

近距離 寫眞測量的 攝影方向과 收斂角變化에 따른 三次元 座標決定의 正確度 分析

Accuracy Analysis on 3-D Coordinates According to the Variation
of Photo Direction and of Convergent Angle
in Close-Range Photogrammetry

柳 福 模* · 孫 德 在**
Yeu, Bock Mo · Sohn, Duk Jae

Abstract

For convergent photos, which are now widely adopted for terrestrial facility survey, a number of experimental studies and theoretical studies on the developments of accuracy predictional model according to the convergent angle change have been accomplished. And such studies are basically depend on the symmetrical geometric configuration at the normal direction to the center of the object. However, in may cases of facility survey such as building facades, bridges, dam surfaces, relatively flat topography, etc., the object features are almost like planar, and frequently the surroundings do not allow the photo station at normal direction, and the sufficient convergent angle can be hardly achieved. Considering those points, in this study, the accuracy analysis on three dimensional coordinates according to the variations of photo direction and of convergent angle to the planar object were attempted, and the optimum geometric configurations at the normal, side-looking, and the most side-looking direction were investigated. The result through this study show that from normal direction to the side-looking direction angle $\tau=30^\circ$, the larger the convergent angle, the higher the accuracy, and in case that right photo is at the most side-looking direction, the better accuracy can be achieved according to the convergent angle increase up to 60° .

要 旨

시설물측량 및 변형측량 등의 지상사진측량에서 근래 널리 이용되는 수렴사진의 경우, 최적촬영조건을 규명하기 위하여 수렴각에 따른 정확도 변화에 대한 실험적 연구와 정확도 예측모델에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구는 기본적으로 대상물 정면 중앙 방향에 대하여 좌우 대칭인 위치

*正會員 · 延世大學校 工科大學 教授, 土木工學科

**正會員 · 延世大學校 大學院 博士過程

에서 수렴촬영하는 경우에 대한 것이 대부분이다.

그러나, 지상사진에 의한 건물, 교량, 댐, 평탄한 지면 등과 같은 시설물 측량의 경우 대상물 형태가 평면적이고, 또한 대상물 주위의 제약조건에 의하여 정면에서 촬영하기 곤란하거나, 충분한 수렴각을 확보하기가 곤란한 경우가 있다.

따라서, 본 연구에서는 평면형 대상물에 대하여 촬영거리를 일정하게 유지하면서 촬영방향과 수렴각을 변화시킴에 따른 3차원 좌표결정의 정확도를 분석하여 정면, 측면 및 최측면에서의 최적촬영조건을 도출하고자 하였다.

본 연구의 결과, 평면대상물인 경우 정면에서 촬영방향각 30° 부근까지는 수렴각을 증가시킬수록 높은 정확도를 얻을 수 있으며 한쪽 사진이 최측면 사진인 경우 수렴각을 60°까지 증가시킴에 따라 정확도를 크게 향상시킬 수 있음을 알았다.

1. 序 論

일반적으로 지상사진에서 대상물의 3차원좌표를 엄밀하게 구하기 위한 촬영방법으로는 직교수평촬영(normal case)과 수렴촬영(convergent case)이 주로 이용된다. 직교수평사진인 경우 정확도를 높이기 위해 기선거리비(B/D)를 크게 하려면 모델면적이 줄어들게 되어 일정한 크기의 대상물을 1 모델로 관측하기 위해서는 촬영거리를 멀리 잡게 되고 이에 따른 정확도 저하를 감수해야하는 단점이 있으며, 따라서 촬영시스템의 기하학적인 형태를 구성하기가 쉽지 않다. 이에 비하여 수렴사진은 촬영방향을 설정하기 용이하고 같은 기선거리비에 대하여 최대의 모델피복면적을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 일반적으로 수렴각을 크게 하면 직교수평 사진에 비하여 높은 정확도를 얻을 수 있다^(1~3). 특히 시설물이나 지반의 변형측량, 다중사진에 의한 시설물측량 등과 같이 정밀한 대상물의 좌표해석이 요구되는 경우에는 수렴촬영이 더욱 널리 이용된다^(4~6).

이러한 수렴사진의 경우, 최적 촬영조건을 규명하기 위하여 수렴각의 변화에 따른 정확도에 대한 실험적 연구와 정확도 예측모델 개발에 대한 이론적 연구 등의 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 연구는 기본적으로 대상물 정면중앙방향에 대하여 좌우대칭인 위치에서 수렴촬영하는 경우이며, 대상물의 형태와 대상점 분포형태는 크게 고려하지 않고, 대상물과 촬영점의 위치의 기하학적인 관계와 사진기의 특성을 위주로 분석하는 것이다^(7~10).

그러나, 지상사진에 의한 3차원좌표결정에 있어

서 특히 건물, 문화재, 교량, 도로, 댐, 평탄한 지면 등과 같은 시설물 측량의 경우 대부분 하나, 또는 여러개의 평면이나 원통형, 구면 등의 조합형태, 또는 그로부터의 기복이 있는 경우로 볼 수 있으며, 특히 대상물 주위의 지형지물이나 제약조건에 의하여 대상물 정면에서 촬영하기 곤란하거나, 정면인 경우에도 충분한 수렴각을 확보하기 곤란한 경우가 많다.

따라서, 본 연구에서는 하나의 평면인 경우, 이를 중심으로 하여 촬영거리를 일정하게 유지하면서 촬영방향과 수렴각을 변화시킴으로써 평면좌표(X, Y) 및 3차원 좌표(X, Y, Z)와 그 표준오차(Sx, Sy, Sz, Sp)를 분석하여 대상물에 대한 정면, 측면, 최측면에서의 정확도 변화를 분석하고 이를 바탕으로 각 경우에 있어서 최적 촬영조건을 도출하고자 한다.

2. Bundle 調整法에 의한 座標解析理論

공선조건식(collinearity equation)에 기초한 번들조정법은 각 사진의 외부표정요소($\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$)와 지상기준점좌표(X, Y, Z)의 9개 미지수에 대한 함수의 최확값을 최소제곱법에 의하여 구하는 기법이다.

비선형인 공선조건식을 Taylor전개하여 선형화시킨 번들조정법의 관측방정식은 다음과 같다⁽¹¹⁾.

$$V_{ij} + \dot{B}_{ij} \delta_i, \dot{B}_{ij} \delta_j = f_{ij} \quad (1)$$

여기서 i는 노출점, j는 대상점을 나타내며

$V_{ij} = [V, V, \Gamma]^T$: 상좌표의 잔차벡터

$$\dot{B}_{ij} = \frac{\partial F}{\partial O} \Big|_{0^{\circ}} \bar{X}_{ij}^c$$

: 외부표정요소와 상좌표간의 계수행렬

$$\ddot{\mathbf{B}}_{ij} = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{0^{\circ}, \bar{X}_{ij}}$$

: 상좌표와 지상기준점좌표간의 계수행렬

$$\dot{\delta}_i = [dX_i^{\circ} dY_i^{\circ} dZ_i^{\circ} d\omega d\varphi d\kappa]^T$$

: 외부표정요소의 보정항

$$\delta_j = [dX_j dY_j dZ_j]^T$$

: 지상기준점과 대상점의 좌표보정항

$$f_{ij} = \begin{bmatrix} x'_{ij} - F_x(0^{\circ}, \bar{X}_{ij}) \\ y'_{ij} - F_y(0^{\circ}, \bar{X}_{ij}) \end{bmatrix} : \text{교차벡터}$$

이다. (1)식에 대한 정규방정식은 다음과 같다(12).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} \dot{\mathbf{B}}_{ij} + \dot{\mathbf{W}}_i & \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} \dot{\mathbf{B}}_{ij} \\ \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} \dot{\mathbf{B}}_{ij} & \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} \dot{\mathbf{B}}_{ij} + \dot{\mathbf{W}}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} f_{ij} - \dot{\mathbf{W}}_i f_{ij} \\ \dot{\mathbf{B}}_{ij}^T \mathbf{W}_{ij} f_{ij} - \dot{\mathbf{W}}_i f_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 觀測 및 結果分析

3.1 觀測

근거리 사진측량에서 평면형을 갖는 대상물의 촬영방향과 수렴각 변화에 따른 정확도를 알아보기 위하여 그림 1과 같이 test field를 설치하였다. 대상물을 중심으로하여 촬영거리 $D_p = 2.5\text{m}$ 를 유지하면서 원호상으로 촬영점을 설치하였으며 각 촬영점은 최소의 사진매수로 다수의 수렴사진쌍을 조합할 수 있도록 -45° 방향으로부터 $+85^{\circ}$ 까지 5° 간격으로 설치하였다. 대상물은 촬영위치가 측면으로 돌아간 경우 촬영거리에 대한 초점심도를 고려하여 가능한 최대인 크기의 $110\text{cm} \times 100\text{cm}$ 의 크기로 하였으며, 표정점은 25점을 25cm 간격으로 격자형으로, 그 사이의 8점은 원형으로 배치하여 총 33점을 대칭 되도록 균등하게 분포시켰다.

촬영은 WILD P31 metric camera로 하였으며, 필름은 KODAK PLUS-X B/W를 사용하고, 노출은 f11로 하였다. 촬영점 및 대상물 표정점의 절대좌표는 거리 $D_c = 40\text{m}$, 기선길이 2.0m 에서 $1''$ reading theodolite WILD T-2를 사용하여 기준점 측량을 실시하였다.

대상물 표정점의 절대좌표와 촬영점 외부표정요소의 초기값은 표 1, 표 2와 같다.

절대좌표계의 X축은 대상물과 평행한 기준점측량의 기선방향, Y축은 수직방향, Z축은 기선과 수직인 방향으로 하였다.

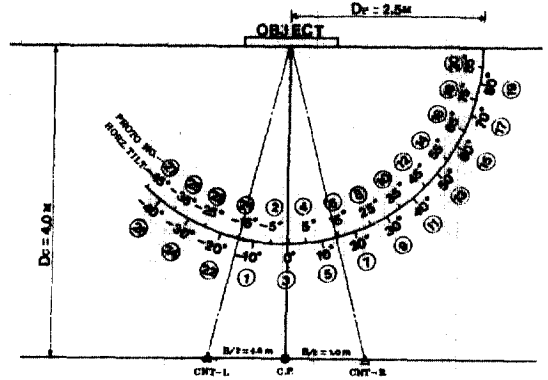


그림 1. 촬영점위치

표 1. 대상물 표정점의 절대좌표

번호	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	47.7135	66.5293	97.9991
2	74.8620	66.5174	97.2519
3	100.0422	66.5965	96.5323
4	125.1836	66.1956	97.0468
5	150.2538	66.6725	97.5580
6	49.7035	41.3760	97.6155
7	74.8378	41.4096	97.6834
8	100.0244	41.4215	97.6531
9	125.1493	41.4542	97.5085
10	150.2689	41.4311	97.3622
11	49.7294	16.3680	97.4706
12	74.7712	16.3527	97.2180
13	99.9741	16.4236	97.5551
14	125.0919	16.4707	98.0944
15	150.2474	16.4343	97.4127
16	49.7018	-8.8795	98.5494
17	74.8168	-8.3096	98.6382
18	99.9194	-8.8012	98.5987
19	125.0973	-8.7204	98.5422
20	150.2592	-8.7266	98.3683
21	49.6440	-33.8129	99.6604
22	74.8336	-33.8881	99.0620
23	99.8966	-33.8895	98.3910
24	125.0410	-33.8472	98.9980
25	149.8721	-34.0365	96.8207
26	87.3456	53.6408	96.7439
27	112.8868	53.5729	96.6026
28	137.9497	29.0496	97.2162
29	138.1793	4.4996	97.6561
30	113.2227	-21.4606	98.1768
31	86.4679	-20.4590	98.2359
32	61.3378	3.8276	97.8020
33	60.9167	27.6625	97.7271

표 2. 각 촬영점의 외부표정요소 초기값

Ph. No.	τ	$\alpha(\text{rad})$	$\varphi(\text{rad})$	$\epsilon(\text{rad})$	$X_0(\text{cm})$	$Y_0(\text{cm})$	$Z_0(\text{cm})$
3127	-45°	0.0000	-0.7854	0.0000	-76.49	4.76	277.43
3126	-40°	0.0000	-0.6981	0.0000	-60.40	4.76	292.12
3125	-35°	0.0000	-0.6109	0.0000	-42.91	4.76	305.34
3124	-30°	0.0000	-0.5236	0.0000	-24.50	4.76	317.09
3123	-25°	0.0000	-0.4363	0.0000	-5.00	4.76	326.91
3122	-20°	0.0000	-0.3491	0.0000	15.10	4.76	335.28
3121	-15°	0.0000	-0.2618	0.0000	36.07	4.76	341.51
3101	-10°	0.0000	-0.1745	0.0000	56.38	4.76	345.99
3102	-5°	0.0000	-0.0873	0.0000	78.07	4.76	348.82
3103	0°	0.0000	0.0000	0.0000	99.87	4.76	349.82
3104	5°	0.0000	0.0873	0.0000	121.71	4.76	348.89
3105	10°	0.0000	0.1745	0.0000	142.38	4.76	346.16
3106	15°	0.0000	0.2618	0.0000	164.18	4.76	341.55
3107	20°	0.0000	0.3491	0.0000	185.00	4.76	334.92
3108	25°	0.0000	0.4363	0.0000	205.20	4.76	326.57
3109	30°	0.0000	0.5236	0.0000	224.66	4.76	316.60
3110	35°	0.0000	0.6109	0.0000	243.08	4.76	304.90
3111	40°	0.0000	0.6981	0.0000	260.35	4.76	291.61
3112	45°	0.0000	0.7854	0.0000	276.46	4.76	276.88
3113	50°	0.0000	0.8727	0.0000	291.52	4.76	260.32
3114	55°	0.0000	0.9599	0.0000	305.02	4.76	242.94
3115	60°	0.0000	1.0472	0.0000	316.69	4.76	224.58
3116	65°	0.0000	1.1345	0.0000	326.93	4.76	204.94
3117	70°	0.0000	1.2217	0.0000	335.36	4.76	184.56
3118	75°	0.0000	1.3090	0.0000	341.86	4.76	163.85
3119	80°	0.0000	1.3963	0.0000	346.59	4.76	142.47
3120	85°	0.0000	1.4835	0.0000	349.46	4.76	120.82

3.2 結果分析

촬영된 사진은 단좌표측정기 KERN MK-2에 의하여 기계좌표를 얻고, Affine 변환식에 의하여 사진좌표로 변환하였으며, 대상물의 3차원좌표 및 그 표준오차는 BUNDLE 조정법에 의하여 구하였다.

그림 2는 촬영방향각(τ)과 수렴각(θ)증가에 따른 X좌표(대상물과 평행한 수평방향)의 표준오차(S_x)의 값을 나타내는 그림이다.

수렴각 $\theta=10^\circ$ 일 경우, 정면($\tau=0^\circ$)에서 최소값 $62.7 \mu\text{m}$, 최측면($\tau=80^\circ$)에서 최대값 $1276.9 \mu\text{m}$ 를 보이며, τ 가 증가함에 따라 S_x 값이 크게 증가함을 알 수 있다. 수렴각 $\theta=20^\circ$ 일 경우는 정면에서 최소값 $65.0 \mu\text{m}$, 최측면($\tau=70^\circ$)에서 최대값 $689.8 \mu\text{m}$, 수렴각 $\theta=30^\circ$ 일 경우 정면에서 최소값 $56.7 \mu\text{m}$, 최측면($\tau=70^\circ$)에서 최대값 $477.2 \mu\text{m}$ 를 보이며, 역시 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다.

수렴각이 증가할수록 증가곡선은 완만해지며 $\tau=30^\circ$ 전후, $\theta=30^\circ-40^\circ$ 를 경계로 하여 증가곡선의 형태가 거의 일치하게 됨을 알 수 있다. 또한 거의

정면에서 최소값, 최측면에서 최대값을 보이는 경향은 변하지 않으나, 최대값의 경우 $\theta=50^\circ-60^\circ$ 를 경계로 그 이상의 수렴각에서는 $200 \mu\text{m}$ 내외로 거의 일정한 값을 보인다.

따라서 X좌표의 경우 정면에서는 수렴각 $\theta=10^\circ$ 에서 $\theta=90^\circ$ 까지 증가함에 따라 S_x 가 큰 변화를 보이지 않으며, 수렴각 θ 를 30° 이상으로 할 경우에는 측면방향 $\tau=30^\circ$ 까지는 거의 일정한 값을 나타낸다. 또한 $\tau=30^\circ$ 이상의 측면으로 갈 경우에는 수렴각 $\theta=60^\circ$ 이상이 되면 오히려 정확도가 떨어질 수도 있음을 보여준다. 한편 최측면방향, 즉 한 사진쌍의 우측사진의 촬영방향 $\tau=85^\circ$ 일 경우에는 수렴각이 $\theta=10^\circ$ 에서 60° 까지 증가함에 따라 1, $276.9 \mu\text{m}$ 로부터 $196.2 \mu\text{m}$ 까지 정확도가 크게 향상되나, 그 이상의 수렴각에서는 정확도는 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

그림 3은 촬영방향각(τ)과 수렴각(θ)증가에 따른 Y좌표(수직방향)의 표준오차(S_y)의 값을 나타내는 그림이다. 그림에서 보듯이 $\tau=30^\circ$ 까지는 수렴각 θ

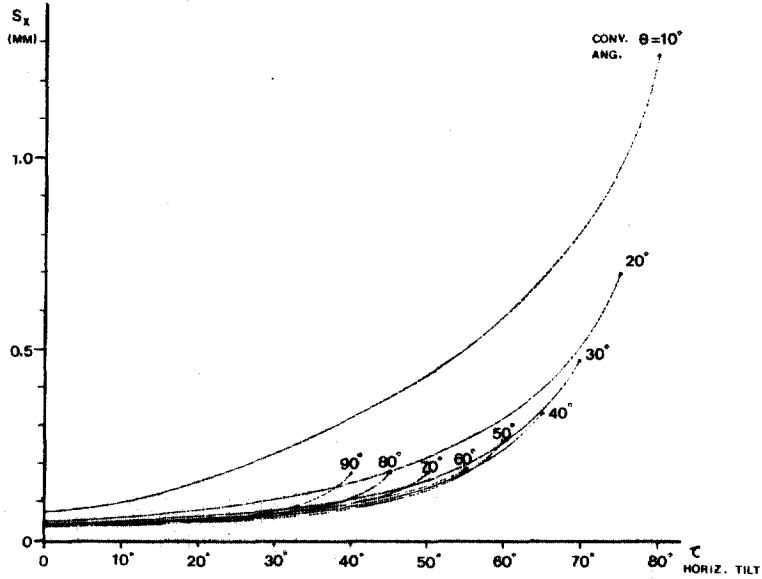


그림 2. 촬영방향(τ)과 수렴각(θ)에 대한 X좌표의 표준오차.

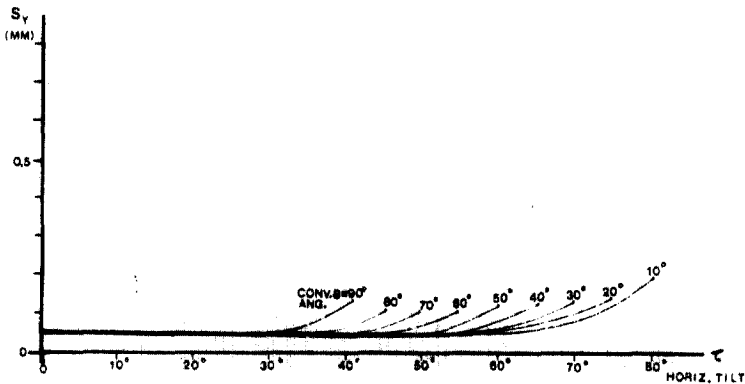


그림 3. 촬영방향(τ)과 수렴각(θ)에 대한 Y좌표의 표준오차.

에 무관하게 $50\mu\text{m}$ 내외의 거의 일정한 값을 보이며, $\theta=10^\circ$ 인 경우 $\tau=60^\circ$ 로부터 완만하게 증가하여 최측면($\tau=80^\circ$)에서 최대값 $192.1\mu\text{m}$ 를 보인다.

또한 수렴각 $\theta=30^\circ$ 부터는 최대값이 $120\mu\text{m}$ 내외의 거의 일정한 값을 나타낸다. 따라서, Y좌표의 경우 정면으로 부터 $\tau=30^\circ$ 측면까지는 수렴각의 크기에 관계없이 일정한 값을 나타내며, $\tau=30^\circ-60^\circ$ 인 측면에서는 수렴각 θ 를 30° 이상으로 할 경우 오히려 정확도가 떨어질 수 있음을 알 수 있다. 또한 우측사진의 촬영방향각 $\tau=85^\circ$ 인 최측면 사진쌍의 경우 $\theta=10^\circ-30^\circ$ 까지는 정확도가 증가하나, 그 이상

의 수렴각 확장은 정확도 향상에 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

그림 4는 촬영방향각(τ)과 수렴각(θ)증가에 따른 Z좌표(촬영축방향)의 표준오차(S_z)의 값을 나타내는 그림이다. 수렴각 $\theta=10^\circ$ 일 때 정면에서 최대값 $655.9\mu\text{m}$, 최측면에서 최소값 $211.7\mu\text{m}$ 을 나타내며 τ 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

수렴각 $\theta=20^\circ$ 일 때 정면에서 최대값 $335\mu\text{m}$, $\tau=50^\circ-60^\circ$ 에서 최소값 $132\mu\text{m}$ 를 보이면서 τ 에 따라 감소하며, 이후 τ 가 증가함에 따라 다시 증가하는 추세를 보인다.

표 3. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=10^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	62.7	57.3	408.7	418.3
5°	116.8	107.3	655.9	677.4
10°	119.4	83.7	570.3	592.2
15°	153.0	70.5	458.5	491.5
20°	156.5	63.6	410.1	447.5
25°	338.8	122.7	684.3	779.2
30°	230.3	73.7	378.8	452.2
35°	352.5	97.4	519.8	639.5
40°	461.9	106.7	535.9	719.6
45°	380.3	77.5	365.8	536.1
50°	457.0	94.8	382.9	607.2
55°	456.8	74.5	311.0	559.8
60°	454.1	85.0	267.4	535.5
65°	578.5	96.6	279.7	651.8
70°	612.3	89.3	224.4	659.8
75°	742.0	122.9	211.9	782.8
80°	1276.9	192.1	246.0	1316.6

표 4. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=20^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	65.0	66.9	312.1	326.0
5°	73.8	72.2	335.0	351.0
10°	83.6	67.3	304.1	323.5
15°	83.5	57.5	252.9	273.7
20°	141.8	80.2	341.3	379.9
25°	136.9	65.1	269.2	310.7
30°	132.4	52.0	211.2	256.0
35°	190.6	65.1	256.7	327.8
40°	123.6	77.4	264.5	356.1
45°	221.4	66.7	221.1	320.9
50°	157.7	42.5	132.0	210.7
55°	217.6	54.3	153.8	272.7
60°	331.3	81.5	193.4	393.1
65°	357.4	80.2	172.3	405.6
70°	462.0	108.7	192.9	513.3
75°	689.8	149.3	212.7	738.2

표 5. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=30^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	56.7	57.2	201.7	217.3
5°	64.5	62.4	219.8	237.6
10°	70.3	63.7	215.0	235.4
15°	78.6	60.4	201.6	225.1
20°	72.9	46.7	154.0	177.1
25°	78.7	44.7	143.3	169.9
30°	107.2	52.6	164.7	203.9
35°	125.0	54.5	159.2	210.2
40°	124.4	52.6	142.1	196.6
45°	169.0	68.0	171.4	250.7
50°	126.7	45.0	105.7	171.4
55°	160.1	53.9	117.6	206.4
60°	190.5	60.8	118.8	233.0
65°	284.1	89.4	151.6	334.9
70°	477.2	139.6	204.8	538.6

표 6. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=40^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	51.8	52.4	163.1	179.0
5°	43.4	41.6	116.7	131.3
10°	72.5	65.9	180.7	205.6
15°	63.6	52.3	140.8	163.3
20°	75.3	56.6	148.0	175.7
25°	69.3	47.1	120.2	146.7
30°	121.4	70.1	173.4	223.2
35°	99.8	56.2	129.8	173.3
40°	122.6	60.7	136.8	193.7
45°	91.6	42.9	89.3	135.1
50°	106.3	47.7	92.3	148.8
55°	137.0	56.9	101.5	180.0
60°	225.1	93.8	151.3	287.4
65°	336.3	127.2	288.0	406.3

표 7. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=50^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	43.6	41.9	97.4	114.6
5°	68.1	64.0	147.8	174.9
10°	50.0	45.0	103.1	123.1
15°	47.9	41.1	91.7	111.4
20°	69.2	55.3	120.9	149.9
25°	76.5	55.5	118.9	151.9
30°	77.5	52.4	107.8	142.7
35°	78.1	49.5	97.5	134.4
40°	59.4	35.2	65.9	95.5
45°	107.3	58.7	105.2	161.4
50°	100.9	52.6	88.7	144.4
55°	153.0	78.0	120.9	210.2
60°	267.0	125.6	184.4	348.3

표 8. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=60^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	65.3	59.4	118.0	147.4
5°	51.3	46.6	92.3	115.4
10°	34.8	30.6	60.6	76.3
15°	70.3	59.4	115.6	147.8
20°	67.1	53.8	102.6	133.9
25°	81.3	62.1	115.0	154.0
30°	86.3	61.6	111.9	154.2
35°	72.0	48.8	85.4	121.9
40°	71.2	46.3	77.0	114.7
45°	107.0	65.3	105.7	164.0
50°	143.0	84.6	128.9	210.4
55°	196.2	110.3	160.8	276.8

수렴각 $\theta=30^\circ$ 일 때, 정면에서 최대값 219.8 μm , $\tau=40^\circ-50^\circ$ 에서 최소값 105.7 μm 를 보이며 감소하다가 이후 점차 증가하여 최측면에서는 204.8 μm 의 값을 나타낸다.

이후 수렴각 θ 가 증가함에 따라 정면에서의 S_z 값은 점차 줄어드는 경향을 보이며, 최소값은 60 μm 내외로 큰 변화를 보이지 않는다. 또한 최측면에서의 S_z 값은 180 μm 내외로 거의 일정한 값을 나타낸다.

전반적으로 볼 때 촬영방향각 $\tau=0^\circ-30^\circ$ 에서는

표 9. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=70^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	54.1	46.5	82.4	109.0
5°	57.1	48.6	85.7	113.9
10°	65.2	55.4	96.9	129.3
15°	55.3	45.8	80.2	107.7
20°	65.8	52.4	88.8	122.3
25°	54.2	41.8	69.5	97.7
30°	69.9	51.7	83.2	120.5
35°	79.1	56.5	88.7	131.6
40°	74.1	50.8	78.0	119.0
45°	129.0	86.5	126.7	200.5
50°	176.5	113.0	164.4	266.4

표 10. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=80^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	62.3	50.2	79.5	112.8
5°	80.1	64.2	103.0	145.5
10°	60.6	48.3	76.9	109.3
15°	65.2	51.6	81.0	116.2
20°	54.8	42.3	65.6	95.5
25°	60.4	45.7	70.0	103.3
30°	86.6	64.3	97.5	145.7
35°	74.9	54.2	79.5	122.1
40°	94.6	66.5	94.6	149.6
45°	171.6	119.6	173.2	271.9

표 11. 촬영방향각(τ)에 따른 표준오차의 변화($\theta=90^\circ$)

τ	S_x	S_y	S_z	S_p
0°	75.5	55.6	81.7	124.4
5°	54.3	40.2	59.1	89.8
10°	75.1	55.2	80.5	123.2
15°	71.7	52.3	75.4	116.6
20°	70.0	51.4	74.3	114.6
25°	85.7	62.6	90.3	139.8
30°	73.9	52.9	75.0	118.3
35°	135.4	96.0	134.5	214.3
40°	173.2	125.0	178.6	279.2

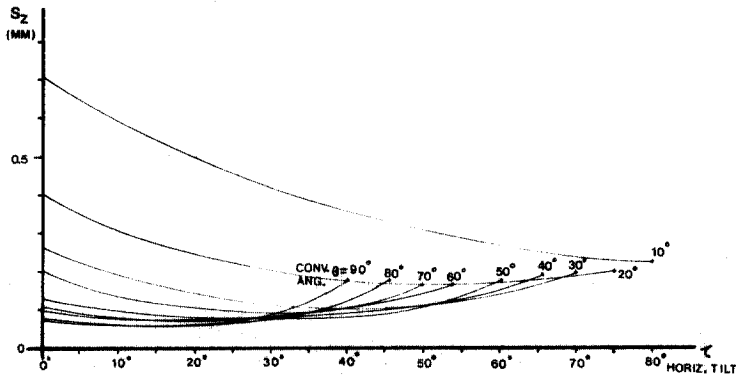


그림 4. 촬영방향(τ)과 수렴각(θ)에 대한 Z좌표의 표준오차.

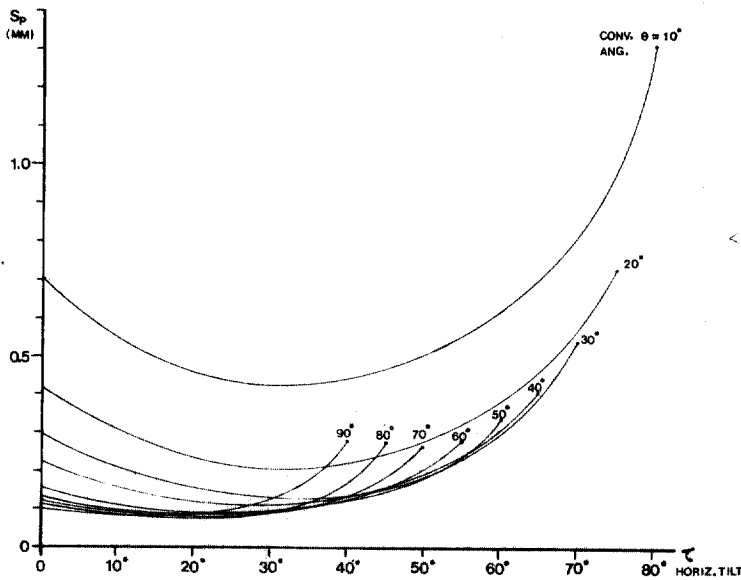


그림 5. 촬영방향(τ)과 수렴각(θ)에 대한 공간위치오차

수렴각 θ 와 촬영방향각 τ 가 증가함에 따라 S_z 값이 감소하는 경향을 보이나, $\tau=30^\circ$ 이상이 되면 촬영 방향이 측면으로 갈수록 S_z 값이 증가하고, 수렴각이 큰 경우 오히려 정확도가 떨어질 수 있음을 나타낸다.

전반적으로 볼 때 촬영방향각 $\tau=0^\circ-30^\circ$ 에서는 수렴각 θ 와 촬영방향각 τ 가 증가함에 따라 S_z 값이 감소하는 경향을 보이나, $\tau=30^\circ$ 이상이 되면 촬영 방향이 측면으로 갈수록 S_z 값이 증가하고, 수렴각이 큰 경우 오히려 정확도가 떨어질 수 있음을 나타낸다.

그림 5는 촬영방향각(τ)과 수렴각(θ) 증가에 따른 위치오차(S_p)의 값을 나타내는 그림이다. 수렴각 $\theta=10^\circ$ 일 때 정면에서 $S_z=677.4 \mu\text{m}$ 로 부터 $\tau=30^\circ-40^\circ$ 에서 최소값 $452.2 \mu\text{m}$ 를 보일 때까지 크게 감소하며, 이후 τ 가 증가함에 따라 크게 증가하여 최측면에서 최대값 $1316.6 \mu\text{m}$ 를 나타낸다. 수렴각 $\theta=20^\circ$ 의 경우 정면에서 $S_z=326.0 \mu\text{m}$ 로 부터 감소하여 $\theta=30^\circ-40^\circ$ 에서 최소값 $256.0 \mu\text{m}$ 을 나타내며, 이후 다시 증가하여 최측면($\tau=75^\circ$)에서 최대값 $738.2 \mu\text{m}$ 를 보인다.

수렴각 $\theta=30^\circ$ 인 경우 정면에서 $237.6 \mu\text{m}$, $\tau=30^\circ-$

40°에서 최소값 169.9 μm , 최측면에서 최대값 538.6 μm 로 같은 경향을 보인다. 이후 수렴각이 증가함에 따라서 전반적으로 S_p 값의 변화가 크지 않은 상태로 동일한 경향을 보이며 최소값을 나타내는 촬영방향각의 위치가 점차 정면쪽으로 이동함을 보인다. 또한 정면에서는 수렴각이 $\theta=10^\circ$ 에서 $30^\circ-40^\circ$ 까지 증가할수록 S_p 가 크게 감소하나 $\theta=50^\circ-60^\circ$ 부터는 S_p 값이 80 μm 내외로 큰 변화를 보이지 않는다.

각 수렴각에 대한 S_p 의 최소값과 최대값을 비교하면 역시 $\theta=10^\circ-30^\circ$ 까지 크게 감소하는 경향을 보이다가 그 이후 완만하게 변화하여 $\theta=50^\circ-60^\circ$ 부터는 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다.

또한, 정면으로 부터 $\tau=30^\circ$ 부근까지는 수렴각이 증가할수록 S_p 값이 감소하나, 그 이상 측면으로 갈수록 오히려 수렴각이 증가하면 S_p 값이 증가하여 정확도가 감소할 수도 있음을 보여준다.

4. 結 論

본 연구를 통하여 대상물 중심에 대한 촬영거리를 일정하게 유지하면서 촬영방향과 수렴각을 변화시킨 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 대상물의 평면좌표(X, Y)의 경우 정면에서 촬영방향각 $\tau=30^\circ-40^\circ$ 까지는 수렴각(θ)이 $10^\circ-30^\circ$ 까지 증가할수록 정확도가 향상되나, 그 이상의 측면인 경우, 수렴각 θ 를 30° 이상으로 하여도 큰 변화를 보이지 않는다.

2) 대상물에 수직한 방향(Z) 좌표의 경우 정면에서 $\tau=30^\circ$ 부근 측면까지는 수렴각을 증가시킬수록 정확도가 향상되며 그 이상 측면으로 돌아간 경우 수렴각을 증가시키기에 따라 정확도가 저하될 수도 있음을 보인다.

3) 3차원좌표(X, Y, Z)를 고루 얻기위해 공간위치오차(S_p)를 분석해 보면 역시 정면에서 $\tau=30^\circ$ 의 측면사이에는 수렴각을 증가시킬수록 정확도를 향상시킬 수 있으며, 한쪽 사진이 최측면 방향인 경

우 수렴각을 60° 까지 증가시키기에 따라 정확도를 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4) 공간위치오차(S_p)를 분석한 결과, 수렴각이 $10^\circ-30^\circ$ 정도로 한정된 경우에는 정면보다는 $\tau=30^\circ-40^\circ$ 의 측면에서 촬영하므로써 정면보다 높은 정확도를 얻을 수 있음을 알았다.

參 考 文 獻

1. Salma, C. C., Ed., *Manual of Photogrammetry*, 4th ed., 1980, pp.785-882.
2. Faig, W. and H. Moniwa, "Convergent Photos for Close-range", *PE*, Vol. 39, No. 6, 1973, pp.605-610.
3. Abdel-Aziz, Y. L., "Expected Accuracy of Convergent Photos", *PE*, Vol. 40, No. 11, 1974, pp.1341-1346.
4. Fraser, C. S. and L. Gruendig, "Microwave Antennas Measurement," *PE & RS*, Vol. 52, No. 10, 1986, pp. 1627-1635.
5. Fraser, C. S., "Limiting Error Propagation in Network Design", *PE & RS*, Vol. 53, No. 5, 1987, pp.487-493.
6. Tolegard, A. K. L., "State-of-the-Art of Close-Range Photogrammetry", *PE & RS*, Vol. 42, No. 1. 1976, pp. 71-80.
7. Karara, H. M. and Y. I. Abdel-Aziz, "Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries", *PE*, Vol. 40, No. 9, 1974, pp.1107-1117.
8. Hottier, P. H., "Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions : Practical Experiments and Prediction", *PE & RS*, Vol. 42, No. 3, 1976, pp.345-375.
9. Marzan, G.T., *Rational Design for Close-Range Photogrammetry*, Ph. D. Dissertation, Univ. of Illinois, Urbanana, 1976.
10. Kenefick, J. F., "Ultra-Precise Analytics", *PE*, Vol. 37, No. 11, 1971, pp.1167-1187.
11. Karara, H. M., *Non-Topographic Photogrammetry*, 2nd ed., ASP, 1989, pp.37-57.
12. Mikhail, E. M., *Observations and Least Squares*, Harper and Row, New York, 1976.

(接受 : 1989. 10. 12)