

정규논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제19권 제5호, 2014년 9월 (JBE Vol. 19, No. 5, September 2014)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2014.19.5.677>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

## 모바일폰 기반 스테레오 영상에서 산출된 3차원 정보의 정확도 분석

안희란<sup>a)</sup>, 김재인<sup>a)</sup>, 김태정<sup>a)\*</sup>

### 3D Accuracy Analysis of Mobile Phone-based Stereo Images

Heeran Ahn<sup>a)</sup>, Jae-In Kim<sup>a)</sup>, and Taejung Kim<sup>a)\*</sup>

#### 요 약

본 논문에서는 모바일폰 카메라를 이용하여 취득한 스테레오 영상으로부터 3차원 정보를 산출하고 이를 통해 3차원 정확도를 분석하고자 한다. 3차원 정확도 분석을 위해 스테레오 모델의 수렴각 변화에 따른 정확도 결과를 비교하였다. 본 논문에서는 내부 파라미터 산출과 영상의 왜곡보정 그리고 종속적 상대표정을 이용한 스테레오 영상의 기하구조 추정을 통해 모델 공간 상의 3차원 좌표를 계산하였으며, 이를 객체 공간 상의 좌표계로 변환함으로써 정량적인 3차원 정확도 분석을 수행하였다. 실험결과에서는 스테레오 모델의 수렴각이 약 17° 이상일 때, 상대적으로 높은 정확도를 갖는 3차원 정보가 생성됨을 확인하였다. 결과적으로 정확도 높은 3차원 정보 생성을 위해서는 촬영거리 및 기선거리를 고려하여 적절한 수렴각을 이루는 스테레오 모델 수립이 필요하다. 본 논문의 결과가 향후 모바일폰의 스테레오 영상을 이용한 입체영상 제작 및 3차원 객체 복원 등 관련 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### Abstract

This paper analyzes the 3D accuracy of stereo images captured from a mobile phone. For 3D accuracy evaluation, we have compared the accuracy result according to the amount of the convergence angle. In order to calculate the 3D model space coordinate of control points, we perform inner orientation, distortion correction and image geometry estimation. And the quantitative 3D accuracy was evaluated by transforming the 3D model space coordinate into the 3D object space coordinate. The result showed that relatively precise 3D information is generated in more than 17° convergence angle. Consequently, it is necessary to set up stereo model structure consisting adequate convergence angle as an measurement distance and a baseline distance for accurate 3D information generation. It is expected that the result would be used to stereoscopic 3D contents and 3D reconstruction from images captured by a mobile phone camera.

Keyword : mobile phone, 3D accuracy, stereo images, epipolar geometry

## 1. 서 론

모바일폰에는 사용자의 편의를 위해 GPS, 자이로스코프 센서, 지자기 센서, 가속도 센서 등 다양한 센서가 부착되어 있으며 광학 센서인 카메라 모듈은 모바일폰에서 필수적인 요소라고 할 수 있다. 국내에서는 800만 화소 이상의 카메라 모듈이 보편적으로 사용되고, 국외에서는 최근 Nokia가

a) 인하대학교 지리정보공학과(Dept. of Geoinformatic Engineering Inha University)

\* Corresponding Author : 김태정 (Taejung Kim)  
E-mail: tejid@inha.edu  
Tel: +82-32-860-7608

※ 본 연구는 인하대학교의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0009721).

· Manuscript received July 2, 2014 Revised August 25, 2014 Accepted August 26, 2014

약 2000만 화소의 고해상도 카메라모듈을 적용한 모바일폰을 발표하였다. 이처럼 모바일폰에 탑재되어 있는 카메라의 화소수가 증가하고 관련 소프트웨어 기술이 향상됨에 따라 영상 합성, 영상을 통한 물체감지, 3차원 객체 복원, 증강현실 시스템 등 모바일 기반의 영상처리 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중에서도 영상을 이용한 3차원 객체 복원 기술은 사진측량 및 컴퓨터 비전 분야에서 오랫동안 연구되어 온 주제이다<sup>[1-7]</sup>. 3차원 객체 복원 기술은 센싱 방법에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. 레이저, 구조광 등의 부가적인 발광장비를 이용하는 능동적 기법과 영상 및 비디오 프레임의 명암이나 시차를 이용하는 수동적 기법으로 나뉜다<sup>[4]</sup>. Jung 등은 구조광 기법을 이용하여 프로젝터를 통해 대상물에 줄무늬 패턴을 투사하고 모바일폰의 카메라로 촬영된 단일 영상을 이용하는 시스템을 제안하였고<sup>[5]</sup>, Raghavendra 등은 모바일폰의 전방 카메라로 촬영된 비디오 프레임에 다중스테레오 기법을 이용하여 3차원 얼굴 복원을 수행하였으며<sup>[6]</sup>, Won 등은 모바일폰 카메라를 통해 고정된 위치에서 조명에 변화를 준 다중 영상을 취득하여 스테레오 기법을 적용하였다<sup>[7]</sup>.

영상으로부터 정확한 3차원 정보를 생성하기 위해서는 카메라의 내부 파라미터(초점거리 및 주점의 위치)와 위의 제안된 기법들과 같이 다양한 알고리즘을 이용하여 외부 파라미터(카메라의 위치 및 자세)를 추정하는 과정이 필요하다. 그러나 모바일폰 카메라에서 사용되고 있는 CMOS는 저가의 영상 센서로서 일반 카메라에 비해 상대적으로 잡음이 많고 정밀도가 떨어진다. 따라서 모바일폰 카메라를 통해 촬영된 영상으로부터 생성된 3차원 정보에 대한 정량적인 평가가 우선적으로 이뤄져야한다<sup>[11-12]</sup>. Kim 등은 사진측량에서 모바일폰 영상의 활용을 위해 6m상의 높이에서 촬영된 영상의 렌즈 왜곡보정 및 광속조정을 수행하고 측량용 카메라와 비교하여 사진측량에서의 모바일폰 영상 활용 가능성을 판단했다<sup>[12]</sup>. Park 등은 스테레오 카메라가 부착된 모바일폰을 이용하여 내부 파라미터를 산출한 뒤 다중영상표정과 광속조정을 통해 정량적인 활용 가능성을 평가했다<sup>[11]</sup>. 선행연구를 통해 모바일폰 카메라로부터 높은 정확도의 3차원 정보 생성이 가능한 것이 확인되었다.

다만 선행연구에서는 스테레오 카메라가 장착된 모바일폰을 사용하였거나<sup>[11]</sup> 다중 영상을 이용하여 기준점의 정확한 위치 결정을 위한 수단으로 모바일폰 카메라를 활용하였고<sup>[12]</sup>, 일반적인 모바일폰 카메라 사용 환경 및 촬영 기하 구조 변화에 따른 정확도 분석은 수행되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 일반적인 모바일폰 사용자가 관심 객체를 좌·우로 촬영한 스테레오 영상으로부터 얻어지는 3차원 정보에 초점을 두고, 이를 실측된 3차원 정보와 비교함으로써 모바일폰 카메라의 촬영 조건에 따른 3차원 정확도를 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 촬영위치 및 방향이 다른 여러 장의 영상을 취득하여, 다양한 수렴각을 가지는 스테레오 영상을 구성하였다. 그리고, 모바일폰 카메라의 내부 파라미터를 산출하고 왜곡보정계수를 이용하여 영상의 왜곡보정을 수행하였다. 스테레오 영상의 기하구조 추정은 특징점 기반 정합기법인 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 알고리즘<sup>[13]</sup>으로 산출된 정합점을 이용하여 사진측량에서 사용되고 있는 상대표정(relative orientation)을 적용하였다. 좌·우 영상점들의 3차원 정보를 생성하기 위해 공선조건(collinearity constraints)식을 적용하였으며, 이를 객체 공간 좌표계로 변환함으로써 실측된 3차원 좌표와 정량적인 비교가 가능하도록 하였다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 먼저 II장에서는 모바일폰 카메라의 내부 파라미터 및 외부 파라미터 추정과 이를 이용한 3차원 정보 생성 과정을 나타낸다. III장에서는 실험 과정에 대한 설명과 스테레오 모델 정확도 및 3차원 정확도 결과를 분석한 뒤, IV장에서 논문의 결론을 맺는다.

## II. 3차원 정보 생성 과정

### 1. 내부 파라미터 및 왜곡계수 추정

내부 파라미터와 왜곡계수 산출을 위해 GML Camera Calibration Toolbox를 이용하였다<sup>[17]</sup>. 이 과정에서는 모바일폰 카메라의 방향과 각도를 변화시키며 mm단위의 길이를 알고 있는 정사각형으로 이루어진 보정패턴을 촬영한

다중 영상을 이용한다. 그 결과 픽셀 단위의 초점거리 및 렌즈왜곡계수가 산출된다.

일반적인 왜곡의 요인으로는 방사왜곡과 접선왜곡이 있으며, 주로 방사왜곡이 많은 비중을 차지한다. 방사왜곡은 렌즈의 굴절률로 인해 나타나는 것으로서, 카메라 렌즈 중심으로부터 거리가 멀어질수록 왜곡이 증가하는 대칭형 왜곡이다. 식 (1)은 테일러 급수를 이용하여 방사 왜곡을 표현한 식으로  $k_i$ 는 방사왜곡 계수,  $r$ 은 주점으로부터의 방사거리,  $x, y$ 는 기존의 영상좌표,  $x_c, y_c$ 는 왜곡 보정된 새로운 영상좌표를 나타낸다<sup>[16, 19]</sup>.

$$\begin{aligned} x_c &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_c &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (1)$$

접선왜곡의 경우 카메라 제조과정에서 렌즈와 센서가 수평하지 않거나 렌즈 자체의 중심이 맞지 않아서 발생한다. 식 (2)는 접선왜곡을 나타낸 식으로  $p_1, p_2$ 는 접선왜곡 계수이다<sup>[16, 19]</sup>.

$$\begin{aligned} x_c &= x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_c &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구에서는 영상의 왜곡보정을 위해 컴퓨터 비전분야에서 많이 사용되고 있는 OpenCV 라이브러리<sup>[18]</sup>를 활용하였다. 방사왜곡과 접선왜곡을 고려한 왜곡보정을 수행하였으며 방사왜곡계수  $k_2$  이후의 항은 고려하지 않았으므로  $k_3$ 의 값은 0으로 두었다.

## 2. 스테레오 영상의 기하 추정

본 논문에서는 스테레오 영상의 정밀한 기하 추정을 위해서 에피폴라 제약조건 또는 공면조건(coplanarity constraints)을 이용한 상대표정을 수행한다<sup>[15-16]</sup>. 상대표정이란 사진측량에서 두 영상의 기하학적인 위치 및 자세를 추정하는 과정을 의미한다. 스테레오 보정 방식은 카메라의 위치 및 자세가 변경될 때마다 보정 패턴을 이용한 재작업이 요구되지만, 상대표정은 공면조건식으로부터 좌·우 카메라

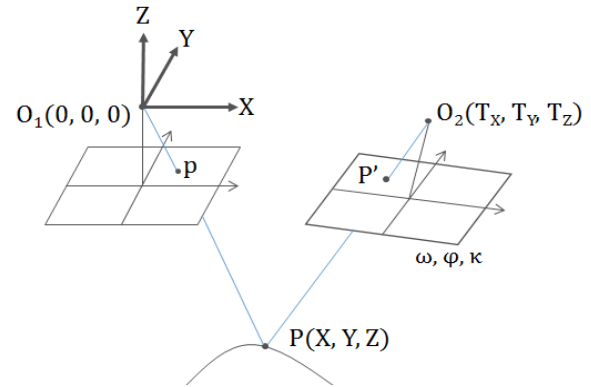


그림 1. 상대표정  
Fig. 1. Relative orientation

의 상대적인 위치 및 자세를 직접 산출할 수 있다. 또한 DLT(Direct Linear Transformation) 기반 알고리즘의 선형적 접근과 달리, 테일러 급수를 통한 선형화 및 최소제곱추정(LSE, Least-Square Estimation)을 수행하여 정확하고 신뢰적인 카메라 위치 및 자세 산출이 가능하다.

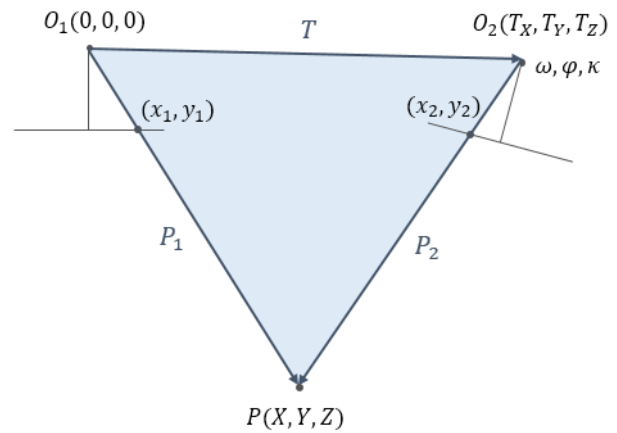


그림 2. 공면조건  
Fig. 2. Coplanarity constraints

식 (3)은 에피폴라 기하 수립을 위한 공면조건식으로 여기서  $T, P_1, P_2$ 는 각각  $T = \overrightarrow{O_1 O_2}, P_1 = \overrightarrow{O_1 P}, P_2 = \overrightarrow{O_2 P}$ 을 의미한다.

$$T \cdot [P_1 \times P_2] = 0 \quad (3)$$

여기서 벡터  $T=[T_X, T_Y, T_Z]^T$ , 벡터  $P_1=[X_1, Y_1, Z_1]^T$ , 벡터  $P_2=[X_2, Y_2, Z_2]^T$ 라고 하면 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[15]</sup>. 벡터  $P_1$ 과 벡터  $P_2$ 는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\omega_r, \phi_r, \kappa_r, T_Y, T_Z) = \begin{bmatrix} T_X & T_Y & T_Z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -T_Z & Y_Y \\ T_Z & 0 & -T_X \\ -T_Y & T_X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ f \end{bmatrix}$$

식 (5)에서  $m_{11} \sim m_{33}$ 은  $\omega_r, \phi_r, \kappa_r$ 로 이루어진 회전행렬 요소이며,  $f$ 는 초점거리,  $(x_1, y_1)$ 은 좌측 영상좌표,  $(x_2, y_2)$ 는 우측 영상좌표이다. 이 때, 좌측 영상의 투영중심  $O_1$ 은 모델 공간 좌표계의 원점이 되며 좌측 영상의 오른쪽 방향을 X축, 위쪽 방향을 Y축, 객체 반대방향을 Z축이라고 가정한다. 스테레오 영상의 기선거리  $T_X$ 는 스케일 관련 상수이므로 결과적으로 미지수의 개수는 총 5개 ( $T_Y, T_Z, \omega, \phi, \kappa$ )가 된다. 테일러 급수를 통해 식 (4)를 선형화 한 후 최소제곱 추정을 수행하여 미지수를 추정한다.

### 3. 3차원 정보 산출

스테레오 영상의 기하구조를 추정하게 되면, 좌·우 영상

점으로부터 3차원 정보를 산출할 수 있다. 이를 위해 사진 측량에서 사용되는 공선조건을 적용하였다<sup>[16]</sup>. 공선조건은

2차원의 영상 좌표와 3차원 좌표 그리고 카메라의 투영 중심이 동일한 직선상에 존재함을 의미하며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

식 (6)을 이용하여 좌측 영상좌표( $x_1, y_1$ )와 우측 영상좌표( $x_2, y_2$ )에 대한 모델 공간 좌표계 상의 3차원 정보( $X_M, Y_M, Z_M$ )를 계산할 수 있다. 이 때 계산되는 3차원 정보는 좌측 카메라 좌표계를 기준으로 하는 모델 공간 좌표계 상의 정보이며, 3차원 정확도 분석을 위해서는 모델 공간 좌표계 상의 정보( $X_M, Y_M, Z_M$ )를 객체 공간 좌표계 상의 정보( $X_O, Y_O, Z_O$ )로 변환하는 과정이 필요하다. 따라서 3차원 등각 변환(3D conformal coordinate transformation)을 수행하며 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[16]</sup>. 3차원 등각변환 계수는 스테레오 영상에서 선정된 기준점에 대해서 실측을 통해 얻어진 객체 공간 좌표와 공선조건식으로 산출된 모델 공간 좌표를 이용하여 산출하였다.

$$\begin{aligned} X_O &= s(r_{11}X_M + r_{21}Y_M + r_{31}Z_M) + T_X \\ Y_O &= s(r_{12}X_M + r_{22}Y_M + r_{32}Z_M) + T_Y \\ Z_O &= s(r_{13}X_M + r_{23}Y_M + r_{33}Z_M) + T_Z \end{aligned} \quad (7)$$

## III. 모바일폰 카메라의 3차원 정확도 분석

### 1. 실험 과정

본 논문에서 사용한 모바일폰은 안드로이드 OS 기반의 Pantech IM-A870 모델로서 그림 3과 같다. IM-A870에는 약 1300만 화소의 1/3" CMOS 카메라가 탑재되어 있다. 일반적으로 안드로이드 OS의 카메라 기능은 자동 초점

$$\begin{aligned} x_1 &= -f \frac{X_M}{Z_M} \\ y_1 &= -f \frac{Y_M}{Z_M} \\ x_2 &= -f \left[ \frac{m_{11}(T_X - X_M) + m_{12}(T_Y - Y_M) + m_{13}(T_Z - Z_M)}{m_{31}(T_X - X_M) + m_{32}(T_Y - Y_M) + m_{33}(T_Z - Z_M)} \right] \\ y_2 &= -f \left[ \frac{m_{21}(T_X - X_M) + m_{22}(T_Y - Y_M) + m_{23}(T_Z - Z_M)}{m_{31}(T_X - X_M) + m_{32}(T_Y - Y_M) + m_{33}(T_Z - Z_M)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

(autofocus) 모드로 설정되어 있으므로 이로 인해 초점거리의 변화가 발생하게 된다. 따라서 안드로이드 SDK에서 제공되고 있는 고정 초점(fixed) 모드를 적용하여 영상을 촬영하였다. 영상 크기는 처리 속도를 고려하여 640x480으로 저장하였다. 표 2에서는 GML Camera Calibration Toolbox<sup>[17]</sup>를 사용하여 실험을 통해서 산출한 해당 카메라의 내부 파라미터 및 왜곡계수를 나타내었다.



그림 3. IM-A870 모바일폰 카메라의 모습  
Fig. 3. Appearance of IM-A870 mobile phone camera

표 1. IM-A870 카메라의 특성  
Table 1. IM-A870 Camera specification

	Value
Sensor Type	CMOS
Sensor Size	1/3"
Pixels	13MP
Pixel Size	1.1 $\mu$ m
Maximum Image Size	4160x3120

표 2. 카메라 내부 파라미터 및 왜곡계수  
Table 2. Camera intrinsic parameters and distortion coefficient

Intrinsic parameter	value (pixel)	Distortion coefficient	value
$f_x$	547.5330	$k_1$	0.0671
$f_y$	548.6219	$k_2$	-0.0821
$c_x$	239.5270	$p_1$	-0.0030
$c_y$	313.8881	$p_2$	0.0001

모든 영상은 그림 4와 같이 객체를 중심으로 약 0.4m의 촬영거리에서 25mm의 기선간격을 두고 촬영하였다. 그림 4에서 Scene-1의 카메라 공간 좌표계를 모델 공간 좌표계와 일치시키며, Scene-1의 오른쪽 방향을 X축, 위쪽 방향을 Y축, 객체 반대방향을 Z축으로 정의한다. 모든 영상의 카메라 투영중심은 모델 공간 좌표계의 X축 상에서 이동하였다. 정확도 분석을 위한 데이터 셋은 카메라의 Y축이 고정된 영상 11장(Data1)과 객체가 영상의 중심에 오도록 카메라 Y축이 회전된 영상 11장(Data2)으로 구성된다.

스테레오 모델에서 수렴각은 그림 6과 같이 기선거리 및 촬영거리의 영향을 받는다. 수렴각  $\alpha$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left( \frac{L}{2H} \right) \quad (8)$$

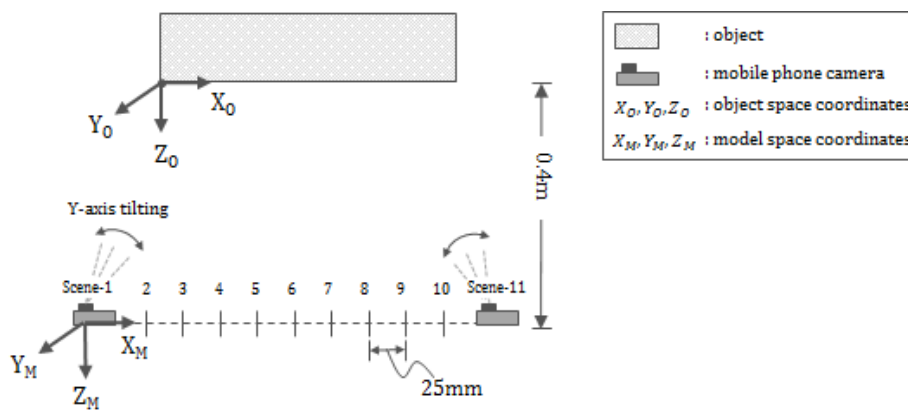


그림 4. 모바일폰 카메라의 배치 및 객체의 위치  
Fig. 4. Arrangement of mobile phone camera and position of the object



그림 5. 스테레오 리그를 이용한 영상 촬영  
Fig. 5. Taking images using stereo-rig

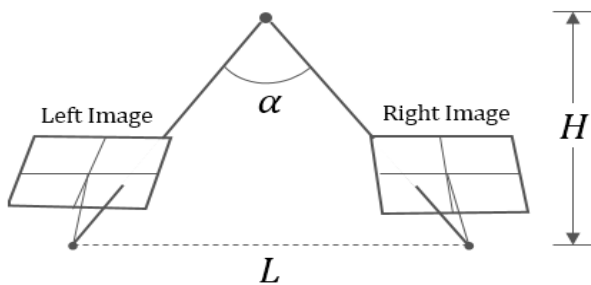


그림 6. 스테레오 모델의 수렴각  
Fig. 6. Convergence angle of the stereo model

식 (8)에서  $L$ 은 스테레오 모델의 기선거리이고  $H$ 는 촬영거리를 나타낸다. 이를 통해 Scene-1을 좌측 영상으로 하

표 3. 스테레오 모델의 수렴각  
Table 3. Convergence angle of the stereo model

Right image	Convergence angle(deg)
Scene-2	3.5798
Scene-3	7.1527
Scene-4	10.7117
Scene-5	14.2500
Scene-6	17.7613
Scene-7	21.2393
Scene-8	24.6782
Scene-9	28.0725
Scene-10	31.4173
Scene-11	34.7080

는 스테레오 모델의 수렴각(convergence angle)을 계산하여 표 3에 나타내었다.

3차원 정확도 분석을 위해 그림 7과 같이 객체 내에서 30개의 기준점(Control Point)을 취득하였다. 표 4에서는 객체 공간 좌표계 상에서 각 기준점의 3차원 좌표를 mm단위로 나타내었다.

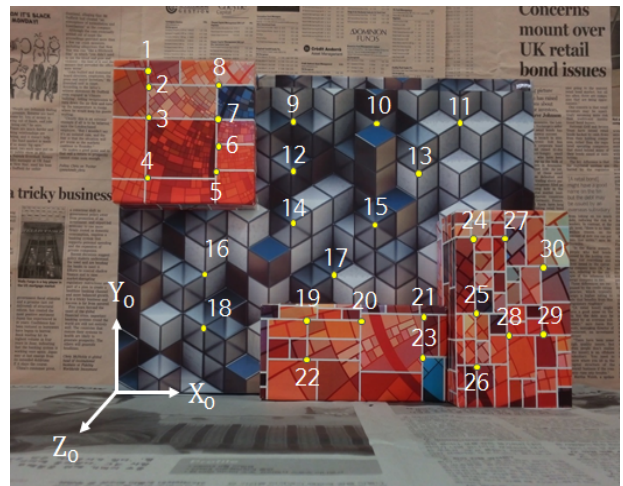


그림 7. 객체 상의 기준점  
Fig. 7. The Control Points on the object

표 4. 실측된 기준점의 3차원 객체 공간 좌표  
Table 4. Measured 3D object space coordinate of the control points

Point	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Point	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	24	212	25	16	64	81	0
2	25	204	25	17	160	81	0
3	25	180	25	18	64	44	0
4	24	141	25	19	140	50	35
5	75	146	25	20	177	50	35
6	75	165	25	21	222	54	35
7	75	181	25	22	140	26	35
8	75	204	25	23	222	29	35
9	128	188	0	24	250	102	65
10	193	189	0	25	250	57	65
11	257	189	0	26	251	25	65
12	129	152	0	27	271	102	65
13	225	152	0	28	271	44	65
14	129	116	0	29	296	44	65
15	193	117	0	30	295	84	65

## 2. 상대표정 수립 정확도 분석

총 20개의 스테레오 모델에서 우측 영상의 위치와 자세를 산출하기 위해 상대표정을 수행하였다. 또한 상대표정 수립 정확도를 계산하기 위해 우선 식 (9)와 같이 30개의 기준점  $(X_O, Y_O, Z_O)$ 을 모델 공간 좌표계 상의 3차원 좌표  $(X_M, Y_M, Z_M)$ 로 변환하고, 이를 영상에 역투영시켜 2차원의 사진 좌표  $(x_r, y_r)$ 를 생성하였다. 기준점의 사진 좌표와 실제 사진 좌표  $(x_r^{true}, y_r^{true})$ 의 차이를 모델 정확도로 나타냈으며 이는 식 (10)과 같다.

$$F(T(X_O, Y_O, Z_O)) = F(X_M, Y_M, Z_M) = (x_r, y_r) \quad (9)$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_n^{true} - x_n)^2 + (y_n^{true} - y_n)^2}}{n} \quad (10)$$

표 5에서는 Data1과 Data2에서 산출된 외부 파라미터 (스케일 상수  $T_Z$ 는 100으로 고정)결과를 비교하였다. 표 5에서 카메라 Y축 회전이 이뤄진 Data2의 Y축 회전요소  $\phi$  값이 점차 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 표 6에서는 Data1과 Data2의 상대표정 수립 정확도를 RMSE로 나타내었다. 전체 데이터 셋의 모델 정확도는 약 1pixel 내외로 나타나 전반적으로 정확한 외부 파라미터 산출이 이뤄졌음을 알 수 있다.

표 5. 상대표정으로 산출된 외부 파라미터

Table 5. Calculated exterior parameters by relative orientation

Relative orientation result of Data1						Relative orientation result of Data2					
	$T_Y$ (pixel)	$T_Z$ (pixel)	$\omega$ (deg)	$\phi$ (deg)	$\kappa$ (deg)		$T_Y$ (pixel)	$T_Z$ (pixel)	$\omega$ (deg)	$\phi$ (deg)	$\kappa$ (deg)
Scene-2	-1.6781	1.9635	0.0229	-0.0516	0.0630	Scene-2	-2.1197	-19.1050	-0.0688	0.9225	0.0172
Scene-3	-3.6922	-3.5643	0.1891	-0.2865	-0.0344	Scene-3	-2.3107	-11.3264	-0.1203	3.1627	0.1318
Scene-4	-1.6915	-0.0991	0.0802	-0.3323	0.0516	Scene-4	-1.0122	-7.6778	-0.1089	6.6979	0.1490
Scene-5	-3.9673	-2.7204	0.3839	-0.6474	-0.0917	Scene-5	-2.2325	-9.7722	0.0859	6.6062	-0.0057
Scene-6	-2.0048	-2.0960	0.1776	-0.5271	0.1432	Scene-6	-0.2269	-8.6749	-0.1948	7.6433	0.3839
Scene-7	-2.3523	-1.3143	0.3438	-0.4756	-0.0401	Scene-7	-1.2800	-7.0654	-0.2235	11.1039	0.4584
Scene-8	-1.7045	0.0750	0.2406	-0.8824	0.2292	Scene-8	-0.9189	-6.9562	-0.4870	12.4733	0.5099
Scene-9	-0.0190	0.3276	-0.0630	-1.1230	0.1776	Scene-9	-0.1914	-4.6698	-0.5271	15.9110	0.1891
Scene-10	-1.5973	0.5926	0.2636	-1.7303	0.2406	Scene-10	-0.5658	-8.2196	-0.4240	17.8476	0.7334
Scene-11	-1.3557	0.1942	0.1375	-1.6673	0.2063	Scene-11	-0.7612	-9.4153	-0.4297	21.9729	0.7735

표 6. 상대표정 수립 정확도

Table 6. Accuracy of relative orientation models

	Model accuracy of Data1			Model accuracy of Data2		
	$e_x$ (pixel)	$e_y$ (pixel)	RMSE	$e_x$ (pixel)	$e_y$ (pixel)	RMSE
Scene-2	1.0030	0.5077	1.1242	1.2532	0.7174	1.4440
Scene-3	1.3853	0.8203	1.6100	0.3035	0.2657	0.4034
Scene-4	1.1549	0.7484	1.3762	0.3048	0.3443	0.4598
Scene-5	1.4874	0.8871	1.7319	0.7929	0.4426	0.9081
Scene-6	0.8066	0.5886	0.9985	0.3331	0.2709	0.4294
Scene-7	0.6096	0.4135	0.7366	0.2566	0.2941	0.3903
Scene-8	0.9049	0.6530	1.1159	0.5486	0.2662	0.6098
Scene-9	0.8397	0.6764	1.0782	0.3895	0.2736	0.4760
Scene-10	1.5478	0.9531	1.8177	0.4891	0.3543	0.6039
Scene-11	1.3049	0.8349	1.5491	0.4587	0.4431	0.6378

### 3. 3차원 정확도 분석

이번에는 스테레오 영상에서 산출된 3차원 정보의 정확도를 분석하였다. 2장에서 기술한 바와 같이 30개의 기준점을 이용하여 좌측 영상의 사진 좌표( $x_1, y_1$ )와 우측 영상의 사진 좌표( $x_2, y_2$ )로부터 모델 공간 좌표계 상의 3차원 정보( $X_M, Y_M, Z_M$ )를 생성하였다. 또한 3차원 변환을 통해 객체 공간 좌표계 상의 3차원 정보( $X_O, Y_O, Z_O$ )로 나타내고, 식 (11)과 같이 실제 3차원 정보( $X_O^{true}, Y_O^{true}, Z_O^{true}$ )와 비교한 결과를 RMSE로 나타내었다.

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(X_{i_O}^{true} - X_{i_O})^2 + (Y_{i_O}^{true} - Y_{i_O})^2 + (Z_{i_O}^{true} - Z_{i_O})^2}}{n} \quad (11)$$

표 7에서는 Data1과 Data2의 수렴각 변화에 따른 3차원 정확도를 비교하여 나타내었다. 스테레오 모델에서 3차원 정확도는 기선거리에 따른 수렴각 등 기하학적인 요소의 영향을 받는다. 이러한 이유로 모든 데이터셋에서 수렴각에 따라 3차원 정확도가 변하는 것을 확인할 수 있다. 수직 방향인 Z방향 정확도는 두 데이터셋 모두 Scene-2에서 4mm이상의 큰 오차를 나타내지만, Scene-3에서 1.68mm, 1.94mm의 오차를 보이고 수렴각이 증가할수록 점차 오차가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 반면에 수평 방향인 X방향과 Y방향에서는 수렴각에 관계없이 전반적으로 1mm 내외의 높은 정확도를 갖는 것으로 보이는데, 이는 수평 방향의 정보가 2차원 사진 좌표로부터 추정되기 때문에 발생한 결과이다. 결과적으로 스테레오 모델의 수렴각이 증가할수록 3차원 오차가 감소하지만, Scene-6과 같이 특

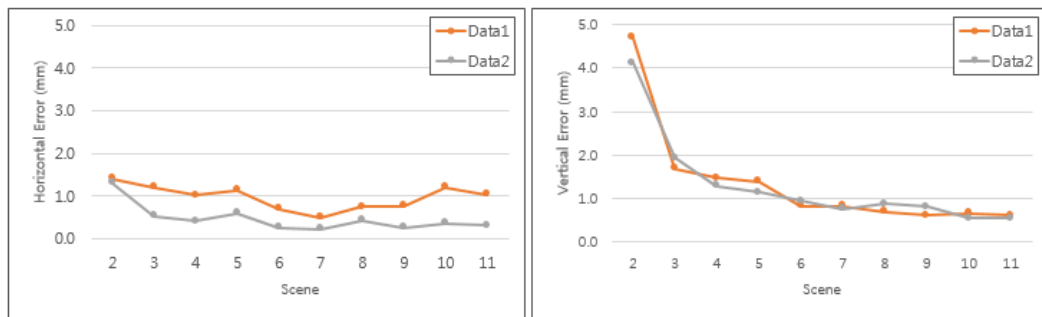


그림 8. 각 데이터셋의 수평·수직 정확도; 수평 정확도(왼쪽), 수직 정확도(오른쪽)

Fig. 8. The horizontal and vertical accuracy of each dataset

표 7. 각 데이터셋의 3차원 정확도

Table 7. The 3D accuracy of each dataset

	Convergence angle(deg)	Accuracy of Data1				Accuracy of Data2			
		$E_X$ (mm)	$E_Y$ (mm)	$E_Z$ (mm)	RMSE	$E_X$ (mm)	$E_Y$ (mm)	$E_Z$ (mm)	RMSE
Scene-2	3.5798	1.2003	0.7274	4.6991	4.9042	1.2123	0.4995	4.1217	4.3252
Scene-3	7.1527	1.0366	0.6365	1.6799	2.0741	0.4609	0.2618	1.9374	2.0086
Scene-4	10.7117	0.8723	0.5510	1.4747	1.7998	0.3158	0.2705	1.2891	1.3545
Scene-5	14.2500	0.9773	0.6057	1.3924	1.8058	0.5538	0.2278	1.1446	1.2918
Scene-6	17.7613	0.5647	0.4075	0.8168	1.0734	0.2166	0.1571	0.9442	0.9814
Scene-7	21.2393	0.3907	0.3093	0.8251	0.9639	0.1483	0.1734	0.7576	0.7912
Scene-8	24.6782	0.5922	0.4625	0.6977	1.0254	0.3682	0.2191	0.8802	0.9789
Scene-9	28.0725	0.5931	0.4998	0.6162	0.9906	0.2310	0.1385	0.8031	0.8471
Scene-10	31.4173	1.0245	0.6543	0.6519	1.3794	0.3112	0.1865	0.5451	0.6548
Scene-11	34.7080	0.8679	0.5745	0.6062	1.2045	0.2672	0.1650	0.5444	0.6285



정 수렴각(약 17°) 이상이 되면 수렴각에 따른 정확도 차이가 크게 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

두 개의 데이터셋을 비교해보면 Data1은 수렴각이 증가함에 따라 오차가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이지만, Data2는 일관성 있게 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 Data1에서는 카메라 회전 이력이 이뤄지지 않았기 때문에 수렴각이 증가할수록 영상의 중복도가 감소하여 수평 오차가 발생하기 때문인 것으로 보인다. 실험결과는 모바일폰 스테레오 영상으로부터 mm단위의 정확도 높은 3차원 정보 생성이 가능함을 보여주었으며, 보다 정밀한 3차원 정보를 위해서는 최소한의 적절한 수렴각이 요구됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 모바일폰 카메라로부터 생성된 3차원 정보에 있어 스테레오 영상의 촬영 조건에 따른 3차원 정확도에 대해 분석하였다. 이를 위해 카메라 파라미터 추정을 통해 스테레오 영상으로부터 3차원 정보를 산출하였으며, 스테레오 모델의 수렴각 변화를 통한 3차원 정확도 결과를 비교하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

스테레오 모델의 수렴각이 증가함에 따라 3차원 정확도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 적정 수렴각을 충족한다면 상대적으로 정확도 높은 3차원 정보를 생성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 수직 방향과 달리 수평 방향의 오차는 수렴각에 관계없이 전반적으로 비슷한 경향을 나타냈지만, 영상의 중복도가 감소할 경우 상대표정 수립 과정에서 발생한 오차의 영향을 받는 것으로 확인되었다. 결과적으로 스테레오 모델의 수립구조 요인인 수렴각의 변화는 수직 방향 정확도에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 이 연구결과는 정밀 지도제작 및 3차원 복원을 위한 스테레오 위성영상의 수렴각에 따른 정확도 특성파도 부합된다<sup>[20]</sup>. 아울러, 스테레오 기하를 설명하는 다른 요소들(에피폴라 평면 경사각, 좌우 관측 비대칭각 등)에 대한 모바일폰 스테레오 영상의 정확도 분석도 향후에 꼭 필요한 연구로 판단된다. 본 논문의 실험결과가 향후 모바일폰의 스테레오 영상을

이용한 입체영상 제작 및 3차원 객체 복원 등의 관련 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 참 고 문 헌 (References)

- [1] Kim, J., Park, W., Hong, S., The 3D Modelling of Cultural Heritage Using Digital Photogrammetry, Korean Journal of Geomatics, vol. 21, no. 4, pp. 365-371, 2003.
- [2] Kim, J., Yun, I., Lee, S., On Shape Recovery of 3D Object from Multiple Range Images, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea. SP, vol. 37, no. 1, pp. 1-15, 2000.
- [3] Hwang, S., Yoo, J., Kim, H., Kim, S., Paeng, K., Kim, S., High-resolution 3D Object Reconstruction using Multiple Cameras, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, vol. 50, no. 10, pp. 150-161, 2013.
- [4] Chu, C., Park, J., Kim, H., Park, J., Lim, S., Koo, B., Recent Trends of 3D Reconstruction Technology, Electronics and telecommunications trends, vol. 22, no. 4, pp. 1-11, 2007.
- [5] Jung, S., Lee, J., User-friendly 3D Object Reconstruction Method based on Structured Light in Ubiquitous Environments, The Journal of the Korea Contents Association, vol. 13, no. 11, pp. 523-532, 2013.
- [6] Raghavendra, R., Raja, K. B., Pflug, A., Yang, B., Busch, C., 3D Face Reconstruction and Multimodal Person Identification from Video Captured Using Smartphone Camera, Technologies for Homeland Security (HST), 2013 IEEE International Conference on, pp. 552-557, 2013.
- [7] Won, J., Yoo, J., Park, I., Active 3D Shape Acquisition on a Smartphone, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea. SP, vol. 48, no. 6, pp. 27-34, 2011.
- [8] Hartley, R., Zisserman, A., Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 2003.
- [9] Nister, D., An efficient solution to the five-point relative pose problem, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 6, pp. 756-770, June 2004.
- [10] Kim, G., Jeong, S., Kim, B., The Change of Interior Orientation Parameters in Zoom Lens Digital Cameras, Korean Journal of Geomatics, vol. 28, no. 1, pp. 93-98, 2010.
- [11] Park, K., Choi, S., 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, 2012.
- [12] Kim, J., Jin, C., Lee, S., Lee, S., Choi, C., Geometric Calibration and Accuracy Evaluation of Smartphone Camera, Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System, vol. 19, no. 3, pp. 115-125, 2011.
- [13] Lowe, D. G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [14] Fischler, M. A., Bolles, R. C., Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communications of the ACM, vol. 24, no. 6,

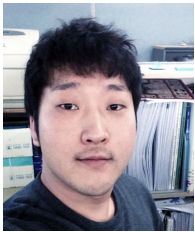
- pp. 381-395, 1981.
- [15] Kim, J., Kim, T., Precise Rectification of Misaligned Stereo Images for 3D Image Generation, Journal of broadcast engineering, vol. 17, no. 2, pp. 411-421, 2012.
- [16] Wolf, P. R., Dewitt, B. A., Elements of photogrammetry with application in GIS, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 2000.
- [17] <http://graphics.cs.msu.ru/en/research/projects/3dreconstruction/cppcalibration>
- [18] [http://docs.opencv.org/doc/tutorials/calib3d/camera\\_calibration/camera\\_calibration.html](http://docs.opencv.org/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html)
- [19] Fraser, C. S., Digital camera self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 52, no. 4, pp. 149-159, 1997.
- [20] Jeong, J., Kim, T., Analysis of Dual-Sensor Stereo Geometry and Its Positioning Accuracy, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 80, no. 7, pp. 653-661, 2014.

## 저 자 소 개



안 희 란

- 2013년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과 학사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 지리정보공학과 석사과정
- 주관심분야 : 3D 객체복원, 모바일 영상처리



김 재 인

- 2010년 8월 : 인하대학교 지리정보공학과 학사
- 2013년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과 석사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 지리정보공학과 박사과정
- 주관심분야 : 3D 입체영상 생성, 위성영상 품질분석, 위성영상 활용



김 태 정

- 1991년 8월 : 한국과학기술원 전자공학과 학사
- 1992년 10월 : University College London 석사(위성공학)
- 1996년 2월 : University College London 박사(원격탐사)
- 1995년 8월 ~ 2001년 3월 : KAIST 인공위성연구센터 선임연구원
- 2001년 4월 ~ 2003년 8월 : KAIST 인공위성연구센터 연구교수
- 2003년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 지리정보공학과 정교수
- 주관심분야 : 영상정합, 3D 객체복원, 3D 입체영상 생성, 센서모델링, 자동 DEM 생성, 수치지도화기 개발