

## 영상 기반 가상 환경 생성을 위한 멀티뷰 카메라 캘리브레이션\*

김기영<sup>o</sup>, 김세환, 우운택

광주과학기술원 U-VR 연구실

## Multi-view camera calibration for Image-based Virtual Environment Generation

Kiyoung Kim<sup>o</sup>, Sehwan Kim, Won-tack Woo

KJIST U-VR Lab.

{kkim, skim, wwoo}@kjist.ac.kr

## 요약

본 논문에서는 영상 기반 가상 환경 생성을 위해, 중거리에서 보다 정확한 카메라 캘리브레이션 결과를 획득하기 위한 방법으로 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라를 이용한 외부 파라미터의 최적화 방법을 제안한다. 우선, Tsai의 캘리브레이션 알고리즘을 적용하여 획득된 카메라 파라미터를 카메라 렌즈간의 사전 기하 정보와 비교하여 그 오차에 기반한 인트라 카메라 캘리브레이션 (Intra-camera Calibration)을 수행한다. 그리고, 가상 공간에 역투영된 3D point cloud에 ICP 알고리즘을 적용하여 인터 카메라 캘리브레이션 (Inter-camera Calibration)을 수행한다. 이를 확장하여, 다수의 카메라를 회전시켜 획득된 3D point cloud에 대해 기존 카메라의 위치를 중심으로 인터 카메라 캘리브레이션을 반복적으로 수행함으로써 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라에 대한 캘리브레이션을 수행한다. 이와 같은 최적화된 외부 파라미터를 이용하면 영상 기반 가상 환경을 생성하기 위한 정합 과정에 사용할 수 있다. 또한, 실시간 3D 객체 추적 및 AR 응용 시스템 등의 다양한 AR 응용분야에 활용될 수 있다.

## 1. 서론

카메라 캘리브레이션이란 3차원 공간에서 카메라 렌즈의 광학적 성질과 카메라의 위치를 구하는 과정이다 [1]. 최근의 카메라 캘리브레이션 연구는 카메라 캘리브레이션이 필요한 시스템에 특화된 개선된 알고리즘에 초점을 맞추고 있다. 특히, 증강 현실 (Augmented Reality) 분야에서는 유연성이 뛰어난 자동 카메라 캘리브레이션 (Self-calibration) 방법이 유용하게 쓰이고 있다 [2]. 한편, 정확성이 요구되는 로봇 분야에서는 정밀한 패턴을 이용하는 사진 측량식 (Photogrammetry) 방법이 널리 이용되고 있다. 영상 기반 가상 환경 생성을 위한 캘리브레이션에서는 두 요소 모두 중요시되지만, 특히 카메라 위치의 정확성이 더욱 중요하게 여겨진다.

사진 측량법으로부터 출발한 카메라 캘리브레이션 방법은 사진 측량법 카메라 모델을 사용하여 카메라의 내부 및 외부 파라미터를 기술하는 포괄적인 방법으로, 비선형 오차 함수를 최소화함으로써 파라미터를 획득한다. 이 방법은 비교적 정확한 결과를 제공하지만 정밀한 계측 장치가 요구되고 계산량이 많다. 이를 Tsai는 왜곡 파라미터들을 카메라 렌즈에 의해 발생하는 방사형 왜곡을 설명하는

파라미터와 수평 방향의 스케일 인자에서의 모호함을 설명하는 파라미터만으로 단순화 하였다 [1]. Heikkila는 기존의 Weng의 카메라 모델을 확장하고 원형의 제어점을 사용함으로써 보다 정확한 결과를 얻었다 [3][4]. 반면, Zhang은 데스크탑 비전 시스템을 위해 용이하게 카메라를 캘리브레이션 할 수 있는 방법을 제안하였다 [5]. 그러나, 대부분의 방법들은 근거리에 대해서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있지만, 거리가 멀어질수록 영상의 잡음으로 인해 정확한 결과를 얻기 힘들다.

본 논문에서는 다수의 멀티뷰 카메라를 이용한 외부 파라미터의 최적화 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 점들과 카메라 좌표계 점들의 관계를 이용하여, 파라미터를 최적화 한다. 이를 바탕으로 각각의 멀티뷰 카메라에서 가상 환경에 역투영 (back-projection)된 3D point cloud에 Iterative Closest Point (ICP) 알고리즘을 적용하여 인터 카메라 캘리브레이션 (Inter-camera Calibration)을 수행한다. 다수

\* 본 연구는 광주과학기술원 실감방송 연구센터를 통한 정보통신부 ITRC 사업과 ETRI의 지원에 의한 것임

의 카메라를 회전시켜 획득된 3D point cloud에 대해 기준 카메라를 중심으로 인트라 카메라 캘리브레이션을 연속적으로 적용함으로써 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라에 대한 캘리브레이션을 수행한다.

제안된 방법을 적용함으로써 단일 렌즈만을 이용하여 얻은 파라미터와 비교해 중거리에서도 비교적 개선된 외부 파라미터를 얻을 수 있다. 또한, 여러 대의 카메라간의 기하학적 상관 위치 관계에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다. 제안된 방법을 사용하여 얻은 최적화된 카메라의 위치 정보는 영상 기반 가상 환경 생성 뿐만 아니라 실시간 3D 객체 추적, AR 응용 시스템 등의 다양한 응용분야에 이용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 카메라 모델 및 표기법을 설명하고, 3 장과 4 장에서는 제안된 인트라 및 인트라 카메라 캘리브레이션을 설명한다. 5 장에서는 이를 바탕으로 수행한 실험 결과를 보이고, 6 장에서는 결론 및 향후 과제에 대해 논한다.

2. 카메라 모델 및 표기법

바늘 구멍 카메라 모델의 기본적인 기하, 그리고 특징점 (단위: mm)  $[x_w, y_w, z_w]$ 의 3D 실세계 좌표를 2D 영상 좌표 (단위: pixel)  $[u, v]$ 로 투영하는 과정은 다음과 같다. 우선, 3D 실세계 좌표계에 존재하는 객체  $[x_w, y_w, z_w, 1]^T$ 를 3D 카메라 좌표계  $[x_c, y_c, z_c, 1]^T$ 로 변환한다. 이러한 변환은 식 (1)에 보이는 것과 같이 표현된다.

$$[x_c, y_c, z_c, 1]^T = [R \ T] [x_w, y_w, z_w, 1]^T \quad (1)$$

위 식에서,  $T=[t_x, t_y, t_z]^T$ 는 3x1 이동 벡터를 나타낸다. 회전 행렬  $R$ 은 세 개의 3x3 회전 행렬의 곱,  $R_\phi R_\theta R_\psi$ 으로 표현된다. 각 행렬은 롤 (roll), 피치 (pitch), 요 (yaw)를 각각 나타낸다. 3D 카메라 좌표는 바늘 구멍 카메라 모델에 기반한 원근 투영에 의해 증강된 이상적인 영상 좌표  $[x_i, y_i, 1]^T$ 로 투영된다.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서,  $f$ 는 카메라의 유효 초점 거리를 나타낸다. 영상 좌표계의 원점은 영상 배열 (array)의 상단 좌측이며, 단위는 "meter"가 아니라 "pixel"이 된다. 따라서, 증강된 실제 영상 또는 컴퓨터 영상  $[u, v, 1]^T$  (단위: pixel)은 다음 변환을 적용함으로써  $[x_i, y_i, 1]^T$ 부터 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식에서,  $(u_0, v_0)$ 는 영상의 오프셋 (단위: pixels)을 나타내고,  $s_x$ 는 스케일링 (단위: pixels/m)으로  $s_x = \alpha_x \times dx \times N_x / N_p$ 로 정의된다. 여기서,  $d_x$ 는 인접한 센서 요소 (sensor element)사이의 중심간 거리를 나타내고,

$N_x$ 와  $N_y$ 는 각각 CCD에서 수평 방향의 센서 요소의 개수, 단일 스캔 라인에서의 화소의 개수를 나타낸다. 그리고  $a$ 는 불확정 파라미터를  $k$ 는 렌즈 왜곡 파라미터이다. 식(1)-(3)을 결합함으로써, 3D 실세계 좌표계는 2D 영상 좌표계와 연결된다.

그림 1은 두 멀티뷰 카메라의 배치 및 그에 따른 회전 및 이동 행렬의 표기법을 나타낸다. 본 논문에서 사용되는  $R_{camera, lens}$ 와  $T_{camera, lens}$ 에서 camera는 오른쪽 (R) 또는 왼쪽 (L) 카메라를 나타내며, lens는 각 카메라의  $i$ 번째 렌즈를 나타낸다. 예를 들면,  $R_{L,3}$ 은 왼쪽 카메라의 3 번째 렌즈의 회전 행렬을 나타낸다. 그러나,  $R_L$ 이나  $T_R$ 와 같이 각 렌즈에 대한 언급 없이 카메라만을 나타내는 경우는 각 카메라의 기준 렌즈에 대한 것을 의미하며,  $R_L$ 이나  $T_R$ 와 같이 각 카메라에 대한 언급 없이 렌즈만을 나타내는 경우는 두 카메라에 모두 적용되는 것을 의미한다. 여기서,  $N_{LR}$ 와  $N_{LC}$ 는 각각 행 방향과 열 방향으로의 카메라의 개수를 나타낸다. 따라서, 총 카메라의 개수  $N_L = N_{LR} \times N_{LC}$ 가 된다.

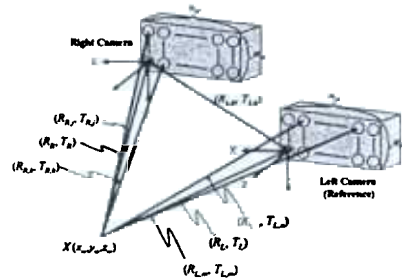


그림 1. 멀티뷰 카메라 표기법

3. 인트라 카메라 캘리브레이션

Tsai의 카메라 캘리브레이션 방법을 통해 얻은 각 렌즈의 회전 및 이동 행렬은 카메라와 패턴과의 거리가 멀어질수록 파라미터의 오차가 커진다. 카메라의 해상도는 일정하지만, 주변 환경에 의해 발생하는 한 화소의 오차가 획득되는 패턴상 점의 정확성에 미치는 영향이 커지기 때문이다. 이러한 오차를 보정하기 위해 멀티뷰 카메라 렌즈 간의 구조적인 정보를 이용한다 [6].

첫째,  $N$ 개의 렌즈는 동일 평면상에 위치하고, 동일한 방향을 향한다. 이는 각각의 렌즈 위치에서 얻은 회전 행렬이 동일하다는 것을 말한다. 둘째, 카메라 렌즈간의 위치 관계는 알려져 있다. 그런데 각 카메라간의 위치 관계는 렌즈의 외부 파라미터 중 이동 행렬의 차를 이용해서 구할 수 있다. 이 회전 오차와 이동 오차를 식 (4)로 정의한다.

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

위 식 (4)에서,  $L$ 은 렌즈 간의 조합 수이고,  $R_i$ 는 실세계상의 참조점에 대한  $i$ 번째 렌즈의 회전 행렬이다.  $d_{i,j}$ 는  $i$ 번째 렌즈와  $j$ 번째 렌즈의 이동 행렬을 통해 계산된 렌즈간 커리 벡터이다. 그리고  $D_{i,j}$ 는  $i$

번째 렌즈에서  $j$ 번째 렌즈로 향하는 벡터를 의미한다.

이 두 가지 구조적 사실을 이용하여 카메라 캘리브레이션을 통해 구한 멀티뷰 카메라 하나의 기준 렌즈로부터 나머지 렌즈들의 회전 및 이동 행렬을 예측한다. 회전 행렬과 이동 행렬은 식 (5)를 이용해서 구한다.

$$T_j = T_i + D_{i,j}, R_j = R_i \quad (5)$$

위 식 (5)에서,  $j$ 번째 렌즈의 이동 행렬은  $i$ 번째 이동 행렬에 렌즈간의 알려진 이상적인 벡터  $D_{i,j}$ 를 더해서 추정한다. 이와 같이 기준 렌즈로부터 추정된 다른 렌즈의 회전 및 이동 행렬은 그 렌즈의 최적화된 회전 및 이동 행렬을 구하는 데 초기값으로 사용된다.

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 캘리브레이션을 수행하므로, 패턴상의 알려진 한 점에 대해  $N$  개의 역투영된 점을 갖는다. 카메라 캘리브레이션을 통해 이상적인 카메라 파라미터들이 모든 렌즈에서 구해졌다면, 한 점에 대해서 역투영된 점들은 모두 동일해야 한다. 이러한 관계를 이용하여 앞에서 구해진  $R, T$ 와 함께 식 (6)과 같은 비용함수를 만든다.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} \|M_i - P_i(M_i, R, T)\| \quad (6)$$

위 식 (6)에서,  $N$ 은 카메라 렌즈의 개수이고,  $M_i$ 은 실제 카메라 캘리브레이션을 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. 이를 바탕으로 멀티뷰 카메라 캘리브레이션을 아래의 순서로 수행한다.

1. 주어진 영상에서 렌즈의 개수  $N$ 만큼 카메라 캘리브레이션 알고리즘을 적용하여  $\{R_1, T_1\}, \{R_2, T_2\}, \dots, \{R_N, T_N\}$  및 내부 파라미터를 구한다.
2. 기준 렌즈를 선택하고 식 (6)을 기반으로 외부 파라미터의 비선형 최적화를 수행하여, 기준 렌즈의  $\{R, T\}$ 를 최적화한다.
3. 기준 렌즈  $\{R, T\}$ 로부터 식 (5)를 통해 다른 렌즈들의  $\{R, T\}$ 를 추정한다.
4. 추정된  $\{R, T\}$ 를 기반으로, 다음 식 (7)을 이용하여 구해진 내부 파라미터에 적합하도록 최적화한다.  $P_i$ 와  $P_i'$ 는 각각 외부와 내부 파라미터에 의해 복원된 점들이다.

$$E = \|P_i(M_i, R, T) - P_i'(m|f, k, s_z, C_x, C_y)\| \quad (7)$$

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

#### 4. 인터 카메라 캘리브레이션

이와 비슷하게 Tsai 알고리즘을 적용하여 실세계로부터 두 카메라까지의 회전 및 이동 행렬  $(R_R, T_R)$ 과  $(R_L, T_L)$ 을 각각 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 카메라의 외부 파라미터를 이용하여 실세계에 대한 3D point cloud를 가상 공간에 역투영시킴으로써 실세계를 가상 환경으로 매핑한다.

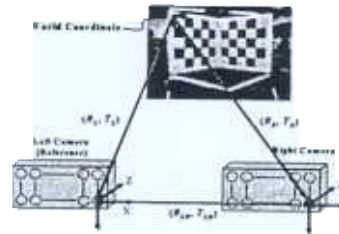


그림 2. 인터 카메라 캘리브레이션 구성도

그러나, 획득된  $(R_L, T_L)$ 과  $(R_R, T_R)$ 이 정확하지 않기 때문에 실세계를 가상 공간으로 역투영한 결과는 정확하게 일치하지 않는다. 따라서, 위의 과정을 통해 얻은 값을 초기값으로 외부 파라미터를 보상하는 과정이 요구된다. 본 논문에서는 이를 위해 역투영된 3D point cloud에 ICP 알고리즘을 적용하여 인터 카메라 캘리브레이션을 수행한다.

우선, 두 카메라간의 위치 관계는 다음과 같다.

$$R_{LR} = R_R R_L^{-1}, T_{LR} = T_L - R_{LR}^{-1} T_R \quad (8)$$

위 식에서,  $R_{LR}$ 과  $T_{LR}$ 은 각각 왼쪽 카메라를 기준으로 오른쪽 카메라의 회전 및 이동 행렬을 나타낸다.

본 논문에서는 각 카메라로부터 획득된  $N_G$ 개의 격자점에 대한 역투영된 3D 좌표에 최적화 과정을 적용하여  $R_{LR}$ 과  $T_{LR}$ 의 최적화된 값을 획득한다. 즉, 주어진  $N_G$ 개의 격자점에 대해, 대응되는 격자점 사이의 거리를 최소화하는  $(R_L, T_L)$ 과  $(R_R, T_R)$ 을 구하는 과정으로, 다음과 같이 표현된다 [7][8].

$$\text{Given two sets of corresponding points,} \\ \text{Find } \{R_L, T_L\}^* \& \{R_R, T_R\}^* \quad (9)$$

$$\text{such that } \operatorname{argmin}_{\{R_L, T_L\}^* \& \{R_R, T_R\}^*} \sum_{i=0}^{N_G-1} (G_{L_i} - G_{R_i})^2$$

위 식에서,  $G_{L_i}$ 와  $G_{R_i}$ 는 각각 왼쪽과 오른쪽 카메라로부터 획득된 캘리브레이션 패턴의 가상 환경으로 역투영된 3D 격자점을 나타낸다. 이상적인 경우,  $G_{L_i}$ 와  $G_{R_i}$ 는 정확히 일치하지만 실제적으로는 불가능하다. 그 차는  $\{R_L, T_L\}$  및  $\{R_R, T_R\}$ 의 함수로 표현되며, 이를 최소화하는 각 카메라의 외부 파라미터를 찾음으로써 두 카메라 사이의 정확한 위치 관계를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 인터 카메라 캘리브레이션을 위한 방법으로 ICP 알고리즘을 사용한다 [9][10]. 우선, 가상 공간에 역투영된 3D 격자점  $G_{L_i}$ 와  $G_{R_i}$  ( $i=0, 1, \dots, N_G-1$ ) 그리고 다음과 같은 초기값들이

주어진다.

$$G_{R_0} = G_R, \quad \bar{q}_0 = [1000000]^T, \quad k=0 \quad (10)$$

위 식에서,  $G_{R_0}$ 는 오른쪽 카메라로부터 획득된 격자점의 3D point cloud 집합의 초기값,  $\bar{q}_0$ 은 쿼터니온의 초기값 그리고  $k$ 는 인덱스를 나타낸다. ICP 알고리즘에서의 쿼터니온은 다음과 같이 회전과 이동벡터의 결합으로 구성된다.

$$\bar{q} = [\bar{q}_R | \bar{q}_T], \quad \bar{q}_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T, \quad \bar{q}_T = [q_4, q_5, q_6]^T \quad (11)$$

첫 번째 과정으로 오른쪽 카메라의 데이터 집합  $G_R$ 의 각 점들  $G_{R_i}$ 로부터 왼쪽 카메라의 데이터 집합  $G_L$ 까지의 최소 거리가 되는 점  $G_{L_j}$ 를 찾는다.

$$Y_k = C(G_{R_i}, G_{L_j}) \quad (12)$$

위 식에서,  $C$ 는 최소 거리 점 연산자,  $Y$ 는  $C$ 를 주어진  $G_L$ 에 대해  $G_R$ 에 적용했을 때의 최소 거리가 되는 점들의 집합을 나타낸다.

두 번째, 최소 자승의 관점에서 ( $G_{R_i}, G_{L_j}$ ) 쌍들의 거리를 최소화하는 강제 변환을 구한다.

$$(\bar{q}_k, d_k) = Q(G_{R_i}, Y_k) \quad (13)$$

위 식에서,  $Q$ 는 최소 자승 쿼터니온 연산자,  $d_k$ 는 평균 자승 점 매칭 오차를 나타낸다. 이는 식 (14)와 같은 mean square objective function을 최소화하는 쿼터니온을 구하는 과정이다.

$$f(\bar{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\bar{y}_i - R(\bar{q}_R)G_{R_i} - \bar{q}_T\|^2 \quad (14)$$

세 번째, 구해진 쿼터니온을  $G_R$ 에 적용하여 다음과 같이  $N_G$ 개의 격자점을 변환한다.

$$G_{R_{k+1}} = \bar{q}_k(G_{R_0}) \quad (15)$$

마지막으로, 최소 거리 점들간의 거리가 문턱치 ( $\tau$ ) 보다 작아질 때까지 위의 과정을 반복한다.

$$d_{k+1} - d_k < \tau \quad (16)$$

이와 같은 ICP 알고리즘을 각 멀티뷰 카메라로부터 획득된  $N_G$ 개의 격자점에 대한 역투영된 3D 좌표에 최적화 과정을 적용하면 이로부터 역으로 기준이 되는 카메라에 대한 상대적인 카메라의 최적화된 회전 및 이동 행렬을 식 (17)과 식 (11)을 사용하여 얻을 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

이 때, 기준 카메라를 중심으로 상대 카메라의 위치를 획득된  $R_{LR}$ 과  $T_{LR}$ 를 적용하여 변환한다. 기준 카메라에 대한 쿼터니온을 다시 획득하고 동일한 방법을 계속 적용하여 오차가 정의된 문턱치보다 작아질때까지 반복적으로 적용하여 최종적인 두 멀티뷰 카메라의 위치를 찾아낸다.

3장에서 인트라 캘리브레이션과 본 장에서의 인터 캘리브레이션을 회전하는 다수의 멀티뷰

카메라에 대해 적용한다. 그림 3은 회전하는 두 대의 카메라에 대한 카메라 캘리브레이션 방법을 보인 것이다. 기준이 되는 위치에서 획득한 왼쪽 및 오른쪽 카메라의 외부 파라미터를 ( $R_{L0}, T_{L0}$ )과 ( $R_{R0}, T_{R0}$ )라 하자. 그러면 기준 위치보다 회전각  $\alpha$  이전에서의 두 카메라에 대한 파라미터는 ( $R_{L(i-1)}, T_{L(i-1)}$ )과 ( $R_{R(i-1)}, T_{R(i-1)}$ )이 된다. 그리고 회전각  $\alpha$  이후에서의 두 카메라의 파라미터는 ( $R_{L(i+1)}, T_{L(i+1)}$ )과 ( $R_{R(i+1)}, T_{R(i+1)}$ )이 된다.

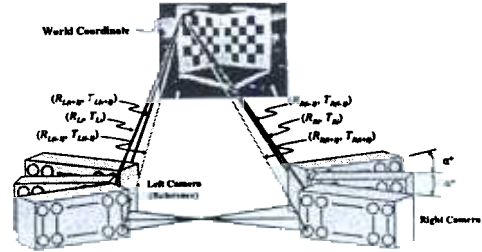


그림 3. 회전하는 멀티뷰 카메라 캘리브레이션

그림 4는 회전하는 두 대의 카메라에 대한 카메라 캘리브레이션 방법의 흐름도를 보인 것이다. 최종 결과로, 기준 카메라를 중심으로 보정된  $N_x$ 개의 카메라의 위치에서, 각 멀티뷰 카메라의  $N_L$ 개의 렌즈에 대해 보정된 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 여기서,  $N_x$ 는 획득된 영상의 개수를 나타내며, ( $R_{L0}, T_{L0}$ )은 기준 카메라의 위치로 사용된다.

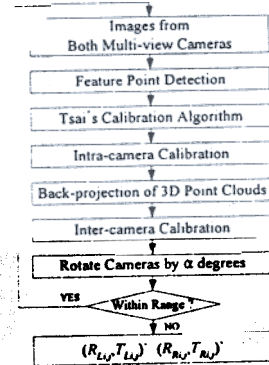


그림 4. 회전하는 멀티뷰 카메라 캘리브레이션 알고리즘 흐름도

### 5. 실험 및 실험 결과

본 실험은 일반적인 실내 환경의 정상적인 조명 하에서 수행되었다. 영상 획득을 위해 사용된 IEEE 1394 카메라인 Digiclops는 CCD 센서로 소니의 ICX084AK를 이용하고, 6 mm의 초점 거리를 갖는다. 특히, 3개의 렌즈를 갖는 멀티뷰 카메라이며, 각 렌즈는 동일한 방향을 향하고 그 사이의 거리는 알려져 있다. 본 실험에서 사용된 캘리브레이션 패턴은 체스 보드 모양을 띄고 있으며, 두 개의 직각 평

면 상에 32 개의 격자들을 갖는다. 그림 5 는 실험을 위한 시스템 셋업을 나타낸다. 그림 5 (a)는 시스템 구성, 그림 5 (b)는 직각 패턴으로, 체스 보드 상의 격자간의 간격은 25 cm 이며, 가상 환경 생성을 위해 중거리용으로 제작된 것이다.

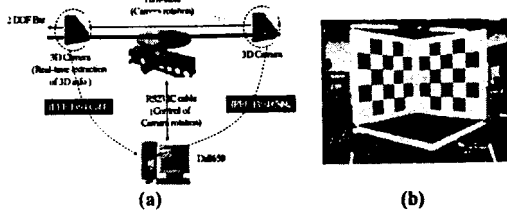


그림 5. 전체 시스템 구성과 직각 패턴

그림 6은 인트라 캘리브레이션의 적용으로 인한 거리에 따른 외부 파라미터 오차의 변화를 나타낸 것이다. 그림 6 (a)는 세 개의 렌즈에 대한 이동 행렬로 계산된 이동 오차 그리고, 그림 6 (b)는 회전 행렬로 계산된 회전 오차를 각각 나타낸다. 회전 및 이동 오차는 최적화 전에는 거리에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 최적화 후에는 그 오차가 어느 한계로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 때 정의된 각각의 오차 함수는 식 (18)과 같다.

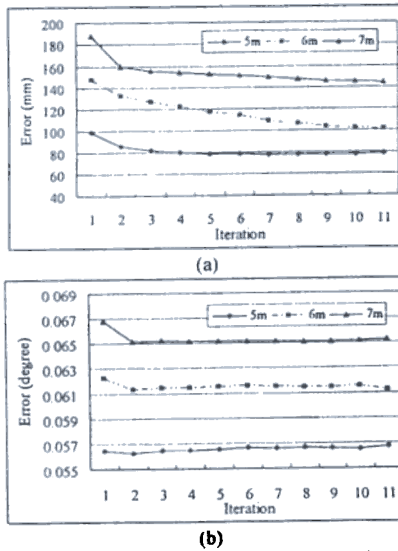


그림 6. 인트라 캘리브레이션 결과 (a) 이동 행렬의 오차 (b) 회전행렬의 오차

$$T_{error} = |\bar{d}_{x_{top}} - D_{x_{top}}| + |\bar{d}_{y_{top}} - D_{y_{top}}| + |\bar{d}_{z_{top}} - D_{z_{top}}| \quad (18)$$

$$R_{error} = |R_{top} - R_{left}| + |R_{top} - R_{right}| + |R_{left} - R_{right}|$$

그림 7은 인터 카메라 캘리브레이션의 반복 횟수에 따른 대응되는 특징점들 사이의 오차의 변화를 거리에 따라 나타낸 것이다. 기준 영상에 대한 다른 영상과의 특징점에 대한 오차 (ACE)는 다음과 같이 정의한다. 본 실험에서 특징점 개수는 격자점

의 개수  $N_G$ 인 32이다.

$$ACE = \left( \sum_{j=0}^{N_G} |G_{ij} - G_{kj}| \right) / N_G \quad (19)$$

위 식 (19)에서  $i$ 는 기준영상이며,  $G_{kj}$ 는  $k$ 번째 영상의  $j$ 번째 격자점이 실제계로 역투영된 3 차원 좌표를 의미한다. 그림에서 보는 것과 같이 반복 횟수가 증가함에 따라 ACE가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 반복 횟수에 관계 없이 거리가 멀어짐에 따라 캘리브레이션 오차 역시 증가함을 알 수 있다. 이는 양안차 추정시 존재하는 오차로 인해 더 이상 ACE 값이 감소하지 않기 때문이다.

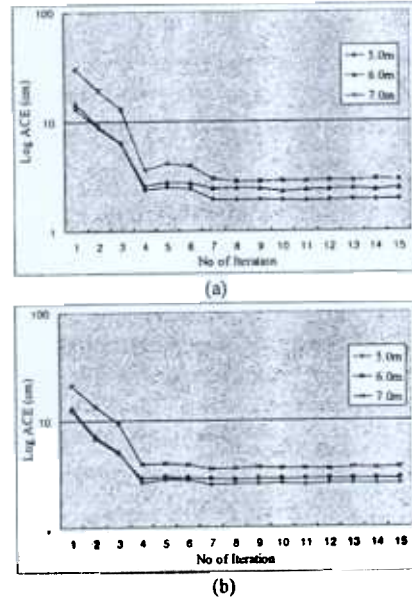


그림 7. 인터 카메라 캘리브레이션의 반복 횟수에 따른 대응되는 특징점들 사이의 ACE (a) 두 장면에 대한 정합 (b) 여섯 장면에 대한 정합

실험 결과를 이용하여, OpenGL 로 생성된 가상 공간에 카메라의 모습과 위치를 렌더링할 수 있다. 그림 8은 인트라 캘리브레이션을 이용하여 카메라의 렌즈가 생성하는 멀티뷰 카메라의 외형이다.

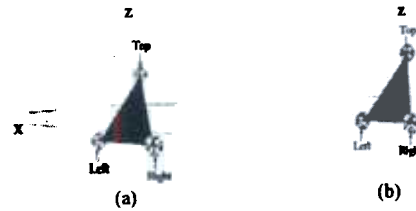


그림 8. 인트라 캘리브레이션을 이용한 렌즈 렌더링 (a) Tsai의 알고리즘 적용 ( $R_{error}$ : 0.067 degree,  $T_{error}$ : 187.711 mm) (b) 제안된 알고리즘 적용 ( $R_{error}$ : 0.064 degree,  $T_{error}$ : 131.572 mm)

또한, 인터 카메라 캘리브레이션을 이용하여 가상

공간의 모습을 렌더링한 결과는 그림 9 와 같고, 이를 실제 공간에 적용한 결과는 그림 10 과 같다.

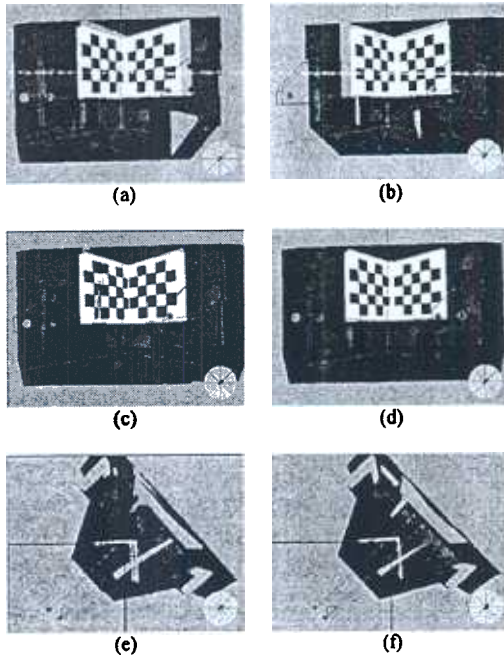


그림 9. 인터 캘리브레이션 결과 렌더링 (a) 왼쪽 카메라 영상 (b) 오른쪽 카메라 영상 (c) 적용 전 정면에서 본 모습 (d) 적용 후 정면에서 본 모습 (e) 적용 전 위에서 본 모습 (f) 적용 후 위에서 본 모습

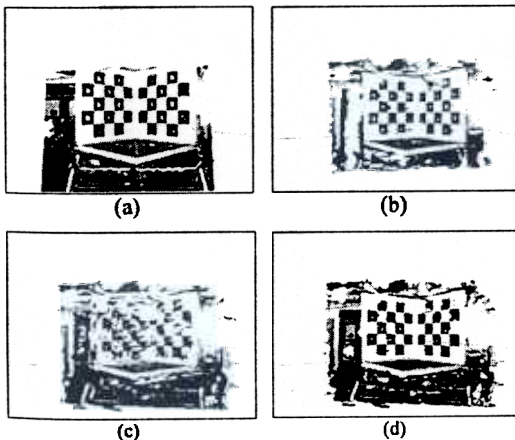


그림 10. 실제 영상에 인터 캘리브레이션 적용 결과 (a) 왼쪽 카메라 영상 (b) 오른쪽 카메라 영상 (c) 알고리즘 적용 전 (d) 알고리즘 적용 후

6. 결론

본 논문에서는 영상 기반 3D 가상 환경 생성을 위해 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라에 기반한 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 사용함으로써 영상기반 가상 환경을 생성하기 위해 요구되는 중거리에서의 정확한 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 즉, 단순히 단일 렌즈만을 사용하는 방법으로는 그 오차를 보정하는 것이 사실상 불가능 하지만, 이미 렌즈간의 상대적인 거리 및 방향을 알고 있는 멀티뷰 카메라를 사용함으로써 중거리에서 보다 강건한 외부 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 또한, 가상 공간에서의 정합 과정을 통해 카메라 파라미터의 오차를 보정할 수 있다. 제안된 방법은 영상 기반 가상 환경 생성뿐만 아니라 AR 응용 시스템, 실시간 3D 객체 추적 등의 응용분야에 이용될 수 있다. 추후에는 이를 360° 전 방향으로 확장하여 모든 방향에 최적화된 카메라 파라미터를 획득하고 이를 이용하여 영상기반 3D 파노라믹 가상 환경을 생성할 것이다. 제안된 방법을 실시간 응용 시스템에 적용하기 위해서는 빠른 스티칭 방법이 요구된다. 그리고 생성된 가상 환경 내에 새로운 가상 객체를 효과적으로 삽입하는 방법 등에 대한 연구를 진행할 예정이다.

7. 참고문헌

- [1] 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, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre, "Recent Advances in Augmented Reality," *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.34-47, 2001.
- [3] Heikkilä, J., "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 22, no. 10, pp. 1066-1077, Oct. 2000.
- [4] 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.
- [5] Z. Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," *ICCV99*, vol. 1, pp. 666-673, 1999
- [6] K. Kim, S.Kim and W. Woo, "Optimization Technique of Extrinsic Parameters using a Multi-view Camera," *Korean Signal Processing Conference 2003*, vol. 16, no. 1. pp. 75-78, 2003.
- [7] S. Kim and W. Woo, "Virtual Environment Generation using 3D Image-based Panorama," *15th Workshop on Image Processing and Image Understanding*, vol. 13, pp. 111-116, 2003.
- [8] S. Kim, E. Chang, C. Ahn and W. Woo, "Image-based Panoramic 3D Virtual Environment using Rotating Two Multi-view Cameras," *IEEE Proc. ICIP2003*, vol. 1, pp. 917-920, 2003.
- [9] P. J. Besl, N. D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," *IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.
- [10] A. Johnson and S. B. Kang, "Registration and Integration of Textured 3-D Data," *Tech. Rep. CRL 96/4*, Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Lab., 1996.