

Calibration of VLP-16 Lidar Sensor and Vision Cameras Using the Center Coordinates of a Spherical Object

Ju-Hwan Lee[†] · Geun-Mo Lee[†] · Soon-Yong Park^{††}

ABSTRACT

360 degree 3-dimensional lidar sensors and vision cameras are commonly used in the development of autonomous driving techniques for automobile, drone, etc. By the way, existing calibration techniques for obtaining the external transformation of the lidar and the camera sensors have disadvantages in that special calibration objects are used or the object size is too large. In this paper, we introduce a simple calibration method between two sensors using a spherical object. We calculated the sphere center coordinates using four 3-D points selected by RANSAC of the range data of the sphere. The 2-dimensional coordinates of the object center in the camera image are also detected to calibrate the two sensors. Even when the range data is acquired from various angles, the image of the spherical object always maintains a circular shape. The proposed method results in about 2 pixel reprojection error, and the performance of the proposed technique is analyzed by comparing with the existing methods.

Keywords : Calibration, Lidar Sensor, Vision Camera, Spherical Object

구형물체의 중심좌표를 이용한 VLP-16 라이다 센서와 비전 카메라 사이의 보정

이 주 환[†] · 이 근 모[†] · 박 순 용^{††}

요 약

전방향 3차원 라이다 센서와 비전 카메라는 자동차나 드론 등의 자율주행기술 개발에 활용되고 있다. 한편 라이다 센서와 카메라 좌표계 사이의 변환 관계를 보정하기 위한 기존의 기술들은 특수한 보정물체를 제작하거나 보정물체의 크기가 큰 단점이 있다. 본 논문에서는 한 개의 구형물체를 사용하여 두 센서 사이의 기하보정을 간편하게 구현하는 방법을 소개한다. 구형 물체의 3차원 거리정보에서 RANSAC으로 네 개의 3차원 점을 선택하여 구의 중심좌표를 계산하고, 카메라 영상에서 물체의 2차원 중심점을 구하여 두 센서를 보정하였다. 구는 다양한 각도에서 영상을 획득하여도 항상 원형의 형상을 유지하기 때문에 데이터 획득 시 유리한 장점이 있다. 본 논문에서 제안하는 방법으로 약 2픽셀의 투영오차의 결과를 얻었고, 기존의 방법과의 비교실험을 통하여 제안 기술의 성능을 분석하였다.

키워드 : 보정, 라이다 센서, 비전 카메라, 구형물체

1. 서 론

최근 로봇과 자동차 분야에서 사용자의 안정성과 편의성 향상을 위한 다양한 기술의 개발이 진행되고 있다. 2009년 구글(Google)에서 개발한 무인 자동차인 “구글 자율 자동차(Google Self-driving Car)”는 운전자 없이 자율주행에 성공하였고, 이

후 로봇과 자동차에 다양한 센서를 장착하고 이를 활용하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 구글 자율 자동차에 사용된 센서 중 대표적으로 사용된 벨로다인(Velodyne) 센서는 라이다(Lidar) 센서의 일종이다. 라이다 센서의 일반적 기능은 360도 방향의 거리 정보를 획득하는 센서이며 64개 채널을 지원하는 고가의 산업용 센서에서부터 16개 또는 그 이하의 저 채널 센서까지 활용범위가 확대되고 있다.

한편 무인자동차에서 비전 카메라는 도로주변의 영상을 획득하는 중요한 센서로 최근에는 비전 카메라와 라이다 센서를 동시에 사용하고 있다[1-4]. 라이다 센서에서 획득한 3차원 거리정보는 카메라로부터 획득한 영상과 융합하여 위치 인식, 3차원 맵 생성, 자율주행 등과 같은 여러 연구 분야에

※ 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(NRF-2016H1D5A1909829).

† 비 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 박사과정

†† 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 교수

Manuscript Received : August 20, 2018

First Revision : November 20, 2018

Accepted : December 25, 2018

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

적용을 할 수 있는 장점이 있다. 여러 종류의 센서들을 사용하기 위해서는 각 센서들의 시점을 하나의 단일 좌표계로 표현하는 보정(calibration) 과정이 반드시 필요하다.

2차원 영상정보를 획득하는 카메라에 대한 보정은 일반적으로 Zhang 보정 알고리즘[5]을 주로 사용하지만 라이다 센서와 같이 3차원 거리정보만 획득할 수 있는 센서와 함께 보정할 경우에 사용하는 보정 기술은 일반적이지 않다. 기존에도 서로 다른 특성을 지닌 두 센서 사이의 보정관계를 구하는 연구가 진행된 바 있으나 대부분의 경우 직선형, 삼각형, 사각형 형태의 특수한 보정 패턴[6, 7]을 제작하여 사용하거나 평면에 구멍이 뚫려져 있는 형태의 특수한 보정물체를 사용하여 두 센서 사이의 보정을 구현하였다[8, 9]. 하지만 기존의 방법들은 특수한 보정물체를 제작해야 하는 번거로움이 있을 뿐만 아니라 라이다 센서의 채널 수가 적어질수록 보정물체의 크기를 크게 만들어야 되는 단점을 가지고 있다.

일반적으로 보정에 사용하는 데이터를 획득할 때는 두 센서의 공통된 시야(field of view)내부에서 다양한 위치에 보정물체를 위치시키고 보정물체의 데이터를 여러 장 획득한다. 하지만 기존의 방법들은 보정판의 크기가 크기 때문에 센서와 보정물체까지의 거리가 가까우면 데이터를 획득하기 어렵다는 문제점을 가지고 있고 평면형태의 모양을 지닌 보정물체를 사용할 경우 보정물체의 모서리나 꼭지점들을 검출한 다음 두 센서 사이의 보정관계를 구하기 때문에 라이다 센서와 보정패턴이 서로 마주보고 있도록 보정물체를 위치시켜야 신뢰성 있는 데이터를 획득할 수 있는 제약조건을 가지고 있다. 따라서 거리정보만을 획득하는 센서와 카메라간 보정관계를 쉽게 구할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 360도 거리정보를 획득할 수 있는 센서인 라이다 센서를 카메라를 함께 사용할 때 특별한 보정물체를 이용하는 것이 아니라 주위에서 쉽게 구할 수 있는 구형물체(spherical object)만을 사용하여 간편하게 두 센서 간의 좌표 변환관계를 알 수 있는 보정 기술을 소개한다. 참고문헌 [10]에서 저자는 360도 라이다 센서와 비전 카메라의 보정에 대한 기술을 제안한 바가 있다. 제안하는 방법은 두 센서의 공통된 시야 내에 구형물체를 다양한 위치로 이동하고 구형물체의 2차원 영상정보와 3차원 영상정보를 획득한 후 획득한 데이터를 사용하여 쉽게 두 센서 사이의 3차원 변환정보를 계산하는 것이다. 본 논문에서는 기존의 논문을 확장하여 라이다-카메라 센서를 보정하기 위한 기존의 보정 방법과의 정확도를 비교 분석하였다. 기존 라이다-카메라 보정에 많이 사용되는 Zhang 알고리즘과 원형 평판을 결합한 방법과의 비교를 위하여 3차원 라이다 데이터를 2차원 영상으로 투영하고 그 오차를 비교하였다. 기존의 라이다-카메라 보정방법에 비하여 우수한 성능을 보임을 실험에서 입증하였다.

2. 라이다 센서와 카메라의 보정

2.1 보정의 착안점

Fig. 1(a)는 한 대의 360도 라이다 센서와 6개의 카메라 센

서를 사용하여 전방향 3차원 맵을 생성하기 위한 장치를 보여준다. 라이다 센서를 중심으로 각 카메라의 방향은 360도 컬러 영상을 획득하도록 60도의 간격을 두고 설치하였다. 라이다 센서로부터 획득한 360도 방향의 3차원 거리정보는 라이다 센서의 좌표계로 표현되고 6대의 카메라들에서 획득한 2차원 영상정보들은 각 카메라 좌표계를 기준으로 표현된다.

Fig. 1(b)에서와 같이 각 카메라의 좌표계를 C_u , 라이다 센서 좌표계를 V 라 하자. 각 센서에서 획득한 정보들을 하나의 좌표계로 표현하고 360도 전방향 3차원 맵을 생성하기 위해서는 라이다 센서와 각 카메라들 사이의 변환관계 $T_{V C_u}$ 를 구해야 한다. 여기서 u 는 카메라의 번호로 1에서 6까지이다. 따라서 $T_{V C_u}$ 는 라이다 센서와 u 번 카메라의 사이의 3차원 기하학적 관계를 표현하는 변환행렬, 즉 3차원 회전(rotation)과 이동(translation)을 말한다. 본 논문에서는 하나의 카메라와 라이다 센서 사이의 변환행렬을 간편하게 구하는 보정 기술을 제안한다.

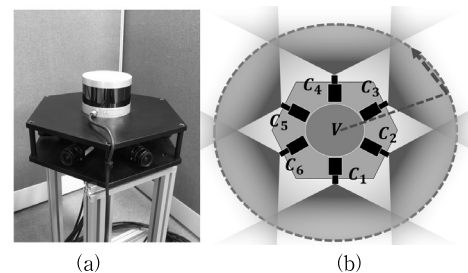


Fig. 1. A Lidar-Camera System for 3D Map Generation
(a) System View (b) Transformation between Lidar and 6 Cameras

우선 두 센서간 보정을 위하여 기존에 연구된 평면 형태로 만든 보정물체를 사용하는 과정을 살펴보자[7]. 먼저 평면으로 이루어진 보정물체를 카메라와 라이다 센서에서 보이도록 설치한 후 보정물체의 2차원 영상정보와 물체의 3차원 표면정보를 동시에 획득한다. 카메라에서 획득한 2차원 영상정보를 바탕으로 물체의 2D 특징점(2D feature point)을 추출한 다음 라이다 센서에서 획득한 3차원 거리 정보를 바탕으로 2D 특징점에 대응되는 3D 특징점(3D feature point)을 검출한다. 검출된 2D-3D 특징점은 일반적으로 “대응점”(corresponding point) 또는 “일치점”이라 부르고 대응점들을 사용하여 두 센서간 변환행렬을 구한다. 일반적으로 대응점은 주로 보정물체의 꼭지점, 모서리 또는 중심점 등의 좌표값을 말한다. 만일 두 센서에서 서로 다른 대응점을 검출하거나 획득한 대응점들의 대응관계가 잘못되면 보정의 결과에 오류가 발생한다.

한편 보정물체의 3차원 정보를 획득하는 라이다 센서가 높은 해상도를 가진다면 비교적 쉽게 물체의 3차원 특징점을 검출할 수 있다. 하지만 라이다의 채널 수가 적거나 저가의 낮은 해상도의 가진 라이다 센서를 사용할 경우 보정물체의 3차원 정보를 충분히 획득하기가 어렵기 때문에 3차원 대응점들을 검출하기가 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 보정물체의 크기를 크게 제작하거나 여러 보정물체를 두고 데이터를 획득한다.

기존 연구와 같이 평면으로 이루어진 보정물체를 사용할 경우 센서의 관측방향(viewing direction)과 보정 물체의 평면이 서로 마주보도록 위치시키고 데이터를 획득하면 비교적 오차가 적은 3차원 데이터를 획득할 수 있다. 하지만 보정 데이터를 획득하기 위하여 최적의 데이터를 획득할 수 있는 위치를 찾아야 하고 다양한 각도에서 데이터를 획득할 수 없는 것과 같은 환경적인 제약조건이 발생한다.

본 논문에서는 라이다 센서와 카메라간의 보정을 보다 쉽고 빠르게 구현하기 위하여 하나의 구형물체만 사용하는 방법을 제안하였다. [10, 11]에서 저자는 구형물체를 이용하여 360도 라이다 센서와 비전 카메라의 보정, 그리고 다시점 RGBD카메라들 사이의 보정에 관하여 기술을 제안한 바가 있다. 3차원 거리획득 센서와 카메라 사이의 변환관계를 보정할 때 구형물체를 이용하면 크게 두 가지의 장점을 얻을 수 있다. 첫 번째는 구 표면의 3차원 표면정보를 최소 네 점만 획득하면 구의 3차원 중심점을 추정할 수 있다는 것이다. 이것은 라이다 센서의 해상도가 낮아 3차원 거리정보가 부족하여도 3차원 중심점을 추정할 수 있게 한다. 또 다른 장점은 구의 3차원 표면정보는 어느 각도에서 획득하여도 항상 구형을 유지한다는 것이다. 이것은 센서의 관측방향과 보정 물체의 평면이 마주보도록 보정물체를 위치시켜야 하는 제약조건에서 벗어날 수 있다.

2.2 두 센서에서 획득한 대응점을 사용하는 보정

본 논문에서는 라이다 센서와 카메라 사이의 보정을 보다 쉽고 빠르게 구현하기 위하여 두 센서에서 검출되는 3차원과 2차원 대응점들을 사용하였다[12]. Fig. 2의 예를 보자. Fig.2에서와 같이 하나의 라이다 센서 V와 하나의 카메라 C의 시야에서 공통적으로 획득할 수 있는 3차원 점과 2차원 점이 각각 3개가 있다고 가정하자. 3차원 점과 2차원 점은 각각 p_i 와 q_i 로 표현된다. 이때 두 시점 사이의 3차원 기하학적 변환관계를 나타내는 변환행렬을 T_{VC} 라 표현하면 T_{VC} 는 하나의 회전변환과 이동변환으로 구성된다.

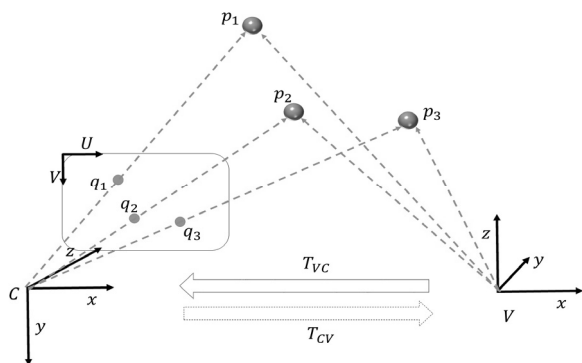


Fig. 2. 3D Transformation Relationship between a LiDAR Sensor and a Camera Defined by Three 3D Points

이론적으로 세 개의 대응점만 있으면 두 센서 사이의 3차원 변환관계를 구할 수 있다. Fig. 2에서 3차원 공간에 있는

세 점을 p_1, p_2, p_3 로 표현하고 카메라의 내부 파라미터 (intrinsic parameter) k 를 통하여 2차원 영상공간으로 투영 (projection)된 세 점을 q_1, q_2, q_3 표현하면 각 점의 관계는 Equation (1)과 같이 표현할 수 있기 때문에 2D-3D 대응되는 세 점을 사용하여 3차원 변환행렬 T_{VC} 를 구할 수 있다. 만일 두 센서에서 획득한 대응점들이 세 개 이상 있다면 Equation (2)와 같이 오차 ϵ 을 최소화 하도록 LSM(Least Square Minimization) 방법과 RANSAC 알고리즘[13]을 사용하여 변환행렬을 구할 수 있다.

$$q_i = kT_{VC}p_i \tag{1}$$

$$\epsilon = \sum_i \|q_i - kT_{VC}p_i\| \tag{2}$$

2.3 구형물체의 데이터 획득방법

본 논문에서는 보정물체로 구형물체를 사용하는 이유는 기존방법들과는 달리 쉽게 보정 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 구형물체의 형상정보는 어느 각도에서 획득하여도 항상 원형인 상태를 유지하기 때문에 센서의 센싱 각도와 거리에 따른 제약이 없이 데이터를 획득할 수 있다. Fig. 3과 같이 두 센서 사이에 공통적으로 보이는 시야 내부에서 구형물체를 다양한 위치에 위치시키고 보정에 필요한 데이터를 획득한다. 만일 공통적으로 획득되는 데이터가 없다면 사용하지 않는다.

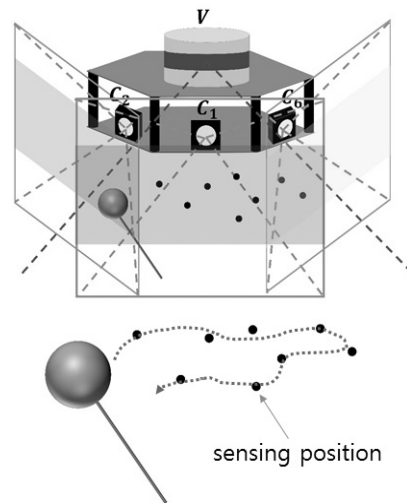


Fig. 3. Acquisition of Lidar and Camera Data. A ball is Moving in front of Both Sensors. At Several Positions, 3D Range and 2D Image Data are Acquired

2.4 구형물체의 중심좌표 검출

구형물체의 중심좌표를 검출하는 다양한 방법이 있지만 라이다 센서는 깊이 카메라를 사용하는 센서보다 보정물체의 표면 정보를 획득할 수 있는 정보가 적다. 따라서 기존방법[14]과는 달리 3차원 대응점에 해당하는 구형물체의 3차원 중심점을 검출하기 위하여 기존 연구의 방법을 이용하였다[12]. 그러나

기존 연구에서 사용한 RGBD 카메라에 비하여 라이다 센서에서 획득한 구형물체의 3차원 표면정보가 적기 때문에 기존 연구와는 달리 라이다 센서에서 획득한 모든 3차원 표면점들을 사용하였다. 구형물체의 표면에서 임의의 네 점을 사용하면 Fig. 4와 같이 삼각뿔을 만들 수 있다. 만들어진 삼각뿔의 각 변의 수직 이등분 평면은 모두 구의 중심을 지나게 된다. 따라서 구 표면의 네 점을 사용하여 만들어진 구의 3차원 중심점의 좌표 (x,y,z)는 다음 Equation (3)으로 표현할 수 있다.

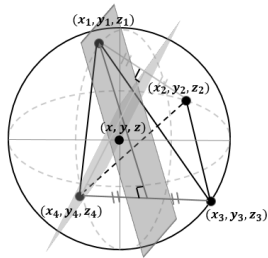


Fig. 4. A Method of Detecting the Center Point of a Sphere using Any Four Points on the Sphere Surface

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 \\ x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + z_3^2 - z_2^2 \\ x_4^2 - x_1^2 + y_4^2 - y_1^2 + z_4^2 - z_1^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

라이다 센서는 일반적으로 측정 거리 값에 오차를 포함하고 있다. 따라서 오차로 인하여 발생하는 구형물체의 3차원 표면 점들을 제거한 후 구형물체의 3차원 중심점을 구해야 한다. 먼저 구형물체의 표면에서 네 점을 랜덤으로 추출한 후 네 점을 지나는 구를 생성하면 구의 중심점 (x,y,z) 해당하는 3차원 중심점 pc를 검출할 수 있다. 이때 구한 구의 중심점으로부터 구형물체 표면의 3차원 좌표점 pj (j = 1,2, ..., Ω)까지의 거리는 구형물체의 실측 반지름 r과 같아야 한다. 그러므로 모든 구형물체 표면의 좌표점들과 구의 중심점까지의 3차원 거리를 구한 후 실측 반지름과 비교하면 거리오차 ε를 계산할 수 있다. 만약 거리오차가 허용범위 이하에 해당되면 3차원 좌표점들은 구형물체의 3차원 표면이라 보고 RANSAC 알고리즘의 내치점(inlier)으로 둔다. 허용범위 이상에 해당하는 3차원 좌표점들은 잡음에 해당되는 외치점(outlier)으로 보면 내치점과 외치점들 간의 비율을 구할 수 있다. 이 비율이

Table 1. Pseudocode of Calculating the Ball Center

```

while(m)
// Using the ball center coordinates from four
// surface points, distance from all surface
// points are computed
if (r - ε < |pcpj| < r + ε) (j = 1,2,.....,Ω)
// 3D coordinates of inliers are computed
then count ++
// If the number of inliers is above a threshold
the model center is considered as the ball center
if (count / Ω > μ) break
else m = m + 1
    
```

사용자 허용 비율 μ을 만족하면 검출한 구의 중심점이 구형물체의 중심점이라 할 수 있다 구형물체의 3차원 중심점을 구하는 과정을 Table 1과 같은 유사코드로 표현 할 수 있다.

2.5 구형물체의 2차원 영상 중심점 검출

카메라로부터 획득한 영상정보를 사용하여 2차원 대응점에 해당하는 구형물체의 2차원 중심점을 구해야 한다. 먼저 Zhang 알고리즘을 사용하며 카메라의 내부 파라미터와 왜곡 계수(distortion coefficients)를 구한 후 획득한 영상에 대하여 왜곡보정을 진행한다.

왜곡이 보정된 영상에서 구형 물체를 검출하는 다양한 방법이 있지만 본 논문에서는 간단하게 적응형 임계치(adaptive threshold)방법을 사용하여 구형물체를 색상으로 찾은 후 구형물체를 타원(ellipse) 추출 알고리즘을 사용하여 구형물체를 피팅(fitting) 한 후 구형 물체의 중심점을 검출한다. 적응형 임계치 방법은 영상의 픽셀값 차이를 이용하여 구와 유사한 색상을 지닌 물체를 검출하기에 용이하다. 또한 획득한 영상에서 구형물체를 검출하는 방법에는 HoughCircles 알고리즘[15]와 같이 기존에 구를 원형으로 피팅하는 방법이 있지만 검출된 구형물체가 약간만 변형되어도 검출 중심점이 틀어지게 되므로 타원(ellipse) 알고리즘을 사용하여 구형 물체의 중심점을 검출하였다. Fig. 5는 카메라에서 구형물체를 추출하는 예이다. Fig. 5와 같이 영상에서 구형물체의 중심점을 쉽게 검출할 수 있다.

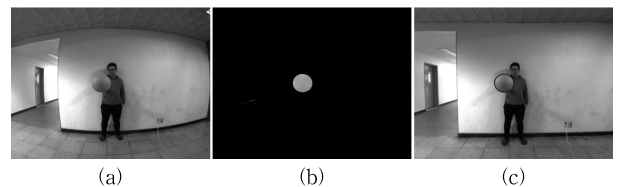


Fig. 5. Examples of the Detecting the Center of a Sphere in a 2D Image (a) Original Image (b) Spherical Object Color Detection(Adaptive Threshold) (c) Spherical object Detection(Ellipse Fitting)

3. 보정실험 결과

3.1 실험 장치 구성

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 한 대의 라이다 센서와 6대의 카메라를 정확하게 보정하는 것을 목표로 두고 실험을 진행하였다. Fig. 6(a)와 같이 하나의 라이다 센서와 여섯 대의 카메라로 구성된 실험 장치를 만들었다. 장치에 사용된 라이다 센서는 16-채널 VLP-16 벨로다인(Velodyne) 라이다 센서이고 카메라는 Point Grey사의 Blackfly-S이다. 벨로다인 라이다 센서는 10Hz의 속도로 360도 전방향 3차원 거리 정보를 획득하도록 구성하였으며 카메라에는 최소한 60도의 화각을 확보할 수 있도록 3.5mm 초점거리를 가진 렌즈를 장착하였다. 그리고 제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 구형물체는 Fig. 6(b)와 같이 시중에서 쉽게 구할 수 있는 피구공을 사용하였다. 주황색 피구공은 8.3인치 직경을 가진다.

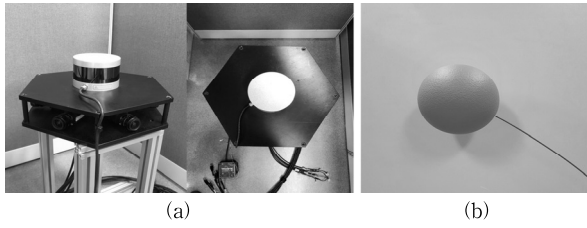


Fig. 6. (a) Velodyne 16-Channel Lidar Sensor and 6 Vision cameras (b) Calibration Ball

3.2 구형물체에 대한 실험 데이터 획득

본 논문에서 제안한 방법의 두 가지 장점은 보정물체의 데이터를 획득 할 때 라이다 센서의 센싱 방향에 대한 제약조건을 받지 않는 것과 데이터 획득거리에 대한 제약이 적다는 것이다. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 한 대의 카메라와 벨로다인 센서를 이용하여 Fig. 7과 같이 장치로부터 피구공을 1m, 2m, 3m 떨어진 위치에서 다양한 방향으로 공을 움직이며 데이터를 획득하였다. 카메라와 벨로다인 센서에서 각각 12 프레임의 3차원 거리정보와 2차원 영상 정보를 획득하였다.



Fig. 7. Data Acquisition of a Spherical Ball with Distance at (a) 1m (b) 2m (c) 3m

3.3 평면 보정판 실험 데이터 획득

제안한 방법과의 성능을 비교하기 위하여 기존방법으로 Fig. 8과 같이 지름 80cm의 원형 모양을 가진 보정판을 제작하고 영상에서 쉽게 좌표를 구할 수 있는 체스보드의 패턴을 프린트하여 부착하였다.

평면 형태를 가진 보정판은 카메라와 벨로다인의 두 센서에서 정면으로 바라볼수록 선명한 체스보드 코너점과 잡음이 거의 없는 보정판의 3차원 점군을 획득할 수 있다. 하지만 현실적으로 다양한 방향에서 보정판을 위치시키면서 데이터를 획득하기가 어렵다. 따라서 본 비교실험에서는 Fig. 9와 같이 카메라와 벨로다인 센서에서 체스보드 코너점이 최대한 선명하고 3차원 잡음이 적은 위치에 보정판을 위치시키면서 다섯 장의 보정판 데이터를 획득하였다. 잡음이 적은 데이터를 획득하기 위한 위치를 찾아 캡처한 시간이 1 프레임에 평균 3분 이상이 소요되었다.

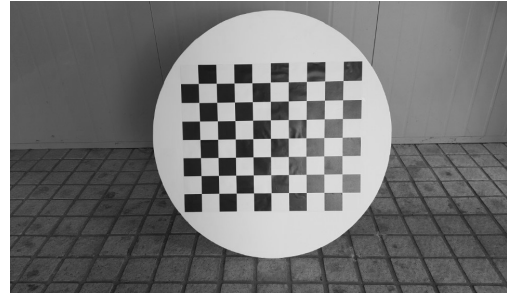


Fig. 8. A Planar Object for Comparison of a Conventional Calibration Method

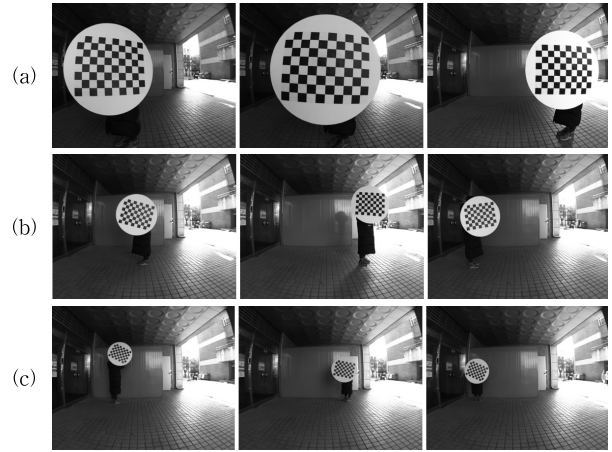


Fig. 9. Data Acquisition of a Circular Planar Object with Distance at (a) 1m (b) 2m (c) 3m

Fig. 10은 2m 거리에서 라이다 센서로부터 획득한 피구공과 보정판의 3차원 거리정보를 보여준다. Fig. 11은 배경을 제거한 공의 3차원 거리 정보이다. 16채널 벨로다인 센서로부터 공이 다양한 방향에서 센싱되어도 거리에 따라 최소 2개 채널, 최대 4개 채널의 거리정보가 획득됨을 알 수 있다.

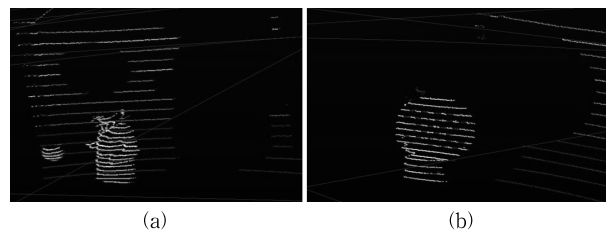


Fig. 10. Depth Data obtained from the Lidar Sensor (a) Ball Object (Hand-Held by a Person) (b) Planar Object



Fig. 11. Examples of the 3D Point Clouds of the Ball Surface

3.4 원형 보정판을 이용한 보정 방법

원형 보정판의 3차원 중심점을 검출하기 위하여 먼저 Fig. 10(b)와 같이 벨로다인 센서로부터 획득한 데이터를 거리 값을 기준으로 배경을 제거하면 Fig. 12(a)와 같이 배경이 제거된 보정판의 3차원 데이터를 구할 수 있다. 하지만 검출된 보정판의 3차원 데이터는 잡음을 포함하고 있기 때문에 보정판의 정확한 3차원 중심점을 구하기가 어렵다. 따라서 보정판의 평면 방정식을 정의하고 보정판의 모든 3차원 점들을 평면에 투영하여 3차원 중심점을 검출하는 방법을 이용하였다. Fig. 12(b)는 보정판의 평면 방정식을 SVD (Singular Value Decomposition) 알고리즘을 이용하여 구한 후 벨로다인 센서로부터 획득한 보정판 데이터를 평면에 투영한 결과이다. 평면에 투영된 점들 중 Fig. 13(a)와 같이 보정판의 경계점에 해당하는 점들을 검출한 후 무작위로 네 점을 선택하여 2.4절의 Equation (3)을 이용하면 보정판의 중심을 지나는 직선위에 있는 3차원 중심점을 검출할 수 있다. Fig. 13(b)는 1000번의 횟수로 임의의 네 점을 선택하여 구한 구의 중심을 지나는 3차원 점군(point clouds)이다. 구의 중심을 지나는 3차원 점군을 Fig. 13(c)와 같이 다시 평면에 투영한 후 투영된 모든 3차원 점군의 무게중심을 이용하여 구한 보정판의 3차원 중심점은 Fig. 13(d)와 같다.

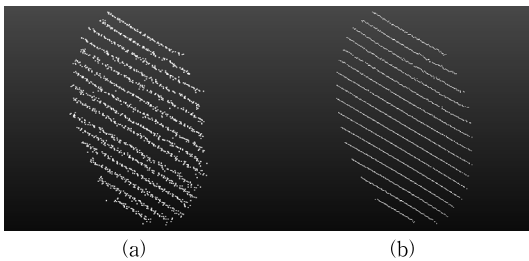


Fig. 12. Result of the Projection (a) Depth Data of the Planar Object (b) Projection Result on a Plane

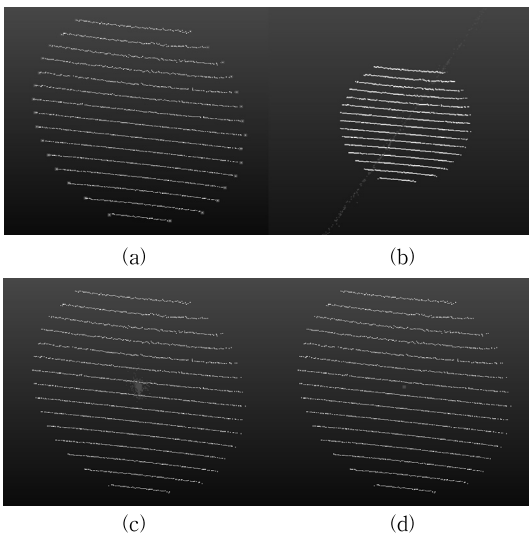


Fig. 13. The Process of Finding the Center Point of a Planar Object (a) the Edge Points (b) a Center Axis (c) the Points Projected on a Plane (d) a Center Point Detected From

3.5 제안한 방법과 기존방법의 보정

제안한 방법과 기존방법을 사용하면 피구공과 보정판의 3차원 중심점과 2차원 중심점을 구할 수 있다. 구한 중심점들을 2.2절에 적용하면 구형보정물체와 보정판을 사용한 방법으로 두 센서 사이의 3차원 변환행렬을 획득할 수 있다. 따라서 제안한 방법과 기존방법을 사용하면 여섯 대의 카메라와 한 대의 벨로다인 센서 사이의 3차원 변환관계를 모두 보정할 수 있다.

한편 여섯 대의 카메라는 서로 화각이 겹치는 부분이 있기 때문에 화각이 겹치는 공간에 있는 영상정보를 사용하여 카메라 사이의 변환행렬을 구한 후 벨로다인 센서와 카메라간 보정 시 사용할 수 있는 방법도 있으나 기준이 되는 좌표계를 벨로다인 센서의 좌표계로 두면 카메라들끼리의 영상정보를 사용하여 구한 3차원 변환관계를 사용하는 방법이 더 좋다고 할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 카메라들끼리의 보정정보는 사용하지 않고 벨로다인 센서를 기준으로 각 카메라와 벨로다인 센서간 보정을 하였다.

3.6 제안한 방법과 기존방법의 보정 결과

Table 2는 한 대의 카메라에서 각 거리별로 획득한 보정물체의 데이터 획득 개수를 보여준다. 예를 들어 1m에서는 0.5m~1.5m 사이에서 피구공을 자유롭게 움직이며 12개의 위치에서 라이다와 카메라 데이터를 획득하였다. 보정판 역시 피구공과 마찬가지로의 방법으로 5개의 데이터를 획득하였다.

Table. 2. Number Positions where the Calibration Objects are Placed for 3D and 2D Data Acquisition

object \ distance	1m	2m	3m
Ball	12	12	12
Planar object	5	5	5

벨로다인 센서와 카메라 사이의 변환행렬을 구하면 벨로다인 센서에서 획득한 3차원 점을 각 카메라로 재투영시킬 수 있다. 벨로다인 센서로부터 구한 구형물체의 3차원 중심점을 카메라로 투영하면 투영된 3차원 중심점과 카메라에서 획득한 2차원 중심점과의 거리를 비교하여 재투영 오차(reprojection error)를 계산할 수 있다. 재투영 오차가 작을수록 두 센서 사이의 정확한 변환행렬을 구한 것으로 볼 수 있다. Fig. 14는 각 거리별로 획득한 보정물체의 데이터를 사용하여 제안한 방법과 기존방법으로 구한 카메라와 벨로다인 센서의 재투영 오차 결과이다.

먼저 원형 보정판을 사용한 기존방법의 결과를 보자. 1m에서 획득한 데이터를 가지고 구한 보정 실험에서는 평균 4픽셀 이하의 재투영 오차가 나온 것을 확인할 수 있지만 2m에서 획득한 데이터를 가지고 획득한 실험에서는 오차가 커지는 결과를 확인할 수 있다. 이것은 데이터 획득 거리가 멀어질수록 카메라에서 정밀한 체스보드 코너점을 검출할 수 없기 때문에 오차가 증가하는 것으로 판단된다. 3m에서는 재투영 오차 결과가 없는데 역시 데이터 획득거리가 멀기 때문에 카메라 영

상에서 체스보드 코너점을 제대로 찾기가 어려워 보정판의 2차원 중심점을 제대로 찾지 못해 두 센서 사이의 변환관계를 구하지 못하였다.

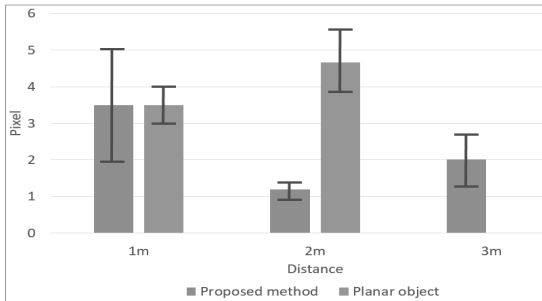


Fig. 14. Reprojection Error of the 1-st Camera at Different Calibration Distance, Blue Bar is Average Error and Red Line is Standard Deviation

하지만 제안한 방법의 경우 각 거리에서 다양한 위치에 공을 위치시켜도 보정 실험을 성공적으로 수행할 수 있었다. 1m 실험에서는 3.5픽셀로 비교적 큰 오차가 나온 것을 확인할 수 있는데 이것은 1m 실험에서는 구와 벨로다인 센서가 너무 가까워 벨로다인 센서의 특성으로 인해 구의 중심을 정확히 찾지 못한 것으로 판단된다. 하지만 2m와 3m 경우 평균 3픽셀 이하의 투영오차 결과를 확인하였다.

Table 3에서는 3m 거리에서 모든 여섯 대의 카메라에서 획득한 데이터를 가지고 구한 변환행렬의 투영오차 결과를 보여준다. 데이터 획득 거리가 멀어도 1번 카메라를 제외한 모든 카메라에서 평균 3픽셀 이하의 투영오차를 보인다.

또한 Table 4에서는 기존의 다른 보정방법과의 투영오차도 비교하였다[6-8]. Table 4에서 볼 수 있듯이 제안한 방법으로 모든 거리에서 실험 후 획득한 전체 평균 투영오차는 2.15픽셀이다. 이것은 제안한 방법이 기존방법들보다 더 좋은 것을 알 수 있다.

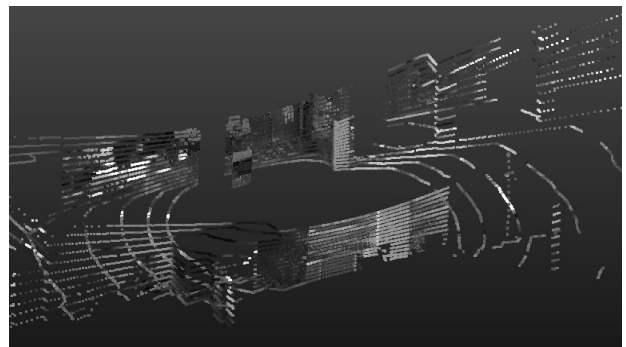
Fig. 15는 제안한 방법을 사용하여 구한 모든 카메라와 벨로다인 센서의 보정 결과를 이용하여 라이다 센서의 3차원 거리정보에 카메라의 컬러정보를 합성한 결과이다. 보정의 투영오차의 평균이 약 3픽셀 이하이기 때문에 360도 전방향에서 획득한 라이다 거리정보와 해당 물체의 컬러 정보가 비교적 정확히 매핑이 됨을 알 수 있다.

Table 3. Reprojection Error of Each Camera View

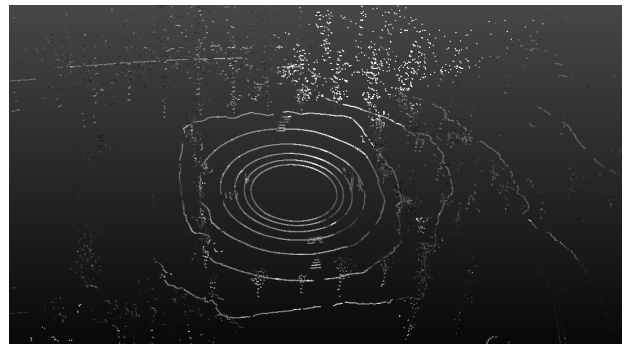
Transformation	Matching pairs	reprojection error (pixel)	
		Average	s.t.d.
T _{vc1}	12	2.02	1.94
T _{vc2}	12	1.77	0.7
T _{vc3}	12	1.25	0.37
T _{vc4}	11	1.45	0.43
T _{vc5}	12	1.72	2.82
T _{vc6}	12	1.89	0.78

Table. 4. Comparison of Reprojection Error with Conventional Methods(In Pixel)

	average error (pixel)
Proposed Method	2.15
Planar object	4.08
O. Naroditsky [6]	6
Y. S. Park [7]	4
M. Velas [8]	3.25



(a)



(b)

Fig. 15. The Result of Modeling the Building and Basketball Court using a Lidar Sensor and Six-Cameras (a) Indoor Data (b) Outdoor Data

4. 결론

본 논문에서는 주위에서 쉽게 구할 수 있는 구형물체를 사용하여 라이다 센서와 같은 거리센서와 카메라 사이를 비교적 쉽고 간편하게 보정 할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 주변에서 쉽게 구할 수 있는 구형물체를 사용하기 때문에 기존의 방법들과는 달리 특별하게 보정물체를 제작할 필요가 없다. 또한 특별한 제약조건 없이 다양한 센싱 방향에서 쉽게 보정물체의 데이터를 획득할 수 있기 때문에 빠르게 데이터를 획득 할 수 있는 장점도 있다. 구의 중심을 정확히 검출할 경우 보정의 정밀도도 높은 장점이 있다. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 기존의 보정 방법과 비교 실험을 수행하였으며 기존 방법보다 작은 오차의 결과를 도출할 수 있었다.

References

[1] M. Hassanein, A. Moussa, and N. El-Sheimy, "A new automatic system calibration of multi-cameras and lidar sensors," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Vol.41, No. 23, pp.589-594, Jul. 2016.

[2] I. Ashraf, S. J. Hur, and Y. W. Park, "An investigation of interpolation techniques to generate 2D intensity images from lidar data," *IEEE Access*, Vol.5, pp. 8250-8260, Apr. 2017.

[3] J. P. Hwang, S. K. Park, E. T. Kim, and H. J. Kang, "Camera and LIDAR Combined System for On-Road Vehicle Detection," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.15, No.4, pp.390-395, Oct. 2017.

[4] J. W. Kim, J. Y. Jeong, Y. S. Shin, Y. G. Cho, H. C. Roh, and A. Y. Kim, "Lidar configuration comparison for urban mapping system," *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence(URAI)*, pp. 854-857, 2017.

[5] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, Nov. 2016.

[6] O. Naroditsky, A. Patterson and K. Daniilidis, "Automatic alignment of a camera with a line scan lidar system," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3429-3434, 2011.

[7] Y. S. Park, S. M. Yun, S. W. Chee, K. E. Cho, K. H. Um, and S. D. Sim, "Calibration between color camera and 3D lidar instruments with a polygonal planar board," *Sensors*, Vol.14, No.3, pp.5533-5535, Mar. 2014.

[8] M. Velas, M. Spanel, Z. Materna, and A. Herout, "Calibration of RGB camera With velodyne lidar," *International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pp.135-144, 2014.

[9] T. GEE, J. James, W. V. D. Mark, A. G. Strozzi, P. Delmas, and G. Gimelfarb, "Estimating extrinsic parameters between a stereo rig and a multi-layer lidar using plane matching and circle feature extraction," *2017 Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications(MVA)*, pp.21-24, 2017.

[10] S. Park and S. Choi, "Convenient View Calibration of Multiple RGB-D Cameras Using a Spherical Object," *KIPS Transactions on Software and Data Engineering*, Vol.3, No.8, pp.309-314, 2014.

[11] G. Lee, J. Lee, and S. Park, "Calibration of VLP-16 Lidar and multi-view cameras using a ball for 360 degree 3D color map acquisition," in *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems(MFI)*, 2017.

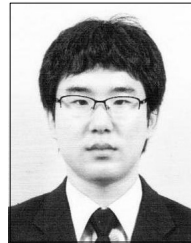
[12] J. H. Lee, E. S. Kim, and S. Y. Park, "Synchronization error compensation of multi-view RGB-D 3D modeling system," *Asian Conference on Computer Vision(ACCV)*, pp.162-174, 2016.

[13] M. A. Fischler and C. R. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, Vol.24, No.6, pp.381-395, Jun. 1981.

[14] M. Ruan and D. Huber, "Calibration of 3D Sensors Using a Spherical Target," *2014 2nd International Conference on 3D Vision*, Vol.1, pp.187-193, Dec. 2014.

[15] D. Loannou, H. Walter, and A. F. Laine, "Circle recognition through a 2D Hough Transform and radius histogramming," *Image and Vision Computing*, pp.15-26, 1999.

이 주 환



<https://orcid.org/0000-0002-0649-2590>

e-mail : sasinhwan@nate.com

2011년 동국대학교 정보통신공학부(학사)

2011년~2015년 한국로봇융합연구원(연구원)

2017년 경북대학교 컴퓨터학부(석사)

2017년~현 재 경북대학교 컴퓨터학부

박사과정

관심분야: 3차원 복원, 다시점 모델링

이 근 모



<https://orcid.org/0000-0002-3974-2779>

e-mail : comboy111@naver.com

2015년 영남대학교 컴퓨터공학과(학사)

2017년 경북대학교 컴퓨터학부(석사)

2017년~현 재 경북대학교 컴퓨터학부

박사과정

관심분야: 자율주행자동차, 컴퓨터비전

박 순 용



<https://orcid.org/0000-0001-5090-9667>

e-mail : sypark@knu.ac.kr

1991년 경북대학교 전자공학과(학사)

1993년 경북대학교 전자공학과(석사)

2003년 미국 뉴욕 주립대학교

스토니브룩(박사)

2005년~현 재 경북대학교 컴퓨터학부 교수

관심분야: 3차원스캐닝, 3차원정합, 로봇비전