

## 멀티뷰 카메라를 사용한 외부 카메라 보정

김기영, 김세환, 박종일\*, 우운택  
광주과학기술원 U-VR 연구실  
\*한양대학교 가상현실 연구실

### Extrinsic calibration using a multi-view camera

Kiyong Kim, Sehwan Kim, Jongil Park\*, Woontack Woo  
KJIST U-VR Lab.

\*Hanyang University VR Lab.

E-mail : {kkim, skim, wwoo}@kjist.ac.kr

\*jipark@hanyang.ac.kr

#### Abstract

In this paper, we propose an extrinsic calibration method for a multi-view camera to get an optimal pose in 3D space. Conventional calibration algorithms do not guarantee the calibration accuracy at a mid/long distance because pixel errors increase as the distance between camera and pattern goes far. To compensate for the calibration errors, firstly, we apply the Tsai's algorithm to each lens so that we obtain initial extrinsic parameters. Then, we estimate extrinsic parameters by using distance vectors obtained from structural cues of a multi-view camera. After we get the estimated extrinsic parameters of each lens, we carry out a non-linear optimization using the relationship between camera coordinate and world coordinate iteratively. The optimal camera parameters can be used in generating 3D panoramic virtual environment and supporting AR applications.

#### I. 서론

카메라 보정은 카메라의 내부 파라미터와 외부 파라미터를 3 차원 공간상에서 구하는 과정이다 [1]. 이는 시각 기반 증강 현실 (Vision-based Augmented Reality)에서 가상의 객체를 적절한 공간에 위치시키기 위한 기반 기술일 뿐만 아니라, 3 차원 파노라믹 가상 환경을 생성하는 연구에 필수적인 최적화된 카메라 위치를 제공한다 [2][3].

카메라 보정 알고리즘은 크게 패턴을 사용하는 사진 측량적 (Photogrammetric) 카메라 보정과 패턴 대신

일상에서 얻을 수 있는 소실점이나 객체를 사용하는 자동 보정 (Self-calibration)으로 분류한다. 자동 보정 방법은 최근 증강 현실 분야에 유용하게 쓰이고 있지만, 패턴을 이용하는 방법에 비해 정확성이 떨어진다. 최근의 사진 측량적 방법은 카메라 모델을 단순화하여 비교적 정확한 결과를 보인다. 그 중에서 Tsai와 Zhang이 제안한 카메라 보정 알고리즘이 널리 알려져 있다. Tsai의 카메라 모델은 1차 왜곡 인자 (Distortion factor)를 가진 간단한 모델이지만, 다른 알고리즘과 비교하여 정확하고 빠른 결과를 제공한다 [1]. 반면, Zhang의 알고리즘은 정확성보다는 유연성을 강조한다. 이는 데스크탑 비전 시스템 (Desktop Vision System : DVS)에 적합하며, 사용이 용이하다 [4]. 그러나 이러한 방법들은 카메라와 패턴과의 거리가 멀어질수록 패턴의 점들을 획득하는데 그 오차가 커지고, 주변 환경의 영향에 민감해지므로 정확한 파라미터를 얻는데 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 멀티뷰 카메라의 렌즈간 구조적 정보와 각 렌즈에서 얻는 동일한 실세계 점들을 이용하여 중·장거리에서의 외부 카메라 보정 방법을 제안한다. 일반적으로 멀티뷰 카메라는 모든 렌즈가 동일 평면상에서 동일한 방향을 향하고, 렌즈간의 위치관계는 알려져 있다. 이를 이용하여, 한 기준 렌즈의 외부 파라미터로부터 다른 렌즈의 외부 파라미터를 추정한다. 그리고 멀티뷰 카메라의 각 렌즈가 얻는 동일한 실세계 좌표계의

---

본 연구는 광주과학기술원과 ETRI의 지원에 의해 수행되었음

점들과 카메라 좌표계 점들의 관계를 이용하여, 파라미터를 최적화 한다. 이를 통해, 각 렌즈에서 독립적으로 구한 카메라 외부 파라미터에 의존하여 카메라를 재구성한 것과 비교하여 기하학적으로 더 유사하고, 카메라 모델에 최적화된 각 렌즈의 자세를 구할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 카메라 모델과 멀티뷰 카메라를 이용한 최적화 알고리즘의 이론을 고찰하고, 3 장에서는 이를 이용한 실험 및 그 결과를 제시한다. 마지막으로 4 장에서는 결론 및 추후 과제에 대해 논의한다.

## II. 외부 파라미터 보정

### 2.1 카메라 모델 및 카메라 보정

일반적으로 CCD 센서의 비틀림(skew) 요소가 없을 경우, 실세계 좌표계 (World coordinate)의 점  $M=[x_w, y_w, z_w]^T$ 과 영상 평면 (Image plane coordinate)의 대응점  $m=[a_u, a_v, a]^T$ 의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = A[R \ T]M, \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} f & 0 & C_x \\ 0 & f & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

위 식에서,  $f$ 는 초점거리,  $C_x, C_y$ 는 주점 (Principal point)을 나타낸다. 또한, 회전 행렬  $R$  및 이동 행렬  $T$ 로 이루어진 행렬은 카메라 좌표계 (Camera coordinate)와 실세계 좌표계의 좌표계 변환을 의미한다. 그림 1은 이러한 좌표계 변환과 카메라 모델을 보여준다.  $O$ 는 카메라 좌표계의 원점을 나타내며,  $O'$ 는 주점을 의미한다. 영상 평면 상의 점  $P_u(X_u, Y_u)$ 는 렌즈에 의해 왜곡되기 전의 점이며,  $P_d(X_d, Y_d)$ 는  $P_u$ 가 왜곡된 후의 점이다.

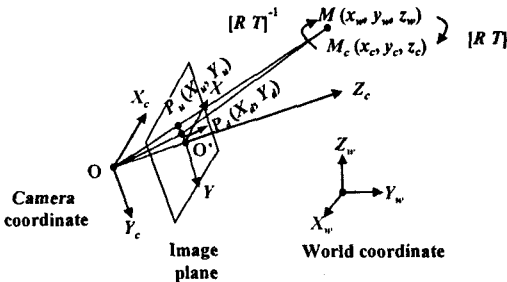


그림 1. 카메라 모델

식 (1)과 그림 1을 기반으로 렌즈에 의한 영상 왜곡 (Image distortion)을 회복하기 위해, Tsai는 카메라 모델에 방사형 왜곡 인자 (Radial distortion factor)  $k$ 를 도입하였다 [1].  $k$ 는 Tsai의 카메라 모델에서 영상 왜곡을 설명하는 유일한 인자로써, 식 (2)는  $P_d$ 와  $P_u$ 의 관계를 나타낸다.

$$P_d = P_u(1 + k \times \|P_u\|^2) \quad (2)$$

위 식에서,  $k$ 는  $f$ , 불확정 인자 ( $s_x$ )와 선형 최적화 (Linear optimization) 과정으로 미리 구해진 회전 및 이동 행렬을 이용하여 비선형 최적화 과정을 통해 구한다. 이때 사용한 일반적인 비용함수는 다음과 같이 정의된다 [6].

$$E = \|P_i(M | R, T) - P^*_i(m | f, k, s_x)\| \quad (3)$$

위 식에서,  $P_i$ 는 실세계 좌표계의 점  $M$ 으로부터 구해진  $R$ 과  $T$ 를 이용하여 얻은 카메라 좌표계 점이다.  $P^*_i$ 는 영상 좌표계의 점  $m$ 으로부터  $f, s_x, k$ 를 이용하여 구한 카메라 좌표계 점이다. 이 과정의 최적화 과정을 통해 일단  $k$ 가 구해지면, 나머지 외부 및 내부 파라미터들은 계산된  $f, s_x, k$ 를 초기값으로 원근 투영 (Perspective projection)을 이용한 비선형 최적화 과정을 다시 적용하여 얻는다.

### 2.2 멀티뷰 카메라의 외부 파라미터 추정

Tsai의 카메라 보정 방법을 통해 얻은 각 렌즈의 회전 및 이동 행렬은 카메라와 패턴과의 거리가 멀어질수록 파라미터의 오차가 커진다. 카메라의 해상도는 일정하지만, 한 화소의 오차가 확대되는 패턴상 점의 정확성에 미치는 영향이 커지기 때문이다. 이러한 오차를 보정하기 위해 앞에서 정의한 일반적인 멀티뷰 카메라를 바탕으로, 렌즈 간의 구조적인 정보를 이용한다.

첫째,  $N$ 개의 렌즈는 동일 평면상에 위치하고, 동일한 방향을 향한다. 그리고 각 렌즈의 외부 파라미터는 동일한 실세계 기준점을 중심으로 얻는다. 이는 각각의 렌즈 위치에서 얻은 회전 행렬이 동일하다는 것을 말한다. 이 회전 오차를 식 (4)로 정의한다.

$$R_{error} = \sum_{i=0, i \neq j}^{L-1} \|R_i - R_j\| \quad (4)$$

위 식에서,  $L$ 은 렌즈 간의 조합 수이고,  $R_i$ 는 실세계상의 참조점에 대한  $i$ 번째 렌즈의 회전 행렬이다.

둘째, 카메라 렌즈간의 위치 관계는 알려져 있다. 그런데 각 카메라간의 위치 관계는 렌즈의 외부 파라미터 중 이동 행렬의 차를 이용해서 구할 수 있다. 즉, 식 (5)에 표현된 바와 같이, 각 렌즈의 이동 행렬으로부터 얻은 렌즈들 간의 벡터들은 실제 렌즈들 간의 벡터와 일치해야 한다.

$$T_{error} = \sum_{i=0, j=1}^{L-1} \|\vec{d}_{i,j} - D_{i,j}\| \quad (5)$$

위 식에서,  $d_{i,j}$ 는  $i$ 번째 렌즈와  $j$ 번째 렌즈의 이동 행렬을 통해 계산된 렌즈간 거리 벡터이다. 그리고  $D_{i,j}$ 는 그림 2에서 보는 바와 같이  $i$ 번째 렌즈에서  $j$ 번째 렌즈로 향하는 벡터를 의미한다. 그림 2는 임의의 실세계 참조점  $M$ 과 이에 대해 정의된 회전 및 이동 행렬,  $(R_i, T_i)$ ,  $(R_j, T_j)$ 의 전체적인 구조를 보여준다.

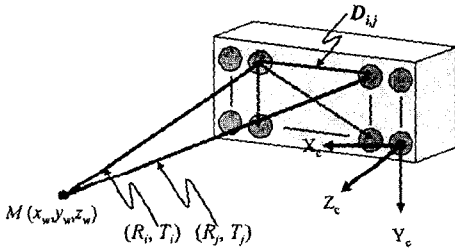


그림 2. 멀티뷰 카메라

이 두 가지 구조적 사실을 이용하여 카메라 보정을 통해 구한 멀티뷰 카메라 하나의 기준 렌즈로부터 나머지 렌즈들의 회전 및 이동 행렬을 예측할 수 있다. 회전 행렬과 이동 행렬은 식 (6)과 같이 추정한다.

$$T_j = T_i + D_{i,j}, R_j = R_i, \text{ for all lenses} \quad (6)$$

위 식에서,  $j$  번째 렌즈의 이동 행렬은  $i$  번째 이동 행렬에 렌즈간의 알려진 벡터를 더해서 추정한다. 이와 같이 기준 렌즈로부터 추정된 다른 렌즈의 회전 및 이동 행렬은 그 렌즈의 최적화된 회전 및 이동 행렬을 구하는 데 초기값으로 사용된다.

### 2.3 외부 파라미터 최적화

영상 평면 좌표계의 획득된 패턴상의 점들이 카메라 행렬에 의해 역투영되면, 실세계 좌표계의 패턴상 알려진 점들로 복구된다. 멀티뷰 카메라의 경우 여러개의 렌즈가 동일한 하나의 패턴을 이용하여 카메라 보정을 수행하므로, 패턴상의 알려진 한 점에 대해  $N$  개의 역투영된 점을 갖는다. 카메라 보정을 통해 이상적인 카

메라 파라미터들이 모든 렌즈에서 구해졌다면, 한 점에 대해서 역투영된 점들은 모두 동일해야 한다. 이러한 관계를 이용하여 2.2 절에서 구해진  $R, T$  와 함께 식 (7)과 같은 비용함수를 만든다.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} \|M_i - P_i(M_i | R, T)\| \quad (7)$$

위 식에서,  $N$  은 카메라 렌즈의 개수이고,  $M_i$  는 실제 카메라 보정을 위해 정의한 이상적인 패턴상의 알려진 점들의 좌표이다.  $P_i$  는 카메라 좌표계상의 점인  $M_i$  로부터  $i$  번째 렌즈에서 구해진 회전 행렬  $R$  및 이동 행렬  $T$  를 이용하여 실세계 좌표계로 역투영된 값이다.

2.2 절과 2.3 절을 바탕으로 멀티뷰 카메라 보정을 아래의 순서로 수행한다.

1. 주어진 영상에서 렌즈의 개수  $N$  만큼 카메라 보정 알고리즘을 적용하여  $(R_1, T_1), (R_2, T_2), \dots, (R_N, T_N)$  및 내부 파라미터를 구한다.
2. 기준 렌즈를 선택하고 식 (7)을 기반으로 외부 파라미터의 비선형 최적화를 수행하여, 기준 렌즈의  $(R, T)$  를 최적화한다.
3. 기준 렌즈  $(R, T)$  로부터 식 (6)을 통해 다른 렌즈들의  $(R, T)$  를 추정한다.
4. 추정된  $(R, T)$  를 기반으로, 다음 식 (8)을 이용하여 구해진 내부 파라미터에 적합하도록 최적화한다.  $P$  와  $P'$  는 각각 외부와 내부 파라미터에 의해 복원된 점들이다.

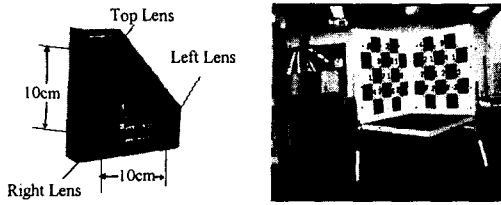
$$E = \|P_i(M_i | R, T) - P'_i(m | f, k, s_r, C_r, C_s)\| \quad (8)$$

5. 기준 렌즈를 바꾸면서, 식 (4)와 식 (5)의  $R_{error}$  와  $T_{error}$  가 특정한 값에 수렴하거나, 특정한 값 아래로 내려 갈때까지 과정 2~4 를 반복한다.

## III. 실험 및 결과

본 실험에서는 체스 보드 모양의 직각 패턴을 사용하였다. 직각 패턴은 체스 보드 격자의 한 변의 길이가 25 cm 인 정사각형이고, 모두 32 개의 점이 존재한다. 멀티뷰 카메라는 총 3 개의 렌즈를 포함한 Point Grey Research 의 Digiclops 이다. 이 카메라는 CCD 센서로는 소니의 ICX084AK 를 이용하고, 6 mm 의 초점 거리를 가지고 있다 [7].

그림 3 은 Digiclops 의 구조와 실험에서 패턴상의 점들이 Digiclops 를 통해 감지된 경우를 보여준다. 그리고 중·장거리의 실험을 위해, 본 실험에서는 패턴과 카메라 간의 거리를 5m ~ 7m 로 설정하였다.



(a) Digiclops 구조 (b) 감지된 패턴상 점들

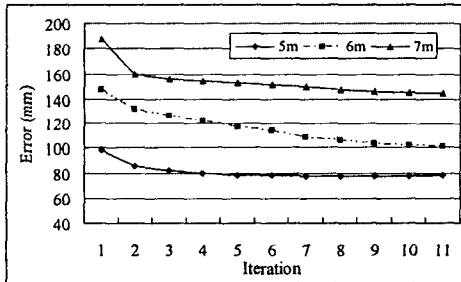
그림 3. Digiclops 구조와 감지된 패턴상의 점들

본 실험에서는 세 개의 렌즈를 이용하므로, 2.2 절에서 정의한  $R_{error}$ 와  $T_{error}$ 는 식 (9)와 같이 정의한다.

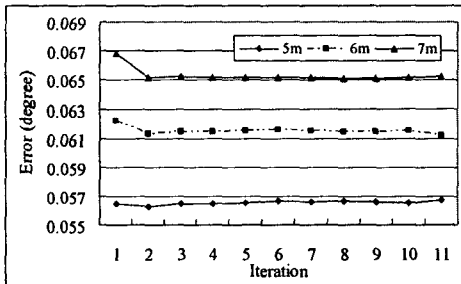
$$T_{error} = \left| \bar{d}_{righttop} - D_{righttop} \right| + \left| \bar{d}_{topleft} - D_{topleft} \right| + \left| \bar{d}_{rightleft} - D_{rightleft} \right| \quad (9)$$

$$R_{error} = \sqrt{(R_{top} - R_{right})^2 + (R_{right} - R_{left})^2 + (R_{left} - R_{top})^2}$$

그림 4는 제안된 최적화 알고리즘을 적용하여, 중·장거리에서의 반복 회수에 따른 식 (9)의  $R_{error}$  및  $T_{error}$  변화를 보여준다. 비선형 최적화를 위해 수정된 *Levenberg-Marquardt* (MINPACK)을 이용하였다.



(a) 회전 행렬 오차 ( $R_{error}$ )



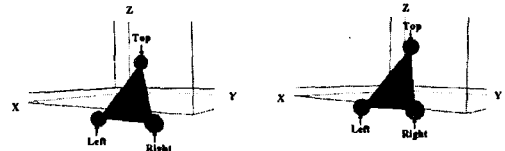
(b) 이동 행렬 오차 ( $T_{error}$ )

그림 4. 반복회수에 따른 이동 및 회전 행렬 오차

실험 결과에서 보듯이 제안된 알고리즘은 카메라와 패턴의 거리가 멀어질수록 증가하는 이동 행렬과 회전 행렬 오차를 줄인다. 그렇지만, 일정한 값 아래로는 내부

파라미터의 오차로 인하여 줄어들지 않는다. 또한, 제안된 알고리즘은 Weng 등이 제안한 오차 측정 방식에 근거하여 계산된 정규 (Normalization) 평균 및 표준 편차 오차에서도 향상된 결과를 보인다 [6].

그림 5는 카메라 보정에서 얻은 파라미터를 이용하여 OpenGL 공간상에 렌즈들을 렌더링한 결과이다. 제안된 알고리즘 적용 후 실제와 유사한 카메라 모습으로 재구성 된다.



(a) Tsai의 알고리즘 적용  $R_{error}$ : 0.067 degree,  $T_{error}$ : 187.711 mm  
 (b) 제안된 알고리즘 적용  $R_{error}$ : 0.064 degree,  $T_{error}$ : 131.572 mm

그림 5. 가상 공간에서 재구성된 카메라

#### IV. 결론

본 논문에서는 거리가 멀어질수록 증가하는 카메라 보정 오차를 멀티뷰 카메라의 렌즈간 거리 벡터를 이용한 다른 렌즈의 외부 파라미터를 추정해서 오차를 줄이는 방법을 제안하였다. 향후에는 내부 파라미터를 보정하는 연구를 진행하고, 멀티뷰 카메라 뿐만이 아니라 다수의 카메라를 동시에 보정하는 데에 쓰일 수 있도록 확장시키는 연구를 수행할 것이다. 제안된 알고리즘을 통해 얻은 최적화된 카메라의 위치 정보는 3차원 파노라믹 가상 환경 생성 및 AR 응용 기술 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

[1] Tsai R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323-344, 1987.  
 [2] R. Azuma, Y. Baillet, K. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre, "Recent Advances in Augmented Reality," *IEEE Computer Graphics and Applications* 21, 6, pp. 34-47, 2001.  
 [3] S. Kim, E. Chang, C. Ahn and W. Woo, "Virtual Environment Generation using 3D Image-based Panorama," *ICIP03*, vol. 1, pp. 917-920, Sept. 14-17, 2003.  
 [4] Z. Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," *ICCV99*, vol. 1, pp. 666-673, 1999.  
 [5] Horn, B. K. P., "Tsai's camera calibration method revisited", <http://www.ai.mit.edu/projects/vision>, 2000  
 [6] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 14, no. 10, pp. 965-980, Oct. 1992.  
 [7] Point Grey Research Inc., <http://www.pigrey.com>, 2002