

VLBI 안테나와 모바일폰 카메라를 활용한 근접수치사진측량의 캘리브레이션 초기값 결정에 따른 3차원 정확도 분석

Analysis of 3D Accuracy According to Determination of Calibration Initial Value in Close-Range Digital Photogrammetry Using VLBI Antenna and Mobile Phone Camera

김혁길¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 조재명³⁾

Kim, Hyuk Gil · Yun, Hong Sik · Cho, Jae Myoung

Abstract

This study had been aimed to conduct the camera calibration on VLBI antenna in the Space Geodetic Observation Center of Sejong City with a low-cost digital camera, which embedded in a mobile phone to determine the three-dimension position coordinates of the VLBI antenna, based on stereo images. The initial values for the camera calibration have been obtained by utilizing the Direct Linear Transformation algorithm and the commercial digital photogrammetry system, PhotoModeler Scanner[®] ver. 6.0, respectively. The accuracy of camera calibration results was compared with that the camera calibration results, acquired by a bundle adjustment with nonlinear collinearity condition equation. Although two methods showed significant differences in the initial value, the final calibration demonstrated the consistent results whichever methods had been performed for obtaining the initial value. Furthermore, those three-dimensional coordinates of feature points of the VLBI antenna were respectively calculated using the camera calibration by the two methods to be compared with the reference coordinates obtained from a total station. In fact, both methods have resulted out a same standard deviation of $X=0.004\pm 0.010\text{m}$, $Y=0.001\pm 0.015\text{m}$, $Z=0.009\pm 0.017\text{m}$, that of showing a high degree of accuracy in centimeters. From the result, we can conclude that a mobile phone camera opens up the way for a variety of image processing studies, such as 3D reconstruction from images captured.

Keywords : VLBI, Close-Range Digital Photogrammetry, Camera Calibration, Mobile Phone

초 록

본 논문에서는 세종시 우주측지관측센터에 위치한 VLBI 안테나를 대상으로 모바일폰 카메라의 캘리브레이션을 수행하고, 촬영된 스테레오 영상으로부터 3차원 위치좌표를 산출하였다. 모바일폰에 탑재된 카메라의 캘리브레이션을 위한 초기값으로 DLT방법과 상용 수치사진측량시스템인 PhotoModeler Scanner[®] ver. 6.0을 활용하였다. DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 표정결과를 초기값으로 사용하여 광속조정을 통해 카메라 내·외부 표정요소를 계산하고, 두 결과의 정확도를 비교하였다. 두 가지 방법으로 산출한 표정결과는 상당한 편차가 발생하지만, 비선형의 공선조건식을 이용한 광속조정계산으로 두 가지 방법의 최종 표정결과가 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한, 두 가지 방법으로 결정된 카메라 내·외부 표정요소들을 이용하여 VLBI 안테나 특징점에 대한 3차원 좌표를 계산하고 토달스테이션을 통해 측정된 기준좌표들과 비교하였다. 그 결과, 두 가지 방법 모두 표준편차가 $X=0.004\pm 0.010\text{m}$, $Y=0.001\pm 0.015\text{m}$, $Z=0.009\pm 0.017\text{m}$ 로서, cm급의 높은 정확도를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 정밀 사진측량의 목적이 아닌 허용오차의 범위가 상대적으로 큰 다양한 사진측량 분야에 모바일폰 카메라를 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

핵심어 : VLBI, 근접수치사진측량, 카메라 캘리브레이션, 모바일폰

Received 2015. 01. 20, Revised 2015. 02. 12, Accepted 2015. 02. 27

1) Member, Dept. of Civil & Environmental Eng., Sungkyunkwan University(E-mail:soulhyug@skku.edu)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil & Environmental Eng., Sungkyunkwan University (E-mail:yoons@skku.edu)

3) Member, Dept. of Civil & Environmental Eng., Sungkyunkwan University(E-mail:jmcho@skku.edu)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

근접수치사진측량은 2개 이상의 촬영영상으로부터 객체의 3차원 좌표 성과를 산출하는 기술이다(Sanz-Ablanedo *et al.*, 2009). 최근 필름을 사용하는 아날로그 방식의 카메라에서 디지털 카메라로 교체됨에 따라, 픽셀의 배열을 활용하여 카메라 좌표계를 설정하는 연구에 비측량용 디지털 카메라가 측량 장비로써 활용되고 있다(Peipe and Stephani, 2003). 자동초점, 줌렌즈, 리트로포커스 렌즈와 같은 기술이 구현된 비측량용 카메라는 고품질의 전문가용 카메라와 저가의 일반 사용자용 카메라로 구분할 수 있으며, 측량 분야의 활용 가능성에 대한 연구가 국내외에서 다수 수행되었다(Jung, 2011; Oh *et al.*, 2006; Rieke-Zapp and Peipe, 2006). 전문가용 카메라는 견고한 구조, 높은 해상도와 감도를 지닌 센서, 고품질의 렌즈, 렌즈 교환 기능과 같은 특징을 지닌다. 일반 사용자용 카메라는 상기와 같은 기능 중 일부를 소형 크기에 포함하도록 구성되어 있으며, 일반적으로 렌즈가 카메라 내부에 탑재되어 사용된다. 일반 사용자용 카메라는 전문가용 카메라와 비교하여 낮은 기하학적 안정성을 지니고 있다. 최근에 이러한 문제를 해결하기 위하여 신속한 카메라 캘리브레이션 프로세스 및 알고리즘의 개발이 진행되고 있으며(Karras and Mavrommati, 2002), 근접수치사진측량 응용분야에 일반 사용자용 카메라를 활용하기 위한 연구가 수행되었다(Mikhail *et al.*, 2001; Fryer *et al.*, 2007).

본 연구에서는 일반 사용자용 카메라 중에서도 일상생활에 있어 가장 활용도가 큰 모바일폰 카메라로 촬영된 스테레오 영상에 근접수치사진측량 알고리즘을 적용해봄으로써, 향후 모바일폰 카메라를 이용한 근접수치사진측량 분야에서의 활용 가능성을 실험하고자 하였다. 최근 모바일폰 카메라를 이용하여 근접수치사진측량 분야에서의 활용성을 연구한 동향을 살펴보면, Park and Choi(2012) 등은 스테레오 카메라가 탑재된 모바일폰을 이용하여 촬영을 수행하고, 다중영상표정과 광속조정을 통하여 정량적인 정보의 취득이 가능한지 실험하였다. 상기 연구는, 스테레오 카메라가 장착된 모바일폰의 고정된 카메라 기선길이의 제한으로 근거리 소규모측량분야의 활용을 제시하였고, 다중 영상을 이용한 자체(self) 캘리브레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 VLBI(Very Long Baseline Interferometer) 안테나를 좌우로 촬영한 스테레오 영상을 사용하여 카메라 기선길이의 범위를 확장시켰다.

또한, 본 연구가 기존 연구와 차별화 되는 점은 연구 대상을 세종시 우주측지관측센터에 위치한 VLBI 안테나로 선정하

는 것이다. 정밀한 측위 정확도를 산출하는 VLBI 안테나의 구조적 안정성을 저하시킬 수 있는 가능성을 배제하기 위하여, 본 연구에서는 별도의 타겟을 부착하지 않고, VLBI 안테나 표면에 다수 분포된 특징점을 카메라 캘리브레이션을 위한 대상으로 활용하였다.

VLBI는 다양한 부재와 재료를 사용하여 구축한 복합구조물로서 안테나 설계시 부재의 강도와 변형률을 고려하여 변형을 최소화하도록 설치하나, 자중과 시간에 따른 노후화로 인한 강성 저하로 변형이 발생된다. 특히, VLBI는 회전부의 처짐, 지지부의 부등침하 및 관측작업에 따른 가속력에 의한 내부 곡률의 변화가 가장 큰 변형 요소이다. VLBI의 기능을 유지하고, 정확도를 극대화하기 위해서는 VLBI 관측지점의 위치 정보와 안테나의 변형에 대한 연구가 중요하다(Lee *et al.*, 2012). 따라서 본 연구에서는 모바일폰 카메라를 활용하여 카메라 캘리브레이션을 수행하고, VLBI 안테나의 3차원 위치좌표 성과를 산출함으로써, 근접수치사진측량으로 VLBI 안테나의 정적변위 모니터링을 위한 기반 연구를 수행하고자 하였다.

이와 더불어, 기존 연구에서는 비측량용 카메라의 캘리브레이션을 실시하기 위하여 미국 EOS Systems Inc.에서 판매하고 있는 상용 수치사진측량시스템인 PhotoModeler Scanner[®] ver. 6.0(이하 PhotoModeler)와 같은 상용프로그램을 활용하였다(Jung, 2011). 본 연구에서는 PhotoModeler 뿐만 아니라, DLT(Direct Linear Transformation)방법으로 산출한 표정결과를 초기값으로 활용하고 광속 조정계산 과정을 통해 정밀한 캘리브레이션 결과를 산출하는 프로세스의 정확도 검증을 수행하고자 하였다. DLT방법은 Computer Vision 분야에서 활용되는 카메라 캘리브레이션 기법으로써, PhotoModeler와 같은 특정한 상용프로그램을 사용하지 않고, 신속하고 자동화된 카메라 캘리브레이션 프로세스 구축을 위한 알고리즘으로 사용될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 광속 조정으로 정밀한 카메라 내·외부 표정요소를 계산하기 위한 초기값으로 DLT와 PhotoModeler 방법으로 산출한 표정결과를 활용하였다. 두 가지 표정결과를 초기값으로 활용하여 광속조정을 수행하고, 산출된 최종 표정결과를 비교하여 향후 DLT방법으로 자동화된 카메라 캘리브레이션 프로세스를 구축하기 위한 활용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 근접수치사진측량 알고리즘

2.1 공선조건식

임의의 점의 좌표(X, Y, Z)와 투영 중심 및 카메라의 영상

면에 투영된 좌표가 한 직선상에 위치함을 나타내는 것을 공선조건이라고 한다. 공선조건은 Fig. 1과 같은 기하학적인 관계를 의미하며, Eq. (1)과 같은 방정식으로 표현될 수 있다 (Mikhail *et al.*, 2001).

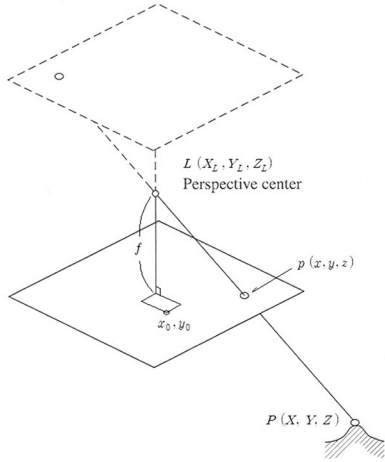


Fig. 1. The collinearity condition equations

$$\begin{aligned}
 x + \delta_x - x_0 &= -c_x \frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \\
 y + \delta_y - y_0 &= -c_y \frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 x, y : 영상좌표, x_0, y_0 : 주점의 위치, c_x, c_y : x, y 방향으로 λ 요소에 의하여 스케일화된 초점거리 ($c_x = c\lambda_x, c_y = c\lambda_y$), $m_{11} \dots m_{33}$: 회전행렬, X, Y, Z : 대상체 좌표, X_L, Y_L, Z_L : 투영중심, δ_x, δ_y : x, y 방향의 렌즈 왜곡량을 나타낸다.

2.2 DLT방법

DLT는 사진좌표계와 지상좌표계 시스템을 선형함수를 이용하여 모델화 하는 것이다. DLT는 공선조건식으로부터 얻을 수 있으며, Eq. (2)로 모델화된다(Mikhail *et al.*, 2001).

$$\begin{aligned}
 x + \delta_x &= \frac{L_1 X_P + L_2 Y_P + L_3 Z_P + L_4}{L_9 X_P + L_{10} Y_P + L_{11} Z_P + 1} \\
 y + \delta_y &= \frac{L_5 X_P + L_6 Y_P + L_7 Z_P + L_8}{L_9 X_P + L_{10} Y_P + L_{11} Z_P + 1}
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -x_i - y_i - z_i - 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_i x_i u_i y_i u_i z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -x_i - y_i - z_i - 1 & v_i x_i v_i y_i v_i z_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = 0$$

Eq. (2)를 $AL+B=0$ 로 단순화하여, $L = -(A^T A)^{-1} A^T B$ 과 같이 최소제곱법으로 해를 구할 수 있다. Eq. (2)에서 $L = -(m_{31}X_c + m_{32}Y_c + m_{33}Z_c)^{-1}$, $L_1 = L(x_0 m_{31} - c_x m_{11})$, $L_2 = L(x_0 m_{32} - c_x m_{12})$, $L_3 = L(x_0 m_{33} - c_x m_{13})$, $L_4 = x_0 + Lc_x(m_{11}X_c + m_{12}Y_c + m_{13}Z_c)$, $L_5 = L(y_0 m_{31} - c_y m_{21})$, $L_6 = L(y_0 m_{32} - c_y m_{22})$, $L_7 = L(y_0 m_{33} - c_y m_{23})$, $L_8 = y_0 + Lc_y(m_{21}X_c + m_{22}Y_c + m_{23}Z_c)$, $L_9 = Lm_{31}$, $L_{10} = Lm_{32}$, $L_{11} = Lm_{33}$ 와 같다.

Eq. (2)에서 구한 DLT 파라미터를 사용하여, 각각의 카메라 파라미터들을 구할 수 있다. 상기와 같은 DLT 방법을 통해 카메라 자세, 투영중심 위치를 포함한 외부표정결과와 초점거리, 주점의 위치와 같은 내부표정결과를 산출한다.

3. 카메라 캘리브레이션

3.1 연구대상 및 기준점측량

본 연구에서는 세종특별자치시의 국토지리정보원 우주측지관측센터에 위치한 VLBI 안테나 표면에 분포된 다수의 특징점을 대상으로 근접수치사진측량이론을 적용하여 3차원 위치좌표 성과를 계산하였다.

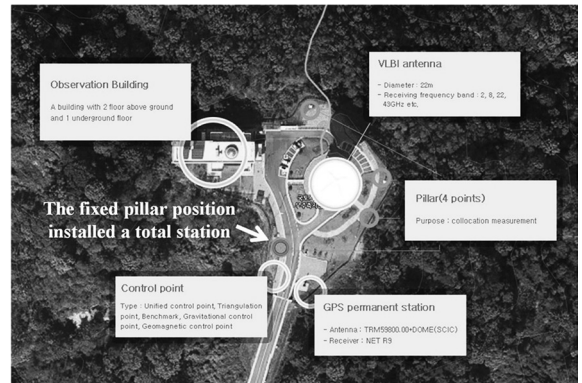


Fig. 2. Bird's eye view of space geodetic observation center facilities in sejong city

Fig. 2와 같이 우주측지관측센터는 VLBI 안테나, 필라 4개소, 기준점 및 GPS 상시관측소로 구성되어 있다. VLBI 안테나 주변에 4개소의 고정필라가 구축되어 있고, 이 중 기준점 가까이 위치한 고정필라에 토탈스테이션을 설치하여 VLBI 안테나 표면의 특징점에 대한 측량을 실시하였다. 사용된 토탈스테이션 장비는 Fig. 3의 Trimble사의 S8 Total Station으

로써, 장비의 사양은 Table 1과 같다. VLBI 안테나 표면에 기준점측량을 위한 반사타겟을 부착하는 것은 전파방해로 인한 VLBI 안테나의 측위정밀도 저하로 이어질 가능성이 있으므로, 본 연구에서는 무타겟 방식으로 안테나 표면의 특징점을 측정하였다. Table 1과 같이 토탈스테이션을 활용한 무타겟 측정시 standard 모드에서는 $\pm(2+2ppm \times D)mm$ 의 정확도 및 오차범위를 지니며, tracking 모드에서는 $\pm(4+2ppm \times D)mm$ 의 정확도와 오차범위를 보이고 있다.



Fig. 3. Total station used in reference surveying (Trimble S8 total station)

Table 1. Trimble S8 total station specifications

Classification		Value
Distance Measurement	Non-targer	1,300m
	Non-target ER	2,200m
	Reflective Foil	1,000m
	Prism	5,500m
	Minimum Distance	0.2m
Accuracy	Prism std.mode	$\pm(1+2ppm \times D)mm$
	Prism trk.mode	$\pm(4+2ppm \times D)mm$
	Non-target std.mode	$\pm(2+2ppm \times D)mm$
	Non-target trk.mode	$\pm(4+2ppm \times D)mm$
Measuring Time	Prism std.mode	1.2s
	Prism trk.mode	0.4s
	Non-target std.mode	1~5s
	Non-target trk.mode	0.4s

기준점측량은 카메라 캘리브레이션과 그 결과를 검증하기 위해 필요하다. 기준점측량 결과는 카메라 캘리브레이션을 위한 기준좌표로 활용되며, 캘리브레이션이 완료된 후 타겟들

의 좌표를 재계산하였을 때, 그 차이가 얼마나 되는지 정확도 평가를 위한 기준좌표로 활용된다(Park and Choi, 2012).

본 연구에서는 VLBI 안테나 표면의 특징점에 대한 3차원 지상좌표를 측정하여 카메라 캘리브레이션을 위한 기준점 좌표로 활용하였다. 카메라 캘리브레이션에 사용될 VLBI 안테나 표면의 특징점에 대한 기준점 좌표를 측정하기 위하여, 우주측지관측센터 내의 고정필라에 토탈스테이션을 설치하였다. 우주측지관측센터에 위치한 필라들을 이용하여 방위각을 고정시킨 지역좌표계를 설정한 후, VLBI 안테나 특징점에 대한 기준점 측량을 수행하였다. Fig. 4는 우주측지관측센터 내의 고정필라를 활용하여 지역좌표계를 설정한 후, 토탈스테이션으로 VLBI 안테나 표면의 특징점의 지상좌표를 획득한 방법을 나타낸다.



Fig. 4. The ground coordinate measurement method for feature points of VLBI antenna

VLBI 안테나 표면의 특징점에 대한 영상좌표와 기준점 좌표의 결과를 매칭하기 위하여, 사전에 Fig. 5와 같이 VLBI 표면의 특징점에 대하여 라벨링을 수행하였다. DLT방법과 PhotoModeler에서 표정을 위하여 Fig. 5에서 라벨링한 VLBI 안테나 표면에 다수 분포된 총 215점의 특징점을 대상으로 기준점 좌표 측량 및 영상좌표를 수집하였다. 표정을 위하여 사용된 영상좌표와 기준점 좌표의 위치는 Fig. 5에서 표시된 것과 같고, 총 215점의 특징점에 대한 기준점 측량 성과와 영상좌표를 활용하였다. 광속조정 계산을 수행하기 위한 내·외부 표정요소 초기값은 DLT방법과 PhotoModeler의 산출결과를 활용하였다. DLT방법과 PhotoModeler 표정 결과를 초기값으로 활용한 광속조정 계산과정에서도 Fig. 5에서 표시된 특징점에 대한 총 215점의 기준점 측량 성과와 영상좌표 결과를 활용하였다.

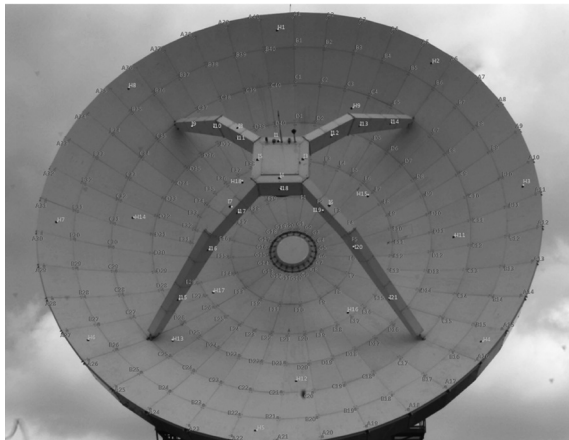


Fig. 5. Target labeling for control point surveying and acquisition of image coordinates

3.2 카메라 선정 및 영상획득

3.1과 같은 방법으로 VLBI 안테나 표면의 특징점에 대한 지상좌표를 획득함과 동시에, Fig. 4에서 표현된 바와 같이 고정된 VLBI 안테나를 대상으로 지역좌표계의 Y축 선상 2곳에서 Fig. 6과 같은 스테레오 영상을 획득하였다.

Fig. 6과 같은 스테레오 영상을 획득하기 위하여 Samsung Galaxy S4 (SHV-E300L) 모바일폰에 탑재된 저가의 디지털 카메라를 사용하였다. 연구에 사용된 모바일폰은 Fig. 7과 같으며, 해당 카메라의 사양은 Table 2와 같다. 또한, 모바일폰의 전·후방에 탑재된 카메라 중 후면에 위치한 1300만 화소의 디지털 카메라를 활용하였다. 사용된 디지털 카메라는 수동 포커싱 기능이 없으며, 모든 객체를 자동으로 포커싱하는 자동

초점 기능만 구현되어있다. 정량적인 수치로 렌즈의 초점길이를 제어할 수 없지만, 지상좌표 기준계에서 지역좌표계의 Y축 한축으로만 이동하여 2매의 영상을 획득하였고, 영상 획득 과정에서 발생하는 초점거리 변화를 최소화 하였다.



(a) The first image

(b) The second image

Fig. 6. Stereo images taken with a mobile phone for VLBI antenna



Fig. 7. Camera used in the study (Samsung galaxy S4, SHV-E300L)

Table 2. SHV-E300L camera specifications

classification	Value
Sensor Type	CMOS
Sensor Size	1/3"
Resolution	13MP
Pixel Size	1.12 μ m
Maximun Image Size	4128×3096

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 VLBI 안테나 구조물은 다수의 특징점이 분포되어 있으며, 이러한 특징점에 대한 영상좌표와 3차원 지상좌표를 활용하여 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. Fig. 6에서 획득된 스테레오 영상에 분포된 총 215점의 특징점에 대한 영상좌표를 수집하였으며, VLBI 안테나 표면에서 획득된 특징점의 분포는 Fig. 8과 같다.

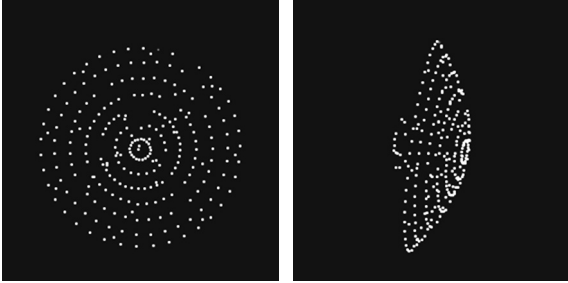


Fig. 8. Extraction of feature point distributed in the VLBI antenna

스테레오 영상에 분포된 총 215점의 특징점을 추출한 뒤, 카메라 캘리브레이션을 수행하여 각 영상에서의 카메라 내·외부 표정요소를 결정한다. 카메라 캘리브레이션의 성과를 검증하기 위하여, Fig. 9와 같이 두 영상에서 총 14점의 공액점 (두 영상에서 동일점)에 대한 영상좌표와 기준점측량 결과를 수집하였다. Fig. 9에서 표시된 VLBI 안테나 표면 전반에 고르게 분포되어 있는 14점의 특징점을 VLBI 안테나 형태를 대표하는 점이라 판단하여 공액점으로 선정하였다. 선정된 공액점은 VLBI 안테나에 분포된 다수의 특징점에 비하여 크기가 크고, 분별이 쉬운 특징을 가지고 있다. Fig. 9와 같이 직사각형 형태에서 우상변 최외곽 모서리를 공액점으로 사용하였다. 기준점측량도 동일한 215점의 특징점과 14점의 공액점을 대상으로 측정되었다.

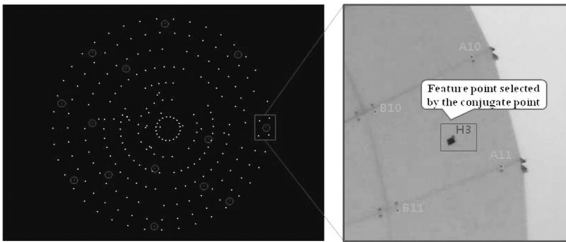


Fig. 9. The conjugate point shown in the stereo images (14 points)

상기 과정으로 결정된 스테레오 영상의 공액점을 대상으로 정확도 분석을 수행함으로써 모바일폰을 이용하여 산출한 VLBI 안테나의 3차원 위치정확도를 검증하고자 하였다. 정확도 분석은 스테레오 영상의 카메라 캘리브레이션 성과를 활용하여 각 공액점에 대한 3차원 위치좌표를 산출하고, 그 결과를 기준 토탈스테이션 측량으로 획득된 동일한 점에 대한 3차원 기준점좌표와 비교하는 과정으로 수행되었다.

3.3 카메라 외부표정요소 초기값 결과 비교

공선조건식을 활용한 광속조정 계산과정에서는 카메라

내·외부 표정요소들의 초기값을 결정하는 문제가 중요하다. 본 연구에서는 이러한 표정요소들의 초기값을 DLT와 PhotoModeler방법을 활용하여 산출하였다.

PhotoModeler에서 카메라 캘리브레이션을 수행하기 위하여 Fig. 10과 같이 PhotoModeler에서 제공하는 2차원 격자용지를 촬영 후, 카메라의 내부표정요소를 산출하였다. 산출된 내부표정요소 결과를 활용하여 PhotoModeler 상에서 카메라 외부표정요소를 계산하였다. 상기와 같은 과정으로 PhotoModeler 상에서 산출된 카메라 내·외부 표정요소를 광속조정 계산을 수행하기 위한 표정요소 초기값으로 활용하였다.

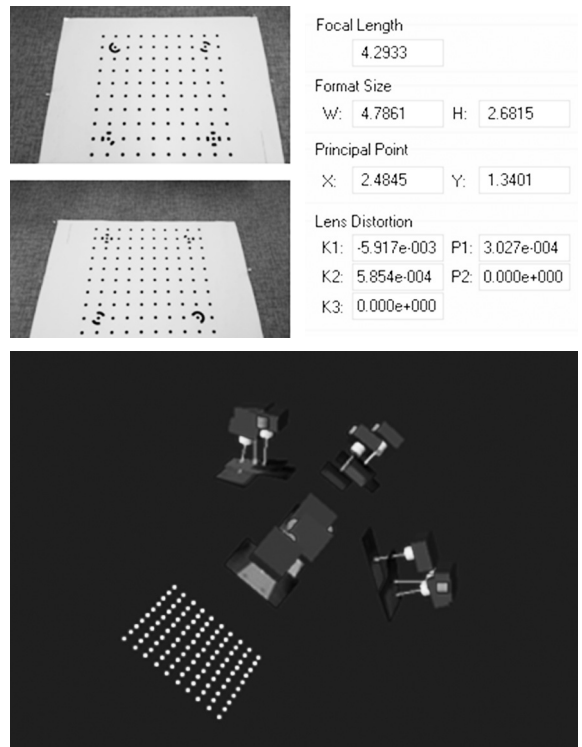


Fig. 10. The calculation of the camera interior orientation parameters using the PhotoModeler

2.2에서 설명된 DLT방법을 활용하여 카메라의 자세, 투영 중심 위치와 같은 외부표정요소와 카메라 초점거리와 주점의 위치가 포함된 내부표정요소를 산출한다. DLT방법을 통해 산출된 카메라 내·외부 표정요소 결과도 PhotoModeler 표정결과와 마찬가지로 광속조정 계산을 위한 초기값으로 활용된다. 상기 두 가지 방법을 통해 산출된 카메라 외부표정요소 초기값을 비교한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison of the initial value of exterior orientation parameters based on DLT and PhotoModeler

Images	Type	Omega(rad)	Phi(rad)	Kappa(rad)	Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)
First image	DLT initial value(A)	2.3129	-0.9081	0.6764	2.1351	4.4927	0.3398
	PhotoModeler initial value(B)	2.3616	-0.8776	0.7147	0.3533	3.4647	-0.8737
	(A) - (B)	-0.0487	-0.0305	-0.0383	1.7818	1.0280	1.2135
Second image	DLT initial value(A)	-2.3493	-1.2611	2.3183	14.3712	21.3783	6.9559
	PhotoModeler initial value(B)	-3.0676	-1.0283	1.6285	1.5080	22.0383	-0.7602
	(A) - (B)	0.7183	-0.2327	0.6898	12.8632	-0.6600	7.7160

Table 3은 스테레오 영상에 대한 DLT와 PhotoModeler방법에 따른 각각의 카메라 외부표정요소 결과와 두 가지 결과의 편차를 제시한다. 두 결과의 편차에서 확인할 수 있듯이, DLT와 PhotoModeler방법을 활용하여 산출된 외부표정요소 결과가 서로 상이한 결과를 보인다. 구체적으로 두 번째 영상에 대한 외부표정요소 결과의 편차가 첫 번째 영상의 외부표정요소 결과의 편차보다 전반적으로 크다는 것을 확인할 수 있다. 특히 두 가지 방법을 활용하여 산출된 외부표정요소 결과 중 카메라 투영중심 위치를 의미하는 Xc와 Zc값에 대한 편차의 절대값 차이가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 편차가 상대적으로 근소한 첫 번째 영상의 Xc값의 편차가 1.7818m인 반면, 상대적으로 편차가 큰 두 번째 영상의 Xc값의 편차가 12.8632m로 약 7배의 차이가 발생한다. 또한 첫 번째 영상의 Zc값의 편차가 1.2135m인 반면, 두 번째 영상의 Zc값의 편차가 7.7160m로 약 6배의 차이가 발생한다. 외부표정요소 결과 중 카메라의 자세를 의미하는 방향각 결과 역시 부호는 일치하지만, 편차의 차이가 상당히 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 광속조정 계산과정을 수행하지 않고, DLT와 PhotoModeler방법을 통해 산출된 카메라 내·외부 표정요소 결과는 신뢰성을 확보할 수 없다는 것을 의미한다.

3.4 카메라 내·외부표정요소 최종 결과 비교·분석

상기 두 가지 방법으로 산출한 스테레오 영상에 대한 카메라

내·외부 표정요소 결과를 초기값으로 활용하여 광속조정 계산을 수행하였다. 비선형의 공선조건식을 타일러 급수를 통해 선형화한 후, Jacobian을 활용하여 반복적으로 광속조정 계산과정을 수행하여 내·외부 표정요소의 최종결과를 산출하였고, 그 중 외부표정요소의 결과는 Table 4 및 Table 5와 같다. Table 4에서는 PhotoModeler방법으로 산출한 외부표정요소 초기값 결과와 광속조정으로 계산된 최종 외부표정요소 결과의 편차를 비교하였다.

DLT방법을 적용하여 산출된 카메라 내·외부 표정요소를 초기값으로 활용하여 공선조건식에 의한 광속조정 계산을 수행하였다. Table 5에서는 DLT방법으로 산출한 외부표정요소 초기값 결과와 광속조정으로 계산된 최종 외부표정요소 결과의 편차를 비교하였다.

PhotoModeler와 DLT방법으로 산출된 내·외부 표정요소를 활용하여 Jacobian 행렬과 관측행렬을 구성하고, 최소제곱법으로 구하고자 하는 최종 내·외부 표정요소를 계산하는 과정을 반복적으로 수행하여 각 파라미터의 수렴값을 산출하였다. Table 4와 Table 5의 결과는 모두 동일하게 총 60회의 반복계산으로 획득하였다. Table 5에서 DLT방법으로 산출된 외부표정요소 초기값과 광속조정으로 계산된 최종 외부표정요소 결과의 편차가 크게 발생하였음을 알 수 있다. 특히, Table 5의 두 번째 영상에서 카메라 투영중심의 위치를 의미하는 Xc값과 Zc값의 편차가 각각 12.96m와 7.6423m로서,

Table 4. Comparison of exterior orientation parameters based on PhotoModeler and bundle adjustment

Images	Type	Omega(rad)	Phi(rad)	Kappa(rad)	Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)
First image	PhotoModeler initial value(A)	2.3612	-0.8776	0.7147	0.3533	3.4647	-0.8737
	Bundle adjustment result(B)	2.3757	-0.8813	0.7252	0.1423	3.3139	-0.8435
	(A) - (B)	-0.0145	0.0037	-0.0105	0.2110	0.1508	-0.0302
Second image	PhotoModeler initial value(A)	-3.0676	-1.0283	1.6285	1.5080	22.0383	-0.7602
	Bundle adjustment result(B)	-3.0577	-1.0177	1.6387	1.4112	22.1031	-0.6864
	(A) - (B)	-0.0099	-0.0106	-0.0102	0.0968	-0.0648	-0.0738

Table 5. Comparison of exterior orientation parameters based on DLT and bundle adjustment

Images	Type	Omega(rad)	Phi(rad)	Kappa(rad)	Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)
First image	DLT initial value(A)	2.3129	-0.9081	0.6764	2.1351	4.4927	0.3398
	Bundle adjustment result(B)	2.3757	-0.8814	0.7251	0.1444	3.3150	-0.8422
	(A) - (B)	-0.0628	-0.0267	-0.0487	1.9907	1.1777	1.1820
Second image	DLT initial value(A)	-2.3493	-1.2611	2.3183	14.3712	21.3783	6.9559
	Bundle adjustment result(B)	-3.0577	-1.0177	1.6387	1.4112	22.1031	-0.6864
	(A) - (B)	0.7084	-0.2434	0.6796	12.9600	-0.7248	7.6423

DLT방법에 의한 초기값이 광속조정 계산에 의하여 보정되었다는 것을 확인할 수 있다. Table 4의 편차결과는 Table 5의 편차결과 보다는 작은 수치로 산출되었음을 알 수 있다. 특히, Table 4의 두 번째 영상의 Xc값의 편차가 최대 12m를 초과하는 반면, Table 5의 두 번째 영상의 Xc값의 편차는 10cm 미만의 수치를 나타내고 있다. Table 5와 Table 4의 편차결과 비교를 통해 알 수 있듯이, DLT방법으로 산출된 표정요소 보다 PhotoModeler방법을 통해 산출된 카메라 표정요소가 광속조정 계산으로 산출된 최종 표정요소에 더욱 근접하다는 것을 확인할 수 있다.

Table 6 ~ Table 9는 스테레오 영상에 대하여 DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 내·외부 표정요소를 초기값으로 활용하여 총 60회의 광속조정 반복계산으로 산출된 최종적인 카메라 내·외부 표정요소 결과를 나타낸다. Table 6과 Table 7은 첫 번째 영상의 광속조정 계산결과에 따른 카메라 내·외부 표정요소를 나타내고 있고, Table 8과 Table 9는 두

번째 영상의 광속조정 계산결과에 따른 카메라 내·외부 표정요소를 보여주고 있다. Table 8과 Table 9에서 확인할 수 있듯이, 두 번째 영상의 최종 내·외부 표정요소 결과는 DLT와 PhotoModeler방법에 따른 표정결과 사용에 관계없이 총 60회의 반복적인 광속조정 계산으로 두 결과가 일치하게 됨을 알 수 있다. 또한, Table 6과 Table 7에서 확인할 수 있듯이, 첫 번째 영상의 최종 내·외부 표정결과 역시 총 60회의 광속조정 계산에 의해 두 가지 방법에 관계없이 결국 유사해짐을 확인할 수 있다. 첫 번째 영상의 최종 외부표정요소 결과를 보여주는 Table 6에서, 카메라 자세를 표현하는 방향각은 거의 일치함을 알 수 있고, 카메라 투영중심의 위치 좌표값은 최대 2mm 정도의 편차를 보임을 알 수 있다. 첫 번째 영상의 최종 내부 표정요소 결과를 보여주는 Table 7에서, 주점의 위치를 표현하는 uc와 vc값이 최대 0.2pixel 이내의 편차를 나타내고 있지만, 렌즈 왜곡량을 비롯한 나머지 파라미터들은 대부분 유사한 것을 확인할 수 있다.

Table 6. The result of exterior orientation parameters in the first image

Type of initial value	omega(rad)	phi(rad)	kappa(rad)	Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)
DLT(A)	2.3757	-0.8814	0.7252	0.1444	3.3150	-0.8422
PhotoModeler(B)	2.3757	-0.8813	0.7252	0.1423	3.3139	-0.8435
(A) - (B)	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0021	0.0011	0.0012

Table 7. The result of interior orientation parameters in the first image

Type of initial value	uc (pixel)	vc (pixel)	k1 (mm ⁻²)	k2 (mm ⁻⁴)	k3 (mm ⁻⁶)	p1 (mm ⁻¹)	p2 (mm ⁻¹)	pixel size (width)	pixel size (height)
DLT(A)	113.8475	29.6887	-1.05056 E-09	-1.0872 E-14	5.17292 E-21	-1.11803 E-06	-6.52283 E-07	4128	2322
PhotoModeler(B)	113.6971	29.8660	-1.04604 E-09	-1.08934 E-14	5.18331 E-21	-1.11358 E-06	-6.53774 E-07	4128	2322
(A) - (B)	0.1504	-0.1772	-4.51249 E-12	2.14029 E-17	-1.03853 E-23	-4.45732 E-09	1.49088 E-09	0	0

Table 8. The result of exterior orientation parameters in the second image

Type of initial value	omega(rad)	phi(rad)	kappa(rad)	Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)
DLT(A)	-3.0577	-1.0177	1.6387	1.4112	22.1031	-0.6864
PhotoModeler(B)	-3.0577	-1.0177	1.6387	1.4112	22.1031	-0.6864
(A) - (B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

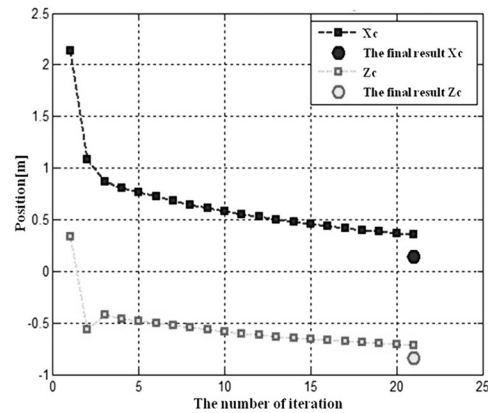
Table 9. The result of interior orientation parameters in the second image

Type of initial value	uc (pixel)	vc (pixel)	k1 (mm ⁻²)	k2 (mm ⁻⁴)	k3 (mm ⁻⁶)	p1 (mm ⁻¹)	p2 (mm ⁻¹)	pixel size (width)	pixel size (height)
DLT(A)	93.3590	50.6275	-2.14868 E-09	-5.48311 E-15	2.0846 E-21	-2.19112 E-07	-1.36849 E-06	4128	2322
PhotoModeler(B)	93.3590	50.6275	-2.14868 E-09	-5.48311 E-15	2.0846 E-21	-2.19112 E-07	-1.36849 E-06	4128	2322
(A) - (B)	0.0000	0.0000	-4.59912 E-22	5.19859 E-28	-1.70024 E-34	-2.30022 E-20	3.98105 E-20	0	0

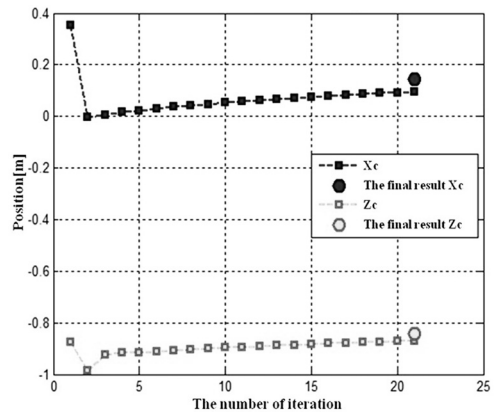
앞서 Table 4와 Table 5의 비교를 통해 알 수 있듯이, DLT방법으로 산출된 표정요소는 PhotoModeler방법으로 산출된 표정요소에 비하여 최종 표정요소 결과를 기준으로 큰 편차를 보이고 있었다. 그러나, 상기 결과로부터 DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 표정결과의 차이와 무관하게 광속조정 반복계산으로 구한 최종 카메라 내외부 표정요소 결과가 모두 유사해짐을 알 수 있다. 이는 별도의 상용프로그램인 PhotoModeler를 활용하지 않고도, 선형적 모델링으로 파라미터를 산출하는 DLT 방법으로 PhotoModeler 사용시와 유사한 카메라 내외부 표정요소를 산출할 수 있음을 보여준다.

Fig. 11과 Fig. 12는 DLT와 PhotoModeler방법에 의해 산출된 Xc와 Zc 초기값의 광속조정 계산 반복횟수에 따른 변동 경향을 나타내고 있다. Table 4 ~ Table 9는 총 60회의 광속조정 반복계산에 의해 산출된 결과이며, 광속조정에 사용된 초기값과 영상의 구분에 따른 수렴속도를 파악하는데 한계가 있다. 따라서 Fig. 11과 Fig. 12에서 광속조정 반복횟수에 따른 초기값의 변동 경향과 최종 결과값을 파악함으로써, 어느 정도의 반복계산 횟수와 수렴속도로 초기값 결과가 최종 산출된 외부 표정결과에 근접해지는지 확인할 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 광속조정 계산 반복횟수에 따른 경향성을 나타내는데 Xc와 Zc값을 선정 한 이유는 Table 3에서 DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 외부표정요소 초기값들 중 Xc와 Zc값이 가장 큰 편차를 보이고, Table 6에서 광속조정에 따른 최종 외부표정요소 결과값 중 Xc와 Zc값의 편차가 가장 크기 때문이다. Fig. 11의 (a)는 첫 번째 영상에서 DLT방법으로 산출한 Xc와 Zc 초기값이 광속조정 반복계산 횟수에 따라 최종값으로 계산되는 경향을 표현한 것이고, (b)는



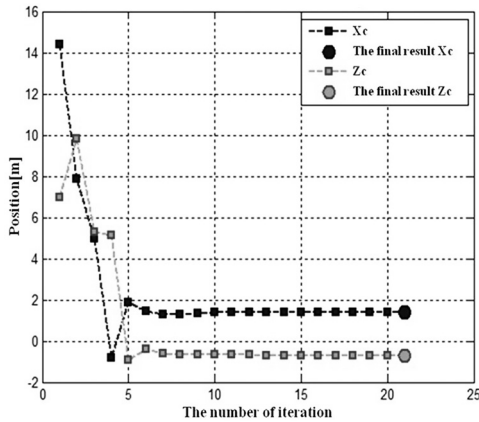
(a) Position tendencies of Xc and Zc by the DLT initial value in the first image



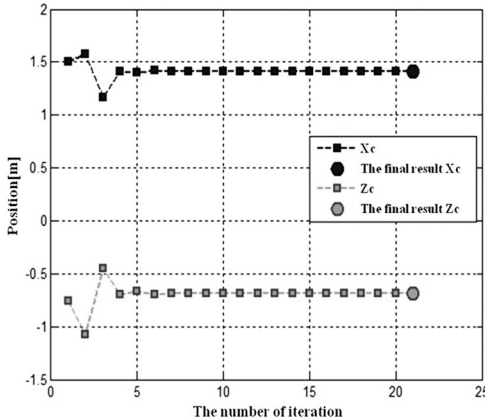
(b) Position tendencies of Xc and Zc by the PhotoModeler initial value in the first image

Fig. 11. Tendency of Xc and Zc initial value based on bundle adjustment in first image. (a) DLT; (b) PhotoModeler

PhotoModeler로 산출한 Xc와 Zc 초기값의 광속조정 반복계산 횟수에 따른 변동 경향을 나타낸 것이다.



(a) Position tendencies of Xc and Zc by the DLT initial value in the second image



(b) Position tendencies of Xc and Zc by the PhotoModeler initial value in the second image

Fig. 12. Tendency of Xc and Zc initial value based on bundle adjustment in second image. (a) DLT; (b) PhotoModeler

Fig. 11은 첫 번째 영상에서 DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 Xc와 Zc값이 총 21회의 광속조정 반복계산에 따라 변동하는 경향과 해당 파라미터의 최종 결과값을 표현하고 있다. Fig. 11의 (b)에서 PhotoModeler방법으로 산출된 Xc와 Zc 파라미터는 초기값이 최종 결과값과 큰 편차를 보이지 않고, 21회의 광속조정 계산으로 최종 결과값에 안정적으로 수렴하는 경향을 보인다. Fig. 11의 (b)의 결과와 비교하면, Fig. 11의 (a)에서 DLT방법으로 산출된 Xc와 Zc 파라미터는 초기값과 최종 결과값이 큰 편차를 보이고 있으며, 특히 Xc의 값이 최종 결과값에 수렴하기 위해서는 21회의 광속조정 계산이 충분하지 않음을 나타내고 있다. 이는 DLT방법 보다 PhotoModeler

방법으로 산출된 표정결과를 광속조정 계산을 위한 초기값으로 사용하였을 때, 더욱 빠른 수렴속도를 보인다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 12는 두 번째 영상에서 DLT 방법과 PhotoModeler로 산출한 Xc와 Zc 초기값의 광속조정 반복계산 횟수에 따른 변동 경향을 표현한 것이다.

Fig. 12는 두 번째 영상에서 DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 Xc와 Zc값이 총 21회의 광속조정 반복계산에 따라 변동하는 경향과 해당 파라미터의 최종 결과값을 표현하고 있다. 두 번째 영상은 첫 번째 영상보다 전반적으로 빠르게 최종 결과값으로 파라미터들이 수렴하는 경향을 보이고 있다. Fig. 12의 (b)에서는 PhotoModeler방법으로 산출된 Xc와 Zc의 값이 최초 5회의 광속조정 계산과정으로 최종 결과값에 거의 근사하게 수렴하는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 (a)에서는 DLT방법으로 산출된 Xc와 Zc의 값과 최종 결과값의 편차가 (b)에 비하여 매우 크다는 것을 알 수 있지만, 최초 10회의 광속조정 계산과정으로 최종 결과값에 유사하게 수렴하고, 이후 안정적인 변동 경향을 보임을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 11의 첫 번째 영상의 결과와 마찬가지로, 두 번째 영상 또한 DLT방법보다 PhotoModeler방법에 의한 표정결과를 광속조정의 초기값으로 활용하였을 때, 더욱 빠른 수렴속도를 보인다는 것을 나타내고 있다. 또한 두 번째 영상은 첫 번째 영상보다 적은 광속조정 반복계산이 요구됨을 알 수 있다.

4. 모바일폰 카메라의 3차원 위치정확도 분석

최종적으로 산출된 스테레오 영상의 카메라 내·외부 표정요소 결과를 활용하여 Fig. 9에서 선정한 14점의 공액점에 대한 3차원 위치좌표를 계산하였다. 광속조정의 결과로 산출된 카메라 내·외부 표정요소와 공액점의 영상좌표를 공선조건식에 대입하면, 공액점의 영상좌표에 대응하는 3차원 위치좌표를 최소제곱법을 통해 계산할 수 있다.

Fig. 9에서 표시된 공액점에 대한 3차원 위치좌표와 동일점에 대한 토탈스테이션 측정값을 검사점으로 활용하여 편차를 계산한 결과는 Table 10과 같다. Table 10의 3차원 위치좌표를 계산하기 위하여 DLT방법으로 산출된 내·외부 표정요소를 초기값으로 활용하고, 광속조정이 수행된 내·외부 표정요소를 사용하였다. Table 10과 같이 편차에 정확도는 X방향으로 $0.004 \pm 0.010m$, Y방향으로 $0.001 \pm 0.015m$, Z방향으로 $0.009 \pm 0.017m$ 로서 cm급의 정확도로 공액점에 대한 3차원 위치좌표가 산출됨을 확인할 수 있다.

Table 11에서는 PhotoModeler방법으로 산출된 내·외부 표

Table 10. Comparison of 3D position coordinates of conjugate points using DLT initial value and TS measurements

Conjugate point(ID)	3D ground coordinates of conjugate points measured by TS(A)			3D position coordinates of conjugate points calculated by bundle adjustment(B)			(A) - (B)		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	29.775	20.976	27.786	29.766	20.977	27.775	0.009	-0.001	0.011
2	32.559	13.963	25.420	32.564	13.911	25.355	-0.006	0.052	0.065
3	33.421	10.326	18.211	33.430	10.336	18.210	-0.009	-0.010	0.002
4	31.862	12.247	10.861	31.851	12.250	10.854	0.011	-0.003	0.006
5	28.137	20.170	7.245	28.113	20.170	7.237	0.024	0.000	0.008
6	25.627	26.859	10.940	25.632	26.871	10.937	-0.005	-0.012	0.003
7	25.165	29.214	16.605	25.151	29.218	16.593	0.014	-0.005	0.012
8	26.603	27.364	24.168	26.602	27.362	24.155	0.001	0.002	0.013
9	34.125	13.864	16.769	34.119	13.865	16.762	0.006	-0.002	0.007
10	30.821	19.905	9.925	30.810	19.902	9.925	0.011	0.002	0.000
11	28.836	24.929	11.730	28.833	24.929	11.730	0.003	0.000	0.001
12	28.364	27.455	17.924	28.350	27.460	17.918	0.014	-0.005	0.006
13	34.193	18.085	19.842	34.201	18.089	19.843	-0.008	-0.004	-0.001
14	33.322	18.741	13.659	33.331	18.744	13.661	-0.009	-0.003	-0.002
Accuracy							0.004±0.010	0.001±0.015	0.009±0.017

Table 11. Comparison of 3D position coordinates of conjugate points using PhotoModeler initial value and TS measurements

Conjugate point(ID)	3D ground coordinates of conjugate points measured by TS(A)			3D position coordinates of conjugate points calculated by bundle adjustment(B)			(A) - (B)		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	29.775	20.976	27.786	29.766	20.977	27.775	0.009	-0.001	0.011
2	32.559	13.963	25.420	32.564	13.911	25.355	-0.006	0.052	0.065
3	33.421	10.326	18.211	33.430	10.336	18.210	-0.009	-0.010	0.002
4	31.862	12.247	10.861	31.851	12.250	10.854	0.011	-0.003	0.006
5	28.137	20.170	7.245	28.113	20.170	7.237	0.024	0.000	0.008
6	25.627	26.859	10.940	25.632	26.871	10.937	-0.005	-0.012	0.003
7	25.165	29.214	16.605	25.151	29.218	16.593	0.014	-0.005	0.012
8	26.603	27.364	24.168	26.602	27.362	24.155	0.001	0.002	0.013
9	34.125	13.864	16.769	34.119	13.865	16.762	0.006	-0.002	0.007
10	30.821	19.905	9.925	30.810	19.902	9.925	0.011	0.002	0.000
11	28.836	24.929	11.730	28.833	24.929	11.730	0.003	0.000	0.001
12	28.364	27.455	17.924	28.350	27.460	17.918	0.014	-0.005	0.006
13	34.193	18.085	19.842	34.201	18.089	19.843	-0.008	-0.004	-0.001
14	33.322	18.741	13.659	33.331	18.744	13.661	-0.009	-0.003	-0.002
Accuracy							0.004±0.010	0.001±0.015	0.009±0.017

정요소를 초기값으로 활용하여 광속조정을 수행하고, 그 결과를 통해 Fig. 9에서 표시된 공액점에 대한 3차원 위치좌표를 계산하였다. Table 10과 마찬가지로, 공액점에 대한 3차원 위치좌표와 동일점에 대한 토탈스테이션 측정값을 검사점으로 활용하여 편차를 계산하였다. Table 11에서 편차에 대한 정확도는 X방향으로 $0.004 \pm 0.010m$, Y방향으로 $0.001 \pm 0.015m$, Z방향으로 $0.009 \pm 0.017m$ 로서 Table 10과 일치하는 정확도로 공액점에 대한 3차원 위치좌표가 산출되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 세종시 우주측지관측센터 내에 위치한 VLBI 안테나를 대상으로 모바일폰 카메라의 캘리브레이션을 수행하고, 촬영된 스테레오 영상으로부터 공액점에 대한 3차원 위치좌표를 산출하였다. DLT와 PhotoModeler방법에 의하여 산출된 각각의 내·외부 표정요소를 광속조정 계산을 위한 초기값으로 활용하여 정밀한 내·외부 표정요소를 계산하고, 그 결과를 비교하였다. DLT와 PhotoModeler방법으로 산출한 표정결과의 차이와 무관하게 광속조정 반복계산으로 구한 카메라 내·외부 표정요소 결과가 모두 유사해짐을 확인할 수 있었다. 이는 별도의 상용프로그램인 PhotoModeler를 활용하지 않고도, 선형적 모델링으로 파라미터를 산출하는 DLT방법으로 PhotoModeler 사용시와 유사한 카메라 내·외부 표정요소를 산출할 수 있음을 보여준다. 향후 DLT방법을 활용하여 자동화된 카메라 캘리브레이션 프로세스를 구축하고, VLBI 안테나의 정적 변위 모니터링을 위한 3차원 위치좌표 산출에 본 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

최종적으로 모바일폰 카메라로 산출된 3차원 위치좌표 정보의 정확도를 분석하기 위하여, 두 영상의 공액점을 대상으로 계산된 3차원 위치좌표와 그 동일점에 대하여 토탈스테이션 기준점측량으로 획득된 지상좌표를 비교하였다. 이때 공액점에 대한 3차원 위치좌표를 계산함에 있어서, DLT와 PhotoModeler의 두 가지 방법에 의하여 산출된 표정결과를 초기값으로 활용하여 광속조정 계산된 내·외부 표정요소를 활용하였다. 산출된 공액점에 대한 3차원 위치좌표와 토탈스테이션 측량으로 획득된 지상좌표의 편차에 대한 정확도는 두 가지 결과 모두 $X=0.004 \pm 0.010m$, $Y=0.001 \pm 0.015m$, $Z=0.009 \pm 0.017m$ 로서, cm급의 높은 정확도를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 정밀 사진측량의 목적이 아닌 허용오차의 범위가 상대적으로 큰 다양한 사진측량 분야에 모바일폰 카메라를 활용할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 향후 발전된

알고리즘을 적용하여 3차원 객체 복원 등의 다양한 영상처리 연구에 모바일폰 카메라가 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 한국연구재단 국제협력사업의 지원을 받아 연구되었습니다(No.2012K2A1A2033107).

References

- Fryer, J., Mitchell, H., and Chandler, J.H. (2007), *Applications of 3D Measurement from Images*, Whittles Publishing, Scotland.
- Jung, S. (2011), Evaluation of long-term stability of interior orientation parameters of a non-metric camera, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 3, pp. 283-291. (in Korean with English abstract)
- Karras, G.E. and Mavrommati, D. (2001), Simple calibration techniques for non-metric cameras, *Proceedings of the International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA) International Symposium*, 18-21 September, Postdam, Germany.
- Lee, S., Yun, H., and Kim, D. (2012), *A Study on Introduction of Antenna Monitoring System and Accuracy Calculation of Collocation Surveying in Space Geodetic Observation Center*, NGII Publication No. 11-1611265-000083-01, National Geographic Information Institute, Suwon, Korea, 100p.(in Korean)
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., and McGlone, J.C. (2001), *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y.
- Oh, J.H., Lee, C.N., and Eo, Y.D. (2006), A photogrammetric network and object field design for efficient self-calibration of non-metric digital cameras, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 24, No. 3, pp. 281-288.
- Park, K. and Choi, S. (2012), Evaluation of the quantitative practical use of smart phone stereo cameras, *Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System*, Vol. 20, No. 2, pp. 93-100. (in Korean with English abstract)
- Peipe, J. and Stephani, M. (2003), Performance evaluation of

- a 5 megapixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry, *Proceedings of the XX International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing*, July 2003, Ancona, Italy, Vol. 34, pp. 259-262.
- Rieke-Zapp, D. and Peipe, J. (2006), Performance evaluation of a 33 megapixel Alpa 12 medium format camera for digital close range photogrammetry, *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium of Image Engineering and Vision Metrology*, 25-27 September, Dresden, Germany, unpaginated CD-ROM.
- Sanz-Ablanedo, E., Rodríguez-Pérez, J. R., Arias-Sánchez, P., and Armesto, J. (2009), Metric potential of a 3D measurement system based on digital compact cameras, *Sensors*, Vol. 9, Issue. 6, pp. 4178-4194.