Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2015) 21(7):602-608
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2015.15.0011 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

스테레오 카메라 캘리브레이션을 위한 동일평면 체커보드 코너점 정밀검출

Precise Detection of Coplanar Checkerboard Corner Points for Stereo Camera Calibration Using a Single Frame

박 정 민, 이 종 인, 조 준 범, 이 준 웅*
(Jeong-Min Park[1], Jong-In Lee[2], Joon-Bum Cho[2], and Joon-Woong Lee[1,*])
[1]Department of Industrial Engineering, Chonnam National University
[2]Hyundai Mobis

Abstract: This paper proposes an algorithm for precise detection of corner points on a coplanar checkerboard in order to perform stereo camera calibration using a single frame. Considering the conditions of automobile production lines where a stereo camera is attached to the windshield of a vehicle, this research focuses on a coplanar calibration methodology. To obtain the accurate values of the stereo camera parameters using the calibration methodology, precise localization of a large number of feature points on a calibration target image should be ensured. To realize this demand, the idea with respect to a checkerboard pattern design and the use of a Homography matrix are provided. The calibration result obtained by the proposed method is also verified by comparing the depth information from stereo matching and a laser scanner.

Keywords: camera calibration, corner point detection, coplanar calibration, homography

I. 서론

최근 자동차 산업에서는 ADAS (Advanced Driver Assistant System) 상용화와 자율주행자동차 관련 기술개발이 진척됨에 따라 차량에 설치되는 카메라의 수량이 늘고 있다. 특히 단안 카메라 중심의 관련 시스템들이 주목을 받던 예전과 달리 이제는 스테레오 카메라의 장착이 큰 관심을 받고 있다. 이와 관련하여 단안 카메라는 물론이고, 양안 카메라의 내 · 외부 (intrinsic/extrinsic) 파라미터를 추출하는 데에 이용할 영상의 표적점을 간편하고 정확하게 검출할 수 있는 방법의 필요성이 커지고 있다.

일반적으로 단안카메라의 경우 외부 파라미터는 공간상에 임의로 설정한(대체적으로 바닥에 설정함) 월드좌표계와 카메라좌표계의 관계를 규정하는 회전행렬과 병진벡터를 지칭하는 것이지만, 양안 카메라의 경우는 두 카메라의 좌표계간의 회전행렬과 병진벡터를 지칭한다. 따라서 양안 카메라의 경우 두 카메라중 한 대의 카메라좌표계를 월드좌표계로 지정한다. 반면에 내부 파라미터는 초점거리(focal length)나 왜곡상수 등을 지칭하는데, 이것은 단안카메라건 양안 카메라건 동일한 의미를 갖는다.

카메라의 내·외부 파라미터 추출에 대한 오프라인(offline) 캘리브레이션(calibration) 방법들은 오래 전부터 연구되어 왔다. 그러한 방법들 가운데 대표적인 것으로 R. Y. Tsai [1]의 동일평면(coplanar)방식과 비 동일평면(non-coplanar) 방식, 그리고 Z. Zhang [2]의 동일평면을 여러 장 촬영하여 캘리브레이션을 하는 비 동일평면 방식이 있다. 그리고 이러한 방법들을 구현할 수 있는 코드들도 웹상에 제공되어 있다. 하지만 이 방법들을 사용하기 위한 입력 데이터는 우리가 준비해야 한다. 바로 본 연구는 자동차 생산현장에서 차량에 장착된 스테레오 카메라의 내·외부 파라미터 추출에 사용할 영상의 표적점 검출을 정확하게 할 수 있는 방법을 제안한다.

그러나 차량이 생산되는 현장에서 이러한 표적점 검출을 가장 잘 할 수 있는 이상적인 환경을 갖추기란 쉽지 않다. 그 이유는 차량마다 카메라가 설치되는 위치나 자세가 다르며, 캘리브레이션이 실시되는 장소의 환경도 다양하며, 차량에 장착되어 있는 카메라를 이리저리 움직이기도 어렵고, 그렇다고 Zhang의 방법에서처럼 캘리브레이션 표적을 이리저리 움직이는 것 또한 어려우며 표적점 데이터 추출에 긴 시간을 투여하기도 어렵기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Tsai의 동일평면 캘리브레이션법에 적합한 표적점 검출에 대해 다룬다.

차량의 스테레오 카메라는 실외의 자연환경에서 작동되어야 하고, 계측해야 할 거리도 수십 미터 이상이 요구된다. 더욱이 계측거리에 대한 정확도 또한 높게 요구되므로 이런 요구를 만족시키려면 카메라 파라미터가 정확히 구해져야 한다. 이 요구를 충족시키려면 가능한 한 캘리브레이션 표적이 영상에 넓게 분포되어야 하고, 영상에서의 표적점의 위치가 정확하게 검출되어야 한다.

첫 번째 요구조건인 캘리브레이션 표적을 영상에 넓게 분포시키는 것을 해결하려면 1) 표적을 넓고 길게 제작해야 하

* Corresponding Author
Manuscript received January 16, 2015 / revised March 28, 2015 / accepted April 22, 2015
박정민, 이준웅: 전남대학교 산업공학과
(ddungpark16@naver.com/joonlee@chonnam.ac.kr)
이종인, 조준범: 현대모비스
(jilee@mobis.co.kr/jbcho@mobis.co.kr)
※ 이 논문은 현대모비스의 지원을 받아 수행된 연구임.

Copyright© ICROS 2015

고, 2) 카메라에 틸트(tilt)각을 크게 줘야 한다. 그러나 표적을 크게 만드는 것이 단순해 보이지만 표적이 크면 이동성이 떨어지고, 동일평면을 유지하는 것이 쉽지 않을뿐더러 캘리브레이션에 사용할 특징점들의 위치정밀도를 맞추기 어렵다. 또한 광축의 틸트각을 크게 주다 보면 광축이 차량의 후드와 간섭이 생기기 때문에 그것도 한계가 있다. 따라서 이 문제는 상황을 충분히 분석한 후 현장에서 시험평가를 통해 최적의 방안을 찾아내야 한다.

두 번째 요구조건인 영상의 표적점들의 위치를 정확하게 검출하는 것은 본 연구가 공헌할 수 있는 주요 분분이다. 이를 위해 먼저 표적의 특징점 추출에 가장 적합한 패턴을 정한다. 이에 대한 방안으로 독립된 원들이나 독립된 사각형들을 평면상에 배치하고, 이를 촬영한 영상에서 블럽칼라링(blob coloring) 기법[3] 등을 이용해 원이나 사각형 각각의 중심점을 찾는 것을 생각할 수 있다. 그러나 표적이 영상에 투영(projection)될 때 원이나 사각형은 찌그러짐(foreshortening)이 생기므로 이들 중심점의 위치가 공간상에서의 이들의 중심점과 일치될 수 없고, 결국 캘리브레이션 결과의 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 특징점 위치 정확도에 있어서 투영왜곡의 영향이 덜하는 체커보드의 코너점을 표적점으로 선택한다. 다음은 이 체커보드의 코너점을 정확하게 검출하는 것이다. 영상의 코너점 검출에 Harris코너 검출기[4]가 널리 사용되고 있지만, 본 연구에서는 Harris코너 검출기가 현장의 조명에 영향을 많이 받기 때문에 호모그래피 행렬[4]을 이용하여 월드좌표계상의 코너점들을 영상에 투영하고, 이 투영점들의 위치조정(location adjustment) 과정을 통해 코너를 검출하는 방법을 제안한다.

검출된 코너점들을 이용하여 Tsai의 동일평면 캘리브레이션을 수행한다. 이 때 계산된 스테레오카메라의 내외부 파라미터들의 정확성을 검증하기 위해 이 파라미터값들을 이용하여 영상을 교정(rectification) [6]하고 스테레오 정합(matching) [3]을 거쳐 3차원 거리를 복원한다. 그리고 이 복원된 거리의 정확성 여부를 식별하기 위해 레이저 스캐너로 계측된 거리와 비교를 한다.

이어지는 논문의 구성은 다음과 같다. 단원 II 장은 동일평면 캘리브레이션법과 체커보드 패턴설계, 단원 III 장은 특징점 추출, 단원 IV 장은 캘리브레이션과 검증에 대해 설명한다. 단원 V 장은 실험결과, 그리고 단원 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 동일평면 캘리브레이션법과 체커보드 패턴설계

Tasi의 동일평면 캘리브레이션법에 의해 카메라 캘리브레이션을 수행할 때 입력 데이터로 사용하는 카메라의 CCD 셀의 가로/세로 수, 가로/세로 크기 등의 정보, 캘리브레이션에 사용할 표적의 특징점들의 3차원 좌표, 이 특징점들의 영상에서의 2차원 좌표, 영상의 수평/수직의 픽셀의 수 등이 필요하다.

사용하는 카메라의 CCD 셀에 관련된 정보는 카메라 제작사로부터 입수하면 되고, 나머지는 캘리브레이션 수행자가 결정한다. 이 가운데 단원 II에서는 표적의 특징점들의 3차원 좌표결정과 관련된 문제를 다룬다. 캘리브레이션에 사용할 특징점들의 3차원 좌표를 얻기 위해 캘리브레이션이 수행되는 공간의 바닥에 규칙적으로 머리부분이 밝은 색으로 되어

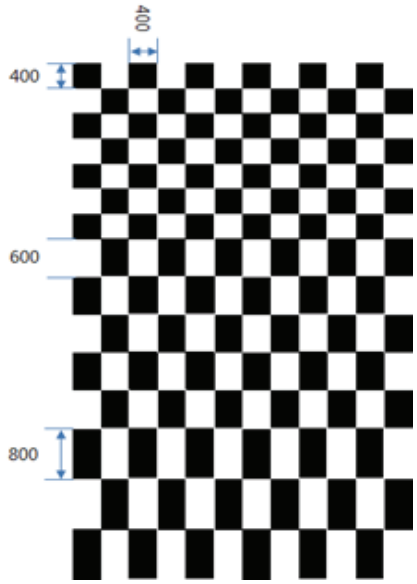


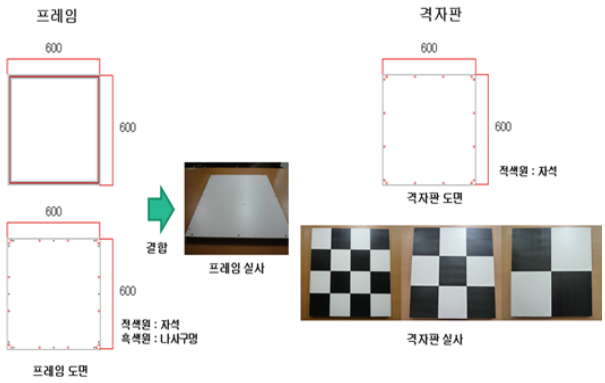
그림 1. 투영효과를 고려한 체커보드 설계.
Fig. 1. Design of a checkerboard considering perspective effect.

있는 못과 같은 것을 박을 수도 있지만, 본 연구에서는 체커보드를 이용하는 방법을 제안한다.

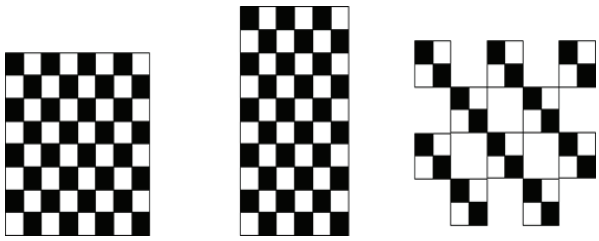
평탄한 면에 체커보드의 격자패턴을 배치하는 과정에서 영상의 투영효과를 고려해야 한다. 그 이유는 영상에서 체커보드 패턴의 코너가 보여야 코너를 검출할 수 있고 검출 위치의 정확성을 증가시킬 수 있기 때문이다. 영상에서의 투영효과는 좌우보다는 전후로 크다. 즉 카메라로부터 멀어질수록 투영효과가 크므로 이 투영효과의 영향을 줄이기 위해 체커보드의 패턴을 좌우보다는 전후로 길게 하는 것이 좋다. 또한 체커보드상의 각각의 사각형의 크기도 카메라로부터 가까운 곳에 있는 것보다 멀리 있는 것의 사각형의 크기를 크게 하는 것이 좋다. 그림 1은 이런 조건에 부합되게 표현된 체커보드의 예시이다.

캘리브레이션 정확성을 높이려면 되도록이면 넓은 영역에서 많은 수의 코너점을 확보해야 한다. 카메라 렌즈의 선택에 상관없이 영상의 넓은 영역에 패턴이 보이게 하려면 궁극적으로 체커보드 자체를 크게 만들어야 하는데, 이 과정에서 패턴의 코너점들의 위치 정확성이 영향을 받을 수 있다. 또 캘리브레이션을 하려면 이 코너점들을 영상에서도 검출을 해야 하는데, 이 때도 이 점들의 3차원 공간상에서의 위치 정확성과 무관하게 검출에러가 발생한다. 또한 Tasi의 동일평면 캘리브레이션은 월드좌표계의 Z축의 좌표가 0인 평면을 가정하는데, 체커보드를 만들 때 이 가정을 완벽하게 만족시키기는 현실적으로 어렵다. 따라서 이러한 에러를 상쇄하기 위해서는 다수의 코너점들을 검출하는 것이 정확한 캘리브레이션 수행에 도움이 된다.

우리는 알고리즘 개발과정에서 실내든 실외든 어디에서나 실험을 수행해야 했으므로 이동이 용이한 형태의 체커보드를 제작할 필요가 있었다. 이 때 전제조건은 전체 타겟크기의 변경이 용이하고, 타겟 배치가 유연해야 하며, 타겟을 배치했을 때 평탄성을 유지해야 하고, 이동성이 용이해야 한다는 것이었다.



(a) Frame and grid plate for a checkboard.



(b) Layout examples of the grid plates.

그림 2. 체커보드 제작과 배치 사례.

Fig. 2. Checkerboard and its various layouts.

그림 2는 이런 전제를 고려하여 제작한 체커보드이다. 먼저 그림 2(a)에 보인 것처럼 일정한 크기의 프레임을 여러 개 만들고 이 프레임에 격자판을 붙이는 구조로 디자인했는데, 격자판은 탈 부착이 가능하도록 했고, 격자판에 그려진 사각형 패턴들은 그 크기를 각자 달리 했다. 그림 2(b)는 이런 프레임을 조립한 후 배치된 여러 형태를 예시한 것이다.

III. 특징점 검출

1. 특징점의 3차원 데이터

그림 3의 우측에 보인 바와 같은 체커보드상의 코너점들의 3차원 좌표를 얻는다. 먼저 공간상의 바닥 임의의 임치에 월드좌표계를 두고, 이 바닥에 배치된 표적의 n개의 코너점들의 위치를 이 월드좌표계로부터 계산하여 3차원 좌표를 얻는다. 이 때 Z축의 좌표는 0으로 둔다.

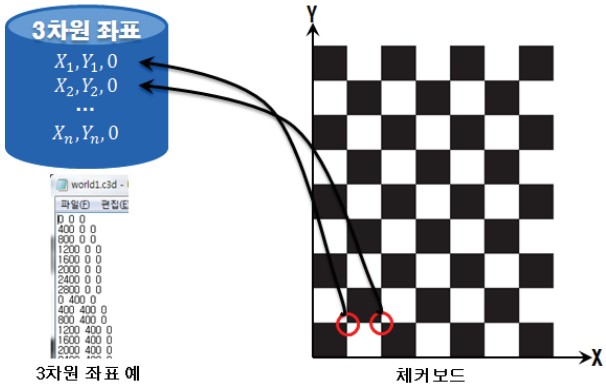


그림 3. 코너점의 3차원 데이터.

Fig. 3. 3D data of corner points of a checkerboard.

2. 영상에서의 체커보드의 코너 검출

체커보드의 코너점 추출에 Harris코너 검출기[4]를 이용할 수 있다. 그러나 Harris코너 검출은 Harris 코너값을 계산하고, 문턱치를 사용해야 하므로 조명 등의 영향을 받아 실제 코너임에도 추출에서 배제되는 경우도 생기고, 코너가 아닌데도 추출이 되는 경우도 발생한다. 또한 영상에서 체커보드의 사각형 격자 사이가 벌어지는 경우도 생기는데, 이 때 Harris코너 검출기로 코너를 검출하면 코너가 두 개 검출되기도 한다. 따라서 본 연구에서는 Harris코너 검출기 대신에 다음과 같은 방법으로 코너를 검출한다.

공간상에서 하나의 평면을 다른 평면으로 옮기는 투영변환을 평면 호모그래피(planar homography) [4]라 하며 다음 식으로 정의한다.

$$\mathbf{x} = \lambda \mathbf{H}\mathbf{X}$$

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$x = \frac{h_{11}X + h_{12}Y + h_{13}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}}$$

$$y = \frac{h_{21}X + h_{22}Y + h_{23}}{h_{31}X + h_{32}Y + h_{33}}$$

여기에서 **X**는 3차원 공간상의 평면위의 점이고, **x**는 이 점이 영상에 투영된 점이며, λ는 스케일 인자이고, **H**는 3×3 호모그래피 행렬이다. **H**는 8개의 자유도가 존재하며 h_{33}=1로 설정된다.

이 정의를 이용하여 공간상에 있는 체커보드를 영상으로 투영하여 캘리브레이션에 이용할 영상 특징점인 체커보드의 코너점을 추출한다. 이를 위해 먼저 식(1)의 투영변환행렬 H를 구해야 하는데 이 때 4개의 점이 필요하다. 3차원 공간상에서의 점의 좌표는 주어져 있지만 이 점들에 대응되는 영상에서의 점의 좌표는 모르므로 본 연구에서는 바닥에 배치된 체커보드를 촬영한 영상으로부터 선택한다. 이 때 보다 좋은 H를 얻기 위해 전후 좌우로 멀리 떨어져 있는 점을 선택하는 것이 좋다. 이렇게 대응되는 4개의 점으로부터 다음 식 (2)를 이용하여 H를 구한다.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 \\ X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -x_2Y_2 \\ X_3 & Y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3X_3 & -x_3Y_3 \\ X_4 & Y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4X_4 & -x_4Y_4 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 1 & -y_2X_2 & -y_2Y_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & 1 & -y_3X_3 & -y_3Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & 1 & -y_4X_4 & -y_4Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \tag{2}$$

다음은 식 (2)로부터 구한 H를 이용하여 공간상에 배치된 체커보드의 코너 좌표들을 다음과 같이 영상으로 투영한다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{H}\mathbf{X}_i, \; i = 1, \cdots, N \tag{3}$$

식 (3)에서 N은 코너점의 수량을 나타낸다.

이렇게 영상에 투영된 점들이 체커보드의 코너에 정확히

일치되지는 않는다. 그 이유는 H를 계산하기 위해 선택한 네 점의 영상좌표가 매우 정교한 것이 아니고, 공간상에 있는 체커보드가 완전한 평면을 유지한다는 보장도 할 수 없기 때문이다. 이에 따라 식 (3)에 의해 영상에 투영된 점들을 격자 코너에 근접되도록 이동시키는 것이 필요하다. 먼저 투영된 점 $\mathbf{q}$ 주위로 사각형 마스크 W를 씌운다. 이 때 W내에 다른 투영점이 포함되지 않도록 W를 정한다. 그리고 참고문헌 [6]에 제시된 방법을 이용하여 $\mathbf{q}$를 이동시킨다. 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_i), \quad \mathbf{p}_i \in W \\ Q &= \sum_i \varepsilon_i^2 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}$ 는 W내에 있는 픽셀 $\mathbf{p}_i$ 의 밝기값 그레디언트(gradient)이다. 새로운 $\mathbf{q}$는 Q를 최소화하는 위치로서 Q를 $\mathbf{q}$에 대해 미분하고 0으로 놓고 정리하여 풀면 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum_i \mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_i) = 0 \\ &\sum_i (\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T) \cdot \mathbf{q} - \sum_i (\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T \cdot \mathbf{p}_i) = 0 \\ &\mathbf{q} = \left(\sum_i \mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T \right)^{-1} \sum_i (\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}\mathbf{g}_{\mathbf{p}_i}{}^T \cdot \mathbf{p}_i) \end{aligned} \tag{5}$$

이 과정에서 $\mathbf{p}_i$ 의 그레디언트의 크기가 적은 경우 새로운 $\mathbf{q}$를 얻는 대상에서 제외시킬 수 있다. 이 새로운 $\mathbf{q}$가 식 (4)와 (5)에 반복적으로 입력되어 다시 $\mathbf{q}$가 계산된다. 이전 $\mathbf{q}$와 새로운 $\mathbf{q}$의 거리가 미리 정해놓은 기준치보다 작거나, 이 이동 횟수가 미리 정해진 횟수가 되면 계산을 멈추고 그 때 $\mathbf{q}$의 좌표를 코너점으로 선정한다.

IV. 캘리브레이션과 검증

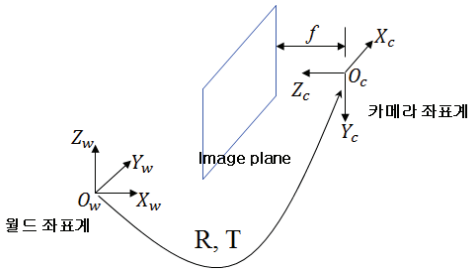
1. 캘리브레이션

단원 II에서 언급하였듯이 단원 III에서 설명한 방법에 의해 얻은 서로 1:1로 대응되는 체커보드의 3D 코너 점들과 2D 코너 점들을 입력으로 하여 Tsai의 동일평면 캘리브레이션법에 의해 그림 4(a)에 보인 바와 같은 단안 카메라의 내외부 파라미터를 추출한다. 양안 카메라의 경우는 좌우 카메라 각각의 내외부 파라미터를 추출한 후 두 카메라 사이의 외부 파라미터를 다음과 같이 계산한다.

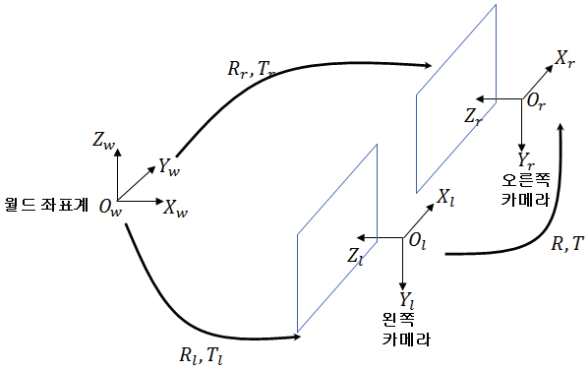
$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_r \mathbf{R}_l{}^T \\ \mathbf{T} &= \mathbf{T}_r - \mathbf{R}\mathbf{T}_l \end{aligned} \tag{6}$$

2. 검증

제안된 방법에 의해 수행된 스테레오 카메라 캘리브레이션의 정확성을 검증하기 위해 본 연구에서는 장애물까지의 거리 추출용 센서인 SICK사의 레이저 스캐너를 이용한다. 즉 그림 5와 같이 스테레오 카메라에 의해 계측된 거리와 레이저 스캐너에 의해 계측된 거리를 비교함으로써 카메라 캘리브레이션이 정확하게 수행되었는지를 평가한다. 그림 5의 Φ와 Δ는 카메라와 스캐너간의 관계로서 회전행렬과 병진벡



(a) Monocular camera and intrinsic/extrinsic parameters.



(b) Binocular camera and intrinsic/extrinsic parameters.

그림 4. 카메라 캘리브레이션.

Fig. 4. Camera calibration.

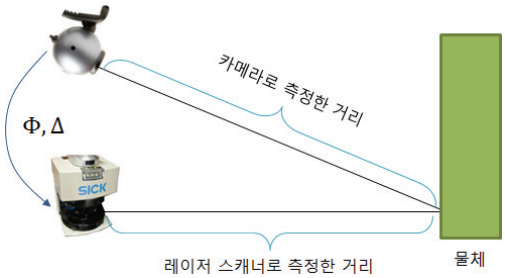


그림 5. 스테레오 카메라 계측정보와 레이저스캐너 계측정보의 비교.

Fig. 5. Comparison of depth data from stereo camera and laser scanner.

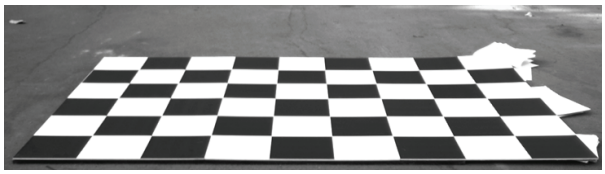
터이다. Φ와 Δ는 참고문헌 [7]에서 제안한 방법에 의해 계산한다. 그리고 두 센서의 거리데이터를 비교하기 위해 어느 한 센서의 데이터를 Φ와 Δ를 이용하여 다른 센서쪽으로 변환한다.

본 연구에서 캘리브레이션 정확성검증을 위해 스테레오 카메라를 이용하여 물체까지의 거리를 검출하는 과정은 다음과 같다. 1) 캘리브레이션을 통해 얻은 카메라 파라미터를 통해 영상교정(rectification)을 수행하고, 2) 교정된 좌우 영상에서 SGM (Semi-Global Matching) [8]을 이용하여 시차맵을 구축한 후, 3) 거리측정을 행한다. 그리고 이렇게 측정된 거리를 레이저스캐너를 이용하여 계측한 거리와 비교를 한다.

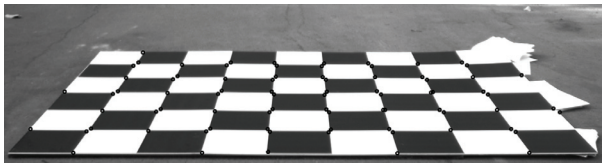
V. 실험결과

1. 영상에서 코너검출

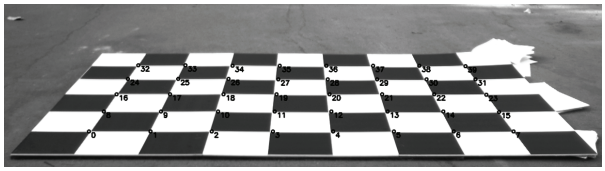
본 연구에서는 체커보드 영상에서 코너는 Harris코너검출기 대신에 호모그래피 행렬을 사용하여 3차원 점들을 영상



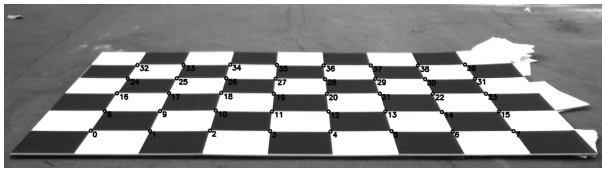
(a) Image of a checkboard.



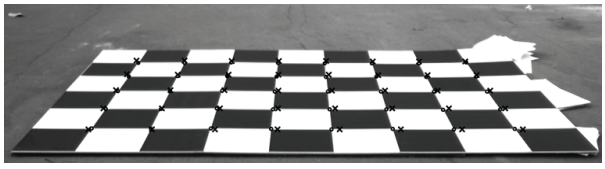
(b) Extraction of corners by Harris corner detector.



(c) Projection of 3D points onto a checkerboard image by Homography matrix.



(d) Extraction of precise corners through a fine positioning of the projected points shown in (c).



(e) Extraction of precise corners under the intentional projection error.

그림 6. 코너점 추출방법.

Fig. 6. Corner extraction from a checkerboard image.

에 투영하고 이 투영된 점들이 정확히 코너로 찾아 가도록 위치에 대한 미세조정을 통해 검출한다. 그림 6은 이에 대한 실험결과를 보인 것이다.

그림 6(a)는 체커보드 영상이고, 그림 6(b)는 체커보드 영상에서 Harris코너검출기로 추출한 코너를 보인 것이다. 그림의 작은 원들이 추출된 코너를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면 실제 코너는 하나임에도 여러 곳에서 두 개씩 추출되었다. 이는 체커보드의 사각형 격자 사이가 벌어질 때 생기는 현상이다. 이런 문제 때문에 3차원 점들을 호모그래피 행렬을 통해 영상에 투영하고, 이 투영점들의 미세조정을 거쳐 코너를 추출한다. 그림 6(c)와 그림 6(d)가 이 두 과정을 보인 것이다. 그러나 그림 6(c)와 그림 6(d)를 보면 그 차이를 알기 어렵다. 따라서 투영점들의 위치가 조정되어 정확하게 코너 위치로 이동되는 것을 보이기 위해 그림 6(e)에서 의도적으로 호모그래피행렬을 에러가 있게 만든 후 이를 이용해 3차원 점들을 영상에 투영하고, 수식 (4)와 (5)에 의해 이들의 위치를 조정한 결과를 보였다. 이 그림에서 크로스 ×로 표기된 것들이 투영점이고, 작은 원들이 위치가 조정된 코너이다.

표 1. 투영된 코너점의 미세 조정 결과.

Table 1. Results of a fine positioning of the projected corner points.

코너 번호	그림6(c)에 보인 코너		그림6(d)에 보인 코너	
	x	y	x	y
0	565	286	568.8325	286.3721
1	701	286	699.9104	286.5707
2	836	286	831.5485	285.6763
3	971	286	964.829	287.3409
4	1104	286	1098.495	287.7797
5	1238	286	1232.655	287.2642
6	1370	286	1367.598	287.6331
7	1502	286	1502.148	286.6679
8	598	242	600.1433	242.7128
9	724	242	722.1121	242.7828
10	850	242	845.2146	242.3802
11	975	242	969.2787	243.7192
12	1100	242	1093.83	244.3759
13	1224	242	1219.275	243.7993
14	1347	242	1344.233	244.5247
15	1470	243	1469.801	243.7331

(a) Sample 1.

(b) Sample 2.

그림 7. 코너점의 위치정확도와 캘리브레이션.

Fig. 7. Localization accuracy of corner points and calibration.

표 1은 그림 6(c)와 그림 6(d)에 보인 코너들 중 하단부에 있는 15개의 수평, 수직 좌표를 제시한 것이다. 이 표에 제시된 수치를 통해 호모그래피 행렬에 의해 투영된 좌표가 수식 (4)와 (5)에 의해 어떻게 미세 조정되었는지를 알 수 있다.

2. 코너위치 정확도가 캘리브레이션에 미치는 영향

캘리브레이션 표적영상의 코너 위치 정확도가 캘리브레이션에 미치는 영향은 크다. 그림 7은 이를 설명하기 위해 사용한 영상이다. 그림 7(a)와 그림 7(b)모두 똑 같은 상황의 체커보드를 촬영한 스테레오 영상으로 촬영 시점만 다를 뿐이다. 이 영상을 촬영한 스테레오카메라는 차량의 전방 윈드쉴드에 장착되었고, 표적을 촬영할 당시 차량은 시동이 켜진 정지상태였다. 따라서 차량의 진동이 카메라에 전달되었다.

표 2은 그림 7의 두 샘플 영상에서 추출한 코너점들을 가지고 캘리브레이션을 실시하여 얻은 카메라 파라미터 가운데 병진벡터를 보인 것이다. 병진벡터의 성분 가운데 T_x와 T_y는 별 차이가 없지만 두 카메라의 광축 사이의 거리에 해

표 2. 코너점의 위치정확도가 캘리브레이션에 미치는 영향.
Table 2. Effects on calibration of localization accuracy of corner points in a target image.

	샘플 1	샘플 2
T_x (mm)	-160.2238	-161.6510
T_y (mm)	1.1271	-3.4168
T_z (mm)	43.3727	-0.4387

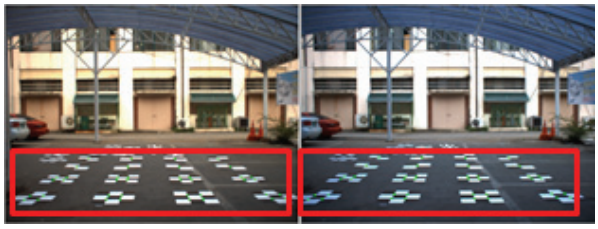
당되는 T_z에 큰 차이를 보였다. 이 차이는 영상에서 추출한 체커보드의 코너점의 위치정확도로부터 기인한 것이다.

3. 캘리브레이션 표적의 영상내 분포에 대한 영향

캘리브레이션 표적이 영상의 넓은 영역을 차지하고, 캘리브레이션에 이용할 특징점의 수가 많으면 그렇지 않는 경우보다 캘리브레이션 정확도를 높일 수 있다. 그림 8은 이 논리를 증명하기 위해 사용한 영상이다. 그림 8(a)와 그림 8(b) 모두 동일한 스테레오 영상인데, 실험을 위해 캘리브레이션에 사용한 특징점의 수만 다르게 선택했다. 그림 8(a)보다 그림 8(b)가 카메라의 광축방향으로 더 많은 체커보드의 코너점들이 선택되었다. 그림 8(c)는 가로방향으로 놓인 격자를 줄이고 세로방향으로 더 넓게 배치하여 촬영한 것으로 그림 8(a)와 그림 8(b)에 비해 가로방향의 코너점의 수는 줄었지만 광축방향으로는 더 많은 코너점을 추출하였다.

표 3은 그림 8에 보인 세 샘플로 캘리브레이션을 실시해 얻은 스테레오 카메라의 파라미터 가운데 병진벡터 T와 좌우 교정영상에서 서로 대응되는 코너점들의 y좌표의 차이에 관련된 데이터를 보인 것이다. 이 결과에서 알 수 있는 것은

(a) Sample 1.



(b) Sample 2.

(c) Sample 3.

그림 8. 코너점들의 영상내 분포와 캘리브레이션 정확도.
Fig. 8. Dispersion of corner points in a target image and calibration accuracy.

표 3. 코너점의 분포가 캘리브레이션에 미치는 영향.
Table 3. Effects on calibration of dispersion of corner points in a target image.

	샘플 1	샘플 2	샘플3
T_x (mm)	-152.743	-155.584	-158.060
T_y (mm)	-2.137	1.255	3.071
T_z (mm)	-45.595	-23.233	16.469
평균 교정에러(pixel)	1.674	1.619	1.366
최대 교정에러(pixel)	6.377	5.733	6.294

광축방향으로 더 많은 코너점들을 추출하면 병진벡터의 광축방향 성분인 T_z의 값이 보다 정확해진다는 것이다. 따라서 교정에러도 작게 된다. 실제 이 실험에 사용한 스테레오 카메라의 T_z는 거의 0에 가까웠다.

4. 캘리브레이션 파라미터 검증

그림 9는 단원 IV에서 설명한 방법으로 캘리브레이션 결과를 검증하는 과정의 블록도이다. 이 실험에서 우리는 Zhang의 비동일평면 캘리브레이션 결과도 레이저스캐너의 계측거리와의 비교를 수행하였다. 일반적으로 Zhang의 비동일평면 캘리브레이션이 Tasi의 동일평면 캘리브레이션보다 더 정확하게 카메라 파라미터를 추출하는 것으로 알려져 있다. 실제 본 연구의 실험에서도 그런 결과를 얻었지만, 그림 10에 보인 바와 같이 두 캘리브레이션법의 결과의 차이는 그렇게 크지 않았다. 두 방법 모두 50m 정도 떨어진 거리에서 복원된 거리의 에러는 1.5m 미만이었다. 따라서 앞 실험결과에서 보였듯이 캘리브레이션 표적이 영상에내에 넓게 퍼져 있고, 특징점의 수가 충분히 많고, 영상에서 특징점의 위치정

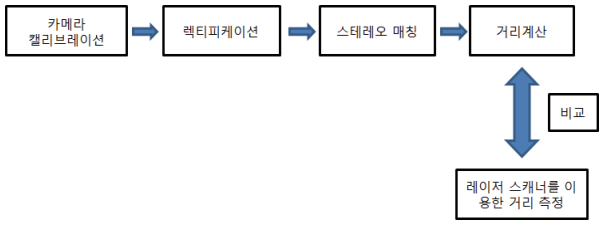


그림 9. 레이저스캐너 데이터를 이용한 캘리브레이션 결과의 검증과정.
Fig. 9. Verification process of calibration result by depth from laser scanner.

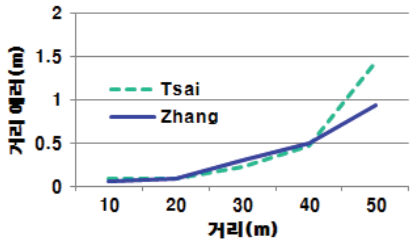


그림 10. 본 연구에서 제안한 Tasi의 동일평면 캘리브레이션과 Zhang의 비동일평면 캘리브레이션 결과를 활용한 스테레오처리의 거리에러.
Fig. 10. Depth error from stereo processing using the proposed Tasi's coplanar calibration and the Zhang's non-coplanar calibration.

확도를 확보하면 Tasi의 동일평면 캘리브레이션으로 스테레오카메라의 파라미터를 정확히 검출할 수 있다.

VI. 결론

카메라의 광축과 바닥에 놓인 체커보드면이 평행에 가까울수록 체커보드 영상의 투영왜곡이 크게 나타나므로 영상에서 체커보드 코너점의 위치정밀도가 떨어지고 따라서 이때 얻은 카메라 파라미터를 사용하여 실시한 스테레오 영상처리의 거리오차가 크게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 조명조건도 영향을 미쳤다. 조명조건이 양호할 경우 격자무늬의 흑백대비가 커서 코너위치를 정확하게 추출할 수 있었고, 따라서 캘리브레이션 정확도를 높일 수 있었다. 이러한 연구결과에도 불구하고 현실적으로 카메라 광축을 조정할 수 없는 경우가 있다. 이런 상황을 대비하여 캘리브레이션 표적이 영상내에 넓게 퍼지게 하고 격자표식의 크기를 거리에 따라 다르게 가져 가는 것이 좋은 캘리브레이션 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

본 연구에서 제안하는 동일평면 캘리브레이션 수행을 위한 코너점 추출방안의 이상적인 조건이 확인되면, 이 조건에 따라 평탄한 바닥에 캘리브레이션 표적을 직접 그리거나 설치하는 것이 가장 좋은 접근일 것이다.

REFERENCES

[1] R. Y. Tasi, “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses,” *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.

[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] D. H. Ballard and C. M. Brown, *Computer Vision*, Prentice Hall, 1982.

[4] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, and S. S. Sastry, An Invitation to 3-D Vision From Images to Geometric Models, Springer, 2004.

[5] A. Fusiello, E. Trucco, and A. Verri, “A compact algorithm for rectification of stereo pairs,” *Machine Vision and Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 16-22, 2000.

[6] A. Geiger, F. Moosmann, O. Car, and B. Schuster, “Automatic camera and range sensor calibration using a single shot,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3936-3943, 2012.

[7] Q. Zhang and R. Pless, “Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration),” *Intelligent Robots and Systems*, 2004.

[8] H. Hirschmuller, “Stereo processing by semiglobal matching and mutual information,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 328-341, 2008.

박 정 민

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제17권 제4호 참조.

이 종 인

2008년 연세대학교 전기전자공학부(공학사). 20012년 연세대학교 전기전자공학부(공학석사). 2010년~2014인지소프트. 2014년~현재 현대모비스 DAS센서 엔지니어링 팀. 관심분야는 지능형자동차, 스테레오비전.

조 준 범

1998년 한양대학교 제어계측공학(공학사). 2012년 한양대학교 프로젝트관리학(공학석사). 1998년~2009년 현대오토넷. 2009년~현재 현대모비스 DAS센서 엔지니어링 팀. 관심분야는 지능형자동차, 스테레오비전.

이 준 웅

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제19권 제6호 참조.