

# 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상의 지오레퍼런싱 Georeferencing of Indoor Omni-Directional Images Acquired by a Rotating Line Camera

오소정<sup>1)</sup> · 이임평<sup>2)</sup>

Oh, Sojung · Lee, Impyeong

## Abstract

To utilize omni-directional images acquired by a rotating line camera for indoor spatial information services, we should register precisely the images with respect to an indoor coordinate system. In this study, we thus develop a georeferencing method to estimate the exterior orientation parameters of an omni-directional image - the position and attitude of the camera at the acquisition time. First, we derive the collinearity equations for the omni-directional image by geometrically modeling the rotating line camera. We then estimate the exterior orientation parameters using the collinearity equations with indoor control points. The experimental results from the application to real data indicate that the exterior orientation parameters is estimated with the precision of 1.4 mm and 0.05° for the position and attitude, respectively. The residuals are within 3 and 10 pixels in horizontal and vertical directions, respectively. Particularly, the residuals in the vertical direction retain systematic errors mainly due to the lens distortion, which should be eliminated through a camera calibration process. Using omni-directional images georeferenced precisely with the proposed method, we can generate high resolution indoor 3D models and sophisticated augmented reality services based on the models.

Keywords : Rotating Line Camera, Omni-directional Image, Georeferencing, Indoor Control Point, Indoor Modeling

## 초 록

회전식 라인 카메라로 취득한 전방위 영상을 실내 공간정보 서비스에 활용하려면 취득한 영상을 실내 좌표계를 기준으로 정교하게 참조할 수 있어야 한다. 이에 본 연구는 실내 전방위 영상의 외부표정요소 - 취득한 시점의 카메라의 위치와 자세를 정확하게 추정할 수 있는 지오레퍼런싱 방법을 제안한다. 이를 위하여 먼저 회전식 라인 카메라를 기하학적으로 모델링하여 전방위 영상에 대한 공선방정식을 유도한다. 실내 기준점을 공선방정식에 적용하여 실내 전방위 영상의 외부표정요소를 추정한다. 실측데이터에 적용한 결과 외부표정요소의 위치는 1.4mm의 정밀도로, 자세는 0.05°의 정밀도로 추정할 수 있었다. 수평방향으로 약 3픽셀, 수직방향으로 약 10픽셀 정도의 잔차가 남아 있었다. 특히 수직방향으로는 렌즈의 왜곡에 의한 시스템적 오차가 포함되어 있는 것으로 분석되었고 이는 카메라 캘리브레이션을 통해 제거되어야 할 것으로 판단된다. 제시된 방법을 이용하여 정밀하게 지오레퍼런싱된 전방위 영상으로부터 고해상도 실내 3차원 모델을 생성하고 이에 기반한 정교한 증강현실 서비스가 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 : 회전식 라인 카메라, 전방위 영상, 지오레퍼런싱, 객체기준점, 실내 모델링

## 1. 서 론

최근, 구글의 스트리트뷰와 다음의 로드뷰 등과 같은 전방위 영상을 이용한 서비스 개발이 활발하다. 전방위(Omni-directional) 영상은 촬영지점을 기준으로 모든 방향을 촬영한 영상으로, 사용자를 중심으로 360°로 주변의 모

든 곳을 볼 수 있다. 따라서 전방위 영상을 이용한 서비스들은 사용자들에게 방문한 적이 없는 장소의 정보를 보다 정확하게 전달할 수 있다. 예를 들어, 기존의 지도 서비스를 이용해서는 처음 방문하는 장소에서 방향을 찾기 어렵지만, 전방위 영상 서비스를 이용하면 현재 위치를 기준으로 모든 방향의 정보를 포함하고 있으므로 방향을 쉽게

1) 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 박사과정(E-mail : osojung0201@uos.ac.kr)

2) 교신저자 · 정회원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 부교수(E-mail : iplee@uos.ac.kr)

찾을 수 있다.

전방위 영상은 취득되는 방식에 따라 크게 투영중심이 하나인 단시점 전방위 영상과 투영중심이 여러 개인 다시점 전방위 영상으로 분류된다(Huang 등, 2006). 단시점 전방위 영상은 거울을 이용하여 하나의 카메라로 전방위 영상을 생성하는 방법이다. 이 방법은 왜곡이 심하게 발생하고 보정하기 쉽지 않다. 또한 높고 균일한 해상도를 갖는 영상을 취득하기 어렵다. 이에 현재 제공되는 대부분의 전방위 영상 서비스는 다시점 전방위 영상을 활용하고 있다.

다시점 전방위 영상은 일반적으로 다수의 프레임 카메라가 동시에 촬영한 영상을 접합하여 생성한다. 비교적 균일한 고해상도의 영상정보가 제공되지만 특히 개별영상이 접합될 때 중첩되는 영역에서 즉 하나의 개별영상의 중심에서 멀어질수록 왜곡이 많이 발생한다는 단점이 있다(Kang 등, 1996). 따라서 많은 수의 카메라를 사용하여 개별영상의 시야각(Field Of View)을 작게 함으로써 보다 왜곡이 적은 다시점 전방위 영상을 생성할 수 있다. 그러나 이 경우에도 개별영상의 개별픽셀마다 대상물까지의 거리를 정확히 알지 못하므로 완전한 왜곡 보정은 어렵다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 Oh 등(2011)은 시야각이 작은 하나의 카메라로 전방위 영상을 취득할 수 있는 회전식 라인 카메라를 제안하였다. 회전식 라인 카메라는 하나의 라인 카메라를 360° 회전하면서 촬영한 라인 영상들을 순차적으로 접합하여 전방위 영상을 생성한다. 다수의 프레임 카메라로 동시에 취득한 영상을 접합하여 생성하는 기존의 방식과 달리 시야각이 아주 작은 라인 영상을 접합하기 때문에 왜곡이 거의 발생하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 회전하는 동안 회전축이나 대상체가 움직이지 않아야한다는 단점 때문에 실외에서 차량에 탑재하여 이동하면서 전방위 영상을 취득하기 어렵다. 따라서 회전식 라인 카메라는 실내의 전방위 영상을 취득하는데 효과적이며 실내의 3차원 모델링이나 다음 스토어뷰와 같은 실내 공간에 대한 공간영상정보 서비스에 효과적으로 활용될 수 있다.

회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상에 관한 연구는 회전식 라인 카메라의 설계(Wei, 2002)와 2장의 전방위 영상의 공액점으로부터 객체점의 3차원 좌표를 결정하는 기하모델의 소개(Tang, 2001), 회전반경과 객체점까지의 거리 비율과 대상체가 촬영된 회전각, 카메라가 틀어진 각을 이용한 depth map의 계산(Shum, 1999; Li, 2004)과 상대좌표계로 획득한 객체기준점을 이용하여 회

전반경과 카메라가 틀어진 각, 라인 영상의 주점 및 초점 거리에 대한 캘리브레이션(Huang, 2006) 등에 관하여 수행되었다.

전방위 영상을 이용하여 객체의 3차원 정보를 얻기 위해서는 먼저 전방위 영상을 취득한 시점의 카메라의 위치와 자세를 객체좌표계 상에서 결정하는 지오레퍼런싱 과정이 필수적이다. 지오레퍼런싱은 전통적으로 영상을 촬영할 때 함께 획득한 GPS/INS 정보를 이용하여 외부표정요소를 추정하는 연구(송연경 등, 2005)와 지상기준점을 이용하여 외부표정요소를 추정하는 연구(나종기, 2004), 지상기준점이 없는 지오레퍼런싱을 수행한 연구(최경아 등, 2009), 지상기준점을 이용한 지오레퍼런싱과 GPS/INS 데이터를 이용한 지오레퍼런싱의 정확도 비교 연구(Bae, 2005) 등이 수행되었다. 또한 오태완 등(2009)은 다수의 카메라로 구성된 전방위 카메라 시스템으로 실외에서 획득한 다시점 전방위 영상의 지오레퍼런싱을 수행하였다. 또한 Li 등(2008)은 지상기준점을 이용하여 회전식 라인 카메라로 획득한 실외 전방위 영상의 지오레퍼런싱을 수행하였다.

실내 영상의 지오레퍼런싱은 실내의 특정점을 기준으로 하는 객체좌표계 상에서 영상의 외부표정요소가 결정되어야 한다. 그러나 실내에서는 외부에서 사용하는 절대좌표계와 같이 정의된 객체좌표계가 존재하지 않고 기준점 확보의 어려움이 있기 때문에 실내 전방위 영상의 지오레퍼런싱을 수행하기 어렵다. 이에, 본 연구에서는 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상의 지오레퍼런싱 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여, 첫째, 실내에서 기준이 되는 객체좌표계를 정의하여 객체기준점을 확보한다. 둘째, 투영법이 4가지인 어안렌즈로 구성된 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상의 공선방정식을 유도한다. 셋째, 잔차가 가장 적은 투영법으로 유도한 공선방정식으로 외부표정요소인 회전좌표계의 위치와 자세를 추정하는 방법의 적합성을 분석하고자 한다.

## 2. 지오레퍼런싱 방법론

회전식 라인 카메라로 취득한 단일 전방위 영상의 지오레퍼런싱, 즉 외부표정요소를 결정하는 방법론을 유도하고자 한다. 이를 위해, 먼저 회전식 라인 카메라와 좌표계들을 정의하고, 회전식 라인 카메라로 취득한 전방위 영상에 대한 공선방정식을 유도한다. 또한, 지오레퍼런싱 과정에 필요한 객체기준점을 실내에서 효율적으로 획득

하는 방법을 제시하고 공선방정식과 객체기준점을 이용하여 외부표정요소 추정을 위한 수학적 모델을 소개한다.

### 2.1 회전식 라인 카메라 및 좌표계 정의

본 연구에서 제안한 회전식 라인 카메라는 그림 1과 같이  $1 \times n$ 개의 픽셀을 가지고 있는 라인 카메라 한대가 회전중심으로부터  $r$ 만큼 떨어져 시계방향으로  $360^\circ$ 를 회전하며 영상을 촬영하는 시스템이다. 회전하며 촬영하는 한 줄의 영상들을 순차적으로 접합하여 최종적으로  $m \times n$ 개의 픽셀을 갖는 전방위 영상을 생성한다.

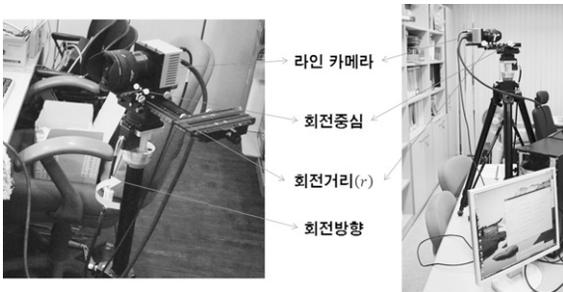


그림 1. 회전식 라인 카메라

실내에서 회전식 라인 카메라로 전방위 영상을 획득할 때, 객체점들이 존재하는 객체좌표계와 카메라가 회전하는 회전좌표계, 영상이 찍히는 순간의 카메라 좌표계로 구성된다. 객체좌표계는 실내의 임의의 코너점을 원점으로 정의할 수 있다. 객체좌표계의 자세는 코너점에서 만나는 세 개의 모서리들로 정의한다.  $OZ$ 축은 천장에서 코너점으로 이어지는 모서리로 정의하고,  $OX$ 축과  $OY$ 축은 나머지 두 개의 모서리로 정의할 수 있다. 회전좌표계의 원점은 회전 중심으로 정의한다. 회전좌표계의  $^RZ$ 축은 천정 방향으로 객체좌표계의  $OZ$ 축과 동일한 방향으로 정의하고,  $^RX$ 축은 원점과 회전을 시작하는 점을 연결하여 정의하며,  $^RY$ 축은  $^RX$ 축을 반시계방향으로  $90^\circ$ 만큼 회전하여 정의한다. 카메라좌표계의 원점은 영상이 촬영되는 지점으로 정의한다. 카메라좌표계는 영상이 촬영되는 순간의 위치와 자세로 정의되므로 영상의  $i$ 방향에 따라 다르게 정의된다. 카메라좌표계의  $^CZ$ 축은 광학축으로 정의하고  $^CY$ 축은 천정방향으로 정의하며  $^CX$ 축은  $^CY$ 축을 반시계방향으로  $90^\circ$ 만큼 회전하여 정의한다.

그림 2와 그림 3은 회전식 라인 카메라의 기하모델을 3차원과 2차원으로 나타낸 그림이다.  $P$ 는 객체점이고  $P'$ 는 객체점의 영상점이다.  $r$ 은 회전반경이고  $f$ 는 초점거리이며  $^R O_C$ 은 영상을 촬영하는 순간의 카메라의 위치이고  $\alpha$

는 영상을 촬영하는 순간의 회전각이다.  $\beta$ 는 라인 카메라가  $^CX$ 축과 이루는 각이다.

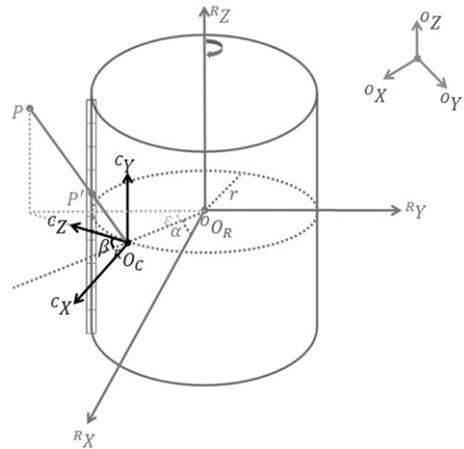


그림 2. 회전식 라인 카메라의 기하모델

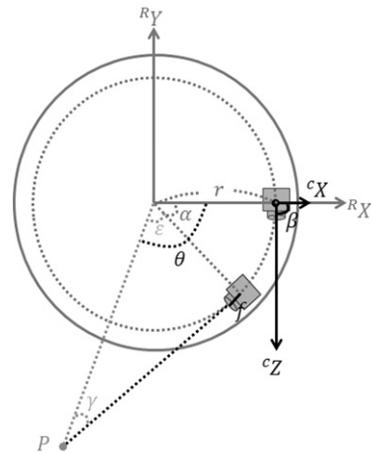


그림 3. 회전식 라인 카메라의 평면 기하모델

### 2.2 전방위 영상에 대한 공선방정식

공선방정식은 객체점이 영상에 투영된 지점을 결정하는 공식으로써 중심투영의 원리에 따라 투영중심, 객체점과 영상점이 하나의 직선 상에 존재한다는 조건으로 유도된다. 전방위 영상에 대한 공선방정식은 객체점의 좌표변환, 영상점에서의 투영, 영상점의 좌표변환으로 나누어 유도할 수 있다.

첫째, 객체점의 좌표변환은 객체좌표계로 표현된 객체점( $P$ )을 카메라좌표계로 표현되는 객체점( $C$ )으로 변환한다. 먼저, 식 (1)을 이용하여  $^O P$ 를 회전좌표계로 표현되는 객체점 ( $^R P$ )으로 변환한다. 다음으로, 식 (2)를 이용하

여  ${}^R P$ 를  ${}^C P$ 로 변환한다.  ${}^O O_R({}^O X_R, {}^O Y_R, {}^O Z_R)$ 는 객체좌표계에서 표현된 회전좌표계의 원점이고  ${}^R R_O$ 는 회전좌표계의 자세( $\omega, \phi, \kappa$ )로 계산하는 객체좌표계에서 회전좌표계로의 회전변환행렬이다.  ${}^R O_C$ 는 회전좌표계에서 표현된 카메라좌표계의 원점이고  ${}^C R_R$ 은 회전좌표계에서 카메라좌표계로의 회전변환행렬이다. 여기서 카메라좌표계의 원점은 식 (3)과 같이 사진을 촬영하는 순간의 회전각  $\alpha$ 로 결정할 수 있다. 카메라좌표계의 회전변환은 식 (4)와 같이  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 결정할 수 있다. 이때  $\alpha$ 는 그림 3에서와 같이  $\theta$ 와  $\varepsilon$ 으로 구할 수 있는데,  $\theta$ 는 회전좌표계로 표현된 객체점의 평면좌표값으로 식 (5)와 같이 정의할 수 있고  $\varepsilon$ 은 sin법칙에 의해서  $\gamma$ 를 구한 후, 삼각형 내각의 합 조건을 이용하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다.  $\alpha$ 는 식 (7)와 같이 정의할 수 있으며  $-2\pi \leq \alpha \leq 0$ 이고  $\theta \leq 0$ 이며  $\beta > 0$ 이다.

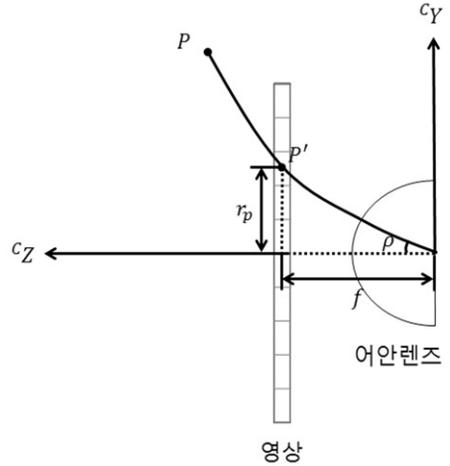


그림 4. 어안렌즈의 투영

$${}^R P = {}^R R_O ({}^O P - {}^O O_R) \tag{1}$$

$${}^C P = {}^C R_R ({}^R P - {}^R O_C) \tag{2}$$

$${}^R O_C = \begin{bmatrix} r \cos \alpha \\ r \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$${}^C R_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos -(\alpha - \beta) & -\sin -(\alpha - \beta) & 0 \\ \sin -(\alpha - \beta) & \cos -(\alpha - \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\theta = \begin{cases} \text{atan2}({}^R Y, {}^R X), & \text{atan2}({}^R Y, {}^R X) \leq 0 \\ \text{atan2}({}^R Y, {}^R X) - 2\pi, & \text{atan2}({}^R Y, {}^R X) > 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$\varepsilon = \pi - (\pi - \beta) - \sin^{-1} \left( \frac{r \sin(\pi - \beta)}{\sqrt{{}^R X^2 + {}^R Y^2}} \right) = \beta - \sin^{-1} \left( \frac{r \sin \beta}{\sqrt{{}^R X^2 + {}^R Y^2}} \right) \tag{6}$$

$$\alpha = \theta + \varepsilon = \text{atan2}({}^R Y, {}^R X) + \beta - \sin^{-1} \left( \frac{r \sin \beta}{\sqrt{{}^R X^2 + {}^R Y^2}} \right) \tag{7}$$

둘째, 영상점에서의 투영은 카메라의 투영법으로 결정할 수 있다. 본 연구에서는 어안렌즈 라인 카메라를 사용하였으므로 그림 4와 같은 어안렌즈 카메라의 투영법을 이용한다.  $f$ 는 라인 카메라의 초점거리이고,  $\rho$ 는 라인 카메라의 광선과 광학축과 이루는 각이며,  $r_p$ 는 라인 카메라의 투영중심에서 영상점까지의 거리로 본 연구에서 제안하는 전방위 영상의  $j$ 방향 좌표값이다. Juho 등(2004)은 4종류의 어안렌즈 카메라 투영법을 제시하였고 그 중 가장 많이 사용하는 투영법 하나를 실험에서 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 4종류의 투영법 중 사용된 카메라에 적합한 투영법을 알지 못하므로 식 (8)에서 제시한 4가지 투영법을 모두 적용하여 차이가 가장 적은 투영법을 결정한다. 식 (9)은 라인 카메라의 광선과 광학축과 이루는 각을 결정하는 식이다.

$$r_p = \begin{cases} 2f \tan \left( \frac{\rho}{2} \right) & \text{투영법1} \\ f \rho & \text{투영법2} \\ 2f \sin \left( \frac{\rho}{2} \right) & \text{투영법3} \\ f \sin(\rho) & \text{투영법4} \end{cases} \tag{8}$$

$$\rho = \tan^{-1} \left( \frac{{}^C Y}{{}^C Z} \right) \tag{9}$$

셋째, 영상점의 좌표변환은 카메라 좌표계로 표현된 영상점을 영상 좌표계에서 표현되도록 식 (10)과 같이 변환한다. 회전과 관련 있는 영상의 칼럼방향의 좌표값( $i$ )은 카메라의 위치 및 자세와 관계있으므로 객체점이 영상에 맺히는 각( $\alpha - \beta$ )을 픽셀당 회전각( $\mu_\alpha$ )으로 나누어 결정한다.  $\mu_\alpha$ 는  $360^\circ$ 를  $i$ 방향의 총 픽셀수( $m$ )으로 나누어 결정한다. 영상의 로우방향의 좌표값( $j$ )은  $r_p$ 를 픽셀당  $j$ 방향의 크기( $\mu_j$ )로 나누어 결정할 수 있다. 그런데 영상의  $j$ 방향 좌표값은  $-\frac{n}{2}$ 에서  $\frac{n}{2}$ 의 범위를 가지므로 식 (10)과 같이 영상점의  $j$ 좌표값을 결정한다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha - \beta}{\mu_\alpha} \\ \frac{n}{2} - \frac{r_p}{\mu_j} \end{bmatrix} \tag{10}$$

### 2.3 외부표정요소 추정

실외 영상의 외부표정요소 추정은 GPS 또는 토탈스테이션으로 측정하여 취득되는 절대좌표값의 지상기준점을 이용한다. 그러나 실내 영상의 경우, 절대좌표값의 지상기준점을 사용하기 어렵다. 따라서 실내 영상의 외부표정요소를 추정하기 위해서는 실내에서 정의되는 객체좌

표계가 필요하며 객체좌표계로 표현된 객체기준점 좌표가 필요하다. 객체좌표계의 설정은 실내의 한 모서리점을 원점으로 정의하고 원점에서 만나는 세 개의 모서리를 각축의 자세로 정의함으로써 가능하다. 이렇게 정의한 객체좌표계에서의 코너점들의 좌표값은 원점과의 거리를 이용하여 그림 5와 같이 정의할 수 있다.

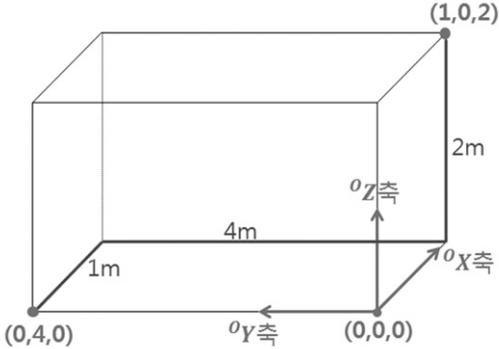


그림 5. 객체좌표계 정의

위와 같이 주로 코너점으로 취득되는 객체좌표계에서 표현된 객체기준점과 2.2절에서 유도한 회전식 라인 카메라로 획득한 전방위 영상의 공선방정식은 식 (11)과 같고, 식 (12)와 같이 개략적으로 표현할 수 있다. 회전좌표계의 위치와 자세( $OX_R, OY_R, OZ_R, \omega, \phi, \kappa$ )만 추정되면, 영상이 촬영될 때의 회전각( $\alpha$ )은 계산할 수 있고 카메라가 틀어진 각( $\beta$ )을 알기때문에 영상이 촬영된 카메라의 위치와 자세가 모두 결정된 것이다. 따라서 본 연구에서는 회전식 라인 카메라의 외부표정요소를 회전좌표계의 위치와 자세로 정의하고 이를 추정함으로써 지오레퍼런싱을 수행한다. 여기서 영상점 ( $i, j$ )은 외부표정요소와 객체기준점( $OX, OY, OZ$ ), 회전반경 ( $r$ ), 카메라의 틀어진 각( $\beta$ )이 비선형으로 관계하고 있는 모델이다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} atan2({}^R Y, {}^R X) - \sin^{-1} \left( \frac{r \sin \beta}{\sqrt{{}^R X^2 + {}^R Y^2}} \right) \\ \frac{n}{2} - \frac{2f \tan \left( \frac{\tan^{-1} \left( \frac{{}^C Y}{{}^C Z} \right)}{2} \right)}{\mu_j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$(i, j) = f(r, \beta, \omega, \phi, \kappa, {}^O X_R, {}^O Y_R, {}^O Z_R, {}^O X, {}^O Y, {}^O Z) \quad (12)$$

하나의 객체기준점은 하나의 영상점에 대응되므로 식 (12)같은 두 개의 관측방정식을 수립할 수 있다. 6개의 외부표정요소를 풀려면 적어도 6개의 관측방정식이 필요하

고 이에 따라 3개 이상의 기준점이 필요하다. 3개 이상의 기준점을 사용해서 위와 같은 관측방정식을 수립한 후 선형화하여 최소제곱법을 적용하여 외부표정요소를 추정한다.

### 3. 실험 결과

먼저 회전식 라인 카메라로 전방위 영상과 객체기준점 (OCP)을 획득한 후 4종류의 투영법을 적용하여 지오레퍼런싱을 수행하고 잔차가 최소인 투영법을 결정한다. 또한, 결정된 투영법을 적용한 결과를 분석하여 제안하는 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상의 지오레퍼런싱의 적합성을 판단한다.

#### 3.1. 전방위 영상 획득

본 연구에서는  $1 \times 4000$  픽셀을 가진 라인카메라를 사용하였고, 카메라의 초점거리( $f$ )는 15mm이며 카메라와 회전좌표계의  ${}^R X$ 축과 이루는 각( $\beta$ )을  $90^\circ$ 로 고정하였다. 먼저, 회전반경( $r$ )을 0으로 설정하여 실내 전방위 내부 영상을 획득한 후, 회전반경을 18cm로 설정하여 실내 전방위 외부 영상을 획득하였다. 전방위 영상의 크기는  $8000 \times$



그림 6. 실내 전방위 내부 영상



그림 7. 실내 전방위 외부 영상

4000이고 픽셀당 크기는  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 이다. 그림 6은 내부 영상이고 그림 7은 외부 영상이다. 영상에서 노란색으로 표시된 점은 객체기준점으로 56개점을 사용하였다.

### 3.2. 객체기준점 획득

회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상의 외부 표정요소를 추정하기 위해서는 3개 이상의 객체기준점이 필요하다. 본 연구에서는 회전식 라인 카메라에 가장 적합한 투영법을 결정하기 위하여 다수의 객체기준점을 사용하였다.

먼저, 토탈스테이션으로 8개의 코너점과 74개의 객체점을 측정하였다. 객체점은 영상에서 보이는 책장들의 교차점들로 구성하였다. 4개의 코너점을 이용하여 측정좌표계와 객체좌표계간의 좌표변환계수를 추정하고, 추정된 좌표변환 계수를 이용하여 74개의 객체점을 객체좌표계로 좌표변환하였다. 마지막으로, 객체점의 이상점을 제

거하여 최종적으로 52개의 객체점과 4개의 모서리점으로 56개의 객체기준점을 획득하였다. 이상점은 책장에서 비슷한 높이에 있어야 하는 두 점들 Z값의 차가 큰 것과 일정한 길이를 가지는 책장 길이의 차이가 큰 것으로 정의하였다.

표 1은 좌표변환계수 추정시 사용한 4개의 코너점 좌표로 측정좌표계와 객체좌표계로 표현된 좌표값이다. 표 2는 추정된 좌표변환계수로 객체좌표계에서 표현된 측정좌표계의 원점과 자세이다. 표 3은 좌표변환 수행 전과 후의 코너점 좌표으로, 측정좌표계와 객체좌표계로 표현된 8개 코너점들이다. 그림 8과 그림 9는 좌표변환 수행 전과 후의 객체점들을 그린 것으로 측정좌표계와 객체좌표계로 표현된 객체점들이다. 그림 10은 이상점과 이상점을 제거한 객체점들을 그린 것이다. 이상점들은 녹색으로 표시하였고 이상점을 제거한 52개의 객체점들은 파랑색으로 표시하였다.

표 1. 좌표변환계수 추정시 사용한 4개의 모서리점

구 분	측정좌표계(m)			객체좌표계(m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
CP0	2.3040	-0.5030	-0.1720	0.0000	0.0000	0.0000
CP1	2.2980	-0.4990	2.3490	0.0000	0.0000	2.5210
CP2	-0.6630	-1.7420	2.3440	0.0000	3.2113	2.5210
CP7	-3.0610	4.0280	2.3510	6.2485	3.2113	2.5210

표 2. 추정된 좌표변환 계수

	이동변환 요소(m)			회전변환 요소(°)		
	$X_t$	$Y_t$	$Z_t$	$\omega$	$\phi$	$\kappa$
추정값	2.3038	-0.5015	-0.1721	0.07	-0.05	-247.40
정밀도	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.03$

표 3. 좌표변환 전후의 모서리점 좌표

	측정좌표계(m)			객체좌표계(m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
C0	2.3040	-0.5030	-0.1720	-0.0015	0.0003	0.0001
C1	2.2980	-0.4990	2.3490	0.0068	0.0012	2.5211
C2	-0.6630	-1.7420	2.3440	-0.0027	3.2125	2.5202
C3	-0.0950	4.9000	2.3220	5.9108	0.1353	2.4891
C4	-0.6630	-1.7440	-0.1740	-0.0067	3.2164	0.0022
C5	-0.3040	5.1910	2.3460	6.2598	0.2164	2.5129
C6	-0.1540	4.8880	2.3520	5.9224	0.1943	2.5191
C7	-3.0610	4.0280	2.3510	6.2458	3.2086	2.5216

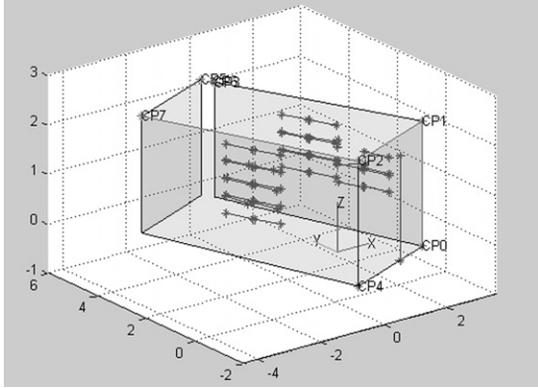


그림 8. 좌표변환 전 객체점

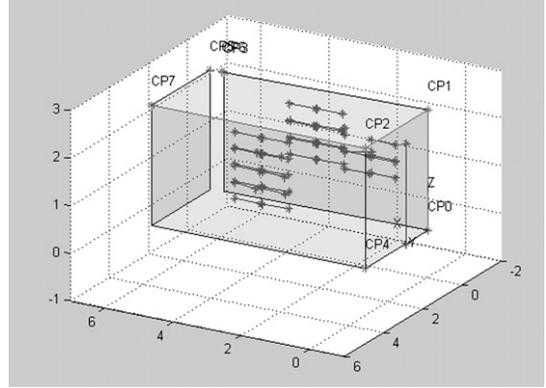


그림 9. 좌표변환 후 객체점

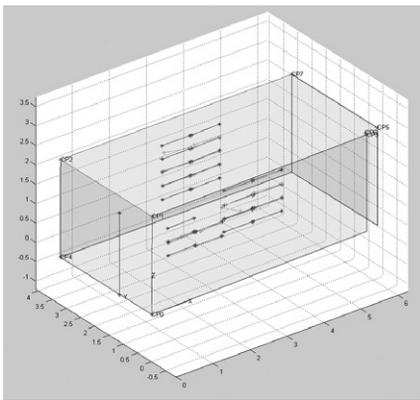


그림 10. 객체점의 이상점

### 3.3. 회전식 라인 카메라에 적합한 투영법 결정

최종적으로 결정한 56개의 객체기준점을 이용하여 내부 영상의 외부표정요소를 추정하였다. 전방위 내외부 영상은 동시에 획득하지 않고 내부영상을 먼저 획득한 후에 외부 영상을 획득하였으므로 내외부 영상의 회전중심은 동일하고 출발시점은 다르다. 따라서 내외부 영상의

회전좌표계의 원점과  $\omega, \phi$ 는 비슷했고  $\kappa$ 는 많이 달랐다.

표 4는 내부 영상의 외부표정요소를 추정한 결과이고 표 5는 외부 영상의 외부표정요소를 추정한 결과이다. 투영법 1을 적용할 때 가장 정밀하게 추정되었다.

표 6은 투영법별로 적용하여 추정한 분산요소, 영상점 잔차들의  $i, j$ 방향별 표준편차이다. 영상점의  $i$ 좌표값은 회전각( $\omega$ )과 관련이 있고,  $j$ 좌표값은 투영법과 관련이 있으므로 영상점의  $i, j$ 방향별로 표준편차를 살펴보았다. 투영법 1을 적용하였을 때, 관측치의 정밀도와 잔차의 표준편차가 가장 좋았다.

4가지 투영법을 적용한 결과, 상대적으로 영상점의  $i$ 방향 잔차의 표준편차는 적었으나  $j$ 방향 잔차의 표준편차는 투영법별로 큰 차이가 있었다. 또한,  $j$ 방향의 오차가 커질수록  $i$ 방향의 오차도 커지는 경향을 보인다. 이는  $j$ 방향에만 영향을 끼치는 투영법은 외부표정요소에도 영향을 미치고, 추정된 외부표정요소는 영상점의  $i$ 방향 좌표값에 영향을 미치기 때문으로 판단한다. 추정된 외부표정요소의 정밀도, 추정된 분산요소와 영상점  $i, j$ 방향별 잔차의 표준편차가 투영법 1을 적용하였을 때 가장 작았다. 따라

표 4. 투영법별 추정된 내부 영상의 외부표정요소

구분	투영법1		투영법2		투영법3		투영법4	
	값	정밀도	값	정밀도	값	정밀도	값	정밀도
$X(m)$	2.59	0.0014	2.60	0.0019	2.60	0.0024	2.60	0.0042
$Y(m)$	1.86	0.0021	1.87	0.0030	1.87	0.0039	1.88	0.0068
$Z(m)$	1.67	0.0011	1.67	0.0016	1.67	0.0020	1.68	0.0036
$\omega(^{\circ})$	0.11	0.0441	0.04	0.0640	0.00	0.0815	-0.09	0.1458
$\phi(^{\circ})$	1.05	0.0653	0.96	0.0943	0.92	0.1199	0.82	0.2136
$\kappa(^{\circ})$	15.26	0.0454	15.29	0.0642	15.31	0.0810	15.34	0.1402

표 5. 투영법별 추정된 외부 영상의 외부표정요소

구 분	투영법1		투영법2		투영법3		투영법4	
	값	정밀도	값	정밀도	값	정밀도	값	정밀도
$X(m)$	2.59	0.0011	2.59	0.0015	2.60	0.0019	2.60	0.0036
$Y(m)$	1.86	0.0019	1.87	0.0024	1.87	0.0032	1.88	0.0063
$Z(m)$	1.67	0.0010	1.68	0.0013	1.68	0.0017	1.68	0.0033
$\omega(^{\circ})$	0.80	0.0496	0.68	0.0644	0.63	0.0859	0.50	0.1685
$\phi(^{\circ})$	0.76	0.0501	0.74	0.0646	0.73	0.0862	0.71	0.1679
$\kappa(^{\circ})$	-21.71	0.0403	-21.65	0.0510	-21.63	0.0674	-21.57	0.1278

표 6. 투영법별 추정된 분산요소와 영상점 잔차들의  $i, j$ 방향별 표준편차

구 분	내부 영상(pixel)			외부 영상(pixel)		
	$\hat{\sigma}_0$	영상점 $i$ 방향 표준편차	영상점 $j$ 방향 표준편차	$\hat{\sigma}_0$	영상점 $i$ 방향 표준편차	영상점 $j$ 방향 표준편차
투영법1	7.40	2.56	9.85	6.63	3.61	8.38
투영법2	10.47	4.16	13.79	8.40	3.94	10.86
투영법3	13.19	5.32	17.35	11.08	4.83	14.46
투영법4	22.83	8.60	30.21	21.02	7.87	27.83

서 본 연구에서는 제안한 회전식 라인 카메라에 적합한 투영법으로 투영법 1을 결정하였다.

### 3.4. 제안한 지오레퍼런싱의 적합성 분석

지오레퍼런싱의 적합성은 영상점의  $i, j$ 방향별 잔차 크기의 분포와 주요 변수와 잔차와의 관련성으로 분석할 수

있다. 먼저, 투영법 1을 적용하여 추정한 외부표정요소로 계산된 영상점의  $i$ 방향 잔차 크기의 분포 경향을 살펴보았다. 그림 11과 12는 내외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차의 히스토그램이다. 몇몇의 이상값을 포함하지만 정규분포에서 크게 벗어나지 않는 것으로 보여진다.

다음으로 영상점의  $i$ 값을 결정하는 주요변수인 회전각

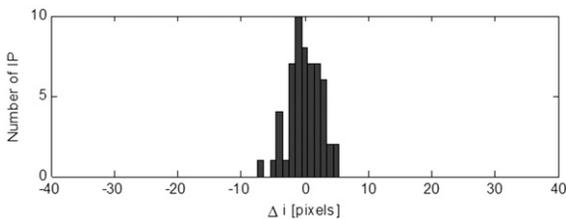


그림 11. 내부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차 분포

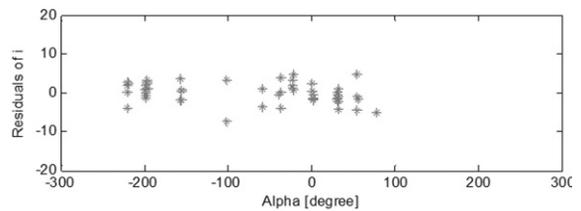


그림 13. 회전각에 따른 내부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차

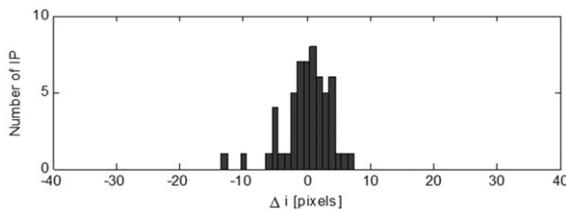


그림 12. 외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차 분포

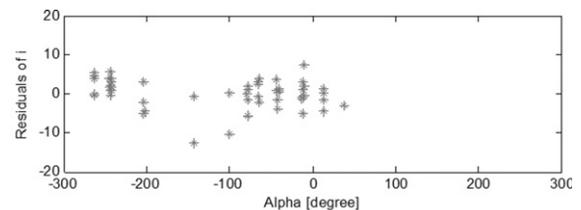


그림 14. 회전각에 따른 외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차

( $\omega$ )와 영상점의  $i$ 방향 잔차를 살펴보았다. 그림 13과 14에서 보듯이, 회전각과 영상점의  $i$ 방향 잔차간에는 큰 관련성이 없음을 알 수 있었다.

그림 15와 16은 내외부 영상점의  $j$ 방향 잔차 크기의 히스토그램이다. 가장 적합한 어안렌즈 투영법을 적용했음에도 불구하고 표준편차가 작지 않은데 이는 왜곡이 심한 어안렌즈의 특성 때문인 것으로 판단한다.

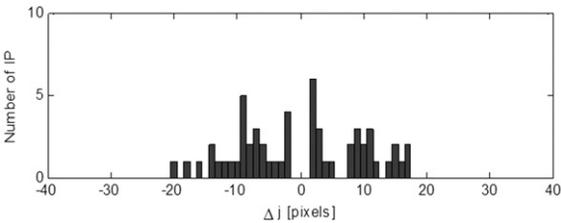


그림 15. 내부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차 분포

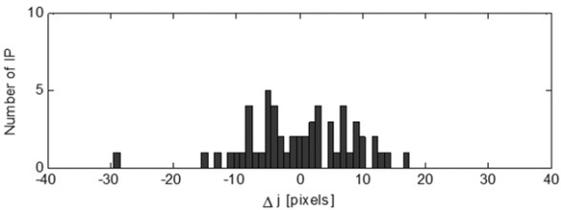


그림 16. 외부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차 분포

다음으로 영상점의  $j$ 값은 주요변수인 객체점의  $^RZ$ 값과 만 관계가 있다. 따라서 객체점의  $^RZ$ 값과 영상점의  $j$ 방향 잔차와의 관련성을 살펴보았다. 그림 17과 18에서 보듯이,  $^RZ$ 값과  $j$ 방향의 잔차 간에는 음의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 특히, -0.5m와 0.5m 사이에서 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다.

또한, 영상점에 영향을 끼치는 주요한 변수인 카메라와 객체점간의 거리( $D$ )와 영상점의  $i, j$ 방향별 잔차와의 관련성을 살펴보았다. 그림 19와 20은 카메라와 객체점간의 거리에 따른 내외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차이고 그림 21과 22는 내외부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차이다. 큰 관련성이 없음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 방사거리에 따른 영상점의  $i$ 방향과  $j$ 방향의 잔차를 살펴보았다. 그림 23과 그림 24는 방사거리에 따른 내외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차이고 그림 25과 26은 내외부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차이다.  $j$ 방향의 영상점 잔차의 분포가 방사거리와 뚜렷한 관련성을 나타내고 있으며 이는 렌즈왜곡이 영상점의  $j$ 방향에 크게 영향을 끼치기 때문이다.

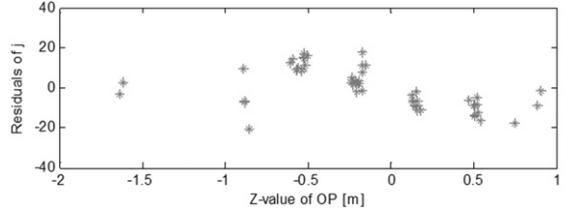


그림 17.  $Z$ 값에 따른 내부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차

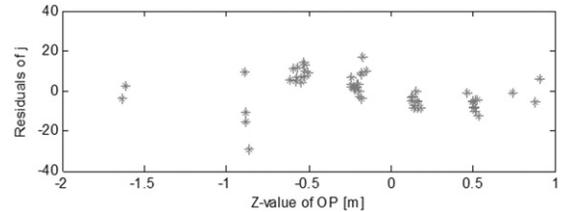


그림 18.  $Z$ 값에 따른 외부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차

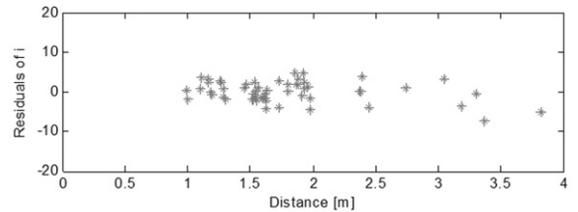


그림 19. 거리에 따른 내부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차

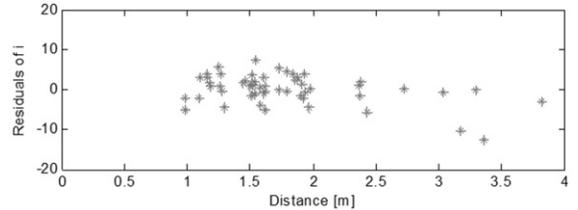


그림 20. 거리에 따른 외부 영상의  $i$ 방향 영상점 잔차

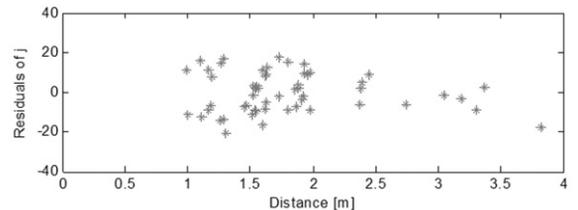


그림 21. 거리에 따른 내부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차

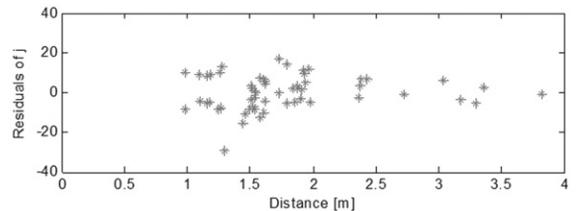


그림 22. 거리에 따른 외부 영상의  $j$ 방향 영상점 잔차

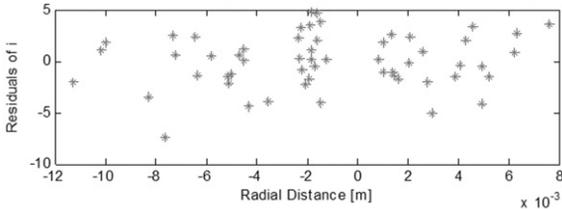


그림 23. 방사거리에 따른 내부 영상의 *i*방향 영상점 잔차

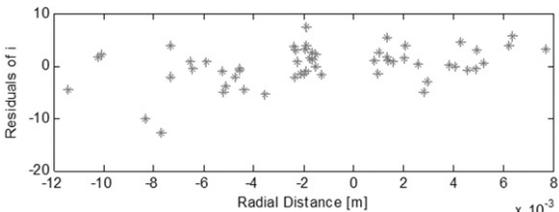


그림 24. 방사거리에 따른 외부 영상의 *i*방향 영상점 잔차

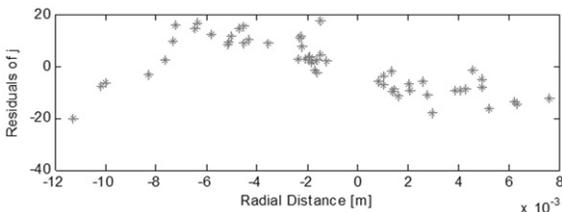


그림 25. 방사거리에 따른 내부 영상의 *j*방향 영상점 잔차

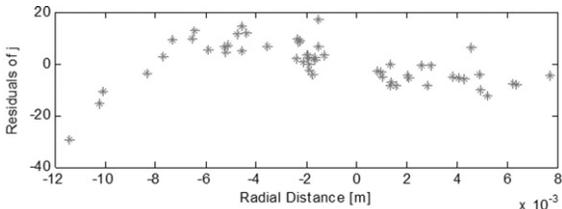


그림 26. 방사거리에 따른 외부 영상의 *j*방향 영상점 잔차

#### 4. 결론

본 연구에서는 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 단일 전방위 영상의 지오레퍼런싱을 위하여 외부표정요소를 추정하였다. 이를 위하여, 회전식 라인 카메라 및 좌표계들을 정의하고, 공선방정식을 유도하였다. 또한 객체기준점 확보를 위하여 객체좌표계를 정의하고 좌표변환계수를 추정한 후, 좌표변환을 수행하여 객체좌표계로 표현된 객체기준점을 획득하였다. 또한 4가지 투영법을 적용하여 외부표정요소를 추정하였고 추정 정밀도가 가장 좋은 투영법으로 본 연구에 적합한 투영법을 선정하였다. 선정된 투영법으로 계산한 잔차의 분포 및 주요 변수와의 관련성에 대하여 분석함으로써, 제한한 지오레퍼런싱 방법

이 회전식 라인 카메라로 획득한 실내 전방위 영상에 적합함을 확인하였다.

추정된 외부표정요소의 위치는 1.4mm의 정밀도로, 자세는 0.05°의 정밀도로 추정할 수 있었다. 또한 영상점 *i*방향의 잔차는 2.56 pixel, *j*방향의 잔차는 9.85 pixel의 표준편차를 나타내었고 영상점의 *j*방향 잔차는 객체점의 *Z*값과의 음의 상관관계가 있었다. 이 외에도 상대적으로 영상점의 *j*방향 잔차가 방사거리와 뚜렷한 관련성을 보이는 것으로 보아 어안렌즈의 왜곡 보정이 필요한 것으로 판단한다.

향후, 회전식 라인 카메라의 캘리브레이션을 수행한다면 회전중심의 거리(*r*)와 카메라가 틀어진 각(*β*), 어안렌즈 카메라의 왜곡계수 등의 추정이 가능할 것이고 보다 정밀한 지오레퍼런싱을 수행할 수 있을 것이다. 또한 두장 이상의 지오레퍼런싱된 실내 전방위 영상을 이용하여 객체점들의 3차원 좌표추정이 가능할 것이며, 더 나아가 정밀한 실내 3차원 모델링이 가능할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(JP100056)과 공간정보 전문인력 양성사업에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 나종기, 박운용, 문두열, 김진수 (2004). Direct Georeferencing을 이용한 도화 정확도 분석, 한국측량학회 학술대회 논문집, pp. 263-268.
- 송연경, 박운용, 박홍기 (2005). Direct Georeferencing에 의한 CCD 영상의 적용기법, 한국측량학회지, 제23권, 제1호, pp. 77-88.
- 오태완, 이임평 (2010). 모바일매핑시스템으로 취득한 중첩 전방위 영상으로부터 3차원 객체좌표의 결정, 한국측량학회지, 제28권, 제3호, pp. 189-196.
- 최경아, 이임평 (2009). UAV 기반 저가 멀티센서시스템을 위한 무기준점 AT를 이용한 영상의 Georeferencing, 한국측량학회지, 제27권, 제2호, pp. 249-260.
- Bae, S. and Kim, B. (2005). Accuracy Analysis of Image Orientation Technique and Direct Georeferencing Technique, 한국GIS학회, 한국GIS학회지, 제13권, 제4호, pp. 373-380.
- Huang, F., Wei, S. and Klette, R. (2003). Comparative Studies of Line-based Panoramic Camera Calibration, 2003

- Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Washington, DC, USA, pp. 71-77.
- Juho, K. and Sami, B. (2004), A Generic Camera Calibration Method for Fish-Eye Lenses, the 17<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UK, pp. 10-13.
- Kang, S. B. and Weiss, R. (1997), Characterization of Errors in Compositing Panoramic Images, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, pp. 103-109.
- Li, R., Yan, L. and Di, K., Wu, B. (2008), A New Ground-Based Stereo Panoramic Scanning System, the XXIIth ISPRS Congress, Beijing, China, pp. 723-727.
- Li, Y. and Shum, H. Y. (2004), Stereo Reconstruction from Multiperspective Panoramas, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 26, No. 1, pp. 45-62.
- Oh, S. and Lee, I. (2011), Estimation of 3D Object Points from Omni-directional Images Acquired by A Rotating Line Camera, the 32<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Taipei, Taiwan.
- Shum, H. and Szeliski, R. (1999), Stereo Reconstruction from Multiperspective Panoramas, 7<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision ICCV'99, Kerkyra, Greece, pp. 14-21.
- Tang, W. K. and Hung, Y. S. (2001), Concentric Panorama Geometry, 8<sup>th</sup> IEEE Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Hong Kong, China, pp. 507-512.
- Torii, A., Sugimoto, A. and Imiya, A. (2003), Mathematics of a Multiple Omni-Directional System, the 2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Washington, DC, USA, pp. 1063-6919.
- Wei, S., Huang, F. and Klette, R. (2002), The Design of a Stereo Panorama Camera for Scenes of Dynamic Range, 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2002), Quebec, Canada, pp. 635-638.
- Huang, F., Wei, S. and Klette, R. (2006), Rotating Line Cameras: Model and Calibration, IMA Preprint Series #2104, Institute for mathematics and ITS applications, University of Minnesota.

---

(접수일 2012. 02. 10, 심사일 2012. 02. 24, 심사완료일 2012. 04. 30)