

# Convenient View Calibration of Multiple RGB-D Cameras Using a Spherical Object

Soon-Yong Park<sup>\*</sup> · Sung-In Choi<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

To generate a complete 3D model from depth images of multiple RGB-D cameras, it is necessary to find 3D transformations between RGB-D cameras. This paper proposes a convenient view calibration technique using a spherical object. Conventional view calibration methods use either planar checkerboards or 3D objects with coded-pattern. In these conventional methods, detection and matching of pattern features and codes takes a significant time. In this paper, we propose a convenient view calibration method using both 3D depth and 2D texture images of a spherical object simultaneously. First, while moving the spherical object freely in the modeling space, depth and texture images of the object are acquired from all RGB-D camera simultaneously. Then, the external parameters of each RGB-D camera is calibrated so that the coordinates of the sphere center coincide in the world coordinate system.

Keywords : View Calibration, Spherical Object, Multi-View, Kinect

## 구형 물체를 이용한 다중 RGB-D 카메라의 간편한 시점보정

박 순 용<sup>\*</sup> · 최 성 인<sup>\*\*</sup>

## 요 약

물체의 360도 방향에서 다수의 RGB-D(RGB-Depth) 카메라를 이용하여 깊이영상을 획득하고 3차원 모델을 생성하기 위해서는 RGB-D 카메라 간의 3차원 변환관계를 구하여야 한다. 본 논문에서는 구형 물체를 이용하여 4대의 RGB-D 카메라 사이의 변환관계를 간편하게 구할 수 있는 시점보정(view calibration) 방법을 제안한다. 기존의 시점보정 방법들은 평면 형태의 체크보드나 코드화된 패턴을 가진 3차원 물체를 주로 사용함으로써 패턴의 특징이나 코드를 추출하고 정합하는 작업에 상당한 시간이 걸린다. 본 논문에서는 구형 물체의 깊이영상과 사진영상을 동시에 사용하여 간편하게 시점을 보정할 수 있는 방법을 제안한다. 우선 하나의 구를 모델링 공간에서 연속적으로 움직이는 동안 모든 RGB-D 카메라에서 구의 깊이영상과 사진영상을 동시에 획득한다. 다음으로 각 RGB-D 카메라의 좌표계에서 획득한 구의 3차원 중심좌표를 월드좌표계에서 일치되도록 각 카메라의 외부변수를 보정한다.

키워드 : 시점보정, 구형물체, 다시점, 키넥트

## 1. 서 론

3차원 스캐닝(3D scanning) 기술은 컴퓨터비전 및 그래픽스 분야에서 오랫동안 연구가 진행된 분야이다. 물체의 3차원 스캐닝을 위해서는 비교적 고가의 3차원 스캐너(3D scanner) 장치가 필요하기 때문에 이전에는 주로 산업용으로만 사용되어 왔다. 그러나 2010년 마이크로소프트사의 '키

넥트(Kinect)'가 기존의 장치에 비하여 매우 저가로 출시되면서 3차원 스캐너는 이제 산업용에서 일반 상업용으로 활용범위가 확대되고 있다. 한편 키넥트는 게임용 인터페이스 용도로 출시되었기 때문에 3차원 스캐닝의 정밀도는 산업용에 비하여 현저히 떨어진다. 하지만 컴퓨터와 인터페이스를 위한 얼굴 및 동작인식 등에 적용하기에 충분한 성능을 가지고 있다. 3차원 스캐너를 보다 다양한 분야에 적용하기 위해서는 물체의 3차원 형상(shape) 획득과 동시에 색상(color)정보까지 획득하는 것이 필수적이다. 이를 위해 키넥트는 한 개의 RGB 카메라와 한 개의 깊이(depth)카메라로 구성되어 있으며 이러한 카메라를 일반적으로 'RGB-D 카메라'라고 부른다.

한편 여러 대의 3차원 RGB-D 카메라를 동시에 사용하여

\* 본 연구는 2012학년도 경북대학교 학술연구비 및 미래부 산업융합원천기술개발사업(No. 10043897)의 지원으로 수행되었음.

† 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 부교수

\*\* 준 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

Manuscript Received: April 4, 2014

First Revision: June 9, 2014

Accepted: June 9, 2014

\* Corresponding Author: Soon-Yong Park(sypark@knu.ac.kr)

물체의 360도 전체의 3차원 스캐닝을 위한 연구도 진행되고 있다[1]. 하나의 RGB-D 카메라로는 단일 시점(viewpoint)에서 물체의 형상을 획득하기 때문에 물체의 전체 형상과 색상정보를 복원할 수 없다. 반면 여러 대의 RGB-D 카메라를 사용하면 물체의 전체 형상을 복원할 수 있고 그 결과를 이용하여 정밀한 동작인식, 360도 3차원 모델링, 가상피팅(virtual fitting), 특수효과 등의 분야에 적용할 수 있는 장점이 있다.

여러 대의 RGB-D 카메라를 사용하기 위해서는 각 카메라의 시점을 하나의 단일 좌표계로 표현하는 시점보정(view calibration)이 반드시 필요하다. 하나의 카메라에 대한 보정은 일반적으로 Zhang 알고리즘[2]을 주로 사용하지만 여러 시점의 카메라 보정 기술은 일반적이지 않다. 기존의 시점보정은 지팡이 형태나 LED 등의 특수한 보정물체를 사용하고 있다[3, 4, 5, 6]. 하지만 기존의 방법들은 깊이를 획득하는 3차원 카메라 기준의 보정이 아닌 RGB 카메라의 보정이 대부분이기 때문에 깊이 카메라의 좌표계를 기준으로 획득한 3차원 형상 정보를 직접 변환하는 데 사용할 수 없다. 따라서 깊이 카메라를 기준으로 여러 대의 RGB-D 카메라의 보정관계를 쉽게 구할 수 있는 기술의 개발이 필요하다[7].

본 논문에서는 키넥트와 같은 RGB-D 카메라를 이용하여 물체의 360도 형상을 복원할 때 필요한 간편한 시점보정 기술을 소개한다. 제안하는 방법은 RGB-D 카메라에서 획득한 구형 물체(spherical object)의 색상정보와 3차원 형상정보를 함께 활용하여 쉽고 빠르게 다시점(multi-view) RGB-D 카메라 사이의 3차원 변환정보를 획득한다. 다시점 보정 결과를 이용하여 추후 RGB-D 카메라를 이용하여 물체의 360도 형상 및 색상정보를 완전하게 스캐닝(scanning)하는 데 본 제안기술의 목적이 있다.

## 2. 다시점 RGB-D 카메라의 시점보정

### 2.1 다시점 RGB-D 카메라 시점보정의 착안점

그림 1은 4대의 RGB-D 카메라를 사용하여 신체의 360도 방향을 스캔하기 위한 장치의 구성도이다. 각 RGB-D 카메라에서 획득한 깊이정보를 하나의 좌표계로 표현하고 물체의 형상을 복원하기 위해서는 각 깊이 카메라 사이의 변환

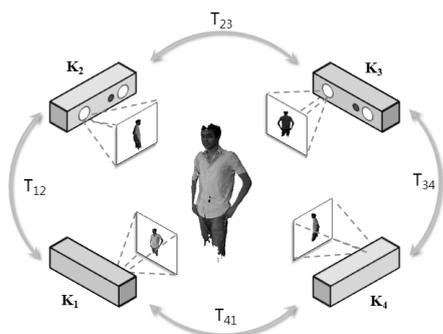


Fig. 1. Diagram of a body modeling system using four RGB-D cameras

관계  $T_{ij}$ 를 구해야 한다. 여기서  $T_{ij}$ 는 3차원 회전과 이동을 표현하는 변환행렬이다. 본 논문에서는 이들 변환행렬을 간편하게 구하는 시점보정 기술을 제안한다.

우선 다시점 RGB-D 카메라의 시점보정을 위하여 기존의 Zhang 카메라 보정 알고리즘을 사용하는 과정을 살펴보자. 먼저 체크보드와 같은 보정판을 모든 RGB-D 카메라에서 보이도록 설치한 후 깊이 카메라에서 보정판 영상을 동시에 획득하여야 한다. 본 연구에서 사용하는 깊이 카메라는 키넥트와 같은 적외선 카메라이므로 RGB-D 카메라에서 투사되는 적외선 패턴의 투사를 막고, 일반 적외선 조명을 보정판에 비추어 영상을 획득한다. 다음으로 각 깊이 카메라에서 획득한 보정판의 적외선 영상에서 코너점을 추출한 후 Zhang 카메라 보정방법으로 각 깊이 카메라의 외부변수(external parameter)를 구할 수 있다. 이때 각 카메라 좌표계를 동일한 월드좌표계(world coordinate system)로 표현하기 위해서는 적외선 영상에서 획득한 보정판의 코너점들의 일치관계를 정확히 구해야 한다. 만일 코너점들의 일치관계가 잘못되면 보정의 결과에 오류가 발생한다.

한편 Zhang 카메라 보정 알고리즘을 사용하기 위해서는 보정판의 영상을 최소 6장 이상 획득하여야 한다[2]. 그러나 그림 1과 같이 서로 다른 시점에서 설치된 카메라에서 보정판이 모두 보이도록 설치하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서 대부분 보정판의 평면이 위로 향하도록 설치하여야 하며, 이러한 경우 보정판의 평면과 카메라 영상면의 각도 차이가 크기 때문에 보정판의 코너점을 추출하는 것이 쉽지 않다. 실제로 본 논문의 비교실험에서도 기존의 Zhang 알고리즘을 사용하는 경우 보정판의 설치와 코너점 추출이 가장 시간이 많이 걸리는 작업이었다. 또 다른 방법으로는 서로 다른 코드를 가진 3차원 보정패턴을 각 시점에서 추적할 수 있으나 입체적인 패턴의 제작이 추가로 필요하다[1].

본 논문에서는 다시점 RGB-D 카메라의 보정을 보다 쉽고 빠르게 구현하기 위하여 깊이 카메라에서 획득하는 물체의 3차원 형상정보를 활용하였다. 그림 2의 예를 들어보자. 그림에서와 같이 두 시점  $K_1$ 과  $K_2$ 에서 획득할 수 있는 3차원 점이 3개가 있다고 가정하자. 이들 3차원 점들의 좌표는 두 시점에서 각각  $p_1$ 와  $q_1$ 로 표현된다. 이때 두 시점 사이의 변환을  $T_{12}$ 이라고 하면  $T_{12}$ 는 회전변환  $R$ 과 이동변환  $t$ 로 표현된다. 두 시점 사이의 유클리디언(Euclidean) 변환을 구하기 위해서는 이론적으로 세 개의 3차원 점의 좌표값으로 변환 행렬을 구할 수 있다. 그림 2에서 3차원 공간에 있는 세 점이 각 카메라에서  $p_1, p_2, p_3$ 와  $q_1, q_2, q_3$ 로 표현되고 각 점의 관계는

$$q_i = T_{12}p_i \tag{1}$$

로 표현되기 때문에 세 점으로 변환행렬  $T_{12}$ 를 구할 수 있다. 만일 3차원 공간에 세 개 이상의 일치점들이 있다면 다음 식 (2)와 같이 오차  $\epsilon$ 를 최소화하도록 LSM(Least Square

Minimization) 방법으로 변환 행렬을 구할 수 있다.

$$\epsilon = \sum_i \| p_i - T_{12}q_i \| \quad (2)$$

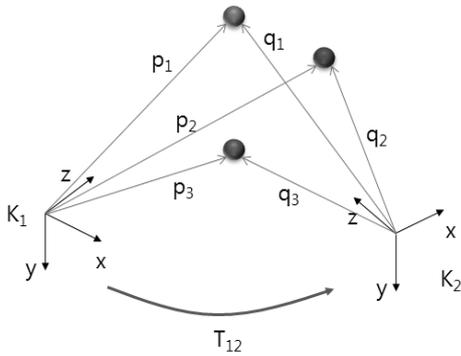


Fig. 2. 3D transformation relation of two view points defined by three 3D points

따라서 서로 다른 깊이 카메라에서 3차원 점의 좌표를 획득하기 위해서는 다양한 방법이 있겠지만 가장 간단하고 효율적인 방법으로 하나의 구형 물체(spherical object)를 이용하는 방법을 제안한다. 구를 이용하는 장점은 구의 표면에 대하여 3차원 깊이 카메라를 이용하여 그 모양을 획득하면 구의 중심점의 3차원 좌표를 추정할 수 있다는 것이다. 구의 중심점의 3차원 좌표를  $(X_c, Y_c, Z_c)$ , 그리고 구의 표면의 한 점의 좌표를  $(X, Y, Z)$ 라 하면 다음과 같은 식의 관계로 두 점을 표현할 수 있다.

$$(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 + (Z - Z_c)^2 = R^2 \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 구의 반지름을 말한다. 위의 식에서 구의 표면을 이루는 충분한 수의 점들의 3차원 좌표를 바탕으로 참고문헌 [8]을 이용하여 구의 중심점의 좌표를 구할 수 있다. 실제 실험 환경에서는 각 깊이 카메라에서 구형 물체의 1/2 정도의 표면에 대한 3차원 정보를 획득할 수 있기 때문에 구의 중심 좌표를 구할 수 있다.

### 2.2 다시점 RGB-D 카메라의 배치

아래 그림 3은 4대의 키넥트를 사용한 다시점 3차원 모델링 시스템의 한 예를 보여준다. 깊이 카메라를 4대를 사용하고 지지대에 부착하여 시점의 이동이 없도록 하였다. 각 카메라의 영상획득 방향이 90°를 이루도록 설치함으로써 물체의 360° 전방향에 대한 깊이영상을 획득할 수 있도록 하였다. 한편 그림 3과 같은 구성이 아닌 다른 어떠한 형태의 다시점 RGB-D 카메라의 구성이라도 본 논문에서 제안하는 방법으로 시점보정을 구현할 수 있다. 이는 구형 물체의 표면 정보를 직접 이용하기보다는 구의 중심점을 이용하기 때문이며 구의 중심점은 어떤 시점에서 보아도 이론적으로 동일하기 때문이다.

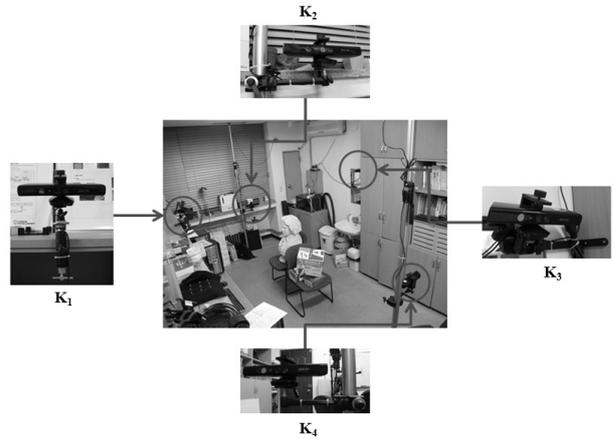


Fig. 3. View of a multi-view 3D modeling system using four RGB-D cameras

각 깊이 카메라에서 획득되는 깊이 정보는 모두 지역(local)좌표계로 표현되기 때문에 각 시점의 깊이 정보를 모두 하나의 공통된 월드(world)좌표계로 변환하여야 한다. 일반적으로 월드좌표계는 여러 개의 깊이 카메라 중에서 하나를 선정하고 그 좌표계를 사용한다. 깊이 카메라에 대한 시점보정 과정을 거치면 3차원 월드좌표계 내에서 각 깊이 카메라의 3차원 자세를 알게 되며 이는 깊이 카메라들 사이의 위치 관계를 말한다. 각 깊이 카메라 사이의 자세 정보를 알고 있기 때문에 추후 각 카메라에서 획득한 3차원 깊이 정보를 공통 좌표계 내에서 일치 및 정렬하여 3차원 모델을 생성할 수 있다.

### 2.3 구형 물체를 이용한 간편한 시점보정

그림 4는 본 연구에서 다시점 보정을 위하여 사용한 구형 물체이다. 물체의 재질은 스티로폼이며 색상은 백색이다. 깊이 카메라에서 물체의 3차원 형상 획득이 용이하도록 색상을 정하였다. 물체의 표면에는 반사도가 낮은 백색 페인트를 사용하여 표면처리를 하였다. 사용한 구의 반지름은 약 20cm이다. 그러나 보정 알고리즘에서 구의 반지름 정보는 사용하지 않는다. 이는 구의 중심을 찾는 알고리즘이 구의 반지름 또한 추정하기 때문이다.

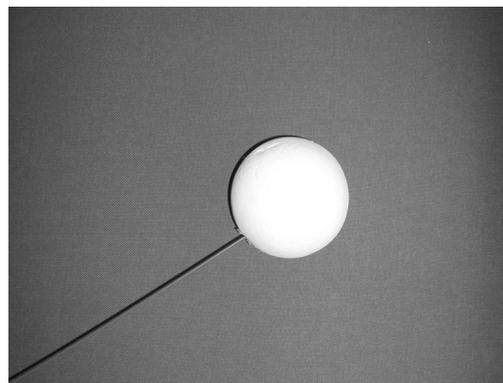


Fig. 4. A spherical object used in view calibration

시점보정에 사용하는 구의 3차원 중심점의 좌표를 정확히 찾겠다고 가정하면 각 깊이 카메라의 좌표계를 기준으로 적어도 3개 이상의 위치에서 3차원 중심점을 획득하여야 한다. 이를 위하여 물체를 3개 이상의 적절한 위치에 고정하고 깊이 정보를 획득할 수 있다. 그러나 충분한 수의 구의 중심점을 획득하는 것이 보정과정에 유리하기 때문에 구를 사람이 직접 들고 모든 깊이 카메라가 보이는 공간에서 움직이면서 깊이 정보를 획득하는 방법을 사용하였다. 깊이가 카메라가 충분한 속도로 구의 3차원 깊이 정보를 획득하고 또한 모든 카메라가 동기화되어 동시에 구의 형상의 획득한다면, 다시점에서 획득한 구의 3차원 정보는 동일한 위치의 구에 대한 3차원 정보라 가정할 수 있다.

따라서 구형 물체를 천천히 움직이고 깊이 정보는 빠르게 획득하였다. 보정에 사용한 구를 가는 막대에 고정하고 사람이 카메라의 획득 공간에서 구를 움직이면서 구의 표면에 대한 3차원 깊이 정보를 획득하였다. 그러나 깊이가 카메라는 획득된 영상의 모든 픽셀의 3차원 정보를 획득하기 때문에 깊이 정보 획득의 시간이 오래 걸리게 되며 따라서 다시점 카메라 간의 동기화 문제가 발생하게 된다. 따라서 3차원 카메라의 깊이 정보 중에서 구의 표면에 대한 정보만을 빠르게 저장하는 방법이 필요하다. 이를 위하여 RGB-D 카메라의 RGB 영상에서 구의 영역을 추출하고 추출된 영역에 해당하는 3차원 깊이 정보만을 저장하였다.

RGB-D 카메라의 RGB영상에서 구의 영역을 추출하기 위해서 우선 배경영상을 모델링하였다. 구의 3차원 정보를 획득하기 이전에 배경 영상을 약 50프레임 누적하고 그 평균 영상을 구하였다. 그리고 배경 모델과 현재 영상의 차영상을 구하고 차영상 중에서 밝기가 매우 밝은 부분만을 추출하였다. 구의 표면의 색상이 백색이므로 이진화를 용이하게 구현할 수 있다. 그리고 이진화된 영상에서 CircleHough 알고리즘을 사용하여 구의 영역만을 추출하였다. CircleHough 알고리즘은 OpenCV2.2의 함수를 사용하였고 알고리즘의 입력은 이진화된 흑백영상을 사용하였다.

그림 5에서는 4대의 RGB-D 카메라의 RGB 영상에서 구의 영역을 추출한 모습을 보여준다. 추출된 구의 영역은 붉은 색의 원으로 표시하였으며 이 영역의 3차원 깊이 정보를 프레임마다 저장하였다. 보정 물체 영역의 추출을 안정적으로 구현하기 위하여 이전 프레임에서 추출된 구의 영역 주변에서 현재 프레임의 구의 영역을 탐색하였다. 또한 CircleHough가 구의 영역을 정확히 추출하지 않더라도 3차원 깊이를 저장하였다. 이는 2차원 RGB 영상에서 구의 정확한 영역을 추출하지 못하더라도 구의 3차원 표면 정보를 제거하여 3차원 중심을 찾을 수 있도록 알고리즘을 구현하였다. 만약 RGB 영상에서 4개의 시점에서 동시에 구의 영역을 찾지 못하면 그 프레임은 무시하였다. 그리고 유효한 깊이 정보를 충분히 획득하기 위하여 구의 영역이 일정한 면적 이하인 경우도 사용하지 않았다.



Fig. 5. Extracted calibration object in four RGB images

보정 물체의 3차원 정보만을 저장하는 경우에는 초당 약 20프레임 이상 고속으로 정보를 획득할 수 있었으며, 따라서 4개의 시점에서 획득한 구의 3차원 정보는 동일한 공간 위치에 있는 구의 정보라 간주할 수 있다. 획득한 구의 부분적인 3차원 점군 정보의 예는 그림 6과 같다. 각 시점에서 획득한 3차원 정보는 구의 부분적인 모습을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이들 정보를 입력으로 하여 구의 중심을 추출하였다. 그리고 추출된 구의 중심점의 좌표를 이용하여 시점 간의 변환 행렬을 구하였다. 첫 번째 깊이가 카메라의 시점을 기준으로 나머지 카메라의 좌표계들을 보정하였다.

실험에서는 약 300~500프레임의 3차원 깊이 정보를 사용하였고 각 프레임에 4개의 시점에서 획득한 구의 중심점의 3차원 좌표를 사용하였다. 그리고 RANSAC(Random Sample Consensus) 알고리즘을 사용하여 중심점이 잘못 계산된 프레임들은 제거하였다.

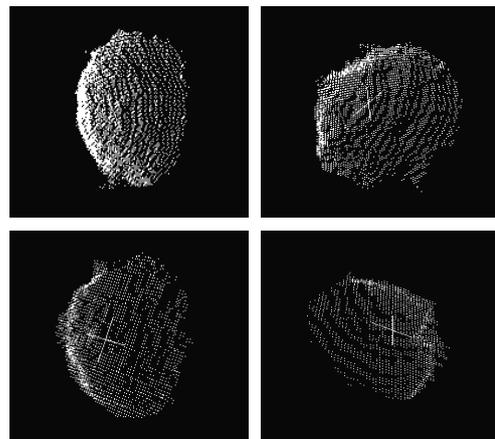


Fig. 6. Examples of 3D shapes of the calibration object in four views

각 시점에서 획득한 3차원 정보를 이용하여 시점 간의 변환정보는 매우 빠르게 계산할 수 있다. 각 시점 (i)에서 획

특한 전체 프레임 정보를  $f_i^D$ 라 하자. 그리고 시점 (i)에서 프레임 (k)의 정보를  $f_i^k$ 라 하자. RANSAC 알고리즘을 사용한 시점 보정의 과정은 다음과 같은 유사코드(pseudocode)로 표현할 수 있다.

---

```

while ( $\epsilon > T_\epsilon$ )
  // 3개의 프레임을 무작위로 선택
   $f_i^k = \text{SelectRandomSubframe}(f_i^D)$ 
  // 구의 중심좌표를 이용하여 시점 사이의 변환 계산
   $T_{iw} \leftarrow \text{minimize} \|C_w^k - T_{iw}C_i^k\|$ 
  // 선택프레임 이외의 모든 프레임에서 구의 중심좌표를
  // 월드좌표계로 변환
   $C_w^{k'} = T_{iw}C_i^{k'}$ 
  // 월드좌표계로 표현된 구의 중심의 평균 계산
   $C_a^{k'} = \frac{1}{4} \sum_{w=1}^4 C_w^{k'}$ 
  // 각 프레임의 구의 중심과 평균의 전체 평균 계산
   $\epsilon = \frac{1}{N_D - 3} \sum_{k'=1}^{N_D - 3} \left( \frac{1}{4} \sum_{w=1}^4 \|C_a^{k'} - C_w^{k'}\| \right)$ 

```

---

위의 코드에서  $C_i^k$ 는 (k)번 프레임에서 (i)번째 시점에서 획득한 구의 중심좌표를 말한다. 그리고  $C_w^k$ 는  $C_i^k$ 를 월드 좌표계로 변환한 좌표이다. 프레임 번호 (k')는 처음 무작위로 선택한 3개의 프레임 이외의 프레임의 번호를 말한다. 또한  $T_\epsilon$ 는 7~8mm로 실험에 따라 변할 수 있다.

그림 7과 그림 8에서는 구의 중심점의 보정 이전과 이후의 위치관계를 보여준다. 그림 7은 모든 프레임에서 추정된 구의 중심을 첫 번째 카메라의 좌표계로 표현하였다. 서로 다른 시점을 다른 색상의 점들로 표시하였다. 시점 보정 이전의 경우는 중심점들이 서로 독립적인 좌표계로 계산되었기 때문에 구의 중심들이 전혀 일치하지 않음을 알 수 있다. 반면 그림 8에서 4개의 시점의 보정 결과를 이용하여 구의 중심점들을 정합한 결과를 보여준다. 모든 시점에서 추정된 구의 중심점들이 서로 일치한 결과를 보여주고 있다. 또한 중심점들의 연속적인 궤적은 구를 이동한 경로임을 알 수 있다.

시점보정의 실험은 3회 실시하였다. 그리고 보정오차의 임계치  $T_\epsilon$ 는 7mm로 정하였다. 제안한 시점보정의 결과를 다른 보정기술과 비교하기 위하여 표 1에서는 기존의 체크보드 보정판을 이용한 결과와 성능을 비교하였다. 체크보드와 Zhang 알고리즘을 이용한 보정방법은 2.1절에서 간략히 설명하였다. Zhang 알고리즘은 단시점 및 다시점 카메라의 보정에 가장 많이 사용되는 방법으로 본 논문에서도 기존 방법과 제안한 방법의 결과를 비교하였다. 각 시점에서 계산된 구형의 보정물체의 중심좌표를 Zhang 알고리즘의 결과를 이용하여 월드좌표계로 변환 후 동일한 오차분석 방법을 사용하였다. Zhang 알고리즘을 사용하는 경우에는 모든 카



Fig. 7. Plots of the center points of the calibration object (Before calibration)



Fig. 8. Plots of the center points of the calibration object (After calibration)

Table 1. Performance comparison between the proposed and related calibration method

	Total frame	Inlier frame	Calibration error ( $\epsilon$ , mm)		Calibration time	
			Proposed	Checker board	Proposed	Checker board
Test1	901	159	6.71	7.62	≈ 1min.	≈ 5min.
Test2	901	296	6.76	8.28		
Test3	751	104	6.77	7.82		

메라에서 체크보드 보정판의 영상을 동시에 획득하여야 하며 최소 6장의 보정판 영상이 각 카메라에서 획득되어야 한다. 따라서 보정판의 설치와 서로 다른 영상에서 코너점을 일치시키는 과정에 시간이 많이 걸린다. 반면 제안한 보정 기술은 영상 획득에서 변환 행렬의 계산까지 약 1분 정도로 마칠 수 있는 장점이 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 다시점 RGB-D 카메라에 획득한 360도 깊이 정보를 합성하여 3차원 모델을 생성하기 위해 필수적인 시점 보정 기술을 제안하였다. 제안한 보정기술은 구형 물체의 3차원 형상과 색상정보를 다시점에서 깊이 카메라와 RGB카메라에서 획득하고 구의 중심점의 3차원 좌표들을 RANSAC을 이용하여 월드좌표계로 변환하는 행렬을 구하였다. 보정물체를 3차원 복원 공간에 자유로이 이동하여 3차원 형상과 색상 정보를 획득함으로써 시점보정을 매우 간편하게 구현할 수 있었다. 기존의 보정 방법과의 비교를 통하여 오차가 적고 시간이 적게 걸리는 것을 확인할 수 있었다.

### Reference

- [1] B. Kainz, S. Hauswiesner, G. Reitmayr, M. Steinberger, R. Grasset, L. Gruber, E. Veas, D. Kalkofen, H. Seichter, and D. Schmalstieg, "OmniKinect: real-time dense volumetric data acquisition and applications," in Proceedings of the Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST), 2012.
- [2] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.
- [3] J. Mitchelson and A. Hilton, "Wand-based multiple camera studio calibration," Technical Report, VSSP-TR-2/2003, University of Surrey, 2003.
- [4] K. Y. Shin and J. H. Mun, "A multi-camera calibration method using a 3-axis frame and wand," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.13, No.2, pp.283-289, 2012.
- [5] T. Pribanić, P. Sturm, and S. Peharec, "Wand-based calibration of 3D kinematic system," IET Computer Vision, Vol.3, No.3, pp.124-129, 1999.
- [6] S. Tomáš, M. Daniel and P. Tomáš, "A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments," Teleoperators and virtual environments, Vol.14, No.4, pp. 407-422, 2005.
- [7] Y. M. Kim, D. Chan, C. Theobalt, and S. Thrun, "Design and calibration of a multi-view TOF sensor fusion system," in Proceedings of the IEEE CVPR Workshop on Time-of-flight Computer Vision, pp.1-7, 2008.
- [8] Least squares fit a sphere to 3D data [Internet], <http://imaginaryz.blogspot.com/2011-/04/least-squares-fit-sphere-to-3d-data.html>.



### 박 순 용

e-mail : sypark@knu.ac.kr

1991년 경북대학교 전자공학과(공학사)

1993년 경북대학교 전자공학과(공학석사)

2003년 Electrical & Computer Engineering at State University of New York at Stony Brook(공학박사)

2005년~현 재 경북대학교 컴퓨터학부 부교수

관심분야: 3차원 컴퓨터비전 및 로봇비전, 3차원 센싱



### 최 성 인

e-mail : ellim5th@naver.com

2007년 금오공과대학교 컴퓨터공학부(공학사)

2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학석사)

2009년~현 재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정

관심분야: 3차원 정합 및 복원, 로봇비전, 영상처리