

## 스마트폰 카메라의 기하학적 검정과 정확도 평가

# Geometric Calibration and Accuracy Evaluation of Smartphone Camera

김진수\* · 진청길\*\* · 이성규\*\*\* · 이선구\*\*\*\* · 최철웅\*\*\*\*\*

Kim, Jin Soo · Jin, Cheong Gil · Lee, Seong Kyu · Lee, Sun Gu · Choi, Chul Uong

### 要 旨

최근 이슈가 되어온 스마트폰에는 고해상도 카메라, Assisted GPS, 가속도계, 자이로스코프, 그리고 자기 계측 센서와 같이 측량에 직접 이용할 수 있는 다양한 센서들이 탑재되어 있다. 본 연구는 고해상도 영상을 제공하는 스마트폰 카메라를 검정하고 그 정확도를 평가함으로써, 사진측량에 스마트폰 영상의 활용 가능성을 제시하는데 그 목적을 둔다. 먼저, 스마트폰 카메라의 정확도 평가에 앞서 각 카메라의 렌즈 왜곡을 보정하기 위한 카메라 검정이 이루어졌고, 이 과정에서 광속조정에 의해 계산된 영상 좌표 및 대상물 좌표의 정확도를 분석하였다. 또한, 3차원 위치 결정에 있어 렌즈 왜곡 계수의 고려 유무에 따른 결과 분석이 이루어졌고, 최종적으로 측량용 카메라에 대한 스마트폰 카메라의 상대 정확도를 평가하였다. 그 결과, 스마트폰 카메라의 왜곡 보정에 있어 고차항의 방사 왜곡 계수도 고려되어야 하며, 측량용 카메라에 의한 결과와 미소한 차이를 나타내어 사진측량에 스마트폰 영상의 활용 가능성이 클 것으로 기대된다.

핵심용어 : 스마트폰, 카메라 검정, 정확도, 방사 왜곡

### Abstract

The smartphones which have been recently are embedded with high resolution quality camera, assisted GPS, accelerometer, gyroscope and various sensors including magnetometer sensor that could be directly used for measurement. This study aims to suggest the possible application of smartphone camera providing high resolution images in terms of photogrammetry by calibrating it and assessing its accuracy. First of all, prior to the accuracy assessment of smartphone camera, camera calibration was conducted to correct lens distortion of each camera and the accuracy of image coordinates and object coordinates calculated by bundle adjustment during this procedure was analyzed. Also regarding three-dimensional positioning, result analysis depending on considering lens distortion coefficients was conducted, and finally relative accuracy of smartphone camera on metric camera was assessed. The result showed that in terms of distortion correction of smartphone camera, also higher order symmetric radial lens distortion coefficients should be considered, and three dimensional position determined by smartphone images was a little difference from that by metric camera. Therefore it is expected that smartphone images have huge possibility to be used for photogrammetry.

Keywords : Smartphone, Camera Calibration, Accuracy, Symmetric Radial Lens Distortion

## 1. 서 론

최근 저가의 고해상도 CCD(charge-coupled device)와 CMOS(complementary metal-oxide -semiconductor) 센서의 개발로 인해 디지털 카메라의 수요가 지속적으

로 증가하고 있고, 이로 인해 디지털 카메라 기술의 활용 범위도 증대되고 있다. 또한, 고해상도 디지털 영상의 보다 손쉬운 획득으로 인해 디지털 카메라 기술은 컴퓨터 비전 및 수치사진측량 등과 같은 전문분야에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다(유환희 등, 2003).

2011년 8월 16일 접수, 2011년 9월 14일 채택

\* 종신회원 · (주)ZEN21 공학박사 (pknu9680@gmail.com)

\*\* 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 석사과정(rekime@nate.com)

\*\*\* 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사과정(geoslegend@gmail.com)

\*\*\*\* 한국항공우주연구원 위성정보연구소 영상활용기술팀 연구원(leesg@kari.re.kr)

\*\*\*\*\* 교신저자 · 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 교수(cuchoi@pknu.ac.kr)

특히, 수치사진측량에 있어 고해상도 비측량용 카메라 활용이 지속적으로 증대되고 있다(정수 등, 2005). 그러나, 대부분의 상업용 디지털 카메라는 수치사진측량의 용도로 설계되어 있지 않기 때문에, 측량의 목적으로 사용할 때 가장 유의해야 할 점은 카메라 렌즈에 포함된 왜곡을 보정하는 것이다(정성수 등, 2008). 이러한 왜곡을 보정하기 위해 카메라 검정(calibration)이 필요하며, 사진측량에 관측 정확도는 센서 품질과 내부 표정의 정확한 모델링에 직접적으로 관계가 있다. 이로 인해 비측량용 카메라 렌즈의 검정에 관련한 연구가 국내외에서 활발히 이루어졌다.

이진덕(1996)은 스틸 비디오 카메라에 대한 기하학적 검정을 수행하였고, 유복모 등(1997)은 근거리 사진 측량에 CCD 카메라의 적용을 위한 연구에서 CCD 카메라 검정 및 이와 관련된 정확도 향상기법을 제시하였다. 유희희 등(2003)은 줌렌즈 CCD 카메라의 기하학적 검정을 수행하였고, 이석군(2005)은 다양한 센서에 대한 내부표정을 수행하였다. 오재홍 등(2006)은 다양한 조건에 따른 카메라 자체 검정의 정확도를 분석하였다. 정성수 등(2008)은 일반 카메라의 촬영 조건하에서 줌 조작 시 렌즈 모델을 모델링하여 그 변화 양상을 조사하였고, 정수(2009)는 콤팩트 디지털 카메라 검정을 수행하고 이를 이용한 3차원 형상을 해석하였다. 국외의 경우, 1970년대 초 해석적 자체검정에 있어 8 매개 변수 식이 제안된 이후(Kenefick 등, 1972), 영상의 축척 및 비직교성분을 나타내는 2개의 변수를 추가한 10 매개변수 식이 제안된 바 있다(Fraser, 1997). Habib와 Morgan(2005)은 저가의 디지털 카메라의 기하학적 검정과 안정성을 분석하였고, Fraser와 Al-Ajlouni(2006)은 줌렌즈 카메라의 검정방법을 제안하고 초점거리의 변화에 따른 각 요소의 변화를 선형관계로 근사하였다. Rieke-Zapp와 Nearing(2005)는 토양 침식을 관측하기 위한 연구에서 디지털 카메라 검정을 선행하였고, Chandler 등(2005)은 4 종류의 비측량용 카메라를 이용하여 근접한 위치에서 표면을 관측하는 연구를 수행하였다.

최근 MEMS(micro-electro mechanical systems) 기술의 발달로 첨단 기능을 가진 센서들이 초소형화, 저가격화 되는 추세이고, 이에 모바일 폰에 내장된 카메라의 해상도 또한 높아져 약 800만 화소의 영상을 지원할 수 있게 되었다. 모바일 폰에 내장된 카메라를 사진 측량에 활용하기 위한 연구는 Akca와 Gruen(2009)에 의해 시도되었다. 이들은 2 종류의 모바일 폰에 내장된 카메라와 2 종류의 스틸 비디오 카메라를 검정하고, 각각의 기하학적 특징을 비교 평가하였고, 모바일 폰에

의해 획득된 영상을 분석한 결과, 그 절대 정확도가 0.5pixel 이내라 보고했다. 국내의 경우 고해상도의 영상을 지원하는 다양한 모바일 폰이 지원되고 있음에도 불구하고, 아직 사진측량에 모바일 폰에서 제공되는 영상을 활용하기 위한 시도가 이루어지지 않고 있다. 특히, 고해상도 카메라, Assisted GPS, 가속도계, 그리고 자기 계측 센서와 같이 측량에 직접 이용할 수 있는 센서를 내장하고 있는 스마트폰의 활용에 관련한 연구가 미비한 실정이다. 국외의 경우, Takeuchi 와 Kennelly (2010)는 스마트폰에 내장된 가속도계를 이용한 지진 감지 어플리케이션을 개발하였고, 미국의 캘리포니아 대학의 연구진들은 모의 지진실험을 통해 스마트폰에 내장된 가속도계의 성능을 분석하고, 그것을 활용하기 위한 연구를 진행하고 있다(CITRIS, 2011). 그러나, 국외에서 스마트폰을 활용한 대부분의 연구는 내장된 각각의 센서의 활용에 국한되었고, 스마트폰에서 제공되는 고해상도 영상을 사진측량에 활용한 연구는 아직 수행되지 않았다.

본 연구는 최근 이슈가 되고 있는 스마트폰에 내장된 다양한 센서 중 고해상도 영상을 제공하는 카메라를 검정하고, 그 정확도를 평가함으로써 사진측량에 스마트폰 영상의 활용 가능성을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 500만 화소 및 800만 화소를 지원하는 2대의 스마트폰을 이용하였고, 스마트폰 카메라의 정확도 평가를 위해 2대의 측량용 카메라를 이용한 촬영도 동시에 수행하였다. 스마트폰 카메라의 정확도 평가에 앞서 각 카메라의 렌즈 왜곡을 보정하기 위한 카메라 검정이 우선적으로 이루어졌고, 이 과정에서 광속조정에 의해 계산된 영상 좌표 및 대상물 좌표의 정확도를 분석하였다. 끝으로 렌즈 왜곡 계수의 고려 유무에 따른 광속조정 계산 결과를 비교·분석하였고, 측량용 카메라에 대한 스마트폰 카메라의 상대 정확도를 평가하였다.

## 2. 이론적 고찰

카메라 모델은 그림 1과 같이 대상 공간 내의 점 P의 3차원 좌표와 영상면 상의 좌표간의 수학적 상관관계로 정의된다. 일반적으로 카메라 모델은 카메라의 모든 광학적, 기하학적 매개변수를 직접적으로 이용하여 정의된다(Pedersini 등, 1999).

또한, 하나의 카메라 모델은 내부표정요소와 외부표정요소의 결합으로 정의될 수 있고(Wolf and Dewitt, 2000), 식 (1)은 대상 공간 내의 점 P, 투영중심 O', 그리고 초점면상의 점 P' 사이의 관계를 나타낸다.

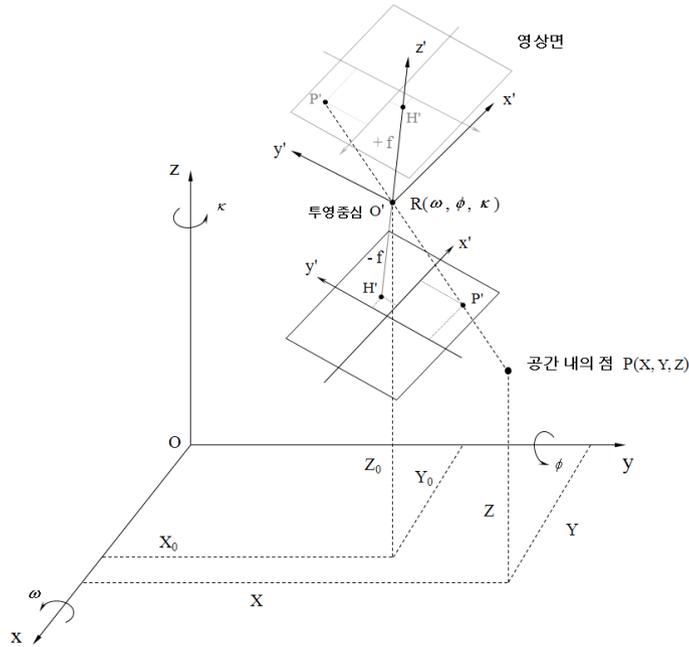


그림 1. 기하학적 카메라 모델

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x' - x_p \\ y' - y_p \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $X, Y, Z$ 는 점  $P$ 의 대상 공간좌표,  $X_0, Y_0, Z_0$ 는 투영중심  $O'$ 의 대상 공간좌표,  $x', y'$ 는 초점면상의 점  $P'$ 의 영상좌표,  $x_p, y_p$ 는 초점면 상의 주점  $H'$ 의 영상좌표,  $f$ 는 초점 거리,  $R$ 는 센서와 대상 공간 좌표 시스템간의 회전 매트릭스,  $\lambda$ 는 각 영상 레이(ray)에 대한 축척 인자이다.

사진측량은 대상 공간 내의 점  $P$ , 투영중심  $O'$ , 그리고 초점면상의 점  $P'$ 가 일직선을 이룬다는 가정을 바탕으로 하는 공선조건식을 근거로 한다. 그러나 실제 카메라 렌즈는 이상적인 곡률을 가질 수 없다. 이로 인해 광선은 렌즈를 통과하여 영상면까지 완전 일직선으로 진행할 수 없기 때문에 카메라 렌즈의 왜곡에 대한 검정이 반드시 필요하다. 사진측량에서 정확하고 신뢰할 수 있는 3차원 위치정보를 추출하기 위해서는 카메라의 정확한 내부표정요소가 필요하며, 이러한 요소를 결정하는 과정을 카메라 검정이라 한다. 비측량용으로 제작된 카메라는 측량용 카메라에 비해 영상 획득 과정에서 기하학적으로 불안정하고, 카메라 검정에 어려움이 따른다(임형민, 2010). 비측량용 카메라는 해석적

검정기법에 의해 검정될 수 있고, 이는 카메라 렌즈의 왜곡을 수정할 수 있는 수학적인 모델을 적용한 광속조정법에 의해 계산될 수 있다.

카메라의 렌즈 왜곡은 영상면에 위치한 영상점의 위치 정확도를 저하시킨다. 이러한 렌즈 왜곡은 방사(symmetric radial), 비대칭(decentering), 비정방형(affinity), 그리고 비직교성분(non-orthogonality) 왜곡으로 구성된다. 보정된 영상 좌표  $x', y'$ 는 식 (2)에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} x' &= \bar{x} + d\bar{x} = \bar{x} - C_1\bar{x} + C_2\bar{y} + dx' \\ y' &= \bar{y} + d\bar{y} = \bar{y} + C_2\bar{x} + dy' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x'$ 와  $y'$ 는 왜곡을 고려한 초점면에서의 좌표이고,  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 왜곡을 고려하지 않은 초점면에서의 좌표이다.  $d\bar{x}$ 와  $d\bar{y}$ 는 왜곡항,  $dx'$ 와  $dy'$ 는 방사 및 비대칭 왜곡항,  $C_1$ 은  $x$ 방향으로의 축척인자, 그리고  $C_2$ 는 비직교성분 인자를 나타낸다. 비정방형과 비직교성분 왜곡은 그 크기가 매우 작고, 일반적으로 렌즈 왜곡은 방사 및 비대칭 왜곡만을 고려한다. 식 (3)은 방사 및 비대칭 왜곡을 표현한 것이다. 방사 왜곡은 영상의 주점에 대해 대칭하고, 방사 왜곡의 보정량은 방사 거리  $r$ 에 대한 고차 다항식에 의해 계산된다(Wolf

and Dewitt, 2000). 또한, 비대칭 왜곡은 렌즈들의 중심이 일치하지 않게 되어 발생하는 오차이고, 이것은 방사 왜곡에 비해 왜곡에 미치는 영향이 매우 작다.

$$\begin{aligned} dx' &= \overline{x'}(A_1r^2 + A_2r^4 + A_3r^6) \\ &\quad + B_1(r^2 + 2\overline{x'}^2) + 2B_2\overline{x'}\overline{y'} \\ dy' &= \overline{y'}(A_1r^2 + A_2r^4 + A_3r^6) \\ &\quad + 2B_1\overline{x'}\overline{y'} + B_2(r^2 + 2\overline{y'}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $A_1, A_2, A_3$ 는 방사 왜곡 계수,  $B_1, B_2$ 는 비대칭 왜곡 계수, 그리고  $r$ 은 방사 거리  $\sqrt{\overline{x'}^2 + \overline{y'}^2}$ 이다.

### 3. 스마트폰 카메라의 기하학적 검정

사진측량에서 측정 정확도는 센스 품질과 내부 표정의 정확한 모델링에 직접적으로 관계가 있다. 그러므로, 카메라 검정은 사진측량 시스템에서 필수적인 부분이다. 본 연구에 사용한 카메라는 그림 2와 같이 삼성 갤럭시 S와 갤럭시 S2이며, 이것에 내장된 카메라 렌즈는 저가형 렌즈로 가장 저렴한 단렌즈를 사용한다. 삼성 갤럭시 S에 내장된 카메라는 삼성전자에서 제작한 S5K5CAG CMOS 센서를 갤럭시 S2는 S5K3H1GX

CMOS 센서를 각각 사용하며, 갤럭시 S는 영상처리 IC로 NEC MC-10170을 사용한다. 일반적으로 모바일 폰에 내장된 렌즈는 비측량용으로 제작된 렌즈이다. 즉, 측량용으로 설계되어 있지 않아 측량용 카메라에 비해 렌즈 왜곡이 매우 크다. 그러므로, 스마트폰을 측량 목적으로 사용할 때 가장 중요한 것은 렌즈 왜곡을 보정하는 것이다.

스마트폰 카메라의 기하학적 검정과 그 정확도를 평가하기 위해 근접 수치사진측량에서 널리 이용되고 있는 측량용 카메라와의 비교 평가가 이루어졌다. 이를 위해, 갤럭시 S와 갤럭시 S2, 그리고 2대의 측량용 카메라(Rollei d7metric과 d30metric)가 사용되었다. 본 연구에 사용된 카메라의 특성은 표 1과 같다. 측량용 카메라는 CCD 센서가 내장되어 있고, 스마트폰은 CCD 센서보다 작은 CMOS 센서를 내장하고 있다. 또한 스마트폰에 내장된 렌즈는 측량용 보다 작고, 그 가격도 매우 저렴하다.

카메라 검정을 위해 그림 3과 같이 비행기 격납고 바닥(5.0 × 3.8m)에 높은 대비 특성을 가진 직경 8cm의 원형 타겟(signalized targets)을 부착하고, 높이 6m에 설치된 크레인에서 사진 촬영이 이루어졌다. 측량용 카메라와 달리 스마트폰 카메라는 일반적으로 자동 초점 기능으로 운용되기 때문에, 촬영 시 자동 초점 기능에

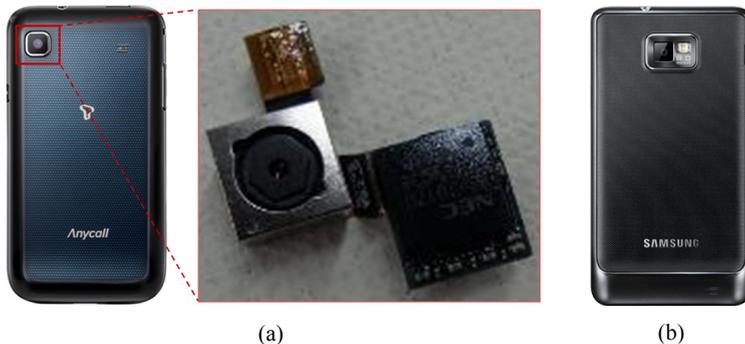


그림 2. 본 연구에 사용된 스마트폰. (a) 갤럭시 S1의 모습 및 내장된 카메라와 영상 처리 IC 모습, (b) 갤럭시 S2

표 1. 본 연구에 사용된 측량용 카메라와 스마트폰 카메라의 특성

구 분	측량용 카메라		스마트폰 카메라	
	Rollei d7metric	Rollei d30metric	유형 A	유형 B
센서 유형	CCD	CCD	CMOS	CMOS
센서 크기	2/3 "	2/3 "	1/5 "	1/3.2 "
픽셀 크기	7.0 μm	7.0 μm	1.4 μm	1.4 μm
영상 포맷	1280 × 1024	1280 × 1024	2552 × 1920	3264 × 2448
초점 거리	7.3mm	10, 30mm	3.79mm	3.97mm
출력 포맷	TIFF와 BMP	TIFF와 BMP	JPEG	JPEG 등

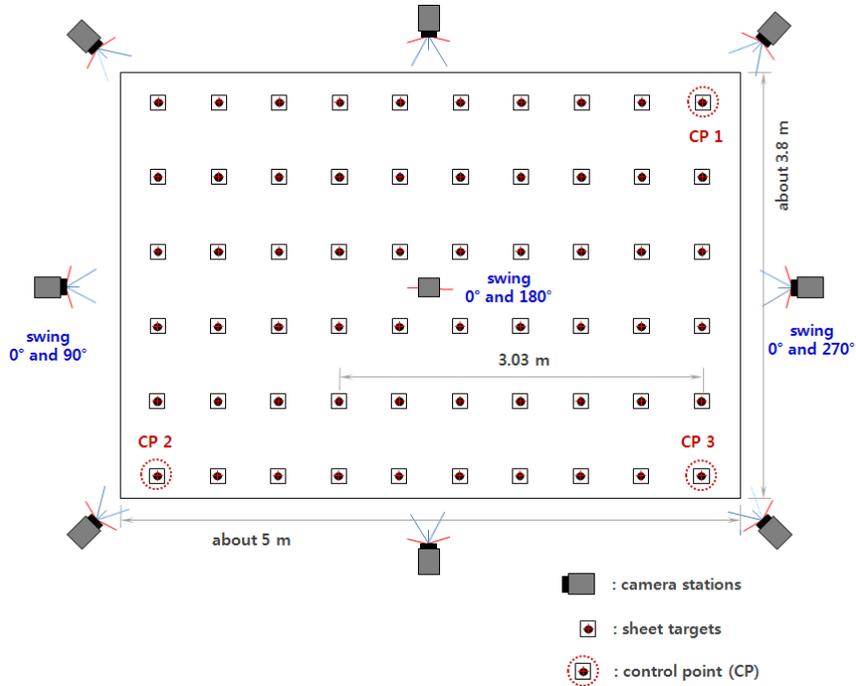


그림 3. 카메라 검정을 위한 원형 타겟 배치와 촬영 위치

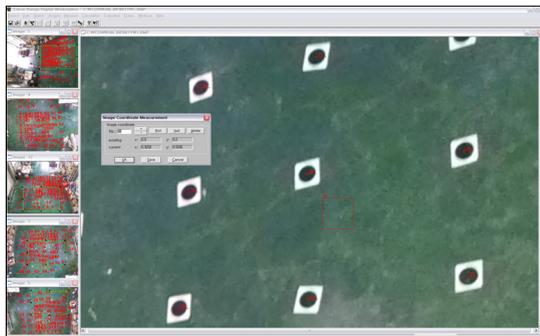
의한 초점 거리의 변화가 발생할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 안드로이드 SDK 내의 카메라 초점 모드를 자동이 아닌 무한대 초점으로 설정하고, 사진을 촬영하였다.

#### 4. 스마트폰 카메라 검정 결과 및 정확도 평가

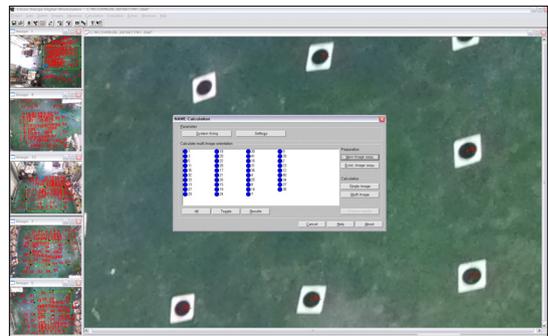
##### 4.1 카메라 검정 결과

카메라 렌즈의 검정 방법에는 DLT(direct linear transformation) 기법, Tsai 기법, 그리고 전통적 사진측

량의 해법에 포함된 해석적 자체검정(self-calibration) 기법이 있다. 일반적으로 사진측량학에 사용되고 공식화된 기하학적 카메라 모델은 다양하지만, 센서 표정과 검정은 주로 광속조정(bundle adjustment)에 의해 수행된다(Brown, 1971). 이러한 방법과 모델은 Clarke과 Fryer(1998)에 의해 고찰된 바 있다. 광속조정은 추출된 검정 계수의 정밀도와 신뢰도 평가와 함께 모든 시스템 계수의 동시 결정을 가능하게 한다. 본 연구에 사용된 카메라의 내부 표정 요소는 Rollei사에서 개발한 CDW(Close-range Digital Workstation)에 의해 계산



(a) 각 영상의 표정 모습



(b) 다중 영상 표정 모습

그림 4. CDW를 이용한 카메라 검정 모습

표 2. 카메라 검정에 이용된 각 카메라별 사진매수, 표정점 개수. 또한, 광속조정에 의해 계산된 영상 좌표 및 대상물 좌표의 RMS 오차

구 분		측량용 카메라		스마트폰 카메라	
		d7metric	d30metric	유형 A	유형 B
사진매수		16	24	22	22
표정점 개수		50	67	67	96
영상 좌표의 RMS 오차	x (pixel)	0.16	0.28	0.19	0.30
	y (pixel)	0.29	0.35	0.21	0.28
대상물 좌표의 RMS 오차	X (mm)	0.22	0.53	0.28	0.40
	Y (mm)	0.14	0.25	0.22	0.31
	Z (mm)	0.34	0.72	0.40	0.56

되었다. 그림 4는 CDW를 이용한 카메라 검정 중 각 영상에서의 표정점 추출 및 다중 영상 표정 모습을 나타낸 것이다. 다중 영상 표정 단계에서 대상점들의 3차원 좌표 결정을 위한 기준계 설정은 그림 3과 같이 기준점 3개가 사용되었고, 이러한 기준계를 토대로 최종적으로 광속조정이 이루어졌다.

표 2는 각 카메라별 검정에 사용된 사진매수, 표정점 개수, 그리고 광속조정에 의한 계산에서 영상 좌표(image coordinate)와 대상물 좌표(object coordinate)에 발생된 RMS 오차를 나타낸 것이다. 광속조정 결과, 영상 좌표의 RMS 오차는  $x, y$  방향으로 d7metric은 0.16, 0.29pixel, d30metric은 0.28, 0.35pixel로 나타났고, 스마트폰 유형 A는 0.19, 0.21pixel, 유형 B는 0.30, 0.28pixel로 나타났다. 비측량용 카메라를 이용한 3차원 위치 결정에 관련한 이전의 연구에 따르면, Rieke-Zapp와 Nearing(2005), D'Amelio와 Brutto(2009)는 고해상도 카메라 검정에 0.2pixel 이내의 RMS 오차가 나타남을 발표했고, RMS 오차가 0.5pixel 이내의 결과를 보고한 연구도 있었다(Hinz et al., 2009; Akca et al., 2009). 특히, Akca et al. (2009)는 다양한 종류의 카메라 검정을 시도하였고, 모바일 폰에 내장된 카메라의 정확도가 0.5pixel 이내임을 밝

혔다. 또한, Parian과 Gruen(2010), Lagüela 등(2011)은 다양한 카메라의 정확도 평가에 관련한 연구를 수행하여 RMS 오차가 준측량용 카메라의 경우 1pixel 이내, 열화상 카메라와 파노라믹 카메라의 경우 1pixel 이상으로 나타남을 발표했다. 본 연구에 사용된 스마트폰 카메라는 비교 평가를 위해 사용된 측량용 카메라의 광속조정 결과에 상당하는 결과를 보였을 뿐만 아니라, 이에 관련한 최근 연구 결과에 상당하거나 그보다 우수한 결과를 나타냈다.

대상물 좌표의 RMS 오차는 X, Y, Z 방향별로 d7metric은 0.22, 0.14, 0.34mm, d30metric은 0.53, 0.25, 0.72mm로 나타났고, 스마트폰 유형 A는 0.28, 0.22, 0.40mm, 유형 B는 0.40, 0.31, 0.56mm로 나타났다. 카메라 검정에 의한 각 카메라의 내부 표정 요소는 표 3과 같고, 스마트폰 카메라의 경우 제품 특성에 제시된 초점 거리에 비해 약 0.1mm 크게 나타났다.

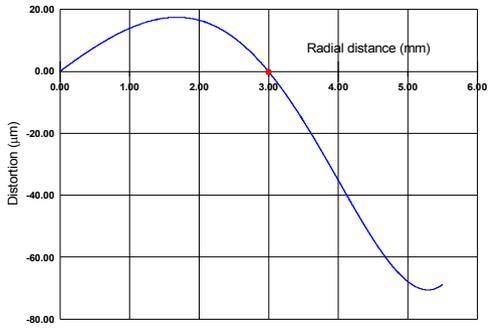
4.2 스마트폰 카메라 정확도 평가

렌즈 왜곡은 주로 방사 왜곡에 의해 발생되며, 방사 거리  $r$ 에 따른 방사 왜곡량( $\delta r$ )은 식 (4)에 의해 계산된다.

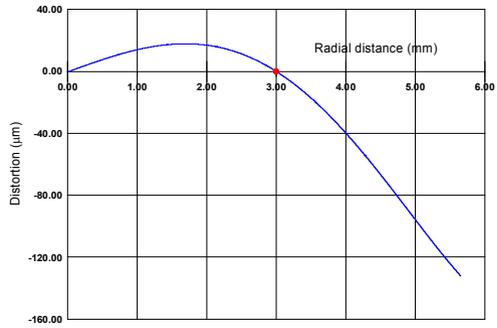
$$\delta r = A_1 r(r^2 - r_0^2) + A_2 r(r^4 - r_0^4) + A_3 r(r^6 - r_0^6) \quad (4)$$

표 3. 카메라 검정에 의한 각 카메라의 내부 표정 요소

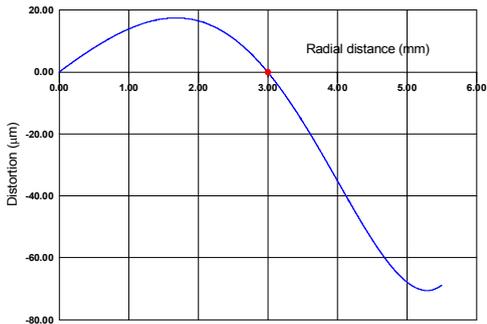
구 분		측량용 카메라		스마트폰 카메라	
		d7metric	d30metric	유형 A	유형 B
초점 거리 (mm)	ck	7.5626	10.4913	3.8441	4.0659
주점 위치 (mm)	xH	-0.1883	0.8149	-0.0005	-0.1057
	yH	0.2595	0.2749	-0.1036	0.0164
방사 왜곡 계수	A <sub>1</sub>	-2.037e-3	-1.457e-3	6.174e-3	6.342e-3
	A <sub>2</sub>	2.286e-5	2.542e-5	-3.005e-3	-1.964e-3
	A <sub>3</sub>	4.304e-7	-9.034e-6	2.959e-4	1.496e-4
비대칭 왜곡 계수	B <sub>1</sub>	8.543e-5	7.774e-5	2.011e-4	3.486e-4
	B <sub>2</sub>	-7.057e-5	8.832e-5	2.093e-5	-3.949e-4
부가적 왜곡 계수	C <sub>1</sub>	-1.028e-4	-8.574e-4	9.685e-5	6.176e-4
	C <sub>2</sub>	5.440e-5	-4.044e-3	2.822e-4	7.478e-4



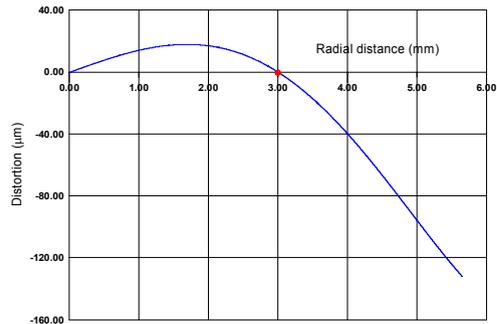
(a) A<sub>2</sub> 이후의 항도 고려된 경우 (d7metric)



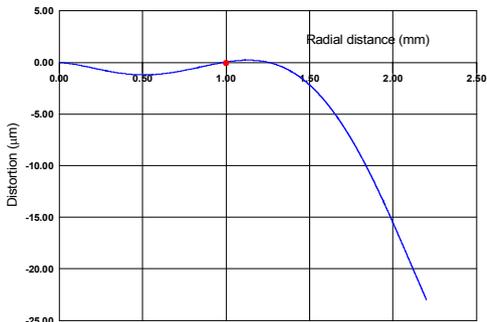
(b) A<sub>1</sub>과 A<sub>2</sub>만 적용된 경우 (d7metric)



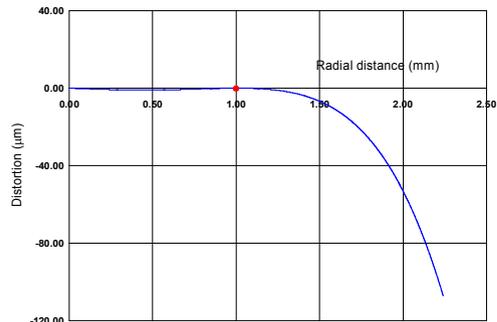
(c) A<sub>2</sub> 이후의 항도 고려된 경우 (d30metric)



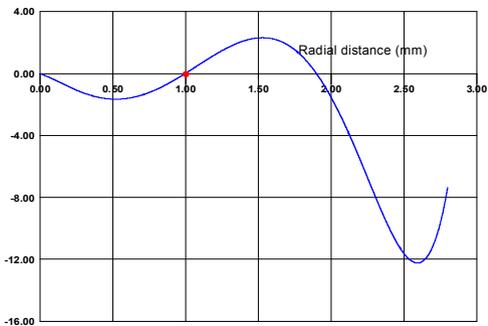
(d) A<sub>1</sub>과 A<sub>2</sub>만 적용된 경우 (d30metric)



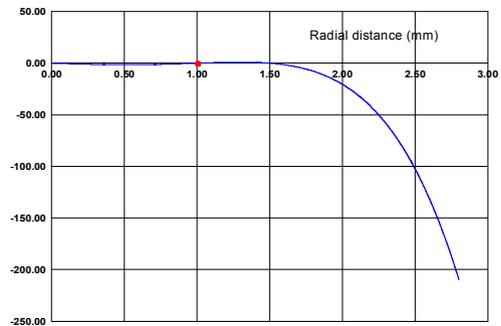
(e) A<sub>2</sub> 이후의 항도 고려된 경우 (유형 A)



(f) A<sub>1</sub>과 A<sub>2</sub>만 적용된 경우 (유형 A)



(g) A<sub>2</sub> 이후의 항도 고려된 경우 (유형 B)



(h) A<sub>1</sub>과 A<sub>2</sub>만 적용된 경우 (유형 B)

그림 5. 카메라 검정에 의한 각 카메라별 방사방향 렌즈 왜곡 곡선

표 4. 각 왜곡 계수의 고려 여부에 따른 광속조정의 계산 결과 비교 (단위 :m)

구분	Case <sup>a</sup>	Case <sup>b</sup>	Case <sup>c</sup>	Case <sup>d</sup>	Case <sup>e</sup>
RMS-X	0.00040	0.00040	0.00054	0.00248	0.00644
RMS-Y	0.00031	0.00031	0.00041	0.00093	0.00651
RMS-Z	0.00056	0.00057	0.00073	0.00185	0.01982

Case<sup>a</sup> : 모든 왜곡 계수를 고려한 경우  
 Case<sup>b</sup> : 방사 및 비대칭 왜곡 계수를 고려한 경우  
 Case<sup>c</sup> : 방사 왜곡 계수만 고려한 경우  
 Case<sup>d</sup> : 방사 왜곡 계수 중  $A_1$ 과  $A_2$  계수만 고려한 경우  
 Case<sup>e</sup> : 방사 왜곡 계수 중  $A_1$  계수만 고려한 경우

여기서,  $r_0$ 는 방사 왜곡 곡선에서 왜곡이 두 번째로 0이 될 때의 반경을 의미한다. 일반적으로, 방사 왜곡 계수 중  $A_2$  이후의 항은 그 양이 크지 않기 때문에 왜곡 보정에 고려되지 않는 경향이 있다(Fraser, 1997). 그러나 스마트폰과 같이 비측량용으로 제조된 카메라의 경우 저가의 렌즈 특성상  $A_2$  이후의 항의 고려 여부가 렌즈의 왜곡에 어떠한 영향을 미치는지 알 수 없다. 따라서 사용된 각 카메라별로 카메라의 검정에 의해 계산된 왜곡 계수 중  $A_2$  이후의 항을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 왜곡량의 변화 패턴을 분석하였다. 그림 5는 왜곡 계수 중  $A_2$  이후의 항의 고려 여부에 따른 각 카메라별 렌즈 왜곡 곡선을 나타낸 것이다. 측량용 카메라의 경우  $A_2$  이후의 항의 고려 여부에 따

른 왜곡 곡선의 변화가 크지 않은 반면, 스마트폰 카메라의 경우 왜곡 곡선의 변화가 크게 나타났다. 이는  $A_2$  이후의 항도 스마트폰 카메라의 왜곡 보정에 고려되어야 함을 보여준다.

다음으로 스마트폰 카메라 유형 B에 의해 획득된 영상을 처리함에 있어 각 왜곡 계수의 고려에 따른 광속조정의 계산 결과를 분석하였고, 그 결과는 표 4와 같다.

표 4와 같이 모든 왜곡 계수를 고려한 경우와 방사 및 비대칭 왜곡 계수를 고려한 경우는 광속조정의 계산 결과에 미소한 차이를 보였다. 또한 방사 왜곡 계수만을 고려한 경우 비대칭 왜곡 계수를 함께 고려한 경우에 비해 광속조정의 RMS 오차가 조금 크게 나오는 경향을 보였고, 방사 왜곡 계수 중  $A_1$ 과  $A_2$  계수만 고려한 경우와  $A_1$  계수만 고려한 경우에 RMS 오차가 매우

표 5. 각 카메라에 의한 15개 표정점의 3차원 위치 결정 결과 (단위 :m)

Point	측량용 카메라						스마트폰 카메라					
	d7metric			d30metric			유형 A			유형 B		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	3.277	2.519	0.011	3.267	2.514	0.009	3.273	2.513	0.006	3.270	2.520	0.000
2	3.284	1.509	0.010	3.278	1.508	0.008	3.280	1.505	0.005	3.276	1.509	0.009
3	3.345	0.554	0.004	3.339	0.553	0.003	3.342	0.552	0.002	3.340	0.555	0.019
4	2.286	1.836	0.011	2.280	1.835	0.001	2.284	1.832	0.002	2.279	1.835	0.005
5	2.351	1.023	0.012	2.344	1.022	-0.004	2.349	1.020	-0.003	2.344	1.021	0.016
6	2.500	0.392	-0.003	2.495	0.391	-0.003	2.497	0.391	-0.005	2.496	0.392	0.023
7	1.876	-0.322	0.002	1.874	-0.321	-0.002	1.875	-0.322	0.001	1.870	-0.322	0.019
8	1.364	1.059	-0.002	1.362	1.058	-0.005	1.363	1.057	-0.005	1.360	1.058	0.012
9	0.427	1.713	0.003	0.428	1.712	-0.010	0.427	1.709	-0.010	0.425	1.711	0.006
10	0.350	0.906	-0.007	0.352	0.905	-0.007	0.351	0.904	-0.009	0.344	0.905	0.010
11	0.302	0.242	0.003	0.303	0.242	-0.004	0.303	0.242	-0.005	0.297	0.242	0.011
12	0.323	-0.300	-0.011	0.323	-0.301	0.005	0.324	-0.300	0.005	0.319	-0.298	0.006
13	-0.442	1.679	-0.008	-0.440	1.679	-0.015	-0.440	1.676	-0.015	-0.447	1.677	0.005
14	-0.432	0.958	0.000	-0.430	0.957	-0.012	-0.430	0.955	-0.013	-0.437	0.956	0.009
15	-0.303	-0.298	0.000	-0.303	-0.298	0.005	-0.302	-0.297	0.003	-0.308	-0.298	0.002

표 6. d7metric 카메라 결과와 나머지 3대 카메라 결과간의 차이 비교 (단위 : m)

Point	d30metric - d7metric			유형 A - d7metric			유형 B - d7metric		
	$v_x$	$v_y$	$v_z$	$v_x$	$v_y$	$v_z$	$v_x$	$v_y$	$v_z$
1	-0.010	-0.005	-0.002	-0.004	-0.006	-0.005	-0.006	0.001	-0.011
2	-0.006	-0.001	-0.002	-0.004	-0.004	-0.005	-0.007	0.000	-0.001
3	-0.006	-0.001	-0.001	-0.003	-0.002	-0.002	-0.005	0.001	0.015
4	-0.006	-0.001	-0.010	-0.002	-0.004	-0.009	-0.007	-0.001	-0.006
5	-0.007	-0.001	-0.016	-0.002	-0.003	-0.015	-0.007	-0.002	0.004
6	-0.005	-0.001	0.000	-0.003	-0.001	-0.002	-0.004	-0.001	0.026
7	-0.002	0.001	-0.004	-0.001	0.000	-0.001	-0.006	0.001	0.017
8	-0.002	-0.001	-0.003	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.001	0.014
9	0.001	-0.001	-0.013	0.000	-0.004	-0.013	-0.002	-0.002	0.003
10	0.002	-0.001	0.000	0.001	-0.002	-0.002	-0.006	-0.001	0.017
11	0.001	0.000	-0.007	0.001	0.000	-0.008	-0.005	0.000	0.008
12	0.000	-0.001	0.016	0.001	0.000	0.016	-0.004	0.002	0.017
13	0.002	0.000	-0.007	0.002	-0.003	-0.007	-0.005	-0.001	0.013
14	0.002	-0.001	-0.012	0.002	-0.003	-0.013	-0.005	-0.001	0.009
15	0.000	0.000	0.005	0.001	0.001	0.003	-0.005	0.000	0.002
Max	0.002	0.001	0.016	0.002	0.001	0.016	-0.002	0.002	0.026
Min	-0.010	-0.005	-0.016	-0.004	-0.006	-0.015	-0.007	-0.002	-0.011
Mean	-0.002	-0.001	-0.004	-0.001	-0.002	-0.004	-0.005	0.000	0.008
Std.Dev.	0.004	0.001	0.008	0.002	0.002	0.008	0.001	0.001	0.010

크게 발생함을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 스마트폰 카메라에 의한 3차원 위치 결정에 있어 방사 왜곡 계수 중  $A_2$  이후의 항이 꼭 고려되어야 함을 보여준다.

끝으로 각 카메라별로 카메라 검정에서 결정된 원형 타깃의 3차원 대상물 좌표 중 동일한 위치에 설치된 타깃 15개에 대한 광속조정 결과는 표 5와 같다.

사진측량에서 삼각측량 및 삼각수준측량 등과 같은 방법에 의해 결정된 검사점(check point)을 이용한 정확도 평가가 주로 이용되고 있지만, 원형 타깃에서 중심의 3차원 위치를 정확히 결정하기엔 많은 어려움이 있다. 따라서 표 2와 같이 광속조정에서 가장 양호한 결과를 나타낸 d7metric 카메라의 결과를 최확값으로 가정하였다. 또한 이것과 나머지 3개 카메라 결과와의 차이를 분석함으로써, 측량용 카메라에 대한 스마트폰 카메라의 상대 정확도를 평가하였고, 그 결과는 표 6과 같다. d7metric과 나머지 3개 카메라간 차이의 평균값과 표준편차는 d30metric의 경우 방향별로  $-0.002 \pm 0.004m$ ,  $-0.001 \pm 0.001m$ ,  $-0.004 \pm 0.008m$ , 스마트폰 유형 A는  $-0.001 \pm 0.002m$ ,  $-0.002 \pm 0.002m$ ,  $-0.004 \pm 0.008m$ , 스마트폰 유형 B는  $-0.005 \pm 0.001m$ ,  $0.000 \pm 0.001m$ ,  $0.008 \pm 0.010m$ 로 나타났다. 이상과 같이 스마트폰 영상에 의해 결정된 3차원 위치는 높은 측정 정확도를 가진 측량용 카메라에 의한 결과와 미소한

차이를 나타내어, 지상사진측량에 스마트폰 영상의 활용 가능성이 클 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 이슈가 되고 있는 스마트폰 영상의 활용 가능성을 평가하기 위해 스마트폰에 내장된 카메라 검정을 수행하고, 스마트폰 영상으로부터 결정된 3차원 위치의 정확도를 평가하였다.

스마트폰 카메라의 기하학적 검정과 그 정확도 평가를 위해 측량용 카메라에 의한 결과와의 비교, 분석이 이루어졌다. 먼저, 카메라 검정에서 광속조에 의해 계산된 영상 좌표의 RMS 오차는  $x$ ,  $y$  방향별로 스마트폰 유형 A는 0.19, 0.21pixel, 유형 B는 0.27, 0.23pixel로 나타났고, 이는 측량용 카메라의 광속조정 결과에 상당하는 결과일 뿐만 아니라, 비측량용 카메라에 관련한 최근 연구 결과에 상당하거나 그보다 우수한 결과이다. 또한 대상물 좌표의 RMS 오차는 X, Y, Z 방향별로 스마트폰 유형 A는 0.28, 0.22, 0.40mm, 유형 B는 0.33, 0.25, 0.44mm로 나타났다.

광속조에 의한 대상물 좌표 결정에 있어 렌즈 왜곡 계수의 고려 유무에 따른 광속조정 계산 결과를 비교 분석하였다. 그 결과, 스마트폰 카메라의 경우 방사 왜곡 계수 중  $A_2$  이후 항의 고려 여부에 따른 왜곡 곡선

의 변화가 크게 나타나, 스마트폰 카메라의 왜곡 보정에 있어  $A_2$  이후의 항도 꼭 고려되어야 한다고 판단된다. 아울러 각 왜곡 계수의 고려에 따른 광속조정의 계산 결과를 분석한 결과, 방사 왜곡 계수 중  $A_1$ 과  $A_2$  계수만 고려한 경우에 RMS 오차가 매우 크게 발생하였다.

끝으로, 광속조정에서 가장 양호한 결과를 나타낸 측량용 카메라에 대한 스마트폰 카메라의 상대 정확도를 평가한 결과, 스마트폰 영상에 의해 결정된 3차원 위치가 높은 정확도를 가진 측량용 카메라에 의해 결정된 3차원 위치간의 상대 정확도 분석에서 미소한 차이를 나타내어 사진측량에 스마트폰 영상의 활용 가능성이 클 것으로 판단된다. 또한, 스마트폰에는 고해상도 카메라, GPS, 가속도계, 자이로스코프, 그리고 자기 계측 센서와 같이 측량에 직접 이용할 수 있는 다양한 센서들이 탑재되어 있어, 향후 이러한 센서의 검정에 관련한 지속적인 연구가 이루어 질 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 국토해양부 영남씨그랜트의 지원을 받아 국토해양연구개발사업(D10503311H4100001E0)에 의해 수행됨.

### 참고문헌

- 오재홍, 이창노, 어양담, 2006, "비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 선정", *한국측량학회지*, 제24권, 제3호, pp.281-288.
- 유복모, 이석근, 최송욱, 김기홍, 1997, "근거리 사진측량을 위한 CCD 사진기 검정에 관한 연구", *한국지형공간정보학회지*, 제5권, 제1권, pp.159-165.
- 유환희, 정상용, 김성삼, 2003, "줌렌즈 CCD 카메라의 기하학적 검정 정확도 평가", *한국측량학회지*, 제21권, 제3호, pp.245-254.
- 이석근, 2005, "여러 가지 영상 형상 센서들의 내부표정에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제3D호, pp.503-508.
- 이진덕, 1996, "산업정밀측정에서 수치영상을 이용한 근접사진측량의 효율적 응용", *한국측량학회지*, 제14권, 제1호, pp.17-25.
- 임형민, 2010, 무인항공기를 이용한 소규모 지역의 3차원 공간정보 구축 및 갱신, 박사학위논문, 충북대학교, p.64.
- 정성수, 허준, 우선규, 2008, "초점거리 변화에 따른 렌즈 왜곡의 경험적 모델링", *한국측량학회지*, 제26권, 제1호, pp.93-100.
- 정수, 2009, "비측량용 카메라를 이용한 3차원 형상 해석", *한국지형공간정보학회지*, 제17권, 제2호, pp.91-99.
- 정수, 이창노, 오재홍, 2005, "직접선형변환 매개변수로부터 물리적 사진기 매개변수의 산정", *한국지형공간정보학회지*, 제13권, 제2호, pp.39-43.
- Akca, D., Gruen, A., 2009. "Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras", *The Photogrammetric Record*, 24(127), pp.217-245.
- Brown, D.C., 1971, "Close-range camera calibration", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 37(8), pp.855-866.
- Chandler, J.H., Fryer, J.G., Jack, A., 2005, "Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement", *The Photogrammetric Record*, 20(109), pp.12-26.
- CITRIS, 2011, <http://ishakeberkeley.appspot.com>
- Clarke, T.A., Fryer, J.G., 1998, "The development of camera calibration methods and models", *The Photogrammetric Record*, 16(91), pp.51-66.
- D'Amelio, S., Brutto, M.L., 2009, "Close range photogrammetry for measurement of paintings surface deformations", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.XXXVIII-5/W1 Commission V-WG 4, 25-28 Feb, Trento, Italy, pp.1-6.
- Fraser, C.S., 1997, "Digital camera self-calibration", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.52, No.4, pp.149-159.
- Fraser, C.S., Al-Ajlouni, S., 2006, "Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.72, No.9, pp.1017-1026.
- Habib, A., Morgan, M., 2003, "Automatic calibration of low-cost digital cameras", *Journal of Optical Engineering*, Vol.42, No.4, pp.948-955.
- Hinz, S., Stephani, M., Schiemann, L., Zeller, K., 2009, "An image engineering system for the inspection of transparent construction materials", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp.297-307.
- Kenefick, J.F., Gyer, M.S., Harp, B.F., 1972, "Analytical self-calibration", *Photogrammetric Engineering*, Vol.38, No.11, pp.1117-1126.

21. Lagüela, S., Gonzalez-Jorge, H., Armesto, J., Arias, P., 2011, "Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements", *Infrared Physics & Technology*, 54, pp.92-99.
22. Parian, J.A., Gruen, A., 2010, "Sensor modeling, self-calibration and accuracy testing of panoramic cameras and laser scanners", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, pp.60-76.
23. Pedersini, F., Sarti, A., Tubaro, S., 1999, "Accurate and simple geometric calibration of multi-camera systems", *Signal Processing*, 77, pp.309-334.
24. Rieke-Zapp, D.H., Nearing, M.A., 2005, "Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion", *The Photogrammetric Record*, 20(109), pp.69-87.
25. Takeuchi, K, Kennelly, P.J., 2010, "iSeismometer: A geoscientific iPhone application", *Computers & Geosciences*, 36, pp.573-575.
26. Wolf, P.R., Dewitt, B.A., 2000, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, McGraw-Hill, Boston, Massachusetts.