

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제24권 제6호, 2019년 11월 (JBE Vol. 24, No. 6, November 2019)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2019.24.6.919>

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

## 다중 입체 영상 획득을 위한 정밀 카메라 캘리브레이션 기법

김 중 희<sup>a)</sup>, 윤 여 훈<sup>a)</sup>, 김 준 수<sup>b)</sup>, 윤 국 진<sup>b)</sup>, 정 원 식<sup>b)</sup>, 강 석 주<sup>a)†</sup>

### Accurate Camera Calibration Method for Multiview Stereoscopic Image Acquisition

Jung Hee Kim<sup>a)</sup>, Yeohun Yun<sup>a)</sup>, Junsu Kim<sup>b)</sup>, Kugjin Yun<sup>b)</sup>, Won-Sik Cheong<sup>b)</sup>, and Suk-Ju Kang<sup>a)†</sup>

#### 요 약

본 논문에서는 입체 영상을 획득하기 위한 정밀 카메라 캘리브레이션(calibration) 기법을 제안한다. 일반적인 카메라 캘리브레이션 기법은 체커보드 구조의 목적 패턴을 이용하여 수행한다. 체커보드 패턴은 사전에 인지된 격자구조를 활용할 수 있으며, 체커보드 코너점을 통해 특징점 매칭을 용이하게 수행할 수 있음에 따라 2차원 영상 픽셀 지점과 3차원 공간상의 관계를 정확히 추정할 수 있다. 특징점 매칭을 통해 카메라 파라미터를 추정하므로 정밀한 카메라 캘리브레이션을 위해선 영상 평면내의 정확한 체커보드 코너 검출이 필요하다. 따라서 본 논문은 정확한 체커보드 코너 검출을 통해 정밀한 카메라 캘리브레이션을 수행하는 기법을 제안한다. 정확한 코너를 검출하기 위해 1-D 가우시안 필터링을 활용하여 코너 후보군들을 검출한 후 코너 정제(refinement) 과정을 통해 이상치(outlier)들을 제거하며 영상내의 부분 픽셀(sub-pixel) 단위의 정확한 코너를 검출한다. 제안한 기법을 검증하기 위해 카메라 내부 파라미터를 추정 결과를 판단하는 재투사 오차(reprojection error)를 확인하며, 카메라 위치 ground truth 값이 제공된 데이터 셋을 활용하여 카메라 외부 파라미터 추정 결과를 확인한다.

#### Abstract

In this paper, we propose an accurate camera calibration method for acquiring multiview stereoscopic images. Generally, camera calibration is performed by using checkerboard structured patterns. The checkerboard pattern simplifies feature point extraction process and utilizes previously recognized lattice structure, which results in the accurate estimation of relations between the point on 2-dimensional image and the point on 3-dimensional space. Since estimation accuracy of camera parameters is dependent on feature matching, accurate detection of checkerboard corner is crucial. Therefore, in this paper, we propose the method that performs accurate camera calibration method through accurate detection of checkerboard corners. Proposed method detects checkerboard corner candidates by utilizing 1-dimensional gaussian filters with succeeding corner refinement process to remove outliers from corner candidates and accurately detect checkerboard corners in sub-pixel unit. In order to verify the proposed method, we check reprojection errors and camera location estimation results to confirm camera intrinsic parameters and extrinsic parameters estimation accuracy.

Keyword : Image processing, Corner detection, Camera calibration, Multi-camera calibration

## 1. 서론

최근 카메라 및 디스플레이 기술의 발달에 따라 자율 주행, 3차원 복원 그리고 VR(virtual reality)에 대한 연구가 활발해지고 있다. 특히 카메라로 촬영한 2차원 영상을 기반으로 실제 3차원 공간으로 복원된 입체영상을 취득하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 이를 통해 몰입도 높은, 실제 세계에 가까운 VR 콘텐츠를 제공하기 위한 기술 수요가 높아지고 있다. 몰입도 높은 VR 콘텐츠를 제공하기 위해선 카메라의 특성을 파악하고 카메라를 통해 촬영된 영상과 3차원 공간간의 관계를 파악하는 과정이 필수적이며, 이를 조직화하고 필요한 파라미터들을 정확히 추정하는 과정이 필요하다. 조직화되며 모델화된 카메라 구조와 이를 구성하는 파라미터들을 추정하는 과정을 카메라 캘리브레이션이라 한다. 보편화된 카메라 캘리브레이션 기법<sup>[1]</sup>은 체커보드 패턴 혹은 독립된 원들로 구성된 패턴을 활용하여 진행한다. 부정확한 카메라 캘리브레이션은 취득한 입체 영상이 실제 3차원 공간과 상이한 출력을 초래하며 사용자의 몰입감을 저해한다. 카메라 파라미터를 추정하는 과정에서

영향을 주는 요소는 체커보드가 촬영된 영상 수와 영상의 체커보드 코너 검출 정확도 등이 있다. 추정 정확도를 높이기 위해 입력 영상수를 증대 시킬 경우, 체커보드를 여러 위치 및 자세로 배치한 영상을 필요로 하며, 이는 많은 업무량과 번거로움을 초래한다.

따라서, 본 논문에선 주어진 데이터를 최대한 활용하며 카메라 캘리브레이션의 정확도를 높일 수 있는 정밀한 체커보드 코너 검출 기법을 제안한다.

## II. 관련 이론

### 1. 카메라 캘리브레이션

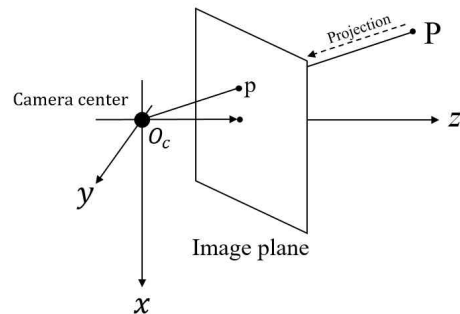


그림 1. 핀홀 카메라 모델 및 영상 평면상의 투영 변환  
Fig. 1. Pinhole camera model and image plane projection transformation

카메라는 그림 1과 같이 3차원 공간 좌표계상의 지점  $P = (X, Y, Z)$ 을 2차원 영상 좌표계 상의 한 픽셀 지점  $p = (x, y)$ 으로 사상(mapping)함으로써 영상을 취득할 수 있다. 동차 좌표계(homogeneous coordinate)<sup>[2]</sup>는 그림 1과 같이 영상 평면상 동일한 위치에 투영된 3차원 좌표계상의 여러 점들을 표현 가능한 좌표계로 카메라 캘리브레이션 과정에서 활용된다. 동차 좌표계를 활용하여 다음과 같은

a) 서강대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Sogang Univ.)

b) 한국전자통신연구원(ETRI)

‡ Corresponding Author : 강석주(Suk-Ju Kang)

E-mail: sjkang@sogang.ac.kr

Tel: +82-2-705-8466

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4809-956X>

※ 이 논문의 연구 결과 중 일부는 한국방송·미디어공학회 “2019년 하계 학술대회”에서 발표한 바 있음.

※ 이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기술진흥센터 (No. 2017-0-00072, 조실감 테라미디어를 위한 AV 부호화 및 LF 미디어 원천 기술 개발)와 한국연구재단 기초연구 사업(No. 2018R1D1A1B07048421)의 지원을 받아 수행된 연구임.

※This work was supported by the Institute for Information and Communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2017-0-00072) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2018R1D1A1B07048421).

· Manuscript received July 22, 2019; Revised October 4, 2019; Accepted October 21, 2019.

$$sp = K[R|t]P = CP$$

$$K = \begin{bmatrix} f_x & skew\_c & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [R|t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad p = [x, y, 1]^T \quad P = [X, Y, Z, 1]^T \quad (1)$$

투영 변환 식을 구성할 수 있다<sup>3)</sup>.

식 (1)의  $s$ 는 0이 아닌 척도 인자(scale factor)이며,  $p$ 는 영상 좌표계상의 동차 좌표계로 표현된 지점을 의미하며,  $P$ 는 영상 좌표계의  $p$ 에 대응되는 3차원 공간상에 놓인 동차 좌표계로 표현된 지점이다.  $f_x, f_y$ 는 픽셀 단위의 초점 거리를,  $c_x, c_y$ 는 픽셀단위의 주점을 의미하며,  $skew_c$ 는 카메라 센서의 기울어진 정도를 의미한다.  $K, R, T$ 는 각각 카메라 내부 파라미터 행렬, 회전 행렬 그리고 변위 행렬을 의미하고,  $M$ 은 카메라 투영 행렬을 의미한다. 영상 평면상에 투영된 지점을 통해 3차원 공간 좌표계간의 관계를 파악할 때 카메라 내·외부 파라미터 정보가 필요하며 해당 파라미터들을 추정하는 과정을 카메라 캘리브레이션이라 한다.

## 2. 단일 및 다중 카메라 캘리브레이션

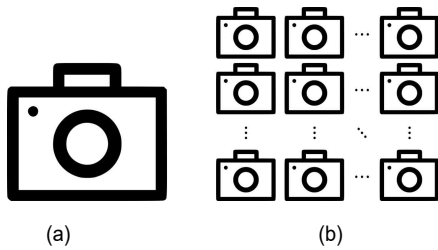


그림 2. 단일 및 다중 카메라 모델 도식 예시. (a) : 단일 카메라 모델 예시, (b) : 다중 카메라 모델 예시

Fig. 2. Example images of the of single camera model and multi-camera model

기존의 카메라 캘리브레이션은 그림 2의 (a)와 같이 단일 카메라의 내부파라미터를 추정하는 것을 중심으로 진행하였다. Tsai<sup>4)</sup>는 3차원 물체를 이용한 캘리브레이션을 처음 도입하였으며, 이를 간편화하기 위해 Zhang<sup>1)</sup> 기법은 인위적인 체커보드 패턴 사용을 제안한다. Zhang은 정확하게 검출할 수 있는 특징점인 체커보드 코너점과 사전에 인지한 격자구조를 활용하여 특징점간의 위치관계를 쉽게 판단할 수 있다는 특성을 활용하여 간편화된 카메라 캘리브레이션 기법을 제안하였다. 체커보드 패턴을 이용하여 영상 좌표계와 3차원 공간 좌표계상의 특징점 매칭쌍을 구성한 후, 선형 및 비선형 최적화 기법을 적용하여 최적의 카메라 파라미터를 추정한다.

그림 2의 (a)와 같은 단일 카메라 모델의 경우 카메라 캘리브레이션 수행 시 영상내의 체커보드를 촬영함에 있어

제약조건이 존재하지 않는다. 하지만 그림 2의 (b)와 같은 다중 카메라 모델의 경우 2개 이상의 카메라가 사용되는 다중 카메라 캘리브레이션이며 카메라 간의 위치 및 자세 정보를 추정하기 위해 각 카메라가 서로의 좌표 공간이 공유되는 체커보드를 촬영해야 한다<sup>1)</sup>. 3차원 공간 좌표계상의 한 지점  $P$ 에 대해 두 카메라 영상 평면상에 투영된 점을 각각  $p_1, p_2$ 라 할 시, 두 영상 지점간의 관계는 기초 행렬 (fundamental matrix)  $F^{[5]}$ 를 통해  $p_1^T F p_2 = 0$ 로 표현 될 수 있다. 이후 기초 행렬  $F$ 를 분해하여 각 카메라간의 상대적인 위치 및 자세정보를 추정할 수 있으며, 이를 다중 카메라 캘리브레이션이라 한다.

## 3. 체커보드 코너 검출

영상과 3차원 공간간의 정확한 변환 관계를 파악하기 위해선 정밀한 카메라 캘리브레이션과 정밀한 카메라 파라미터 추정이 필요하다. 추정 파라미터의 정확도를 개선하기 위해선 체커보드 코너점을 영상 평면내의 다양한 지점에서 검출하기 위해 여러 각도 및 위치에서 체커보드를 촬영해야 한다. 또한 체커보드 코너 특징점을 부분 픽셀(sub-pixel) 단위로 정확하게 검출함으로써 정확한 특징점 매칭을 수행해야 한다. OpenCV<sup>10)</sup>와 같은 상용화된 기존 코너 검출 알고리즘은 Harris 코너 검출기<sup>6)</sup>를 활용하며 해당 검출기는 픽셀의 그레디언트(gradient) 방향을 기반으로 코너를 검출한다. 하지만 픽셀의 그레디언트 방향을 판단하는 과정에서 임계값을 이용하여 분류를 진행하기 때문에 영상 환경에 민감하게 작용하며 일관적이지 않은 결과를 출력한다. 따라서 본 논문은 정밀 카메라 캘리브레이션을 위해 영상 환경에 강건하고 정확도 높은 코너 검출 기법을 제안하며 실험을 통해 검출 성능을 평가한다.

## III. 제안하는 기법

### 1. 체커보드 코너 검출 기법 개요

제안하는 기법의 전체 구성은 그림 3와 같다. 체커보드를 촬영한 영상을 입력으로 제안한 체커보드 초기 검출 기법을 적용하여 체커보드 코너 후보군들을 검출한다. 검출된 코너

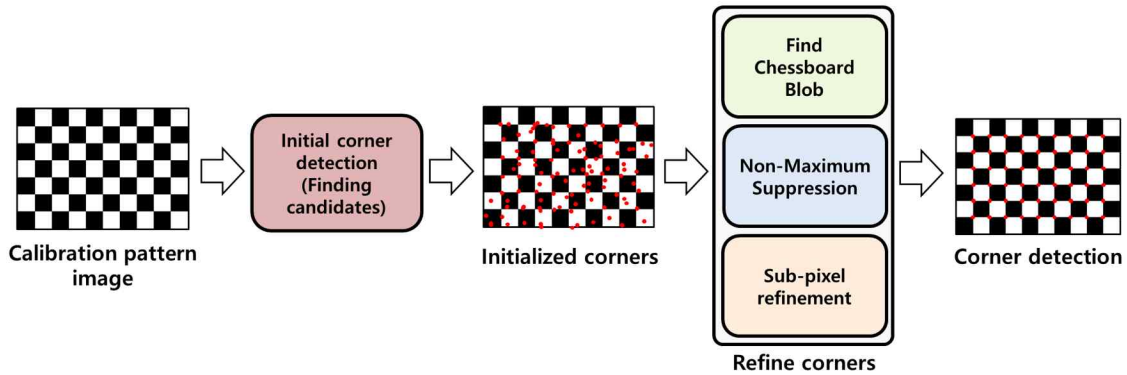


그림 3. 카메라 캘리브레이션을 위한 코너 검출 기법 개념도  
 Fig. 3. Concept of the corner detection method for camera calibration

후보군들에 대해 이상치(outlier)들을 제거하기 위한 정제과정을 적용하며 최종 정제된 체커보드 코너들을 검출한다.

## 2. 체커보드 코너 후보군 검출

픽셀의 그레디언트 방향만을 고려한 Harris 코너 검출 기법<sup>[6]</sup>보다 강건하며 캘리브레이션 정확도가 개선된 코너 검출을 위한 기법을 제안한다. 검출된 코너 후보군들이 실제 체커보드 코너 부근에 위치할 시 정제과정을 통해 실제 체커보드 코너의 위치를 찾을 가능성이 높아지므로 후보군 검출과정이 중요하다. 따라서 정확한 코너들을 검출하기 위해 다음과 같은 1차원 가우시안 필터 기반의 코너 후보군 검출 기법을 제안한다.

$$k_{1D}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \quad k_{1D}(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

식 (2)는 영상좌표계상의 x축, y축 상의 1차원 가우시안 필터링을 적용하는 수식이며  $u, v$ 는 각각 영상좌표계 가로축, 세로축 화소 좌표를 의미하며  $\sigma^2$ 는 커널내의 화소값에 대한 분산이다.  $1 \times k$  크기의 1차원 가우시안 필터 4개를 구성하여 픽셀 지점에 대해 상·하·좌·우 방향으로 2개의 필터를 적용하고 대각선 방향으로 나머지 필터를 적용한다. 대각선 방향에 대한 필터링의 경우 연산의 간소화를 위해 영상을 회전시킨 후 픽셀 지점에 대해 상·하·좌·우 4방향에 대한 가우시안 필터를 적용하여 상·하·좌·우 방향에 대한 필터

링과 동일한 연산을 수행한다. 출력된 1차원 가우시안 필터링 결과를 바탕으로 출력의 극대 극소차이를 판단하며, 만약 해당 지점이 체커보드 코너일 시 필터링된 값의 극대값과 극소값의 차이가 크게 나타난다. 이후 코너 지점 검출을 위한 임계값을 설정하여 검출된 코너 점들로 초기 코너 후보군들을 구성한다. 박스 필터가 아닌 가우시안 필터를 적용함으로써 픽셀 부근값에 대한 가중치를 적용할 수 있으므로 체커보드 사이즈와 크기에 강건하며 총 4개의 필터를 적용함으로써 적은 연산량을 통해 회전 변환에도 강건한 체커보드 코너를 검출을 수행한다. 다중 카메라 캘리브레이션 수행 시 서로 다른 모듈의 카메라에 대해 동일한 코너 지점을 검출해야함에 따라 코너 검출 결과가 카메라 모듈 환경에 강건해야한다. 제안 기법의 경우 극대, 극소의 차이값을 이용한다는 점에서 서로 다른 모듈의 카메라를 사용할 시에도 동일한, 강건한 결과를 출력한다.

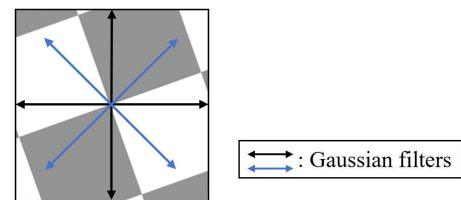


그림 4. 체커보드 코너 후보군 검출을 위한 1차원 가우시안 필터링 구조  
 Fig. 4. 1-dimensional gaussian filtering structure for detecting checkerboard corner candidates

그림 4는 1차원 가우시안 필터를 적용하는 과정을 도식화 한 것이다. 그림 4와 같은 예시에선 좌·상단을 향하는

대각선 필터에 대해 필터링된 출력이 극대화될 것이며 좌·하단을 향하는 대각선 필터를 통해 필터링된 결과가 최소화 되어 최대 및 최소 차이가 크게 나타날 것이며 임계값을 통해 해당 픽셀을 코너로 판단한다.

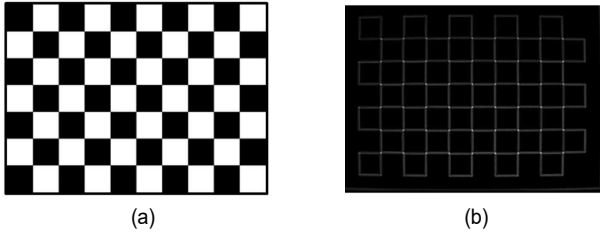


그림 5. 제안 기법 적용 결과 영상. (a) 입력 7x10 체커보드 패턴 영상, (b) 제안 기법 적용 출력 영상  
 Fig. 5. Proposed method results. (a) Input chessboard pattern image, (b) output response map

그림 5는 체커보드 영상에 대해 제안 기법의 필터를 적용한 결과로 코너 지점 부근에서 극대화된 값이 출력되는 것을 확인할 수 있다. 현 실험은 1×11 커널의 1차원 가우시안 필터와 필터의 시그마( $\sigma$ )는 2.5로 지정 후 진행하였으며 해당 값들은 실험을 통해 결정하였다.

### 3. 체커보드 코너 정제(refinement)

먼저 코너를 검출하기 위해 체커보드가 존재하는 공간을 파악하기 위해 닫힌 영역(closed area)을 검출함으로써 체커보드 영역을 파악한다. 설정된 영역내의 코너 후보군들에 대해 동일 코너 점상에 2개 이상의 코너가 검출되는 것

을 방지 위해 국지적인 최대값만을 보존하는 비최대값 억제(non-maximal suppression)<sup>[7]</sup>를 적용한다. 이후 이상치들이 코너 후보군  $c'$ 에 대해  $N_I(c')$ 의 정사각형 커널을 적용하며 코너 후보군의 인접 픽셀들  $p$ 에 대해 다음과 같은 연산<sup>[8,9]</sup>을 수행한다.

$$c = \arg \min_{c'} \sum_{p \in N_I(c')} (g_p^T(p - c'))^2 \quad (3)$$

식 (3)은 인접 픽셀  $p$ 에 대한 그레디언트  $g_p$ 를 구한 후 두 에지가 교차하는 점, 즉 모든 방향에 대한 그레디언트 값과 수직되는 지점이 체커보드 코너이므로 위의 최적화식을 통해 정제된 코너 지점  $c$ 를 구한다.

$$c = \sum_{p \in N_I(c')} (g_p g_p^T)^{-1} \sum_{p \in N_I(c')} (g_p g_p^T) p \quad (4)$$

최적화 식을 풀기 위해 코너 후보군  $c'$ 에 대한 미분 연산을 수행하여 식 (4)와 같은 닫힌 형태 방정식(closed form solution)으로 정리할 수 있다.

## IV. 실험 결과

### 1. 실험 환경 및 절차

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 평가하기 위해

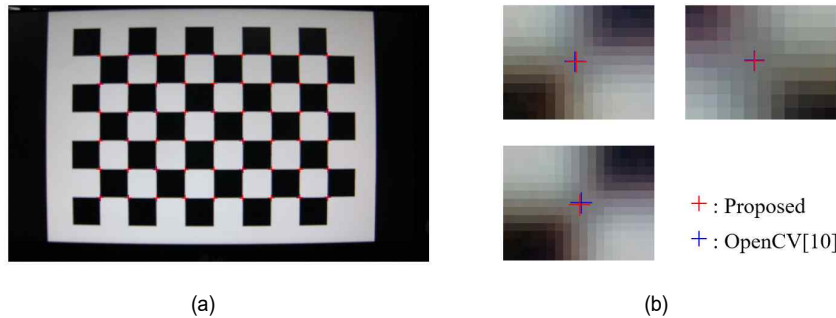


그림 6. 코너 검출 기법 비교 영상. (a) 코너 검출 기법이 적용된 체커보드 영상 샘플, (b) 체커보드 코너 부근에서 확대된 결과  
 Fig. 6. Corner detection method comparison results. (a) checkerboard corner detected sample image, (b) magnified results of checkerboard detection

7×10 체커보드 영상 데이터 셋에 대한 기존 코너 검출 기법<sup>[10]</sup>과 제안한 기법으로 코너 검출 실험을 진행한다. 데이터 셋은 각 카메라에 대해 내부 파라미터를 추정하기 위한 40장의 영상과 카메라 외부 파라미터를 확인하기 위해 모든 카메라에 대해 체커보드가 검출된 1장의 영상을 사용한다. 각 기법에 따른 카메라 캘리브레이션 정확도를 판단하기 위해 검출된 코너값을 기반으로 카메라 내부 파라미터 추정을 위한 단일 카메라 캘리브레이션과 상대적인 위치 및 자세정보, 카메라 외부 파라미터를 추정하기 위한 다중 카메라 캘리브레이션을 진행하였다.

그림 6을 통해 기존 알고리즘과 제안 기법의 체커보드 코너 검출 기법을 적용한 결과를 확인할 수 있다. 그림 6의 (b)와 같이 검출한 코너점들에 확대한 결과 각 기법들에 대해 서로 다른 지점을 검출한 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 각 기법의 정확도 및 결과가 상이할 것임을 확인할 수 있다.

검출된 코너점들을 이용한 캘리브레이션 정밀도를 판단하기 위해 먼저 카메라 내부 파라미터를 추정한다. 추정된 내부 파라미터를 이용하여 다음과 같은 재투사 오차 판단식에 대한 출력값을 확인한다.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|x_{ij} - \hat{x}(K, R, T, X_j)\| \quad (5)$$

식 (5)의  $x_{ij}$ 는  $i$ 번째 영상의  $j$ 번째 특징점에 대한 영상

좌표계 상의 픽셀 지점을 의미하며,  $\hat{x}(K, R, T, X)$ 는 추정된 카메라 파라미터  $K, R, T$ 를 이용하여 3차원 공간 좌표계 상의 점  $X_j$ 를 영상 평면으로 투영하는 연산이다. 영상의 실제 픽셀 지점과 추정한 파라미터를 통해 투영된 영상 평면상의 지점간의 거리 차이를 통해 추정한 파라미터의 정확도를 판별하며, 모든 체커보드 코너점에 대해 수행하고 이를 통해 카메라 캘리브레이션 정확도를 판단한다.

이 후 카메라 외부 파라미터의 추정오차를 비교하는 실험으로 실제 측정된 ground truth 위치 정보값과 캘리브레이션을 통해 추정한 카메라 위치 정보를 비교한 실험을 진행하며, 해당 실험은 사전에 추정한 카메라 내부파라미터를 활용하여 진행한다.

## 2. 카메라 캘리브레이션 결과

제안한 기법의 성능 평가를 위해 기존 알고리즘<sup>[10]</sup>과 제안 기법으로 검출된 체커보드 코너점들을 기반으로 카메라 캘리브레이션을 진행하였다. 코너 검출 정확도는 카메라 내부 파라미터 추정 정밀도를 의미하는 pixel 단위의 재투사 오차와 카메라 외부파라미터 정확도를 의미하는 카메라 위치 추정값을 비교한다.

그림 7은 내부파라미터 추정을 위해 촬영된 여러 위치 및 크기의 체커보드 패턴에 대한 코너 검출 결과를 비교한 영상이다. 그림 7과 같이 카메라 영상 내에 체커보드가 여러 지점 및 크기로 촬영될 수 있도록 체커보드를 옮기며 배치함과 동시에 촬영하였다. 내부 파라미터 추정을 위한

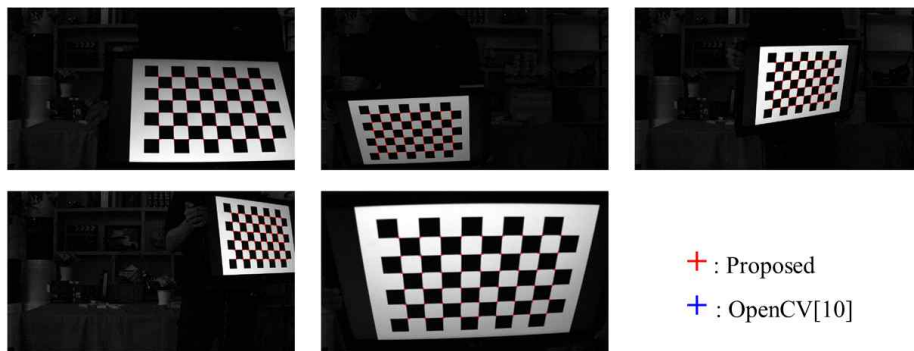


그림 7. 제안 기법 및 OpenCV 기법을 적용한 정성적 코너 검출 결과 영상  
 Fig. 7. The qualitative corner detection result of the proposed method and the OpenCV[10] method

카메라 캘리브레이션 영상은 체커보드 1개의 사각형 변의 길이가 영상 내에 20-100 pixel에 이르도록 체커보드를 촬영하여 사용하였으며, 외부 파라미터 추정을 위해선 사전에 추정된 카메라 내부파라미터를 기반으로 5대의 카메라 모두 공유되는 위치에 체커보드 패턴을 배치하여 최종 외부파라미터를 추정하였다. 안정적인 결과에서 확인할 수 있듯이 육안으로 각 체커보드 위치에 따른 결과를 분석하기 어렵기 때문에 카메라 캘리브레이션을 통한 reprojection error를 정량적 지표로 비교하였다.

표 1은 Harris 코너 검출기 기반의 기존 알고리즘과 제안한 기법간의 카메라 캘리브레이션을 통한 재투사 오차를 비교한 결과이다. 각 카메라 당 그림 7과 같은 50장의 체커보드가 담긴 영상을 활용하여 진행하였으며, 제안 기법의 재투사 오차가 기존 알고리즘 대비 적은 것을 확인할 수 있다. 특히 카메라 5의 경우, 기존 알고리즘의 오차가 큰 값으로 나타나며, 이는 체커보드 코너 검출 수행 시 잘못된 코너점을 검출함으로써 인한 것으로 제안 알고리즘이 기존 알고

리즘 대비 정확하며 영상에 강건함을 확인할 수 있다.

표 2는 5대의 카메라에 대해 추정된 카메라 파라미터를 기준으로, 추가적인 카메라 외부 파라미터 결과를 비교하였다. 카메라 1을 기준으로 상대적인 카메라 위치 좌표 추정값을 비교하였으며 평균 오차는 3차원 좌표 변위에 대한 평균 제곱근 오차(RMSE)를 계산하였다. 제안한 기법의 오차가 기존 기법보다 개선된 결과를 출력함을 평균 오차를 통해 확인할 수 있으며 특히 카메라 5의 경우 오차가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 표 1의 재투사 오차를 통해 확인한 추정 내부 파라미터의 부정확함으로 인한 것으로 코너 검출이 영상 평면과 3차원 공간간의 관계를 추정하는 과정에 큰 영향으로 작용함을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 입체 영상 취득을 위한 정밀한 카메라

표 1. 코너 검출 기법에 따른 재투사 오차 실험 결과

Table 1. The reprojection error according to checkerboard corner detection methods

Reprojection errors	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4	Camera 5	Average
Proposed	0.0928 px	0.0967 px	0.1009 px	0.1284 px	0.0698 px	0.0977 px
OpenCV <sup>[10]</sup>	0.0889 px	0.1793 px	0.1384 px	0.1370 px	2.8167 px	0.8321 px

표 2. 카메라 1을 기준으로 코너 검출 기법에 따른 상대적인 카메라 변위 추정 오차

Table 2. The relative translation error according to checkerboard corner detection methods based on camera 1

Localization accuracy	Location	Ground truth	Proposed		OpenCV <sup>[10]</sup>	
			Results	Error	Results	Error
Camera 2	$T_x$ (mm)	151.20	159.73	8.53	144.79	6.41
	$T_y$ (mm)	-0.60	-1.49	0.89	-10.03	9.43
	$T_z$ (mm)	1.59	2.87	1.28	1.60	0.01
Camera 3	$T_x$ (mm)	300.40	307.49	7.09	305.85	5.45
	$T_y$ (mm)	-0.40	-0.02	0.38	-8.79	8.39
	$T_z$ (mm)	1.64	1.64	0.00	15.31	13.67
Camera 4	$T_x$ (mm)	451.29	452.79	1.50	448.94	2.35
	$T_y$ (mm)	-2.63	-4.46	1.83	-11.00	8.37
	$T_z$ (mm)	-0.58	-0.89	0.31	11.93	12.51
Camera 5	$T_x$ (mm)	598.91	604.02	5.11	564.80	34.11
	$T_y$ (mm)	0.29	1.22	0.93	18.88	18.59
	$T_z$ (mm)	1.52	3.85	2.33	-0.75	2.27
Average Error (RMSE)	$T$ (mm)	-	-	5.96	-	14.52

캘리브레이션 기법을 제안하였다. 정밀한 카메라 파라미터를 추정하기 위해 정확한 코너 검출 기법을 제안하였으며 기존 알고리즘 대비 개선되며 정확한 결과를 출력함을 확인하였다. 정확한 카메라 내·외부 파라미터를 추정함으로써 2차원 영상 평면과 3차원 공간간의 정밀한 변환 관계를 판단할 수 있었으며 실제 측정값과 영상을 통한 추정값 간의 간극이 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 기법을 통해 정밀한 카메라 캘리브레이션을 수행하며 몰입도 높은 입체 영상을 취득할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌 (References)

[1] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, December 2000.

[2] G. Bloomenthal, and J. Rokne, "Homogeneous coordinates," *The Visual Computer*, Vol.11, No. 1, pp.15-26, January, 1994.

[3] R. Hartley, and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge university press, pp.151-176, 2003.

[4] R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344, August, 1987.

[5] Q.T. Luong, and O. D. Faugeras, "The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis," *International journal of computer vision*, Vol.17, No.1, pp.43-75, January, 1996.

[6] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, and S. S. Sastry, *An invitation to 3-d vision : from images to geometric models*, Springer Science & Business Media, pp. 82-90, 2012.

[7] A. Neubeck and L. Gool, "Efficient non-maximum suppression," *18th International Conference on Pattern Recognition*, Hong Kong, China, pp.850-855, 2006.

[8] A. Geiger *et al.*, "Automatic camera and range sensor calibration using a single shot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minnesota, USA, pp.3936-3943, 2012.

[9] W. Förstner and E. Gülch, "A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features," *Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data*, Interlaken, Germany, pp.281-305, 1987.

[10] OpenCV 3.0, <https://opencv.org/opencv-3-0.html>

저 자 소 개



김 중 회

- 2019년 : 서강대학교 전자공학과 학사
- 2019년 : 서강대학교 전자공학과 석사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9775-7274>
- 주관심분야 : 3차원 영상 정보처리, 컴퓨터 비전, 딥러닝



윤 여 훈

- 2018년 : 세종대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2019년 : 서강대학교 전자공학과 석사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2074-5758>
- 주관심분야 : 딥러닝, 컴퓨터 비전, VR



---

저 자 소 개

---



김 준 수

- 2012년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사
- 2017년 : 서울대학교 전기정보공학부 박사
- 2017년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 실감미디어연구실 선임연구원
- 주관심분야 : VR/AR, Light field



윤 국 진

- 1999년 : 전북대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2001년 : 전북대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2016년 : 경희대학교 전자전파공학과 박사
- 2001년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 테라미디어연구그룹 책임연구원
- 주관심분야 : VR/AR, MPEG, 디지털방송



정 원 식

- 1992년 : 경북대학교 공과대학 전자공학과 학사
- 1994년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 석사
- 2000년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사
- 2001년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 테라미디어연구그룹 책임연구원
- 주관심분야 : 디지털방송, MPEG, VR/AR/MR



강 석 주

- 2006년 : 서강대학교 전자공학과 학사
- 2011년 : 포항공과대학교 전자전기공학과 공학박사
- 2011년 ~ 2012년 : LG Display 선임 연구원
- 2012년 ~ 2015년 : 동아대학교 전기공학과 조교수
- 2015년 ~ 현재 : 서강대학교 전자공학 부교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4809-956X>
- 주관심분야 : 멀티미디어 영상신호처리, 컴퓨터 비전, 딥러닝 시스템 설계