

논문 2004-41CI-2-14

파노라믹 3D 가상 환경 생성을 위한 다수의 카메라 캘리브레이션 (Multiple Camera Calibration for Panoramic 3D Virtual Environment)

김 세 환*, 김 기 영*, 우 운 택**

(Sehwan Kim, Kiyong Kim, and Woontack Woo)

요 약

본 논문에서는 영상기반 파노라믹 3D 가상 환경 (Virtual Environment: VE) 생성을 위해 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라를 위한 캘리브레이션 방법을 제안한다. 일반적으로, 카메라 캘리브레이션 알고리즘은 카메라와 캘리브레이션 패턴 사이의 이 멀어질수록 획득되는 카메라 파라미터의 정확도가 상당히 저하되어 파노라믹 영상 제작에는 부적합하다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 멀티뷰 카메라의 렌즈간 그리고 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라간의 기하학적인 상관 위치 관계를 이용하여 정확도를 높인다. 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 기준 카메라의 위치를 중심으로 인터 카메라 캘리브레이션을 연속적으로 수행함으로써 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라에 대한 캘리브레이션을 수행한다. 이와 같은 캘리브레이션 방법을 통해 중에서도 비교적 개선된 카메라 파라미터를 획득할 수 있기 때문에 파노라믹 3D 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.

Abstract

In this paper, we propose a new camera calibration method for rotating multi-view cameras to generate image-based panoramic 3D Virtual Environment. Since calibration accuracy worsens with an increase in distance between camera and calibration pattern, conventional camera calibration algorithms are not proper for panoramic 3D VE generation. To remedy the problem, a geometric relationship among all lenses of a multi-view camera is used for intra-camera calibration. Another geometric relationship among multiple cameras is used for inter-camera calibration. First, camera parameters for all lenses of each multi-view camera are obtained by applying Tsai's algorithm. In intra-camera calibration, the extrinsic parameters are compensated by iteratively reducing discrepancy between estimated and actual distances. Estimated distances are calculated using extrinsic parameters for every lens. Inter-camera calibration arranges multiple cameras in a geometric relationship. It exploits Iterative Closet Point (ICP) algorithm using back-projected 3D point clouds. Finally, by repeatedly applying intra/inter-camera calibration to all lenses of rotating multi-view cameras, we can obtain improved extrinsic parameters at every rotated position for a middle-range distance. Consequently, the proposed method can be applied to stitching of 3D point cloud for panoramic 3D VE generation. Moreover, it may be adopted in various 3D AR applications.

Keywords : 3D virtual environment generation, rotating multi-view camera, camera calibration, 3D panoramic image

* 학생회원, 광주과학기술원 정보통신공학과
(Dept. of Information and Communications, Kwangju Institute of Science and Technology)

** 종신회원, 광주과학기술원 정보통신공학과
(Dept. of Information and Communications, Kwangju Institute of Science and Technology)

※ 본 연구는 대학 IT 연구센터 육성·지원사업과 KJIST 기관고유사업에 의해 수행되었음.

접수일자: 2003년10월5일, 수정완료일: 2004년3월2일

I. 서론

3D 깊이 정보를 이용한 실사 기반 가상 환경 (Image-based Virtual Environment)은 2D 기반 파노라마가 갖는 한계를 극복하고 사용자에게 자연스런 네비게이션을 제공함으로써 보다 큰 현실감과 몰입감을 제공한다. 이는 영상 기반 가상현실 (Image-based Virtual Reality: IBVR) 시스템을 구축하는 데 활용될 수 있는 가능성을 제시하여 많은 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 가상 환경 생성을 위해서는 근 뿐만 아니라 중·장거리에서도 정확한 3D 깊이 정보를 얻는 과정이 요구되며, 이는 정확한 카메라 캘리브레이션 과정을 요한다. 왜냐하면, 근거리에서와는 달리 중·장거리에서는 조명의 영향, 영상 해상도의 제약 등으로 정확한 캘리브레이션 결과를 얻기가 어렵기 때문이다. 일반적으로, 카메라 캘리브레이션의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 종류의 영상 왜곡을 고려하는 포괄적인 카메라 모델을 사용하는 방법과 정교한 캘리브레이션 패턴을 사용하는 방법 등이 있다.

지금까지 기하학적 카메라 캘리브레이션을 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다. 사진 측량법 (photogrammetry) 으로부터 출발한 방법은 전통적인 사진 측량법 카메라 모델을 사용하여 카메라의 내부 및 외부 파라미터를 기술하는 포괄적인 방법을 사용하며, 비선형 오차 함수를 최소화함으로써 카메라 파라미터를 획득한다^[1]. 이 방법은 비교적 정확한 결과를 제공하지만 정밀한 계측 장치가 요구되고 계산 량이 많다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 높은 정확도가 요구되지 않을 때에는 완화된 사진 측량법 모델이 사용된다. 이러한 방법 중 가장 잘 알려진 캘리브레이션 방법이 Tsai에 의해 제안된 것이다^[2]. Tsai는 왜곡 파라미터들을 카메라 렌즈에 의해 발생하는 방사형 왜곡을 설명하는 파라미터와 수평 방향의 스케일 인자에서의 모호함을 설명하는 파라미터만으로 제한함으로써 기존의 사진 측량법 카메라 모델을 단순화 하였다. Heikkila는 기존의 Weng의 카메라 모델을 확장하고 원형의 제어점을 사용함으로써 보다 정교한 결과를 얻었다^{[3][4]}. 반면, Zhang은 데스크탑 비전 시스템 (Desktop Vision System: DVS)을 위해 비전에 비전문가라 하더라도 용이하게 카메라를 캘리브레이션 할 수 있는 방법을 제안하기도 하였다^[5]. 그러나 이와 같은 방법들은 근거리에 대해서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있지만, 거리가 멀어질수록 정확도가 급격히 저

하된다. 이는 한 화소가 차지하는 영역이 거리가 멀어짐에 따라 증가하고, 그에 따라 캘리브레이션 패턴의 격자점 (grid point)을 검출할 때 오차가 증가하기 때문이다. 이와 같은 문제점은 중·장거리 배경을 대상으로 여러 방향에서 3D 데이터를 획득하고 이를 정합하여 가상 환경을 생성하는 데 문제를 야기시킨다.

본 논문에서는 중·장거리에 대해서도 보다 정확한 카메라 캘리브레이션 결과를 획득하기 위한 방법으로 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라를 이용한 카메라 파라미터의 최적화 방법을 제안한다. 기본적으로, Tsai의 알고리즘과 멀티뷰 카메라의 렌즈간, 그리고 회전하는 다수의 카메라간의 기하적인 상관 위치 관계를 이용한다. 우선, 두대의 멀티뷰 카메라 각각에 부착된 N_L 개의 렌즈에 대한 파라미터를 획득한다. N_L-1 개의 렌즈에 대해 얻은 파라미터를 기준으로 나머지 한 개 렌즈의 외부 파라미터와 카메라 렌즈간의 실거리와의 오차를 계산한다. 이를 최소화하는 최적화 알고리즘을 모든 렌즈에 반복적으로 적용함으로써 인트라 카메라 캘리브레이션 (Intra-camera Calibration)을 수행한다. 그리고 가상 환경에 역투영 (back-projection)된 3D point cloud에 Iterative Closest Point (ICP) 알고리즘을 적용하여 인트라 카메라 캘리브레이션 (Inter-camera Calibration)을 수행한다. 다수의 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 중·장거리에서도 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 파노라믹 3D 가상 환경 생성뿐만 아니라 실시간 3D 객체 추적, 증강 현실 (Augmented Reality: AR) 응용 시스템 등의 다양한 증강 현실 응용분야에 이용될 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다수의 멀티뷰 카메라를 이용한 카메라 캘리브레이션 방법에 대해 설명한다. III장에서는 이에 대한 실험 결과 및 비교, IV장에서는 결론 및 추후 과제에 대해 언급한다.

II. 다수의 멀티뷰 카메라 캘리브레이션

1. 카메라 모델 및 표기법

바늘구멍 카메라 모델 (pinhole camera model)의 기본적인 기하 (geometry), 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. 3D 카메라 좌표계는 광학적 중심 (optical center), O_c 를 중심으로 c_z 축을 그 광축 (optical axis)으로 하여 구성된다. 영상 좌표계는 광축과 영상 평면과의 교차점을 중심으로 형성된다. 그리고 초점 거리 f 는 광학적 중심과 영상 평면과의 거리를 나타낸다^[6].

우선, 3D 실세계 좌표계에 존재하는 객체 $[x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$ 를 3D 카메라 좌표계 $[x_c \ y_c \ z_c]^T$ 로 변환한다. 이러한 변환은 식 (1)에 보이는 것과 같이 표현된다.

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

위 식에서, $T=[t_x \ t_y \ t_z]^T$ 는 3×1 이동 벡터를 나타낸다. 회전 행렬 R 은 세 개의 3×3 회전 행렬의 곱, $R_\phi R_\theta R_\xi$ 으로 표현된다. 각 행렬은 롤 (roll), 피치 (pitch), 요 (yaw)를 각각 나타낸다.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\xi & -s\xi & 0 \\ s\xi & c\xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서, s 와 c 는 각각 *sine*과 *cosine*을 나타낸다. 3D 카메라 좌표는 바늘 구멍 카메라 모델에 기반한 원근 투영 (perspective projection)에 의해 증강된 이차적인 영상 좌표 $[x_i \ y_i \ 1]^T$ 로 투영된다.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식에서, (u_0, v_0) 는 영상의 주점 (principal point) (단위: pixel)을 나타내고, s 는 스케일링 (단위: pixel/m)

으로 $s = \alpha \times k \times d \times N_s / N_p$ 로 정의된다. 여기서, d 는 인접한 센서 요소 (sensor element) 사이의 중심간 거리를 나타내고, N_s 와 N_p 는 각각 CCD에서 수평 방향의 유효 센서 요소의 개수, 단일 스캔 라인에서의 유효 화소의 개수를 나타낸다. 일반적으로, 불확정성 파라미터 α 와 렌즈 왜곡 파라미터 k 는 1로 설정되지만, 실제로는 두 값이 모두 특정 값으로 설정되어야 한다^[7]. 식 (1)-(4)를 결합함으로써, 3D 실세계 좌표계는 2D 영상 좌표계와 연결된다.

그림 1은 두 멀티뷰 카메라의 배치 및 그에 따른 회전 및 이동 행렬의 표기법을 나타낸다. 멀티뷰 카메라는 행 방향과 열 방향으로 각각 N_{LR} 과 N_{LC} 개의 렌즈가 존재하므로, 총 $N_L = N_{LR} \times N_{LC}$ 개의 렌즈로 구성된다. 또한, 각 렌즈간의 거리 및 각 렌즈의 방향이 이미 알려진 카메라를 의미한다.

멀티뷰 카메라의 각 렌즈는 대응되는 CCD 셀을 통해 실시간으로 영상을 획득하며, 렌즈 사이의 관계를 이용하여 기준 카메라를 중심으로 깊이 정보를 제공한다. 본문에서 사용되는 $R_{camera, lens}$ 와 $T_{camera, lens}$ 에서 *camera*는 오른쪽 (*R*) 또는 왼쪽 (*L*) 카메라를 나타내며, *lens*는 각 카메라의 i 번째 렌즈를 나타낸다. 예를 들면, $R_{L,3}$ 은 왼쪽 카메라의 3번째 렌즈의 회전 행렬을 나타낸다. 그러나 R_L 이나 T_R 과 같이 각 렌즈에 대한 언급 없이 카메라만을 나타내는 경우는 각 카메라의 기준 렌즈에 대한 것을 의미하며, R_L 이나 T_2 와 같이 각 카메라에 대한 언급 없이 렌즈만을 나타내는 경우는 두 카메라에 모두 적용되는 것을 의미한다.

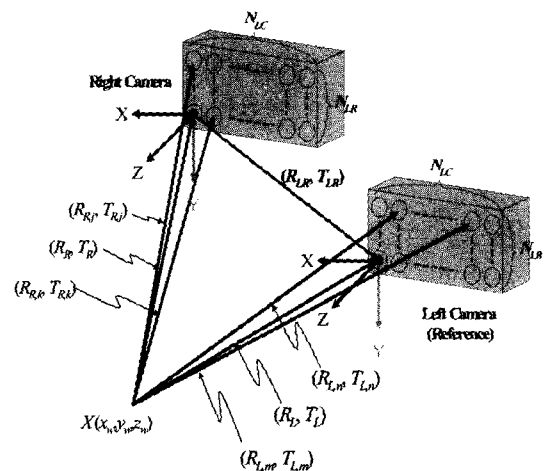


그림 1. 두 멀티뷰 카메라의 배치 및 표기법.
Fig. 1. Configuration and notation of two multi-view cameras.

2. 인트라 카메라 캘리브레이션(Intra-camera Calibration)

1 절에서 정의된 카메라 모델을 기반으로 인트라 카메라 캘리브레이션을 수행한다. 우선, 3D 실세계 좌표와 멀티뷰 카메라로의 2D 원근 투영된 영상과의 관계를 얻기 위해 카메라 캘리브레이션 과정을 수행한다. 일반적으로, 카메라 캘리브레이션 과정은 다음의 세 단계에 의해 수행된다. 우선, 3D 실세계 좌표와 그에 대응되는 2D 영상 좌표의 집합을 획득한다. 다음으로, 주어진 좌표 집합에 대해 일련의 방정식을 적용해 각각의 카메라에 대한 카메라 파라미터 값들을 추정한다. 마지막으로, 투영 행렬로부터 epipolar geometry를 구성한다^[6].

본 논문에서는 렌즈의 왜곡 모델과 모델 파라미터를 결정하기 위해 Tsai의 캘리브레이션 알고리즘을 사용한다[2]. 이 알고리즘은 11개의 모델 파라미터를 추정한다. 내부 카메라 파라미터는 유효 초점 f , 1차 방사형 렌즈 왜곡 계수 k_1 , 주점 $[u_0, v_0]$, 프레임 그래버의 수평 방향의 스캔라인 재표본화로 인해 발생하는 불확정성을 설명하는 스케일 인자 s_x 를 포함한다. 외부 파라미터는 회전 행렬 R (실세계 좌표계와 카메라 좌표계 사이의 변환을 위한 회전 각) 그리고 이동 행렬 T (실세계 좌표계와 카메라 좌표계 사이의 변환을 위한 이동)를 포함한다. 그림 2에 보인 것과 같이 카메라는 N_L 개의 렌즈로 구성되며, 각 렌즈간의 거리는 고정되어 있고, 각 렌즈는 동일한 방향을 향한다. 본 논문에서는 이와 같은 멀티뷰 카메라의 각 렌즈에 대한 상대적인 위치 관계를 이용하여 카메라 캘리브레이션 결과를 보정한다^[8].

일반적으로, 캘리브레이션 패턴이나 카메라 자체의 정밀도로 인한 영상 획득시의 오차가 발생하는데 이를 보완하기 위해 캘리브레이션 패턴을 동일한 위치에 두고 여러 장의 영상을 획득한다. 그리고 동일한 위치에서 획득된 각 영상으로부터 찾아진 격자점에 필터링 과정을 수행함으로써 안정된 값을 얻을 수 있다. 우선, Tsai의 알고리즘을 적용하여 내부 및 외부 파라미터를 얻는다. 즉, 실세계 좌표로부터 각 렌즈까지의 회전 및 이동 행렬 (R_i, T_i) ($i=0, \dots, N_L-1$)을 각각 얻을 수 있다^{[9][10]}.

일반적으로, Tsai의 캘리브레이션 알고리즘을 적용해서 얻은 각 렌즈의 회전 및 이동 행렬은 카메라와 캘리브레이션 객체와의 거리가 멀어질수록 그 오차는 커진다. 카메라의 해상도는 일정하지만, 한 화소의 오차가 캘리브레이션 객체의 점에 미치는 영향이 커지기 때문이다. 이러한 오차를 보완하기 위해 본 실험에서는 카메라

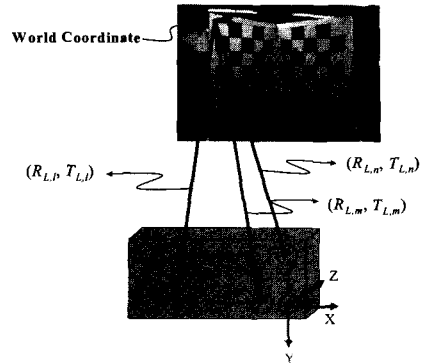


그림 2. 인트라 카메라 캘리브레이션.
Fig. 2. Intra-camera calibration.

자체에서 얻을 수 있는 카메라 렌즈간의 기하학적 정보 두 가지를 이용한다. 첫째, 모든 렌즈는 동일한 방향을 향하기 때문에 각각의 렌즈에 대해 구한 회전 행렬은 동일하다. 둘째, 렌즈간의 이동 행렬의 차이로 얻은 렌즈간의 거리는 카메라 구조에서 구한 각각의 거리 값과 동일해야 한다.

멀티뷰 카메라의 모든 렌즈가 동일한 방향을 향한다는 특징에 의해 다음과 같은 회전 행렬의 오차를 구할 수 있다.

$$R_{error} = \sum_{i=0, i \neq j}^{L-1} \|R_i - R_j\|^2 \quad (5)$$

위 식에서, L 은 렌즈의 쌍을 나타낸다. 그리고 렌즈간의 이동 행렬 차이와 그 실제 거리 정보를 이용하여 이동 행렬의 오차를 구할 수 있다.

$$T_{error} = \sum_{i=0, i \neq j}^{L-1} \|d_{i,j} - D_{i,j}\|^2 \quad (6)$$

위 식에서, $d_{i,j}$ 와 $D_{i,j}$ 는 각각 i 번째와 j 번째 렌즈간의 계산된 거리 및 실제 거리를 나타낸다. 따라서 외부 파라미터에 의해 발생하는 오차는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C_{error} = R_{error} + \lambda T_{error} \quad (7)$$

위 식에서, λ 는 회전 오차와 이동 오차간의 스케일 인자를 나타낸다.

이를 바탕으로 최적화 알고리즘을 다음과 같은 순서로 적용한다. 본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 Levenberg-Marquardt 최적화 알고리즘을 사용한다.

1. 렌즈 개수 N_L 만큼 Tsai알고리즘을 적용시켜 초기의 회전 및 이동 행렬을 구한다. $\{R_0, T_0\}, \{R_1, T_1\}, \dots, \{R_{N_L-1}, T_{N_L-1}\}$
2. 과정 1에서 구한 회전 및 이동 행렬을 초기값으로, 임의의 N_L-1 렌즈를 중심으로 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하여 C_{error} 를 최소화함으로써 나머지 한 렌즈의 값을 최적화한다.
3. 과정 2에서 최적화된 외부 파라미터들의 집합에서 최적화하려는 렌즈를 바꾸면서, 최적화 과정을 N_L 만큼 반복함으로써 모든 렌즈의 외부 파라미터를 최적화 할 수 있다.
4. 결과가 수렴할 때까지 최적화하려는 렌즈를 바꿔가면서 과정 2 ~ 3을 반복한다.

이와 같은 인트라 카메라 캘리브레이션 과정을 통해 N_L 개의 렌즈에 대해 최적화된 외부 파라미터를 획득할 수 있다.

3. 인터 카메라 캘리브레이션 (Inter-camera Calibration)

인트라 카메라 캘리브레이션의 결과로 실세계의 기준 점으로부터 두 대의 카메라의 기준 렌즈 (reference lens) 까지의 회전 및 이동 행렬 (R_R, T_R) 과 (R_L, T_L) 을 각각 얻는다. 멀티뷰 카메라의 구조를 이미 알고 있기 때문에 기준 렌즈는 임의의 렌즈를 선택하여도 무방하다. 이렇게 얻어진 카메라의 외부 파라미터를 이용하여 실세계에 대한 3D point cloud를 가상 환경에 역투영시킴으로써 실세계를 가상 환경으로 매핑하는 것이 가능하다.

그러나 획득된 (R_L, T_L) 과 (R_R, T_R) 이 정확하지 않기 때문에 실세계를 가상 환경으로 역투영한 결과는 그림 10(c)에 보인 것과 같이 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.

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

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

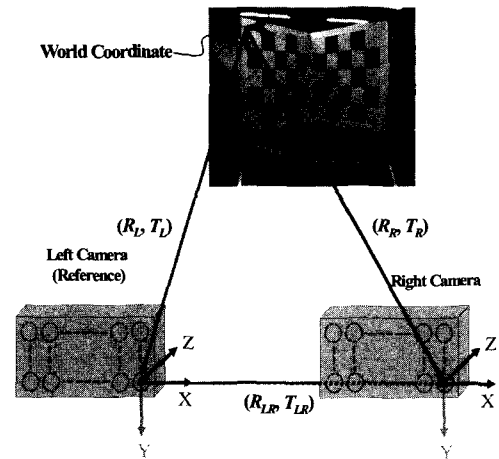


그림 3. 인터 카메라 캘리브레이션.
Fig. 3. Inter-camera calibration.

두 대의 멀티뷰 카메라를 사용하여 가상 공간에 역투영된 3D point cloud들이 정확하게 일치하기 위해서는 R_{LR} 과 T_{LR} 값을 정확히 획득해야만 한다. 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. 주어진 N_G 개의 격자점에 대해, 대응되는 각 격자점 사이의 거리를 최소화하는 R_{LR} 과 T_{LR} 을 찾는 과정이다. 다시 말하면, 왼쪽과 오른쪽 카메라의 외부 파라미터 (R_L, T_L) 과 (R_R, T_R) 을 구하는 것으로, 다음과 같이 표현된다 [11].

Given two sets of corresponding points,
Find $\{R_L, T_L\}^*$ & $\{R_R, T_R\}^*$ (9)
such that $\arg \min_{\{R_L, T_L\} \& \{R_R, T_R\}} \sum_{i=0}^{N_G-1} \{G_{Li}(R_L, T_L) - G_{Ri}(R_R, T_R)\}^2$

위 식에서, G_L 와 G_R 는 각각 왼쪽과 오른쪽 카메라로부터 획득된 캘리브레이션 패턴의 가상 환경으로 역투영된 3D 격자점을 나타낸다. 이상적인 경우, G_L 와 G_R 는 정확히 일치해야 하지만 실제적으로 정확한 값을 얻는 것은 불가능하다. 그 차는 $\{R_L, T_L\}$ 및 $\{R_R, T_R\}$ 의 함수로 표현되며, 이를 최소화하는 각 카메라의 외부 파라미터를 찾는으로써 두 카메라 사이의 정확한 위치 관계를 얻을 수 있다.

캘리브레이션 패턴의 격자점 $G_i = [x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}]^T$ 에 대해 왼쪽 카메라를 통해 투영된 좌표 값을 라 하면 가상 공간으로 역투영된 좌표 G_{Li} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_{Li} = \begin{bmatrix} x_{gLi} \\ y_{gLi} \\ z_{gLi} \\ 1 \end{bmatrix} = \left([C_L \ 0] \begin{bmatrix} R_L & T_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_{G_{Li}} \\ v_{G_{Li}} \\ 1 \end{bmatrix} = P_L^{-1} \begin{bmatrix} u_{G_{Li}} \\ v_{G_{Li}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

위 식에서, C_L 은 카메라 내부 파라미터를 나타낸다. 오른쪽 카메라에 대해서도 동일하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{Ri} = \begin{bmatrix} x_{gRi} \\ y_{gRi} \\ z_{gRi} \\ 1 \end{bmatrix} = \left([C_R \ 0] \begin{bmatrix} R_R & T_R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_{G_{Ri}} \\ v_{G_{Ri}} \\ 1 \end{bmatrix} = P_R^{-1} \begin{bmatrix} u_{G_{Ri}} \\ v_{G_{Ri}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

위 식에서, $(u_{G_{Ri}}, v_{G_{Ri}})$ 는 G_i 에 대해 오른쪽 카메라를 통해 투영된 영상 좌표, C_R 은 오른쪽 카메라의 카메라 내부 파라미터를 나타낸다. 결론적으로, 식 (9)를 최소화하는 R_{LR} 과 T_{LR} 를 구함으로써 두 카메라간의 관계를 알 수 있다.

본 논문에서는 인터 카메라 캘리브레이션을 위한 방법으로 ICP 알고리즘을 사용한다^{[12][13]}. 우선, 가상 공간에 역투영된 3D 격자점 G_{Li} 와 G_{Ri} , ($i=0,1,\dots,N_G-1$) 그리고 다음과 같은 초기값들이 주어진다.

$$G_{R,0} = G_R, \quad \hat{q}_0 = [1000000]^T, \quad k=0 \quad (12)$$

위 식에서, $G_{R,0}$ 는 오른쪽 카메라로부터 획득된 격자점의 3D point cloud 집합의 초기값, \hat{q}_0 은 쿼터니온(quaternion)의 초기값 그리고 k 는 인덱스를 나타낸다. ICP 알고리즘에서의 쿼터니온은 다음과 같이 회전과 이동벡터의 결합으로 구성된다.

$$\hat{q} = [\hat{q}_R | \hat{q}_T], \quad \hat{q}_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T, \quad \hat{q}_T = [q_4 \ q_5 \ q_6]^T \quad (13)$$

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

$$Y_k = C(G_{R,k}, G_L) \quad (14)$$

위 식에서, C 는 최소 거리 점 연산자(closest point operator), 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_{Ri}, G_{Li}) 쌍들의 거리를 최소화하는 강제 변환(rigid-body transformation)을 구한다.

$$(\hat{q}_k, d_k) = Q(G_{R,0}, Y_k) \quad (15)$$

위 식에서, Q 는 최소 자승 쿼터니온 연산자(least square quaternion operator), d_k 는 평균 자승 점 매칭 오차(mean square point matching error)를 나타낸다. 이는 다음과 같은 mean square objective function을 최소화하는 쿼터니온을 구하는 과정이다.

$$f(\hat{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\hat{p}_i - R(\hat{q}_R)G_{Ri} - \hat{p}_T\|^2 \quad (16)$$

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

$$G_{R,k+1} = \hat{q}_k(G_{R,0}) \quad (17)$$

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

$$d_{k-1} - d_k < \tau \quad (18)$$

이와 같은 ICP 알고리즘을 각 멀티뷰 카메라로부터 획득된 N_G 개의 격자점에 대한 역투영된 3D 좌표에 최적화 과정으로 적용하면 이로부터 역으로 기준이 되는 카메라에 대한 상대적인 카메라의 최적화된 회전 및 이동행렬을 식 (13)과 식 (19)를 사용하여 얻을 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 때, 기준 카메라를 중심으로 상대 카메라의 위치를 획득된 R_{LR} 과 T_{LR} 를 적용하여 변환한다. 쿼터니온을 다시 획득하고 동일한 방법을 계속 적용하여 오차가 정의된 문턱치보다 작아질때까지 반복적으로 적용하여 최종적인 두 멀티뷰 카메라의 위치를 찾아낸다. 위와 같은 방법으로 인터 카메라 캘리브레이션을 통해 카메라 파라미터를 보정함으로써 가상 환경에 역투영된 좌우 3D point

cloud를 정합하는 것이 가능하다. 이와 같이 보정된 회전 및 이동 행렬은 기준 렌즈 이외의 나머지 렌즈에 대한 파라미터를 보정하는데 동시에 적용된다. 최종적으로, 두 대의 멀티뷰 카메라의 $2N_L$ 개의 렌즈에 대해 최적화된 파라미터를 얻는다.

4. 회전하는 다수의 카메라 캘리브레이션

가상 환경 생성을 위해 앞에서 설명한 캘리브레이션 방법을 회전하는 다수의 카메라에 적용하여 각 카메라에 대한 카메라 파라미터를 보정함으로써 다수의 3D point cloud를 정합한다. 사용자 네비게이션이 가능한 3D 가상 환경을 생성하기 위해 두 대의 멀티뷰 카메라를 그림 6(a)와 같이 턴테이블 중심으로부터 동일한 거리에 위치시킨다. 이를 일정한 각도로 회전하여 360° 전 방향에 대한 3D point cloud를 획득한다. 이를 위해, 제한된 범위 내에서 캘리브레이션 패턴을 사용하여 최적화된 카메라 파라미터를 획득하고, 전 방향에 대한 정합과정에 사용한다.

본 장에서는 제한된 범위 내에서 최적화된 카메라 파라미터를 획득하기 위해 회전하는 카메라에 대해 제안된 카메라 캘리브레이션 방법을 적용한다. 그림 4는 회전하는 두 대의 멀티뷰 카메라에 대한 카메라 캘리브레이션 방법을 보인 것이다. 기준 위치에서 획득한 왼쪽 및 오른쪽 카메라의 외부 파라미터를 (R_{Li}, T_{Li}) 과 (R_{Ri}, T_{Ri}) 라 하자. 기준 위치보다 회전각 α° 이전에서의 두 카메라에 대한 파라미터는 $(R_{Li(i-1)}, T_{Li(i-1)})$ 과 $(R_{Ri(i-1)}, T_{Ri(i-1)})$ 이 된다. 그리고 회전각 α° 이후에서의 파라미터는 $(R_{Li(i)}, T_{Li(i)})$ 과 $(R_{Ri(i)}, T_{Ri(i)})$ 이 된다.

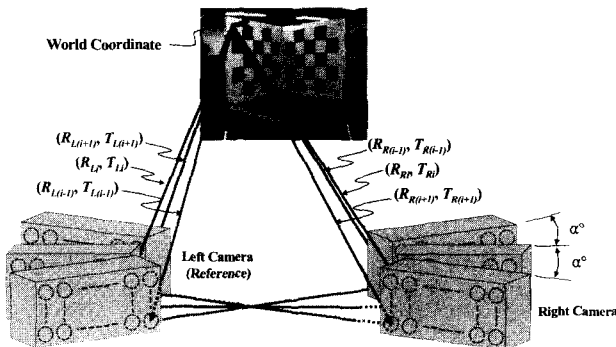


그림 4. 회전하는 다수의 카메라 캘리브레이션.
Fig. 4. Camera calibration for rotating multiple cameras.

그림 5는 회전하는 두 대의 카메라에 대한 카메라 캘리브레이션 방법의 흐름도를 보인 것이다.

우선, 양쪽에 위치한 멀티뷰 카메라로부터 캘리브레이션 패턴이 포함된 2D 영상을 각 렌즈에 대해 획득하고 Tsai 알고리즘을 적용한 후, 인트라 카메라 캘리브레이션을 수행한다. 그리고, (R_{Ri}, T_{Ri}) 와 (R_{Li}, T_{Li}) 를 사용하여 역투영된 N_G 개의 특징점에 대한 3D point cloud를 기반으로 인트라 카메라 캘리브레이션을 수행한다. 그 결과로, 두 멀티뷰 카메라의 모든 렌즈에 대한 보정된 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 마지막으로, 턴테이블 위의 카메라를 일정한 각도로 회전시킨다. 이 때, 카메라로부터 획득되는 영상이 캘리브레이션 패턴을 포함하고 있는지 확인하고, 포함하고 있으면 위의 과정을 반복한다. 최종 결과로, 기준 카메라를 중심으로 보정된 N_{sc} 개의 카메라의 위치에서, 각 멀티뷰 카메라의 N_L 개의 렌즈에 대해 보정된 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 여기서, N_{sc} 는 획득된 영상의 개수를 나타내며, (R_{Li0}, T_{Li0}) 은 기준 카메라의 위치로 사용된다.

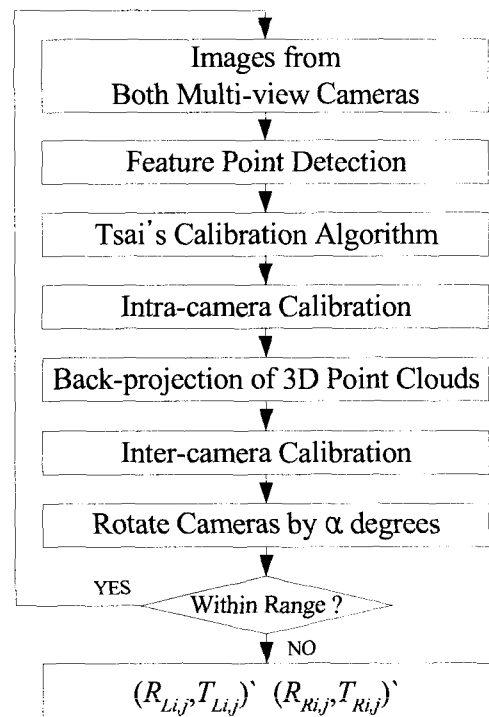


그림 5. 회전하는 다수의 카메라 캘리브레이션 흐름도.

Fig. 5. Flowchart of camera calibration for rotating multiple cameras.

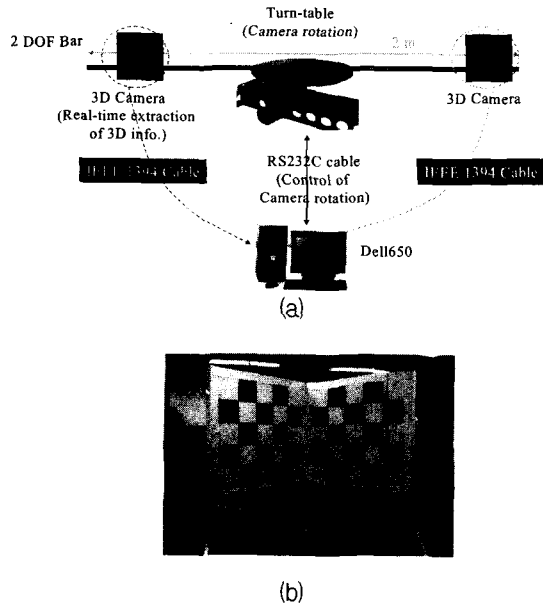


그림 6. 실험 셋업 (a) 시스템 구성 (b) 직각 패턴
Fig. 6. Experimental setup (a) system configuration (b) non-coplanar pattern.

이러한 방법을 통해 두 대의 멀티뷰 카메라를 회전하여 얻은 N_{sc} 개의 카메라의 위치에 대한 보정된 회전 및 이동 행렬을 얻는다. 이와 같이 보정된 카메라 파라미터를 사용함으로써 중·장거리에 존재하는 여러 방향의 3D point cloud에 대해서도 정확한 정합이 가능하다.

III. 실험 및 분석

본 실험은 일반적인 실내 환경의 정상적인 조명하에서 수행되었다. 영상 획득을 위해 IEEE1394 카메라 (Digiclops)를 사용하였으며, Xeon 2.8 GHz CPU 컴퓨터에서 수행되었다. Digiclops는 소니의 ICX084AK CCD 센서를 이용하고, 6 mm의 초점 거리를 갖는다 [14]. 특히, 세 개의 렌즈를 갖는 멀티뷰 카메라이며, 각 렌즈는 동일한 방향을 향하고 그 사이의 거리는 알려져 있다. 본 실험에 사용된 캘리브레이션 패턴은 체스 보드 모양을 띄고 있으며, 두 개의 직각 평면상에 32 개의 격자점이 있다. 그림 6은 실험을 위한 시스템 셋업을 나타낸다. 그림 6(a)는 시스템 구성, 그림 6(b)는 직각 패턴으로, 체스 보드 상의 격자간의 간격은 25 cm 이며, 가상 환경 생성을 위해 중·장거리용으로 제작된 것이다.

그림 7은 인트라 카메라 캘리브레이션의 적용으로 인한 거리에 따른 외부 파라미터 오차의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 세 개의 렌즈에 대한 회전 행렬로

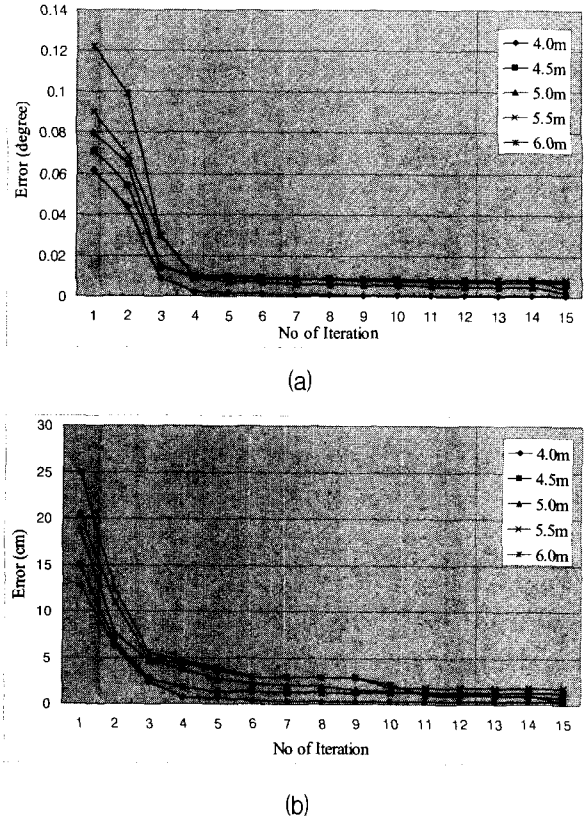


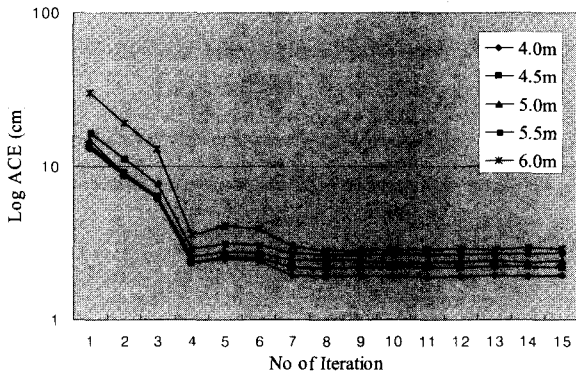
그림 7. 인트라 카메라 캘리브레이션에 의한 외부 파라미터의 오차 (a) 회전 오차 (b) 이동 오차
Fig. 7. Errors of extrinsic parameters by intra-camera calibration (a) rotation errors (b) translation errors.

계산된 회전 오차 그리고 그림 7(b)는 이동 행렬로 계산된 이동 오차를 각각 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 회전 및 이동 오차는 최적화 전에는 거리에 따라 오차가 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 최적화 후에는 그 오차가 0에 가까운 값을 가지며 거리에 거의 무관함을 알 수 있다. 표 1은 이 때 사용된 각 렌즈의 내부 파라미터이다.

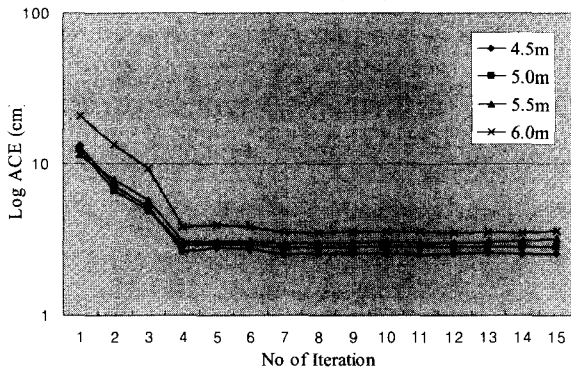
그림 8은 인트라 카메라 캘리브레이션의 반복 횟수에 따라 대응되는 특징점들 사이의 오차의 변화를 거리에 따라 나타낸 것이다. 즉, 대응되는 격자점들의 3D point cloud에 대한 평균 대응 오차 (Average Correspondence Error: ACE)를 로그 스케일로 나타낸 것이다. 두 장면과 여섯 장면에 대한 정합 결과가 그림 8(a)와 그림 8(b)에 나타나 있다. 여섯 장면은 턴테이블을 회전시켜 획득한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 반복 횟수가 증가함에 따라 ACE가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 반복 횟수에 관계없이 거리가 멀어짐에 따라 캘리브레이

표 1. 내부 파라미터.
Table 1. Intrinsic parameters.

Parameters \ Lens	Left	Right	Top
Focal length (mm)	6.0843	6.0237	6.0092
Principal point (pixel)	326.6836 251.2265	316.4015 241.2226	320.3961 241.2278
Distortion factor	0.0085	0.0084	0.0082
Uncertainty factor	1.0357	1.0358	1.0358



(a)



(b)

그림 8. 인터 카메라 캘리브레이션의 반복 횟수에 따른 대응되는 특징점들 사이의 ACE (a) 두 장면에 대한 정합 (b) 여섯 장면에 대한 정합
Fig. 8. ACE for 3D point clouds of corresponding grid points with respect to iteration number of intercamera calibration (a) registration of two scenes (b) registration of six scenes.

오차 역시 증가함을 알 수 있다. 이는 양안차 추정시 존재하는 오차로 인해 더 이상 ACE 값이 감소하지 않기 때문이다. 그림 8(b)에서 거리가 4 m인 경우는 턱테이블

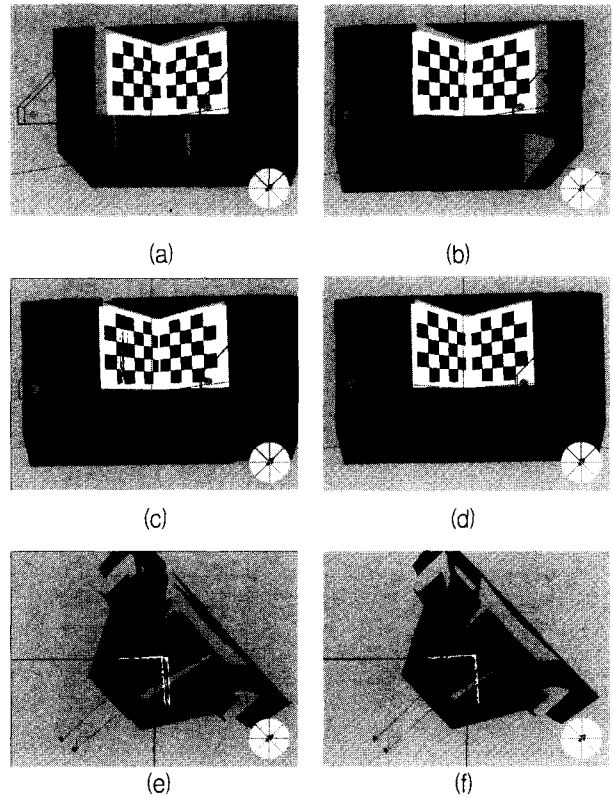


그림 9. 합성 모델에 인터 카메라 캘리브레이션 방법을 적용한 결과 (a) 왼쪽 영상 (b) 오른쪽 영상 (c) 정합 전 (d) 정합 후 (e) 정합 전의 상위 뷰 (f) 정합 후의 상위 뷰

Fig. 9. Results of applying inter-camera calibration to a synthetic model (a) left scene (b) right scene (c) before registration (d) after registration (e) top-view before registration (f) top-view after registration.

을 회전할 때 캘리브레이션 패턴이 영상에 포함되지 않기 때문에 비교에서 제외되었다

그림 9는 OpenGL로 구현된 합성 모델에 인터 카메라 캘리브레이션 방법을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 각각 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라에서 바라본 장면을 나타낸다. 그림 9(c)는 좌우 영상을 동시에 보인 그림이고, 그림 9(d)는 인터 카메라 캘리브레이션 방법을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 9(e) 및 그림 9(f)는 각각에 대한 상위 뷰를 나타낸 것이다. 그림에 보인 것과 같이 인터 카메라 캘리브레이션 방법을 사용함으로써 32 개의 특징점만을 이용하여 정합 과정을 수행하기 위한 행렬을 찾는 것이 가능하다.

그림 10은 실제 장면에 인터 카메라 캘리브레이션을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 10(a)와 그림 10(b)는 각

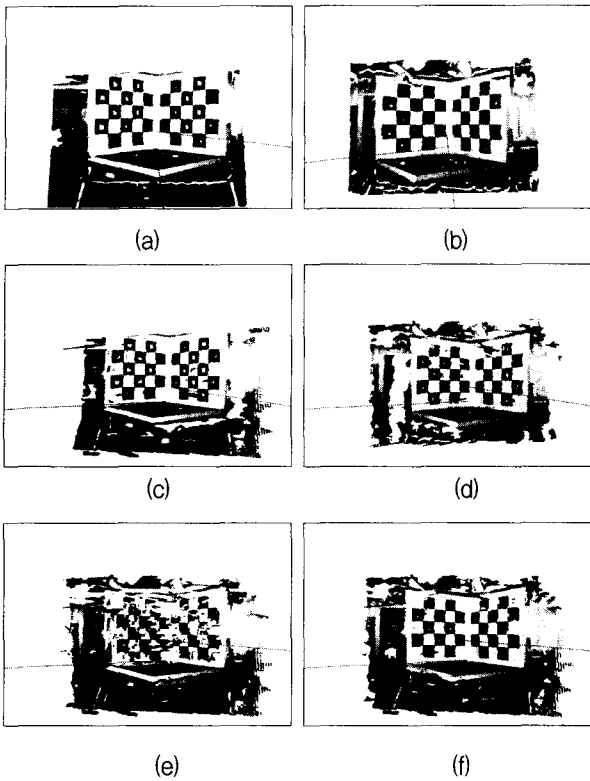


그림 10. 실제 장면에서 인터 카메라 캘리브레이션을 적용한 결과 (a) 왼쪽 카메라 시점에서의 왼쪽 영상 (b) 오른쪽 카메라 시점에서의 오른쪽 영상 (c) 중심 시점에서의 왼쪽 영상 (d) 중심 시점에서의 오른쪽 영상 (e) 정합 전 (f) 정합 후

Fig. 10. Results of applying inter-camera calibration to real scenes.

- (a) left scene from left camera viewpoint
- (b) right scene from right camera viewpoint
- (c) left scene from middle camera viewpoint
- (d) right scene from middle camera viewpoint
- (e) before registration (f) after registration.

각 왼쪽과 오른쪽 카메라로부터 얻은 3D point cloud를 각 카메라에 대해 얻은 외부 파라미터를 사용하여 가상 공간에 역투영한 결과를 나타낸 것이다. 각각의 카메라 시점에서 투영한 영상이기 때문에 홀 (hole)이 거의 없다. 여기서, 홀이란 양안차 추정의 결과가 문턱값을 넘어 3D point cloud가 존재하지 않는 영역을 의미한다. 반면, 그림 10(c)와 그림 10(d)는 두 카메라의 중심 시점에서 바라본 것으로 바라보는 시점이 다르기 때문에 양안차 추정이 수행되지 않은 곳에 대해서는 많은 홀들을 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 10(e)는 그림 10(c)와 그림 10(d)를 동시에 역투영한 결과를 나타낸다. 그림에 보이는 것과 같이 카메라 캘리브레이션 결과로 얻은

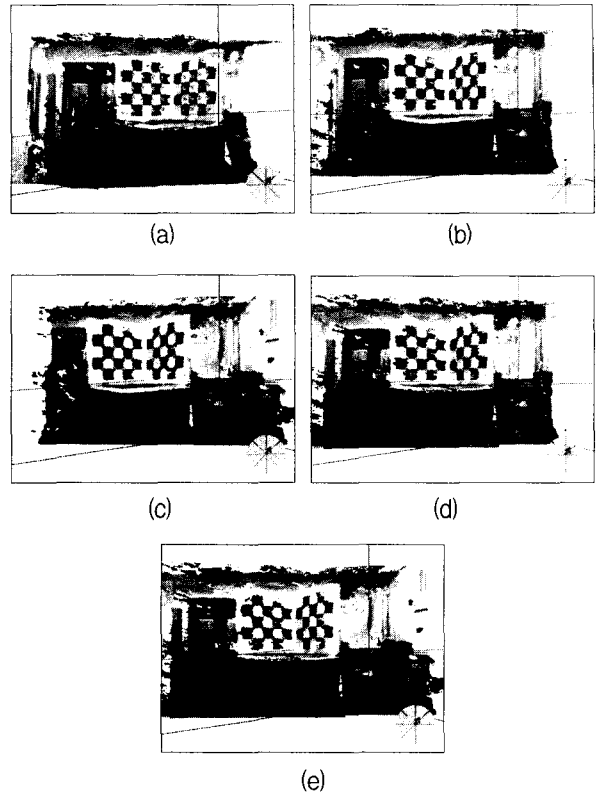


그림 11. 회전하는 두 대의 멀티뷰 카메라에 적용한 인터 카메라 캘리브레이션 (a) 장면 1 (b) 장면 2 (c) 장면 3 (d) 장면 1과 장면 2의 정합 결과 (e) 장면 1부터 장면 3까지의 정합 결과

Fig. 11. Inter-camera calibration for rotating two multi-view cameras (a) scene 1 (b) scene 2 (c) scene 3 (d) registration between scene 1 and scene 2 (e) registration from scene 1 to scene 3.

외부 파라미터가 정확하지 않기 때문에 두 point cloud의 집합이 일치하지 않음을 알 수 있다. 반면, 그림 10(f)는 인터 카메라 캘리브레이션을 적용하여 두 카메라의 외부 파라미터를 보정한 결과로서 두 3D point cloud 집합이 정합되었음을 알 수 있다. 또한, 이와 더불어 그림 10(c)와 그림 10(d)에서 문제되었던 홀들의 영향도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 11은 회전하는 두 대의 멀티뷰 카메라에 인터 카메라 캘리브레이션을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 그림 11(a), 그림 11(b) 그리고 그림 11(c)는 카메라를 5°씩 회전시켜 얻는 왼쪽 및 오른쪽 영상에 대해 인터 카메라 캘리브레이션을 적용한 결과를 보인 것이다. 그리고 그림 11(d)는 그림 11(a)와 그림 11(b)를 정합한 결과를 보인 것이며, 그림 11(e)는 그림 11(a)부터 그림 11(c)까지를 정합한 결과를 보인 것이다.

IV. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 영상기반 3D 가상 환경 생성을 위해 회전하는 다수의 멀티뷰 카메라에 기반한 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 사용함으로써 영상기반 가상 환경을 생성하기 위해 요구되는 중·장거리에서의 정확한 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 즉, 단일 렌즈만을 사용하는 방법으로는 그 오차를 보정하는 것이 사실상 불가능 하지만, 이미 렌즈간의 상대적인 거리 및 방향을 알고 있는 멀티뷰 카메라를 사용함으로써 중·장거리에서 보다 강건한 외부 카메라 파라미터를 얻을 수 있다. 또한, 3차원 point cloud의 정합 과정을 통해 카메라 파라미터의 오차를 보정할 수 있다. 제안된 방법은 파노라믹 3D 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 파노라믹 3D 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.

참고 문헌

- [1] C. C. Slama, *Manual of Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, 4th ed., 1980
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Heikkilä, J., "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 22, no. 10, pp. 1066-1077, Oct. 2000.
- [5] Z. Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," *ICCV99*, vol. 1, pp. 666-673, 1999.
- [6] W. Woo, N. Kim and Y. Iwadate, "Stereo imaging using a camera with stereoscopic adapter," *Proc. Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, vol. 2, pp. 1512-1517, 2000.
- [7] C. Cheung and W. Brown, "3D Shape Measurement using Three Camera Stereopsis in Optics," *Proc. SPIE Illumination and Image Sensing for Machine Vision II*, vol. 850, pp. 128-139, 1987.
- [8] 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.
- [9] S. Kim and W. Woo, "Image-based 3D Mosaicking using Multiple 3D Cameras," *Korean Institute of Communication Sciences (KICS02)*, vol. 26, pp. 58-61, 2002.
- [10] S. Kim and W. Woo, "Virtual Environment Generation using 3D Image-based Panorama," *15th Workshop on Image Processing and Image Understanding (IPIU03)*, vol. 13, pp. 111-116, 2003.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Point Grey Research Inc., <http://www.ptgrey.com>, 2002.

저 자 소 개



김 세 환(학생회원)
 1998년 서울 시립대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 2000년 광주과학기술원 정보통신
 공학과 석사 졸업.
 2000년~현재 광주과학기술원
 정보통신공학과 박사과정.
 <주관심분야:Virtual/Mixed Reality, 3D Vision>



우 운 택(중신회원)
 1989년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1991년 포항공과대학교
 전기전자공학과 석사 졸업.
 1998년 University of Southern Ca
 lifornia, Electrical Engin
 eering-System 박사 졸업.
 1991년~1992년 삼성종합기술연구소 연구원
 1999년~2001년 ATR MIC Lab., Japan, 초빙
 연구원
 2001년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과
 조교수
 <주관심분야 : Virtual/Mixed Reality, 3D Vision,
 3D Display, HCI, Networked VR, Ubiquito
 us/Wearable Computing>



김 기 영(학생회원)
 2002년 중앙대학교 컴퓨터공학과
 학사 졸업.
 2002년~현재 광주과학기술원
 정보통신공학과 석사과정.
 <주관심분야 : Virtual/Mixed Rea
 lity, 3D Vision>