

체커보드의 유형에 따른 스테레오 카메라 캘리브레이션의 정확도 비교

Comparison of the Accuracy of Stereo Camera Calibration According to the Types of Checkerboards

김의명¹⁾ · 권상일²⁾

Kim, Eui Myoung · Kwon, Sang Il

Abstract

For camera calibration, a checkerboard is generally used to determine the principal point, focal length, and lens distortions. The checkerboard has a planar and three-dimensional shape, and camera calibration parameters are affected by the size of the checkerboard, the placement of the target, and the number of target points. In this study, the accuracies of the types of checkerboards were compared using checkpoints for stereo camera calibration, and the purpose of this study was to propose the best performance checkerboard. The checkerboard with large flat shape showed comparatively high accuracy through comparison with the check points. However, due to the size of the checkerboard, it was inconvenient to move and rotate, and there was a disadvantage in that it was difficult to shoot so that the target points could all appear in the stereo camera. The checkerboard, which was manufactured in a small size in a flat shape, was easy to move and rotate but had the lowest three-dimensional accuracy. The checkerboard with targets with height values had the hassle of having to determine the three-dimensional coordinates of the target points by using observation equipment for camera calibration, but it was small in size, convenient to move and rotate, and showed the highest three-dimensional accuracy.

Keywords : Checkerboard, Stereo Camera, Camera Calibration, Interior Orientation Parameters, Relative Orientation Parameters

초 록

카메라 캘리브레이션을 위해 일반적으로 체커보드를 이용하여 주점, 초점거리, 렌즈 왜곡을 결정한다. 체커보드는 평면 형태와 3차원 형태가 있으며 체커보드의 크기, 타겟의 배치와 타겟점의 개수에 따라 카메라 캘리브레이션 매개변수에 영향을 미친다. 본 연구에서는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 위해 체커보드의 유형에 따른 정확도를 검사점을 이용하여 비교하였으며 이를 통해 가장 성능이 우수한 체커보드를 제안하는 것을 목적으로 하였다. 평면 형태의 크기가 큰 체커보드는 검사점과의 비교를 통해서 비교적 높은 정확도를 나타내었다. 그러나 체커보드의 크기로 인하여 이동과 회전이 불편하였고 스테레오 카메라에서 타겟점이 모두 나타날 수 있도록 촬영하는 것이 어려운 단점이 있었다. 평면 형태의 작은 크기로 제작된 체커보드는 이동 및 회전이 편리하지만 가장 낮은 3차원 정확도를 나타내었다. 높이 값이 있는 타겟을 부착한 체커보드는 타겟점의 3차원 좌표를 카메라 캘리브레이션을 위해서 관측장비를 이용하여 결정해야 하는 번거로움이 있었지만 크기가 작아 이동과 회전이 편리하였고 가장 높은 3차원 정확도를 나타내었다.

핵심어 : 체커보드, 스테레오 카메라, 카메라 캘리브레이션, 내부표정요소, 상호표정요소

Received 2020. 09. 15, Revised 2020. 10. 13, Accepted 2020. 11. 23

1) Corresponding Author, Member, Department of Spatial Information Engineering, Professor, Namseoul University (E-mail: kemyoung@nsu.ac.kr)

2) Member, Underground Surveying Team, Employee, Spatial Information Quality Management Service (E-mail: ksi7242@naver.com)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

카메라 캘리브레이션은 사진 좌표와 이에 대응되는 일직선 상의 실세계 좌표와의 관계를 통해 내부표정요소(IOP: Interior Orientation Parameters)를 결정하는 것이다. 내부표정요소는 카메라의 초점거리, 사진의 주점, 렌즈왜곡 계수 등으로 이루어져 있으며, 이를 통해 사진 내의 객체에 대한 정확한 3차원 좌표를 결정할 수 있다 (Kim and Kwon, 2018; Hong and Kim, 2018). 카메라 캘리브레이션을 위해 일반적으로 체커보드(checkerboard)를 사용하며, 체커보드의 흑백 패턴에 대한 교점(이하 타겟)을 이용한다 (Kim *et al.*, 2019).

체커보드는 카메라의 촬영 거리와 화각 등을 고려하여 다양한 크기와 형태로 제작될 수 있고, 체커보드의 타겟이 촬영된 영상에 전반적으로 분포하며 나타날 수 있도록 다양한 각도에서 촬영을 수행한다 (Genovese *et al.*, 2019). 체커보드의 크기, 타겟의 배치, 촬영 거리 등에 따라 카메라 캘리브레이션의 결과가 다소 상이할 수 있으며 이러한 캘리브레이션 성과는 3차원 위치 결정의 정확도에 영향을 미치게 된다. 카메라 캘리브레이션은 단일 카메라 혹은 두 대 이상의 카메라를 이용하여 수행할 수 있다. 두 대 이상의 카메라를 이용하면 공간전방교회법(spatial intersection)을 통해 3차원 좌표를 결정할 수 있으며, 3차원 좌표를 통해 정확도 검증을 수행할 수 있다. 또한, 두 대의 카메라를 각각 카메라 캘리브레이션을 수행한 결과와 이를 하나의 스테레오 카메라로 간주하여 캘리브레이션의 정확도 검증을 수행하였을 경우 스테레오 카메라 캘리브레이션이 비교적 우수한 정확도를 나타낸 연구가 있었다 (Kim and Hong, 2018).

스테레오 카메라 캘리브레이션은 카메라 간의 기선 길이, 수렴각, 촬영 거리, 체커보드의 크기, 형태 및 타겟의 배치 등에 따라 정확도가 다르게 나타날 수 있다. 이에 따라 카메라의 기선 길이에 따른 연구, 수렴각에 따른 연구가 수행되었고, 평면 체커보드와 3차원 형태의 타겟을 비교하는 연구, 평면 체커보드에서 타겟의 형태와 배치에 따른 연구가 수행되었다 (Pribanić *et al.*, 2009; Ahn *et al.*, 2014; Mohamed, 2016; Ha *et al.*, 2017). 하지만, 스테레오 카메라 캘리브레이션을 위해서 다양한 유형의 체커보드를 분석한 사례는 드물다.

이에 따라, 본 연구에서는 체커보드 바탕 색상, 타겟의 개수, 타겟의 배치, 입체 타겟의 설치, 타겟의 크기 등을 다르게 설계한 세 종류의 체커보드를 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 가장 성능이 우수한 체커보드를 제안하는 것을 목적으로 하였다.

2. 체커보드의 크기 및 타겟의 배치

본 연구에서는 체커보드의 크기와 차원을 고려하여 세 가지의 체커보드를 구성하고 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. 평면 형태의 체커보드는 A, B 두 가지가 있으며, 그 중 가로×세로 길이가 170cm×90cm로 가로가 세로보다 약 2배 정도 큰 체커보드(이하 A 체커보드)는 Fig. 1과 같다. A 체커보드는 평면상에 흑백 패턴이 체스보드와 같이 규칙적으로 배치된 형태이며 타겟의 개수는 128개로 구성되어 있다.

녹색 바탕에 흑백 패턴이 일정한 간격으로 배치된 체커보드(이하 B 체커보드)는 A 체커보드와 같이 평면 형태지만, 체커보드의 가로×세로 길이는 118.9cm×84.1cm로 A0 크기와 같으며 A 체커보드에 비해 크기가 작다. 타겟의 개수는 Fig. 2와 같이 63개로 구성되어 타겟점의 개수가 A 체커보드에 비해 약 50% 정도 적다.

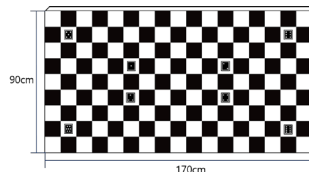


Fig. 1. A checkerboard

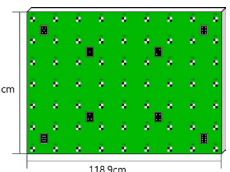


Fig. 2. B checkerboard

흑백 패턴의 3차원 타겟이 부착된 체커보드(이하 C 체커보드)는 Fig. 3과 같다. C 체커보드는 B 체커보드와 동일한 A0 크기지만, 0cm, 1cm, 5.2cm의 세 가지 높이 값을 갖는 타겟이 배치된 것이 특징이며, 타겟의 개수는 Table 1에 나타낸 것과 같이 80개이다.

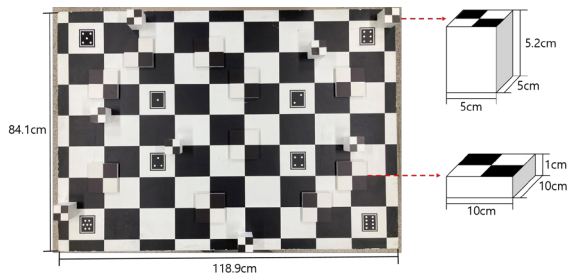


Fig. 3. C checkerboard

Table 1. Number of targets for a C checkerboard

Height of target	0cm	1cm	5.2cm
Number of target	62	10	8

Table 2. GSD differences according to target heights

	Image size		Image sensor size		Focal length	
Camera	6,000×4,000		22.3mm		35mm	
Height of target	Object distance	Scale	Difference of scale	GSD		Difference of GSD
0cm	2.7m	77.143	-	726.457mm		-
1cm	2.69m	76.857	0.286	723.767mm		7.239pix
5.2cm	2.648m	75.657	1.486	712.466mm		37.644pix

Table 3. Types of checkerboards

Type	Background color	Number of target	Flat	Size(cm)	
				Width	Height
A checkerboard	B/W	128	○	170.0	90.0
B checkerboard	Green	63	○	118.9	84.1
C checkerboard	B/W	80	×	118.9	84.1

카메라 설정값이 같은 경우, 타겟의 높이 값에 따라 축척이 변화하여 지상해상도(GSD: Ground Sampling Distance)의 차이가 발생한다. 실험에 사용된 스테레오 카메라의 설정값을 기준으로 타겟 높이 1cm 차이에 따라 축척 분모수는 약 0.286 차이가 발생한다. 축척 변화를 크게 설정하기 위해 축척 분모수의 차이가 약 1.5로 나타나는 5cm 타겟을 제작하였다. 두께가 2mm인 흑백 십자선을 5cm 타겟에 부착하여 최종적으로 5.2cm 타겟을 설치하였다. 타겟 높이에 따른 지상해상도 차이를 계산한 결과 Table 2와 같이 타겟 높이 1cm, 5.2cm 차이에서 약 7픽셀, 38픽셀의 지상해상도 차이가 발생하였다.

A, B, C 체커보드에서 타겟의 개수, 형태, 크기를 정리하면 Table 3과 같다. A 체커보드는 가장 큰 크기와 가장 많은 타겟의 개수를 지니고, B 체커보드는 가장 적은 타겟의 개수와 비교적 작은 크기로 구성되어 있다. C 체커보드는 크기가 B 체커보드와 같이 A0로 같지만 중간 정도의 타겟 개수로 구성되어 있으며, 평면이 아닌 높이 값을 지닌 타겟으로 구성되어 있다.

3. 스테레오 카메라 환경 구축 및 캘리브레이션

3.1 카메라 캘리브레이션 수행방법

세 가지 체커보드를 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 정확도를 비교하는 절차는 Fig. 4와 같다. 스테레오 카메라를 이용하여 세 가지 형태의 체커보드에 대해 영상을 촬영한 후 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행한 후 결정된 두 카메라의 내부표

정요소와 두 카메라 간의 상호표정요소를 이용하여 검사점의 3차원 위치를 결정하고 토탈스테이션을 이용하여 검사점의 3차원 위치를 결정한 후, 검사점 간의 거리를 비교하여 정확도를 평가하였다.

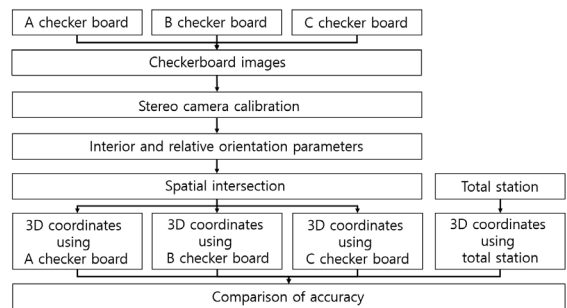


Fig. 4. Flow chart of stereo camera calibration using checkerboards

3.2 스테레오 카메라 환경 구축

스테레오 카메라는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 두 대의 Canon 800D 카메라를 약 0.7m의 기선 길이로 설치하였으며 무선 동조기를 이용하여 동시에 좌우 영상이 촬영될 수 있도록 하였다. Table 4는 설치된 두 카메라의 영상의 크기, 초점 거리, 픽셀 크기 등을 나타내며 본 연구에서는 실내에서 촬영을 수행하였기 때문에 ISO는 200으로 설정하고 초점거리는 35mm로 고정될 수 있도록 수동모드를 적용하였다.

Table 4. Specifications of stereo camera

Camera	Width (pixel)	Height (pixel)	ISO	Iris	Shutter speed (sec)	Focal length (mm)	Pixel size (μm)
Cam1	6000	4000	200	F5.6	1/20	35	3.8989
Cam2							



Fig. 5. Stereo camera

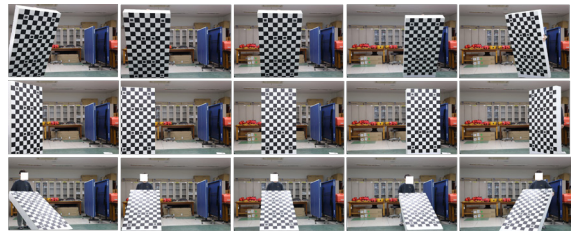


Fig. 8. Images of the vertical direction of an A checkerboard(Cam2)

3.3 체커보드 촬영 및 타겟 인식

스테레오 카메라 캘리브레이션을 위한 체커보드의 촬영은 약 2.7m 거리에서 A, B, C 체커보드 모두 동일하게 24회 촬영하였고, 카메라의 화각을 고려하여 수평 방향과 수직 방향으로 정방향, 좌측, 우측, 좌상, 좌하, 우상, 우하, 상, 하 방향으로 기울여서 3회씩 촬영하였다.

A 체커보드를 수평 방향으로 촬영한 영상은 Fig. 6과 같고, Cam1과 Cam2를 이용하여 수직 방향으로 촬영한 영상은 각각 Fig. 7, Fig. 8과 같다. Fig. 9는 A 체커보드를 촬영한 카메라의 위치를 나타낸다.

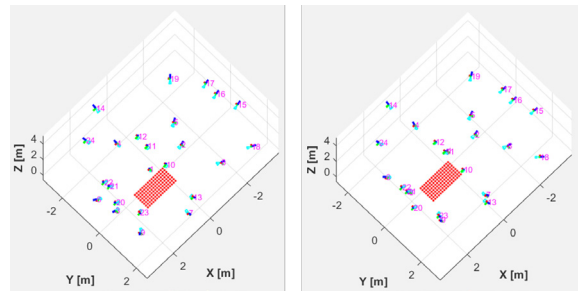
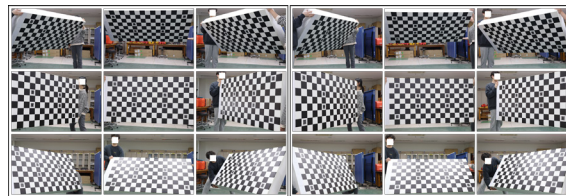


Fig. 9. Camera positions of an A checkerboard



(a) Cam1 (b) Cam2

Fig. 6. Images of the horizontal direction of an A checkerboard

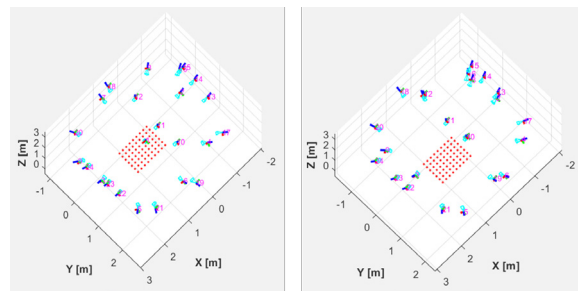


Fig. 10. Camera positions of a B checkerboard

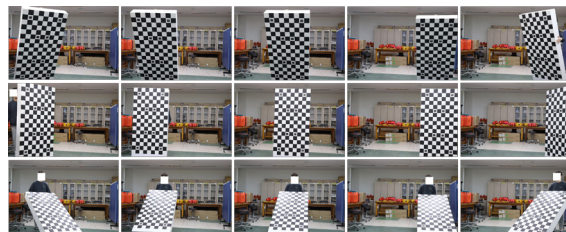


Fig. 7. Images of the vertical direction of an A checkerboard(Cam1)

B 체커보드와 C 체커보드도 A 체커보드를 촬영한 방식과 동일하게 촬영하였으며 카메라의 위치는 각각 Fig. 10과 Fig. 11과 같다.

Table 5. Detection rates of checkerboard targets

Checker board	Camera	All targets	Detection targets	Detection rate(%)	Images
A	Cam1	3006	2996	99.67	24
	Cam2	3024	3014	99.67	
B	Cam1	1471	1466	99.66	
	Cam2	1473	1472	99.93	
C	Cam1	1919	1919	100.00	
	Cam2	1918	1918	100.00	

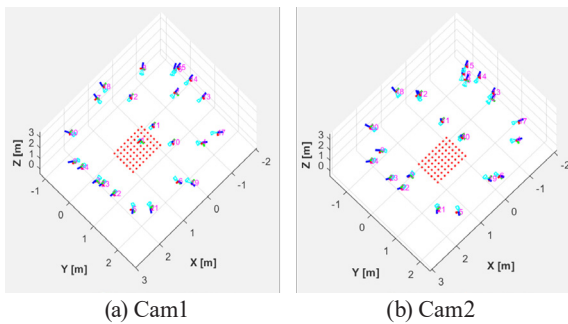


Fig. 11. Camera positions of a C checkerboard

평면 형태의 A, B 체커보드는 흑백 패턴의 자동 타겟 인식 기법을 이용하여 타겟의 좌표점을 추출하였고 그 결과는 Table 5와 같다 (Kim and Kwon, 2018). C 체커보드는 높이 값이 있는 3차원 체커보드로 체커보드를 많이 기울였을 경우 높이 값이 큰 타겟에 가려 타겟점의 위치가 보이지 않는 경우가 발생하여 수동으로 타겟 좌표를 추출하였다. 자동 및 수동으로 추출한 타겟의 개수와 인식률은 Table 4와 같으며 평면 형태의 체커보드 인식률은 99% 이상인 것을 알 수 있었다.

3.4 스테레오 카메라 캘리브레이션

스테레오 카메라 캘리브레이션을 위해 Fig. 12와 같이 기준 카메라 좌표계에서 종속 카메라 좌표계 방향으로 향하는 기선 벡터와 두 카메라 좌표계 간의 회전을 고려하는 수정된 공선조건식 Eq. (1)을 이용하였다 (Lari *et al.*, 2013; Kim and Hong, 2018; Lee, 2019).

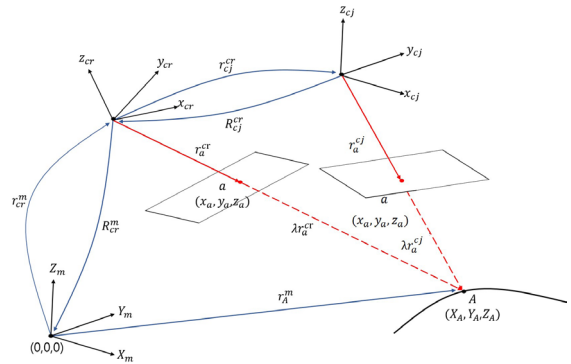


Fig. 12. Modified collinearity condition

$$r_A^m = r_{cr}^m + R_{cr}^m r_{c_j}^{cr} + \lambda R_{cr}^m R_{c_j}^{cr} r_a^{c_j} \quad (1)$$

where, r_A^m denotes the mapping coordinates of an object point A , r_{cr}^m denotes the perspective center of a left camera, λ denotes a scale, R_{cr}^m denotes a 3D rotation matrix from the left camera to the mapping coordinate system, $r_{c_j}^{cr}$ denotes a baseline vector, $R_{c_j}^{cr}$ denotes a 3D rotation matrix from the right camera to the left camera coordinate system, $r_a^{c_j}$ denotes the image coordinates of an object point A .

A, B, C 체커보드를 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하였으며 결정된 내부표정요소와 상호표정요소는 각각 Table 6과 Table 7과 같다. A, B, C 체커보드를 이용하여 결정된 내부표정요소에 대한 사후 표준편차는 A 체커보드가 0.50 픽셀이고, 3차원 타겟을 부착한 C 체커보드는 1.03 픽셀이며 A0 크기를 갖는 흑백 패턴의 B 체커보드는 1.32 픽셀 순으로 나타났다.

Table 6. Interior orientation parameters of stereo camera

Checker board	Cam	$\hat{\sigma}_0$ (pixel)	x_p (pixel±pixel)	y_p (pixel±pixel)	f_c (pixel±pixel)	k_1 (pixel-2±pixel-2)	k_2 (pixel-4±pixel-4)
A	Cam1	0.50	-45.688 ±0.6143	-37.453 ±0.9554	9339.936 ±0.7425	8.82E-10 ±9.960E-12	4.45E-17 ±9.342E-19
	Cam2		-17.287 ±0.5913	-73.037 ±0.9427	9137.157 ±0.7300	8.10E-10 ±1.054E-11	4.46E-17 1.065E-18
B	Cam1	1.32	-47.668 ±1.840	-29.932 ±2.965	9355.837 ±2.391	9.18E-10 ±3.100E-11	4.46E-17 ±2.662E-18
	Cam2		-20.430 ±1.849	-65.633 ±2.914	9149.619 ±2.418	9.17E-10 ±3.225E-11	3.96E-17 ±2.814E-18
C	Cam1	1.03	-37.233 ±1.473	-28.418 ±2.191	9343.648 ±2.534	9.85E-10 ±2.527E-11	3.36E-17 ±2.389E-18
	Cam2		-11.860 ±1.477	-69.753 ±2.179	9140.550 ±2.518	8.89E-10 ±2.669E-11	3.73E-17 ±2.637E-18

Table 7. Relative orientation parameters of stereo camera

Checker board	b_x (m±mm)	b_y (m) (m±mm)	b_z (m) (m±mm)	b_w (°±")	b_φ (°±")	b_k (°±")
A	-0.661 ±0.223	0.018 ±0.269	-0.065 ±0.171	-0.168 ±0.005	-12.951 ±0.004	-2.097 ±0.001
B	-0.665 ±1.181	0.018 ±0.115	-0.066 ±0.632	-0.172 ±0.016	-12.961 ±0.011	-2.086 ±0.005
C	-0.663 ±0.595	0.018 ±0.127	-0.066 ±0.790	-0.211 ±0.012	-12.953 ±0.009	-2.098 ±0.003

4. 결과 분석

세 가지 체커보드를 이용한 스테레오 카메라 캘리브레이션의 정확도는 3차원으로 결정된 좌표 간의 거리를 이용하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 Fig. 13과 같이 흑백 패턴을 벽면에 부착한 검사점과 Fig. 14의 사물함을 이용하였다. 벽면 검사점은 카메라를 많이 기울이지 않은 상태에서 촬영한 반면 사물함은 검사점에 대해 많이 기울여서 촬영하였다.

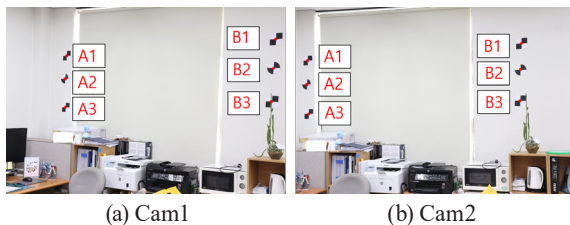


Fig. 13. Check field 1



Fig. 14. Check field 2

4.1 검사점의 3차원 위치 결정

세 가지 체커보드를 이용하여 결정한 스테레오 카메라 캘리브레이션 결과의 정확도를 비교하기 위해서 벽면과 사물함에 부착된 흑백 패턴과 모서리 점의 검사점에 대해 Table 8과 같이 3차원 좌표를 구한 후 검사점 간의 거리를 계산하였다. 그리고 토탈스테이션을 이용하여 관측한 검사점의 3차원 좌표를 이용하여 검사점 간의 거리를 구한 후 이를 기준으로 설정하여 Table 9와 같이 스테레오 카메라를 이용하여 결정한 검사점 간의 거리 차이를 비교하였다.

Table 8. 3D coordinates of checkpoints using camera calibration results

ID	A checker board(m)			B checker board(m)			C checker board(m)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
Wall	A1	-0.993	0.641	-5.447	-0.970	0.585	-5.532	-0.974	0.583	-5.515
	A2	-1.015	0.349	-5.448	-0.991	0.292	-5.535	-0.995	0.291	-5.518
	A3	-1.007	-0.009	-5.433	-0.983	-0.067	-5.521	-0.987	-0.068	-5.505
	B1	1.354	0.660	-4.413	1.299	0.614	-4.327	1.295	0.613	-4.324
	B2	1.334	0.380	-4.416	1.280	0.334	-4.331	1.276	0.333	-4.327
	B3	1.316	0.051	-4.410	1.263	0.003	-4.328	1.259	0.003	-4.323
Checker	C1	0.234	0.529	-3.520	0.235	0.527	-3.536	0.231	0.525	-3.527
	C2	0.220	-0.199	-3.508	0.221	-0.203	-3.523	0.217	-0.203	-3.514
	D1	0.507	0.586	-2.817	0.509	0.585	-2.832	0.505	0.584	-2.825
	D2	0.486	-0.512	-2.802	0.488	-0.516	-2.815	0.484	-0.515	-2.808

Table 9. Accuracy comparison using distances between checkpoints

unit: m

ID	TS	Checkerboard			TS-A	TS-B	TS-C	
		A	B	C				
Wall	A1-B3	2.596	2.599	2.603	2.597	-0.003	-0.007	-0.001
	A2-B2	2.562	2.565	2.570	2.565	-0.003	-0.008	-0.002
	A3-B1	2.656	2.657	2.664	2.658	-0.001	-0.008	-0.002
	B1-A1	2.562	2.564	2.569	2.563	-0.002	-0.007	-0.001
	Mean					0.003	0.007	0.001
	RMSE					±0.003	±0.007	±0.001
Checker	C1-C2	0.728	0.728	0.730	0.729	0.000	-0.002	-0.001
	C1-D2	1.289	1.289	1.292	1.290	0.000	-0.003	-0.001
	C2-D1	1.084	1.084	1.087	1.085	0.000	-0.003	0.000
	D1-D2	1.100	1.098	1.101	1.099	0.002	-0.001	0.001
	Mean					0.001	-0.002	0.000
	RMSE					±0.001	±0.002	±0.001

Table 10. Summary of the results of stereo camera calibration

Checker board	Rank (Ascending)					Flat
	Accuracy	Precision		Number of targets	Number of times the target shown	
		IOP	ROP			
A	2	1	1	1	3	○
B	3	3	3	3	2	○
C	1	2	2	2	1	×

4.2 정확도 평가 및 결과 분석

벽면과 사물함에 설치된 검사점에 대해 토탈스테이션을 이용하여 결정한 검사점과의 거리와 스테레오 카메라를 이용하여 결정된 거리와의 차이는 Table 9와 같다.

Table 9에서 알 수 있듯이 벽면 검사장에서 A, B, C 체커보드의 내부표정요소와 상호표정요소를 이용하여 구한 검사점 간 거리와 토탈스테이션을 이용하여 결정한 검사점 간 거리의 평균제곱근오차(RMSE : Root Mean Square Error)는 각각 $\pm 0.003\text{m}$, $\pm 0.007\text{m}$, $\pm 0.001\text{m}$ 로 나타났고 사물함 검사장에서의 검사점 간 거리 RMSE는 각각 $\pm 0.001\text{m}$, $\pm 0.002\text{m}$, $\pm 0.001\text{m}$ 로 나타났다.

벽면에 부착된 검사점을 대상으로 한 실험에서 B 체커보드의 RMSE가 0.007m로 가장 높아 세 가지 체커보드 중에서 가장 결과가 좋지 않은 반면 C 체커보드의 정확도가 가장 높았으며 그 다음으로 A 체커보드로 나타났다.

사물함을 대상으로 한 정확도 검증에서는 A, B, C 체커보드의 정확도가 각각 $\pm 0.001\text{m}$, $\pm 0.002\text{m}$, $\pm 0.001\text{m}$ 로 나타나 큰 차이가 없었다. 이는 사물함의 검사점 간 거리가 상대적으로 짧아 벽면을 대상으로 비교한 경우에 비해 3차원 좌표의 영향이 적게 나타났기 때문으로 판단된다.

A 체커보드는 크기가 가장 크고 타겟점의 개수가 가장 많이 사용되었기 때문에 Table 6과 Table 7에 나타난 것과 같이 다른 체커보드에 비해 내부표정요소와 상호표정요소의 정밀도는 높게 결정되었다. 그러나 A 체커보드는 평면 형태로 구성되었기 때문에 3차원 위치를 결정하였을 경우, C 체커보드에 비해 다소 낮은 정확도를 나타낸 것을 알 수 있었다. 또한 체커보드의 크기로 인하여 좌우 사진에서 모든 타겟점이 나타날 수 있도록 하기 어려웠다.

B 체커보드는 A 체커보드와 같이 평면 형태이나 크기가 A 체커보드보다 작아 좌우 사진에서 모든 타겟점이 나타날 수 있었다. 그러나 타겟점이 그린보드에 일정한 간격으로 떨어져 있어 타겟점의 개수가 가장 적었으며 이를 이용하여 결정된 3차원 좌표의 정확도도 가장 낮았다.

C 체커보드는 크기가 B 체커보드와 동일하여 좌우 사진에서 모든 타겟점이 나타나기 쉬웠으며, 바둑판 형태의 흑백 타겟이 2차원과 3차원 형태로 있어 타겟점의 개수가 많을 뿐만 아니라 Table 9에 나타난 것과 같이 3차원 위치결정의 정확도 측면에서 가장 우수한 결과를 나타내었다.

이를 통해 평면 체커보드를 제작할 때에는 바둑판 형태의 타겟점이 많은 것을 선택하는 것이 좋고, 가능하다면 높이 값이 있는 3차원 타겟점을 배치하는 것이 정확도를 높일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 위해 서로 다른 특징을 갖는 체커보드를 이용하여 높은 성능을 지닌 체커보드를 제안한 것으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

체커보드의 제작과 3차원 좌표 결정과 관련해서 평면 형태의 A와 B 체커보드는 흑백 패턴이 연속적으로 있거나 규칙적으로 배치된 체커보드로 일정한 패턴을 갖고 있기 때문에 체커보드의 3차원 좌표를 설계 단계에서 알 수 있는 장점이 있었다. 이에 반해 높이 값이 있는 타겟점을 가진 C 체커보드는 타겟점의 3차원 좌표를 관측장비를 이용하여 결정해야 하는 번거로움이 있었다.

A 체커보드는 크기가 가장 크기 때문에 좌우 사진에서 모든 타겟점을 관측하기 어려웠다. 반면, 비교적 크기가 작은 B, C 체커보드는 카메라 캘리브레이션 수행 시 체커보드를 이동하고 회전하기 쉬웠다.

평면 형태의 A, B 체커보드 중에서는 타겟 간 간격이 좁고 크기가 큰 A 체커보드가 내부표정요소와 상호표정요소의 정밀도가 좋을 뿐만 아니라 3차원 거리 비교에서도 높은 정확도를 나타내었다. B 체커보드의 경우, 타겟 간격이 멀어 타겟점의 개수가 적게 분포하기 때문에 가장 낮은 정확도를 나타냈다.

A, B, C 체커보드를 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 검사점을 이용하여 정확도를 평가한 결과 입체 타겟을 포함한 C 체커보드가 검사점 간 거리가 먼 경우 뿐만 아니라 경사 촬영을 수행한 경우에도 가장 높은 정확도를 나타내었다.

향후 실내 환경이 아닌 실외 환경에서 비교적 장거리의 촬영 거리에서 스테레오 카메라 캘리브레이션을 위한 체커보드의 제작과 검증을 수행한다면 다양한 환경에서 적합한 체커보드를 선택하는 데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2018R1D1A1B07045817).

References

Ahn, H.R., Kim, J.I., and Kim, T.J. (2014), 3D accuracy analysis of mobile phone-based stereo images, *Journal*

- of Broadcast Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 677-686. (in Korean with English abstract)
- Genovese, K., Chi, Y., and Pan, B. (2019), Stereo-camera calibration for large-scale DIC measurements with active phase targets and planar mirrors, *Optics Express*, Vol. 27, No. 6, pp. 9040-9053.
- Ha, H.W., Perdoch, M., Alismail, H., Kweon, I.S., and Sheikh, Y. (2017), Deltille grids for geometric camera calibration, *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 22-29 October, Venice, Italy, pp. 5344-5352.
- Hong, S.P. and Kim, E.M. (2018), Calibration accuracy evaluation of stereo camera, *Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science*, 18 May, Jinju, Korea, pp. 199-200.
- Kim, E.M. and Kwon, S.I. (2018), Automatic target recognition for camera calibration, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 525-534. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M. and Hong, S.P. (2018), Calibration comparison of single camera and stereo camera, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 295-303. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., Yun, Y.H., Kim, J.S., Yun, K.J., Cheong, W.S., and Kang, S.J. (2019), Accurate camera calibration method for multiview stereoscopic image acquisition, *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp 919-927. (in Korean with English abstract)
- Lari, Z., Habib, A., Mazaheri, M., and Al-Durgham, K. (2013), Multi-camera system calibration with built-in relative orientation constraints(part 1) - theoretical principle, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 3, pp. 191-204.
- Lee, D.W. (2019), Estimation of rotation of stereo cameras based on the properties of frequency response of a scene for camera calibration, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp, 125-132. (in Korean with English abstract)
- Mohamed, A.S. (2016), Photogrammetric and Stereo Vision Techniques for Evaluating Material Properties in Timber and Timber-Based Composite Structures, Master's thesis, Edinburgh Napier University, Edinburgh, United Kingdom, 264p.
- Pribanić, T., Peharec, S., and Medved, V. (2009), A comparison between 2D plate calibration and wand calibration for 3D kinematic systems, *Kinesiology*, Vol. 41, No. 2, pp. 147-155.