldView-2 satellite and DGPS surveying data. In this experiment, we analyzed accuracies of RPC block adjustment models of two kinds of homogeneous stereo pairs, four kinds of heterogeneous stereo pairs, three 3 triplet image pairs, and one quadruplet image pair separately. The result shows that the accuracies of the models are nearly same. The accuracy without any GCPs reaches about CEP(90) 2.3m and LEP(90) 2.5m and the accuracy with single GCP is about CEP(90) 0.3m and LEP(90) 0.5m.

Keywords : RPC, Block Adjustment, GeoEye-1, WorldView-2, Accuracy

초 록

본 논문에서는 서로 다른 두 종류의 위성센서로부터 획득한 네 개의 고해상도 위성영상에 대해 영상과 함께 제공되는 RPC 기반의 블록조정 모델을 구성하고 3차원 위치결정 정확도를 분석하였다. 실험자료로는 In-track 입체 영상 획득방법으로 촬영된 두 개의 GeoEye-1 및 WorldView-2 입체 영상쌍과 DGPS 측량성적을 활용하였다. RPC 블록조정 모델 알고리즘을 이용하여 동종(同種) 영상으로 구성한 두 개의 입체영상 모델 및 이종(異種) 영상으로 구성한 네 개의 입체영상 모델과 세 개의 삼중영상 모델 및 하나의 사중영상 모델의 정확도를 분석하였다. 각 모델의 정확도는 유사하게 나타났으며, 지상기준점을 사용하지 않을 경우 CEP(90) 2.3m, LEP(90) 2.5m, 하나의 지상 기준점을 사용하였을 경우 CEP(90) 0.3m, LEP(90) 0.5m를 나타냈다.

핵심어 : RPC, 블록조정, GeoEye-1, WorldView-2, 정확도

1. 서 론

1994년 미국정부에서 “open sky” 정책으로 고해상도 위성영상의 해상도 규제를 완화함에 따라 첩보위성기술을 민간용으로 이전한 상업용 지구관측 위성사업을 허가하고 군사적 목적으로 사용되던 지상 관측용 고해상도 인공 위성영상이 상용화되기 시작하였다(전형섭, 2003). 인공 위성 영상의 상용화 이후, 입체 위성영상은 현지측량을 하지

않고도 공간 전방교회법을 이용하여 3차원 위치측정이 가능하기 때문에 지형정보 생성 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 특히 인공위성은 지구의 어떠한 지역이라도 제약 없이 영상을 촬영할 수 있으므로, 접근이 불가능하여 현지측량을 할 수 없는 지역의 지형자료 제작을 위한 유용한 자료로 다양하게 이용되고 있다.

최근 선진국에서는 인공위성 제어기술 및 영상 획득 센서 기술의 비약적인 발전으로 정밀 위치측정에 적합한 in-

1) 정희원 · 국방과학연구소 책임연구원(E-mail:sychoi@add.re.kr)

2) 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail:jmkang@cnu.ac.kr)

track(동일궤도) 입체 영상을 판매하고 있으며, 센서 위치 및 자세정보가 필요한 엄밀모델과 유사한 수준의 정확도를 제공하는 분수다항식 모델의 RPC(Rational Polynomial Coefficient) 계수를 영상과 함께 제공하고 있다. 분수다항식 모델은 엄밀모델로부터 유도되므로 엄밀모델이 가지고 있는 오차가 전파되어 편의(bias) 형태의 오차 특성을 갖는다. 1999년 발사된 IKONOS 위성의 위성영상이 분수다항식 모델을 위한 RPC 계수를 제공하면서 분수다항식 모델과 관련된 다양한 연구가 수행되었다. Fraser(2003)는 IKONOS 영상을 대상으로 이러한 편의를 제거하기 위해 다항식을 이용하여 RPC 계수를 보정하는 방법을 연구하였으며, Grodecki(2003)은 다수의 IKONOS 영상을 이용한 블록조정 방법에 대해 연구하였다. 국내에서는 이재빈 등(2003)이 기준점 정보를 이용한 RPC 모델 보정 알고리즘을 제시하였으며, 이효성 등(2004)은 IKONOS 영상의 RPC를 수정보완하여 3차원 위치결정에 활용하였다. 이진덕(2009)은 IKONOS 영상을 이용하여 분수다항식 모델을 개선하기 위해 RPC 계수를 보정하는 연구를 수행하였으며, 이수암 등(2011)은 다중 KOMPSAT-2 영상을 이용하여 두 장의 영상과 다중 영상에 대해 분수다항식 센서모델을 수립하여 3차원 위치정확도를 비교분석하였다. 김광은(2005)는 편미분 방법을 이용하는 기존의 방법과는 달리 Downhill Simplex 방법으로 스테레오 영상에서 3차원 좌표를 추출하는 연구를 수행하였다.

RPC가 제공되는 고해상도 위성영상의 블록조정 모델이 Grodecki(2003)에 의해 처음으로 제안되어 IKONOS 위성영상을 이용하여 그 실용성이 확인된 이후, 동일 센서로 촬영된 동종 영상 또는 서로 다른 센서로 촬영된 이종 영상에 대한 블록조정 모델을 이용한 연구결과가 다수 발표되었다. Dial(2004)은 IKONOS 영상을 이용하여 물리적 모델과 RPC 모델의 정확도를 비교하였으며, Niu(2004)는 IKONOS 영상과 QuickBird 영상의 동종 및 이종 입체영상 모델을 이용하여 각 입체영상의 Convergent Angle에 따른 정확도를 비교하여 동종 입체영상 모델의 정확도가 우수함을 확인하였으며, Fraser(2005)의 연구에서는 IKONOS 및 QuickBird 영상 각각에 대한 RPC 블록모델에서 어핀 조정과 이동(shift) 조정에 대해 정확도 차이가 거의 없음을 보였고, Fraser(2006)는 다중영상 RPC 블록모델에서 기준점의 정확도와 모델링 정확도와와의 관계를 연구하여 GCP의 오차가 화소 크기에 비해 작을 경우, 영상좌표 측정 정확도를 향상시켜 모델의 정확도를 개선할 수 있으며, GCP 오차가 클 경우 다중영상 모델의 접합점을 활용하여 모델 정확도

를 개선할 수 있음을 보였다. Li(2007)는 IKONOS 영상과 QuickBird 영상의 다양한 입체영상 모델의 기하학적 특성과 정확도의 비교분석을 통해 IKONOS와 QuickBird 영상의 이종 입체영상 모델도 영상촬영 기하 조건에 따라 동종영상 모델 보다 정확도가 좋을 수 있음을 보였다. Zhu(2008)은 IKONOS와 QuickBird 영상의 동종 또는 이종모델에 대해 Bisector Elevation Angle, Convergence Angle, B/H ratio와 같은 다양한 영상촬영기하에 따른 정확도를 비교분석하였으며, Li(2008)는 지구 곡률이 고려되어야 하는 고고도 위성의 B/H ratio를 계산하는 방법을 제안하였다.

2008년부터 운용되기 시작한 약 0.5m 해상도를 갖는 고해상도 위성영상인 GeoEye-1 입체영상은 GCP 없이 CEP(90) 4m와 LEP(90) 6m 이상의 정확도를 갖는다고 발표(GeoEye, 2012)하고 있어 3차원 위치결정에 그 활용성이 기대되고 있다. GeoEye-1 영상을 이용한 연구는 Wang(2011)이 기선대 고도비(B/H 비율)가 0.62인 GeoEye-1 입체영상쌍을 이용하여 5종류의 센서모델을 수립하고 모든 모델에서 수평, 수직 방향 각각에 대해 RMSE 0.5m를 확인하였다. 2009년 영상공급 서비스를 시작한 WorldView-2 위성은 GeoEye-1 영상과 유사한 약 0.5~0.6m 해상도 영상을 제공하고 있으며, NGIA(2012)에서는 다양한 실험결과를 이용하여 1B 스테레오 영상의 정확도가 CEP(90) 3.1m와 LEP(90) 4.5m라고 보고하고 있다. 그러나 GeoEye-1 영상과 WorldView-2 영상을 이용한 이종 입체영상 모델 또는 이종 다중영상 모델의 정확도 분석에 대한 연구결과는 아직 발표되고 있지 않다.

본 연구에서는 in-track 방법으로 촬영한 GeoEye-1 및 WorldView-2 위성의 입체영상쌍에 대해 블록모델링 기법을 적용하여 지상기준점을 사용할 경우와 사용하지 않을 경우의 정확도를 분석하였으며, 다양한 조합의 이종 입체영상 모델의 정확도를 분석하고, 삼중 영상모델과 사중 영상모델의 정확도를 분석하여 동종 및 이종 입체영상 모델 정확도와 비교하였다. 본 연구결과를 통해 고해상도 위성 영상을 활용한 비접근 지역의 3차원 위치측정 가능성 및 정확도를 확인하고자 한다.

2. 활용 자료

본 연구에서는 실험 대상 지역인 충남 서해안의 동일지역을 촬영한 GeoEye-1 위성의 in-track 입체영상 및 WorldView-2 위성의 in-track 입체영상과 센서 모델링 정확도 확인을 위해 정적(static) DGPS(Differential Global Positioning System) 측량으로 획득한 지상기준점을 사용하였다.

표 1. 위성영상 특징

영상	센서	제품종류	스캔방향	밴드	해상도	촬영시각
GE01	GeoEye-1	GeoStereo	Reverse	P	0.5m	2010.4.25 02:30 GMT
GE02	GeoEye-1		Reverse	P	0.5m	2010.4.25 02:31 GMT
WV01	WorldView-2	Stereo 1B	Reverse	P	0.65m	2010.4.23 02:28 GMT
WV02	WorldView-2		Forward	P	0.51m	2010.4.23 02:27 GMT

2.1 위성영상

본 연구에 사용한 위성영상의 특징은 표 1과 같다.

영상과 함께 제공되는 분수다항식 모델의 편의를 확인하기 위해, RPC 계수와 지상기준점을 이용하여 분수다항식 모델로 계산한 영상좌표와 지상기준점을 관측한 영상좌표를 직접 비교하였으며, 결과는 그림 1 및 표 2와 같다. 편의의 양은 영상 및 화소 방향에 따라 적게는 0.3 화소에서 크게는 3.8 화소까지 차이가 있으나, 일정한 방향으로 편의되어 있는 것을 확인할 수 있다.

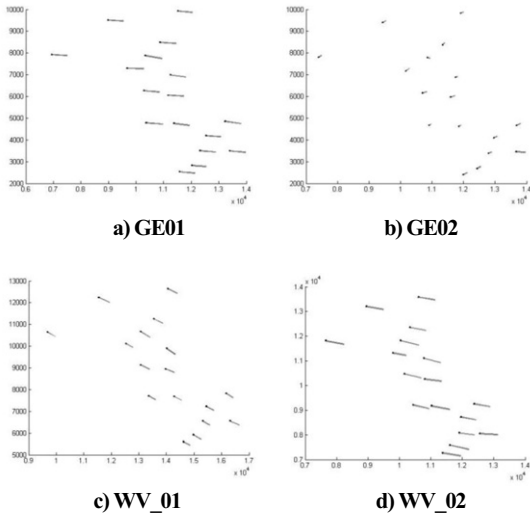


그림 1. 영상별 화소 편의의 벡터

표 2. 영상별 화소 편의

Images	RMSE		MEAN		S.D.	
	Line	Sample	Line	Sample	Line	Sample
GE01	3.846	0.440	3.842	-0.398	0.188	0.194
GE02	0.861	0.535	0.781	0.450	0.373	0.297
WV01	2.049	1.360	2.029	-1.345	0.300	0.206
WV02	3.625	0.873	3.612	-0.840	0.312	0.245

2.2 지상기준점

지상기준점 측량은 대상지역을 촬영하기 전에 수행하였다. 정적(static) DGPS 방법으로 측량하였으며 해당지역에 약 1m 크기로 마크를 표시하여 영상에서 식별할 수 있도록 하였다. 그림 2는 지상기준점의 표식과 영상에서 식별되는 모습을 보여준다. 영상좌표 측정은 ERDAS IMAGINE 소프트웨어를 이용하였으며, 기준점 식별을 용이하게 하기 위해 양선형 보간법(Bilinear interpolation)으로 보정하고 영상 히스토그램을 조정하였다.

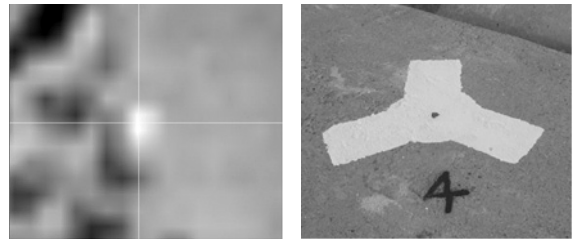


그림 2. 지상기준점 배치

실험에 사용한 지상기준점 표식은 항공사진측량을 위한 용도의 표식으로 0.5m 해상도의 위성영상에서 식별이 용이하지 않았다. 본 연구에서 사용한 지상기준점은 위성영상에서 식별이 용이한 17개의 기준점만을 선택하였으며 사용한 기준점의 배치는 그림 3과 같다.

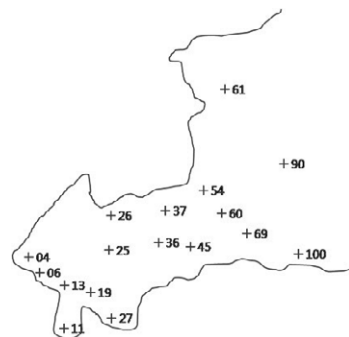


그림 3. 지상기준점 배치

3. 블록조정 모델 수립

본 연구에서 사용한 RPC 모델은 다중영상의 모형을 구성할 수 있는 블록조정 모델이며 기본적으로 Grodecki(2003)이 제안한 방법을 활용하였으며, 본 연구의 실험자료에 적합하도록 초기값 및 경중률 값을 조정하였다. RPC 모델은 지상좌표(φ, λ, h)와 영상좌표(Line, Sample)의 관계를 설명하는 분수다항식 모델로써 영상좌표 각각에 대해 분수다항식 형태로 구성되어 있으며, 계산상의 정밀도를 높이기 위해 다음과 같이 지상좌표 및 영상좌표를 (-1, 1)사이의 값으로 정규화 한다.

$$P = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_s} \quad (1)$$

$$L = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_s} \quad (2)$$

$$h = \frac{h - h_0}{h_s} \quad (3)$$

여기에서 φ_0 : 위도의 offset, φ_s : 위도의 scale
 λ_0 : 경도의 offset, λ_s : 경도의 scale
 h_0 : 높이의 offset, h_s : 높이의 scale

정규화된 영상좌표를 라인과 샘플방향에 대해 각각 Y, X라고 하면 다음과 같은 분수다항식으로 표현할 수 있다. 라인방향에 대해 Y는

$$Y = g(\varphi, \lambda, h) = \frac{\text{Num}_L(P,L,H)}{\text{Den}_L(P,L,H)} = \frac{c'u}{d'u} \quad (4)$$

여기에서

$$u = (1 \ L \ P \ H \ L \ P \ L \ H \ P \ H \ L^2 \ P^2 \ H^2 \ P \ L \ H \ L^3 \ L \ P^2 \ L \ H^2 \ L^2 \ P \ P^3 \ P \ H^2 \ L^2 \ H \ P^2 \ H \ H^3)'$$

$$c = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{20})'$$

$$d = (d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{20})'$$

비슷하게 샘플방향에 대해 X는

$$X = h(\varphi, \lambda, h) = \frac{\text{Num}_S(P,L,H)}{\text{Den}_S(P,L,H)} = \frac{e'u}{f'u}$$

$$u = (1 \ L \ P \ H \ L \ P \ L \ H \ P \ H \ L^2 \ P^2 \ H^2 \ P \ L \ H \ L^3 \ L \ P^2 \ L \ H^2 \ L^2 \ P \ P^3 \ P \ H^2 \ L^2 \ H \ P^2 \ H \ H^3)'$$

$$e = (e_1 \ e_2 \ \dots \ e_{20})'$$

$$f = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{20})'$$

이다. 따라서 정규화된 Y, X로부터 영상좌표를 계산하는 것은 식(6)과 식(7)을 이용할 수 있다.

$$\text{Line} = Y \cdot \text{Line}_s + \text{Line}_o \quad (6)$$

$$\text{Sample} = X \cdot \text{Sample}_s + \text{Sample}_o \quad (7)$$

여기에서

Line_o : 라인 offset, Line_s : 라인 scale

Sample_o : 샘플 offset, Sample_s : 샘플 scale

이다. 식(6)과 식(7)의 좌표 및 관계식을 이용하여 관측방정식을 구성하면 영상 i, 기준점 j에 대해 식(8)과 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_{Lj}^i = -\text{Line}_j^i + a_0^i + a_1^i S_j + a_2^i L_j + \frac{\text{Num}_{Lj}^i(P,L,H)}{\text{Den}_{Lj}^i(P,L,H)} \cdot L_s^i + L_o^i + \varepsilon_{Lj}^i = 0 \quad (8)$$

$$F_{Sj}^i = -\text{Sample}_j^i + b_0^i + b_1^i S_j + b_2^i L_j + \frac{\text{Num}_{Sj}^i(P,L,H)}{\text{Den}_{Sj}^i(P,L,H)} \cdot S_s^i + S_o^i + \varepsilon_{Sj}^i = 0 \quad (9)$$

모델의 정확도를 확인하기 위해 GPS 측량 성과를 갖는 검사점(check point)의 초기 지상좌표를 지상좌표의 offset ($\varphi_0, \lambda_0, h_0$)으로 설정하였다. 지상좌표 검사점에 대한 경중률을 $1.0e+5$ (Grodecki, 2003)로 설정하였으며, 영상좌표의 경중률은 $1.0e-4$, 지상기준점(control point)에 대한 경중률은 $1.0e-5$ 를 사용하였다.

식(8)과 식(9)에 대해 영상 및 기준점의 번호(index)를 제거하여 단순화한 후 테일러 시리즈를 이용하여 1차식으로 선형화하면 식(10)과 식(11)과 같다.

$$F_L = F_{L_o} + \frac{\partial F_L}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial F_L}{\partial a_1} \Delta a_1 + \frac{\partial F_L}{\partial a_2} \Delta a_2 + \frac{\partial F_L}{\partial b_0} \Delta b_0 + \frac{\partial F_L}{\partial b_1} \Delta b_1 + \frac{\partial F_L}{\partial b_2} \Delta b_2 + \frac{\partial F_L}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_L}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial F_L}{\partial h} \Delta h + v_L = 0 \quad (10)$$

$$F_S = F_{S_o} + \frac{\partial F_S}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial F_S}{\partial a_1} \Delta a_1 + \frac{\partial F_S}{\partial a_2} \Delta a_2 + \frac{\partial F_S}{\partial b_0} \Delta b_0 + \frac{\partial F_S}{\partial b_1} \Delta b_1 + \frac{\partial F_S}{\partial b_2} \Delta b_2 + \frac{\partial F_S}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_S}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial F_S}{\partial h} \Delta h + v_S = 0 \quad (11)$$

식(10)과 식(11)을 행렬식으로 표현하면 식(12)와 같다

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L_0} \\ F_{S_0} \end{bmatrix} + [A_A \quad A_G] \begin{bmatrix} dX_A \\ dX_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_L \\ v_S \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서

$$A_G = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_L}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_L}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_L}{\partial h} \\ \frac{\partial F_S}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_S}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_S}{\partial h} \end{bmatrix}, \quad A_G = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_L}{\partial a_0} & \frac{\partial F_L}{\partial a_1} & \frac{\partial F_L}{\partial a_2} & \frac{\partial F_L}{\partial b_0} & \frac{\partial F_L}{\partial b_1} & \frac{\partial F_L}{\partial b_2} \\ \frac{\partial F_S}{\partial a_0} & \frac{\partial F_S}{\partial a_1} & \frac{\partial F_S}{\partial a_2} & \frac{\partial F_S}{\partial b_0} & \frac{\partial F_S}{\partial b_1} & \frac{\partial F_S}{\partial b_2} \end{bmatrix}$$

이다. 식(12)를 이용하여 구성한 관측방정식은 식(13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_A & A_G \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dX_A \\ dX_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_L \\ v_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_P \\ W_A \\ W_G \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A \cdot dX + v = W$$

여기에서 W_P 는 측정된 영상좌표의 관측값과 보정된 값의 차이이며, W_A 는 영상좌표 조정을 위한 관측값과 보정된 값의 차이이고, W_G 는 지상좌표의 관측값과 보정된 값의 차이를 나타낸다. 측정된 영상좌표, 영상좌표 조정 및 지상좌표에 대한 경중률 행렬을 각각 C_P, C_A, C_G 라 하면 각 모수의 보정값은 식(14)와 같이 구할 수 있다. 따라서 모수에 대한 초기값을 설정하고 식(14)를 계산하는 과정을 반복 수행하면 블록조정 모델의 모수를 계산할 수 있다.

$$dX = (A'C^{-1}A)^{-1}A' C^{-1}W \quad (14)$$

여기에서

$$C = \begin{bmatrix} C_P & 0 & 0 \\ 0 & C_A & 0 \\ 0 & 0 & C_G \end{bmatrix}$$

이다.

본 실험에서 RPC 블록조정 모델링 식(8)과 식(9)에서 보

는 바와 같이 영상좌표 보정을 위한 변환 방법으로 affine 변환을 고려하였으나, 실험 결과 이동(shift) 변환과 비교하여 정확도에서 차이가 없었으므로 Fraser(2005)와 같은 결과를 확인하였으며, 본 논문에서는 간단하고 계산을 용이하게 하기 위해 $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0$ 로 설정하여 이동변환만을 고려하였다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 동종 및 이종 입체영상 모델

In-track 방식으로 촬영한 각각 2개의 GeoEye-1과 WorldView-2 영상에 대해 2개의 동종(homogeneous type) 입체영상 모델과 4개의 이종(heterogeneous type) 입체영상 모델에 대해 기준점을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 모델 정확도를 비교하였다. 그림 4와 표 3에서 보는 바와 같이 지상기준점을 사용하지 않은 경우 GeoEye-1의 입체영상 모델은 CEP(90) 1.33m, LEP(90) 2.53m, WorldView-2 입체영상 모델은 CEP(90) 1.60m, LEP(90) 2.39m의 정확도를 나타내었으며, 이종 입체영상 모델의 경우 최대 CEP(90) 2.25m, LEP(90) 2.13m를 확인하였다. 지상기준점을 사용하였을 경우 각 입체영상 모델에 대해 사용한 지상기준점수에 따른 정확도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 각 영상의 분수다항식 모델에서 편이의 크기 및 방향이 거의 일정하여 하나의 기준점만으로도 영상좌표의 편이를 보정할 수 있음을 나타낸다.

지상기준점을 사용하지 않은 경우 이종 입체영상 모델의 정확도가 동종 입체영상 모델의 정확도와 거의 유사하게 나타났으나, "GE02 WV02" 이종 입체영상 모델의 경우 다른 in-track 동종 입체영상 모델에 비해 약 40% 정도 좋은 정확도를 나타냈다. 이종 입체영상 모델이 in-track으로 촬영된 동종 입체영상 모델 보다 정확도가 좋은 원인 분석을

표 3. 동종 및 이종 입체영상 모델의 정확도

입체영상 모델	No GCP(m)		1 GCP(m)		4 GCPs(m)	
	CEP(90)	LEP(90)	CEP(90)	LEP(90)	CEP(90)	LEP(90)
GE01 GE02	1.33	2.53	0.25	0.53	0.25	0.62
GE01 WV01	1.35	2.07	0.24	0.41	0.21	0.38
GE01 WV02	2.25	0.76	0.20	0.38	0.19	0.46
GE02 WV01	1.24	2.13	0.30	0.48	0.26	0.53
GE02 WV02	0.69	1.56	0.39	0.62	0.29	0.51
WV01 WV02	1.60	2.39	0.37	0.57	0.33	0.58

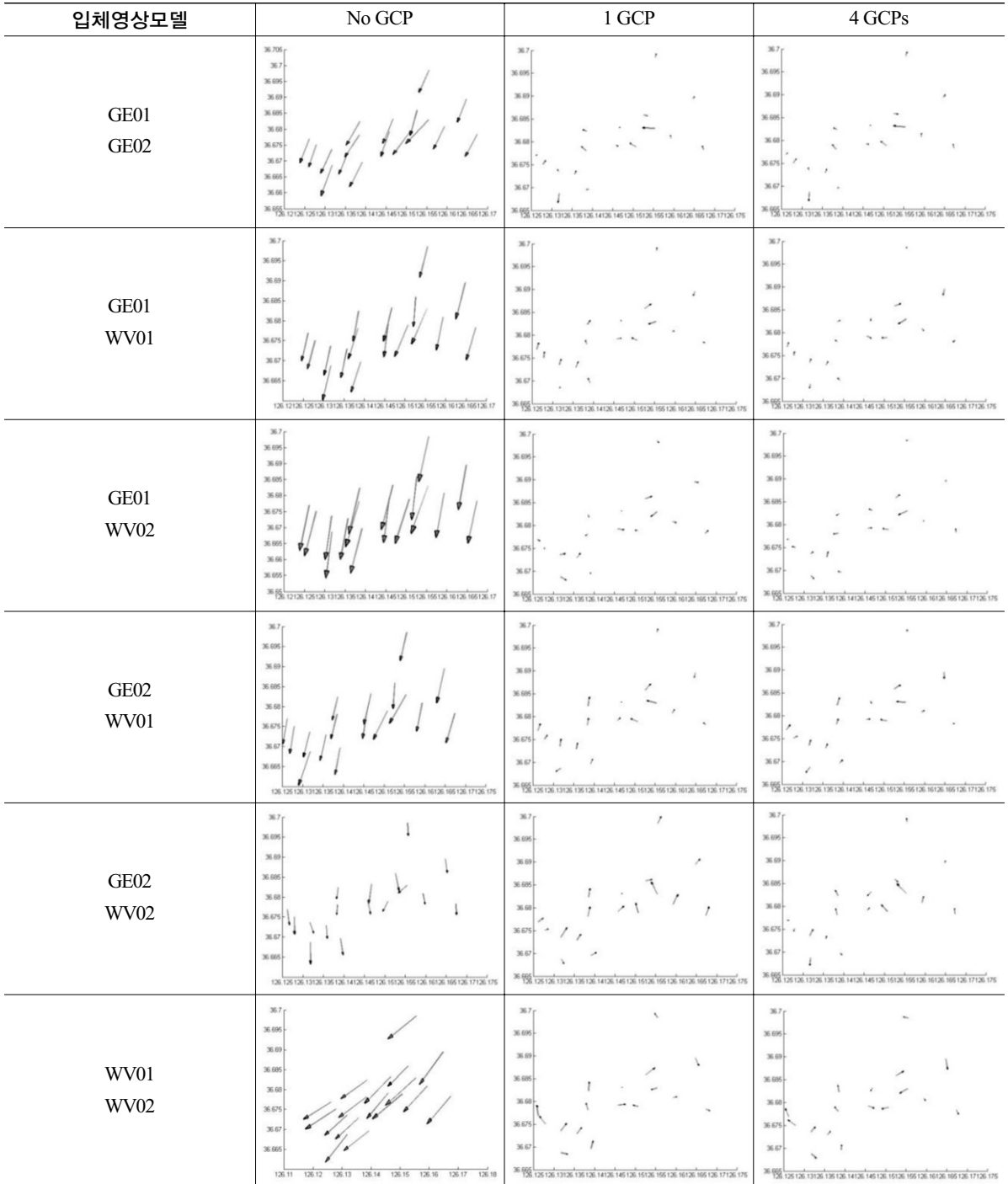


그림 4. 동종 및 이종 입체영상 모델의 오차벡터

위해 Zhu(2008)가 분석한 것과 같이 입체영상의 촬영기하를 확인하였다. 표 4에서 B/H(Base/Height)는 기선대 고도

비, CA는 Convergence Angle, AA는 Asymmetry Angle, BIE는 Bisector Elevation Angle를 의미한다.

표 4. 입체영상 모델의 기하 특성

입체영상 모델	B/H	CA(°)	AA(°)	BIE(°)
GE01 GE02	0.74	39.9	10.7	79.3
GE01 WV01	1.16	59.7	8.6	81.4
GE01 WV02	0.69	33.0	10.1	79.9
GE02 WV01	0.61	28.5	28.7	61.3
GE02 WV02	0.73	34.2	11.7	78.3
WV01 WV02	0.71	34.1	24.5	65.5

위성영상의 촬영기하에 대한 기존의 연구 중 SPOT-5 입체영상의 경우 B/H 비율이 0.61에서 정확도가 좋다는 연구 결과(Büyüksalih, 2005)와 CA는 30°~60°가 이상적이며, AA는 20°보다 작아야 좋다(GEOIMAGE, 2010)는 연구결과로부터, 동종 입체영상 모델들에 비해 정확도가 나쁘지 않은 “GE02 WV01” 모델을 제외하고, 본 연구에서 사용한 입체영상 모델은 대부분 좋은 입체기하를 갖고 있다고 판단된다. 본 연구에 사용한 동종 및 이종의 입체영상 모델이 유사한 영상 촬영기하를 나타내어 다양한 촬영기하에 대한 정확도와와의 관계를 분석할 수는 없었으나, 이종의 입체영상 모델도 동종 입체영상 모델보다 정확도가 좋을 수 있다는 Li(2007)의 연구 결과를 확인할 수 있었다.

4.2 다중 영상모델

그림 5와 표 5는 5개의 다중영상 모델에 대한 오차벡터와 모델정확도를 보여준다. 지상기준점을 사용하였을 경우 입체영상 모델과 같이 기준점 수에 따른 정확도 차이는 거의 없으며, 입체영상 모델의 정확도와도 유사하게 나타났다. 지상기준점을 사용하지 않을 경우 “GE01 GE02 WV01” 모델을 제외하면 표 3의 입체영상 모델에 비해 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 이는 Fraser(2006)가 IKONOS 영상을 이용하여 실험한 동종 영상의 다중영상 모델과 유사한 결과를 보여주는 것으로, 지상기준점을 사

용할 수 없을 경우 다중영상모델을 이용하면 입체영상모델 보다 정확도가 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 실험 결과 종합

In-track 촬영방식으로 촬영한 GeoEye-1 및 WorldView-2 고해상도 입체 위성영상의 다양한 영상 조합에 대한 블록조정 모델을 구성하여 동종/이종 입체영상 모델 및 다중영상 모델과 지상기준점 사용 여부에 따른 정확도 수준을 분석한 실험결과를 다음과 같이 종합하였다.

지상기준점을 사용하지 않는 경우 GeoEye-1 위성의 in-track 입체영상 모델은 CEP(90) 1.33m, LEP(90) 2.53m, WorldView-2 위성의 in-track 입체영상 모델은 CEP(90) 1.60m, LEP(90) 2.39m의 정확도를 나타냈으며, 하나의 지상기준점을 사용할 경우 차례로 CEP(90) 0.25m, LEP(90) 0.53m과 CEP(90) 0.37m, LEP(90) 0.57m 정확도를 나타내었다.

4개의 이종 입체영상 모델에서 지상기준점을 사용하지 않는 경우 평균 CEP(90) 1.38m, LEP(90) 1.63m이며, 하나의 지상기준점을 사용할 경우 평균 CEP(90) 0.28m, LEP(90) 0.47m의 정확도를 나타냈다. 본 실험 결과 그림 6에서 보듯이 이종 입체영상 모델의 정확도가 동종 입체영상 모델의 정확도 보다 좋게 나타났다. 이러한 현상의 원인은 분수다항식을 이용한 입체영상 모델이 영상의 해상도 및 촬영방식과 관계없는 각 영상의 분수다항식 모델의 조합으

표 5. 다중영상 모델의 정확도

다중영상 모델	No GCP(m)		1 GCP(m)		4 GCPs(m)	
	CEP(90)	LEP(90)	CEP(90)	LEP(90)	CEP(90)	LEP(90)
GE01 GE02 WV01	1.29	2.23	0.22	0.39	0.21	0.46
GE01 GE02 WV02	1.61	0.75	0.19	0.36	0.20	0.47
GE01 WV01 WV02	1.85	0.43	0.21	0.35	0.20	0.41
GE02 WV01 WV02	1.22	0.39	0.29	0.41	0.24	0.43
GE01 GE02 WV01 WV02	1.51	0.85	0.20	0.32	0.19	0.42

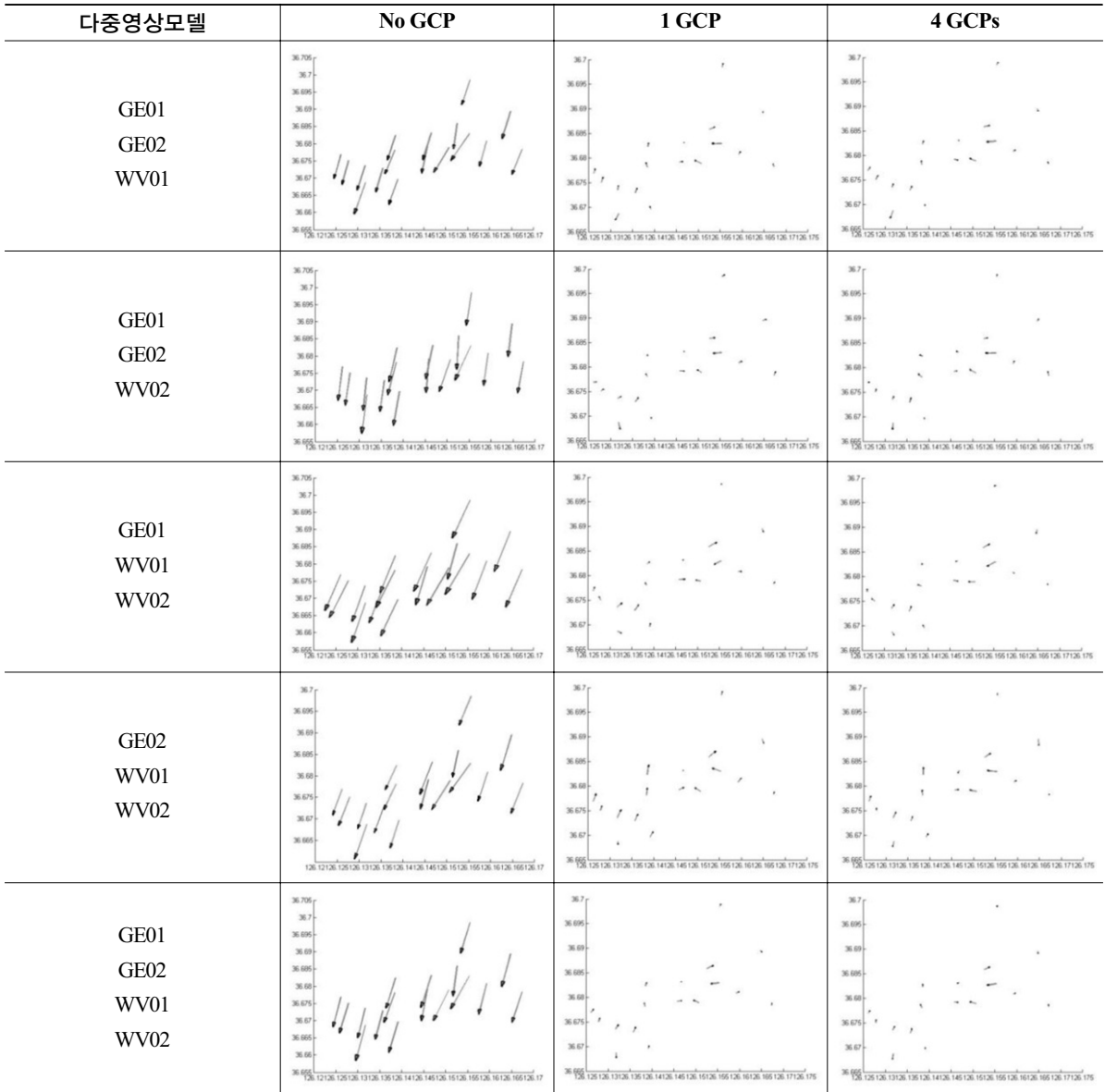


그림 5. 다중영상 모델의 오차벡터

로 구성되므로 물리적 센서 모델과 같은 동종 센서 또는 이중 센서를 구분하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험 결과는 IKONOS와 QuickBird 영상을 이용하여 실험한 이중의 입체영상 모델도 동종 입체영상 모델보다 정확도가 좋을 수 있다는 Li(2007)의 연구와 동일한 결과를 보여준다.

5개의 다중영상모델에서 지상기준점을 사용하지 않는 경우 정확도는 평균 CEP(90) 1.50m LEP(90) 0.93m이며, 하

나의 지상기준점을 사용할 경우 평균 CEP(90) 0.22m, LEP(90) 0.37m의 정확도를 나타내었다. 특히 지상기준점을 사용하지 않는 경우 다른 모델들에 비해 LEP(90)가 작은 것으로 나타났다. GCP가 부정확 할 때 다중영상을 사용함으로써 모델 정확도를 높일 수 있다는 Fraser(2006) 연구와 유사한 결과를 보여준다. 이는 접합점을 이용함으로써 각 영상의 모델 오차를 상쇄 시키는 최소제곱 추정법의 특성이 반영된 것으로 판단된다.

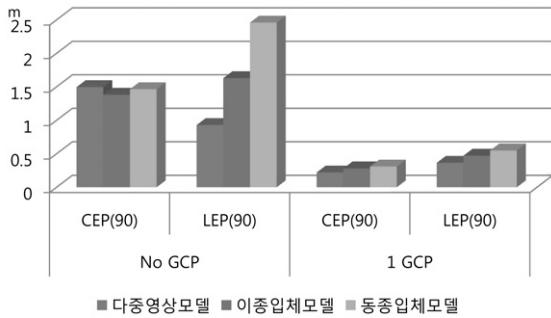


그림 6. 모델별 정확도 평균

5. 결론

본 연구에서는 고해상도 위성영상의 다양한 종류의 블록조정 모델링 방법을 실험하여 비접근 지역에서 확보 가능한 3차원 위치측정 정확도 수준을 분석하고자 하였다. 국내에서는 거의 수행되지 않은 서로 다른 종류의 센서로 촬영된 GeoEye-1 및 WorldView-2 고해상도 입체위성영상의 동종 및 이중 입체영상 모델과 다중영상 모델을 구성하고 지상기준점 사용에 따른 정확도를 분석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 지상기준점을 사용하지 않은 GeoEye-1 및 WorldView-2 고해상도 입체위성영상의 모델링 정확도는 약 CEP(90) 1.5m, LEP(90) 2.5m로 나타났다. 따라서 지상기준점을 사용할 수 없는 비접근 지역에 대해서도 고해상도 입체 위성영상을 활용한다면 이와 유사한 수준의 정확도로 3차원 위치측정이 가능함을 확인하였다.
- DGPS 방식으로 측량한 하나의 지상기준점만을 사용할 경우 고해상도 입체위성영상은 약 CEP(90) 0.4m, LEP(90) 0.6m의 정확도로 모델링 되었다. 비접근 지역에서도 정확한 하나의 기준점을 확보할 수 있다면, 3차원 위치측정 정확도를 획기적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.
- 센서의 물리적 특성과 관계없이 적용할 수 있는 분수다항식 모델을 이용하여 동종 및 이중 입체영상 모델의 정확도를 비교하였다. 동종 및 이중 입체영상 모델의 정확도가 유사하게 나타났으며, 이러한 결과는 이중 입체영상 모델이 in-track 동종 입체영상 모델만큼 정확할 수 있음을 확인한 것으로, 향후 고해상도 위성영상이 보다 다양하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 지상기준점을 사용하지 않을 경우 다중영상 모델을

이용하면 다른 입체영상 모델과 비교해서 정확도가 향상됨을 확인하였다. 비접근 지역과 같이 정확한 지상기준점을 확보할 수 없을 경우에도 다수의 다양한 영상을 활용하면 3차원 위치측정 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

In-track 방식의 입체 영상쌍은 3차원 위치측정에 적합한 영상기하를 갖도록 촬영된다. 본 연구에서 사용한 4개의 이중 입체영상 모델의 기하가 in-track 입체영상 모델의 기하와 유사하였다. 이중 입체영상 모델과 동종 입체영상 모델의 정확도를 분석한 실험결과에서 보듯이 각각의 정확도가 유사한 것은 영상기하가 유사한 것에 기인한다고 예상되나 실험 자료의 부족으로 이에 대한 충분한 분석을 수행하지 못하였다. 3차원 위치측정을 위해 이중 영상 모델을 활용하기 위해서는 촬영기하와 정확도의 관계에 대한 다양한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

김광은 (2005), RPC를 이용한 Stereo 영상으로부터의 3차원 좌표 추출, 대한원격탐사학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 135-143.

김형무, 차득기, 양철수 (2010), GeoEye-1 스테레오페어 위성영상을 이용한 영상응용지적도 수치도화설계, 정보 및 제어 심포지엄 논문집, 대한전기학회, pp. 249-250.

오관영, 정협섭, 이원진, 이동택 (2011), KOMPSAT-2 RPC를 이용한 3차원 위치결정 정확도 분석, 한국측량학회, 제29권 제1호, pp. 1-9.

이수암, 정재훈, 이태운, 김태정 (2011), 다중 KOMPSAT-2 영상으로부터 생성된 DEM 정확도 분석, 대한원격탐사학회지, Vol. 27, No. 1, pp. 51-58.

이재빈, 광태석, 김용일 (2003), IKONOS 영상으로부터 추출되는 3차원 지형자료의 정확도 향상에 관한 연구 - RPC 모델의 위치정확도 보정을 통하여, 한국측량학회, 제 21권 제 4호, pp. 301-308.

이진덕, 소재경 (2009), 고해상도 위성영상의 RF모델 기반 지상위치의 정확도 개선 알고리즘 개발, 한국지리정보학회지 12권 1호, pp. 106-118.

이효성, 신석효, 안기원 (2004), 수치지도를 이용한 IKONOS Geo-level 위성영상의 편의보정, 한국측량학회, 제22권 제4호, pp. 331-338.

전형섭, 정용주, 조기성 (2003), RFM을 이용한 고해상도 위

- 성영상의 기하보정에 관한 연구, 공학연구, 전북대학교 부설 공학연구원, 공학연구 제34집, pp. 147-157.
- Büyüksalih, G., Kocak, G., Topan, H., Oruc, M., and Marangoz, A. (2005), SPOT Revisited : Accuracy Assessment, DEM Generation and Validation from Stereo SPOT 5 HRG Images, *The Photogrammetric Record*, 20 (110), pp. 130-146.
- Cain, J. (1989), *Stereomodel Acquisition Geometry*, Ph.D. thesis, U.C. Berkeley.
- Dial, G., Grodecki, J. (2004), *Satellite Image Block Adjustment Simulations with Physical and RPC Camera Models*, Proceedings of ASPRS 2004 Conference, Denver, May 23-28.
- Fraser, C.S., and Hanley, H.B. (2003), Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1), pp. 53-57.
- Fraser, C.S., and Hanley, H.B. (2005-1), Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.71, No. 8, pp. 909-915.
- Fraser, C.S., Dial, G., Grodecki, J. (2006), Sensor Orientation via RPCs, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60(2006), pp. 182-194.
- GeoEye (2012), *GeoEye-1 Fact Sheet*, http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye-1_Fact_Sheet.pdf (accessed 9 Feb. 2012).
- GEOIMAGE, 2010, "Digital Elevation Models from Satellite Imagery", http://www.geoimage.com.au/geoimage/uploads/Geoimage_DEM_brochure_Oct10_small_lowres.pdf.
- Grodecki, J., and Dial, G. (2003), Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1), pp. 59-68.
- Li, J., Shao, Y., Wang, J., and Yang, J. (2008), The Research and Design of The Base-Height Ratio for the Three Linear Array Camera of Satellite Photogrammetry, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII.Part B1.Beijing, pp. 757-760.
- Li, R., Zhou, F., Niu, X., and Di, K. (2007), Integration of Ikonos and QuickBird Imagery for Geopositioning Accuracy Analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(9), pp. 1067-1074.
- NGIA(National Geospatial-Intelligence Agency)(2012), *Geolocation Accuracy Evaluations of WorldView-1 and WorldView-2*, http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE11/Presentations/WedPM/115_Bresnahan_JACIE_11.05.pdf(accessed 9 Feb. 2012).
- Niu, X., Zhou, F., Di, K., Li, R. (2005), 3D Geopositioning Accuracy Analysis Based on Integration of QuickBird and IKONOS Imagery, Proceedings of the ISPRS Workshop "High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", Hanover, Germany, May 17-20.
- Wang, W., Zhao, L. (2011), Geolocation Accuracy Evaluation of GeoEye-1 Stereo Image Pair, Image and Data Fusion(ISIDF), 2011 International Symposium on, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06024283>(accessed 9 Feb. 2012).
- Zhu, L., Umakawa, H., Guan, F., Tachibana, K., and Shimamura, H. (2008). Accuracy Investigation of Orthoimages Obtained from High Resolution Satellite Stereo Pairs, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII.Part B1.Beijing, pp. 1145-1148.