

3 차원 복원을 위한 구조적 조명 보정방법

신동조, 양성우, 김재희

연세대학교 전기전자 공학과

Hard calibration of a structured light for the Euclidian reconstruction

Dongjoe Shin, Sungwoo Yang, Jaihie Kim

Dept. Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

tunegod@yonsei.ac.kr

Abstract

A vision sensor should be calibrated prior to infer a Euclidian shape reconstruction. A point to point calibration, also referred to as a hard calibration, estimates calibration parameters by means of a set of 3D to 2D point pairs. We proposed a new method for determining a set of 3D to 2D pairs for the structured light hard calibration. It is simply determined based on epipolar geometry between camera image plane and projector plane, and a projector calibrating grid pattern.

The projector calibration is divided two stages; world 3D data acquisition stage and corresponding 2D data acquisition stage. After 3D data points are derived using cross ratio, corresponding 2D point in the projector plane can be determined by the fundamental matrix and horizontal grid ID of a projector calibrating pattern. Euclidian reconstruction can be achieved by linear triangulation, and experimental results from simulation are presented.

I. 서론

구조적 조명을 이용한 3차원 데이터 복원은 스테레오 카메라 방식의 3차원 복원 과정에서 발생하는 대응점 문제를 해결하기 위해 피사체에 프로젝터 등을 이용해 특정 패턴을 투사하여 3차원 데이터를 획득하는 방식이다[1]. 기본적인 구조적 조명시스템의 구성은 하나의 카메라와 하나의 패턴 프로젝터(구조적 조명)로 이루어진다. 프로젝터는 스테레오 방식에서 하나의 카메라를 대처한 형태로 볼 수 있다. 따라서, 구조적 조명

을 이용한 유클리디안 복원을 위해서는 카메라와 프로젝터의 보정(calibration) 정보와 복원할 특징 점의 대응 쌍(corresponding pair) 정보를 알고 있어야 한다. 보정과정은 3차원 공간에서 2차원 영상평면으로 변환에 관여하는 변수들을 추정하는 과정으로 볼 수 있다. 이러한 변수 추정 과정은 주어진 데이터 집합으로부터 함수를 추정하는 일종의 최적화 문제로 볼 수 있다[3]. 카메라 보정의 경우 추정에 사용될 3차원-2차원 대응 쌍을 보정 패턴을 통해 쉽게 얻을 수 있다. 하지만, 프로젝터의 경우 외부를 볼 수 없기 때문에 보정 패턴을 이용한 대응 쌍 획득이 불가능하다. 또한, 특정 프로젝터 평면상에서 생성된 패턴이 항상 알고 있는 3차원 위치에 투사된다고 기대할 수 없다.

최근의 프로젝터 보정방법은 기본행렬을 이용해 구해지는 두 개의 근사 보정행렬을 통해 프로젝티브 복원을 한 후, 유클리디안 복원을 위해 투사 패턴의 기하 조건을 사용하는 방법과[4], 2차원 사영 평면간의 호모그래피(homography)를 이용하여 각 줄무늬 패턴에 대해 영상평면 좌표에 대한 실 세계 좌표 복원 식을 구하는 방법 등이 소개되었다. [2].

본 논문은 카메라의 영상 평면을 이용한 구조적 조명의 보정 방법을 제안 한다. 이를 위해서 프로젝터 보정용 격자 패턴을 카메라 보정 패턴에 투사하고, 이때 얻어지는 영상으로부터 프로젝터 보정에 필요한 대응 쌍을 획득한다. 이런 대응 쌍을 이용해 구조적 조명의 점 대 점 보정을 수행한다.

II. 사영기하 (Projective geometry)

본 절에서는 논문에서 사용되는 기본적인 사영공간에서의 기하조건을 설명한다. 먼저 에피폴라 기하조건과 기본행렬을 설명하고, 이어서 사영공간 상에서의 교차율에 대해 설명한다.

2.1 에피폴라 (epipolar) 기하와 기본행렬 (fundamental matrix)

에피폴라 기하 조건은 스테레오 방식의 대응 점 관계로부터 유도된다. 두 개의 카메라 중심 좌표와 실 세계 좌표로부터 만들어진 평면을 에피폴라 평면이라 할 때, 좌측 영상평면의 특징 점에 해당하는 우측 영상평면의 대응 점의 위치는 우측 영상평면과 에피폴라 평면의 교선 상에 존재 하게 된다. 이 때 이 교선을 에피폴라 선(epipolar line)이라고 정의한다[3]. 기본 행렬은 이와 같은 에피폴라 기하 관계로부터 유도되는 3x3의 행렬로 임의의 특징 점에 대한 대응점이 존재하는 에피폴라 선을 정의하는 계수(rank) 2의 행렬이다. 일반적으로 이런 기하적 관계는 대응 점 정합 시, 검색 범위를 제한하는 역할을 하는데, 본 논문에도 기본행렬로 표현되는 에피폴라 기하조건을 이용해 프로젝터 보정 시 필요한 패턴 평면의 좌표를 구한다.

2.2 교차율 (cross ratio)

그림 1. 의 3 차원 공간에 직선 1 위의 4 개의 점 a, b, c, d가 (collinear points) 있다고 가정할 때, 4 점에 의한 교차율은 다음과 같이 정의 된다.

$$(a, b : c, d) = \frac{d(a, c) / d(b, c)}{d(a, d) / d(b, d)} \quad (1)$$

이 때, 사영 공간(projective space)에서 이에 대응하는 1' 위의 4점 A, B, C, D의 교차율은 불변한 특성을 갖는다. [2]

$$(A, B : C, D) = (a, b : c, d) \quad (2)$$

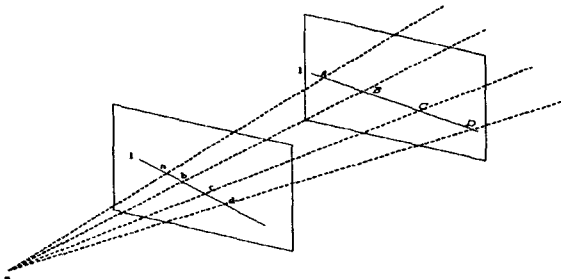


그림 1. 사영 공간에서 교차율

교차율의 불변특성은 4장의 프로젝터 보정과정에서

보정에 필요한 실 세계 좌표 획득 과정에 적용된다.

III. 시스템 보정

본 절에서는 구조적 조명을 이용한 3 차원 복원 시스템의 보정에 대해 설명한다. 시스템보정은 크게 카메라 보정과 프로젝터 보정으로 나뉜다. 3.1 절에서는 카메라 보정을 설명하고, 이어서 제안하는 프로젝터 보정에 대해 설명한다.

3.1 카메라 보정

카메라 보정은 3 차원 공간에서 2 차원 영상평면으로 변화하는 변환행렬의 추정과정이다. 이 과정은 또한 최적화 문제로 볼 수 있다. $\tilde{\mathbf{x}}$ 을 3 차원 공간상의 점 좌표이고, 이에 대응하는 2 차원 영상 평면 좌표가 $\tilde{\mathbf{x}}_i' = (x_i \ y_i \ w_i)^T$ 라면, 카메라 보정행렬을 통해 식 (3) 가 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{x}}' = P_{3 \times 4} \tilde{\mathbf{x}} \quad (3)$$

이때 보정 행렬은 식 (4)와 같이 분해 될 수 있는데, 여기서 $K_{3 \times 3}$ 은 카메라의 내부 변수(intrinsic parameter) 행렬이고 나머지요소들은 카메라의 외부 변수(extrinsic parameter)로 정의된다[3].

$$P_{3 \times 4} = K_{3 \times 3} [R_{3 \times 3} \ | \ \mathbf{t}] \quad (4)$$

이와 같은 카메라 행렬을 추정하기 위해서, 2 차원-3 차원 대응 쌍이 n 개 주어지면, 이로부터 식 (3)를 식 (5)로 정리된다.

$$\{\tilde{\mathbf{x}}_i \mapsto \tilde{\mathbf{x}}_i'\}, \text{ where } i = 1, \dots, n$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}^T & -w_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T & y_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T \\ w_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T & \mathbf{0}^T & -x_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T \\ -y_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T & x_i \tilde{\mathbf{x}}_i^T & \mathbf{0}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}^1 \\ \mathbf{c}^2 \\ \mathbf{c}^3 \end{bmatrix} = \mathbf{Ac} = \mathbf{0} \quad (5)$$

식 (5)로부터 카메라 보정 행렬 C 를 구하는 과정은 $\|\mathbf{Ac}\|$ 의 산술 오차를 최소화 하는 정규화된 크기를 갖는 벡터 C를 찾는 과정으로 볼 수 있다 식(6).

$$\min_{\mathbf{c}} \|\mathbf{Ac}\| = (\mathbf{Ac})^T (\mathbf{Ac}) = \mathbf{c}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{c}$$

$$\text{subject to } \|\mathbf{c}\| = \mathbf{c}^T \mathbf{c} = 1 \quad (6)$$

식(6)의 최적의 선형 해는 행렬 $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ 의 최소 고유 값 (eigen value)에 해당하는 고유 벡터(eigen vector)로부터

얻을 수 있다. 따라서 행렬 A 의 SVD(singular value decomposition)을 통해 최적의 카메라 보정 행렬을 구한다.

3.2 프로젝트 보정

카메라 보정 이후에 이루어 지는 프로젝트 보정은 먼저 보정행렬 추정에 필요한 3 차원 데이터 획득 과정과 이에 대응하는 프로젝트 평면상의 2 차원 데이터 획득 과정으로 나뉜다.

프로젝터 보정에 필요한 실 세계 좌표 획득을 위해 격자 무늬 프로젝트 보정 패턴을 카메라 보정 패턴에 투사한다. 그 후 카메라 영상 평면으로부터 그림 2와 같은 영상을 얻을 수 있다. 이때 카메라 보정 시 사용한 3개의 꼭지점 a, b, d가 이루는 직선 l과 투사된 가로 줄 패턴의 교차점인 c로부터 정의되는 교차율은 실 세계 좌표 계의 4점 A, B, C, D에서도 같은 값을 갖는다. 따라서, 영상평면 상의 c에 해당하는 실 세계좌표를 교차율(식 (2))을 통해서 구할 수 있다.

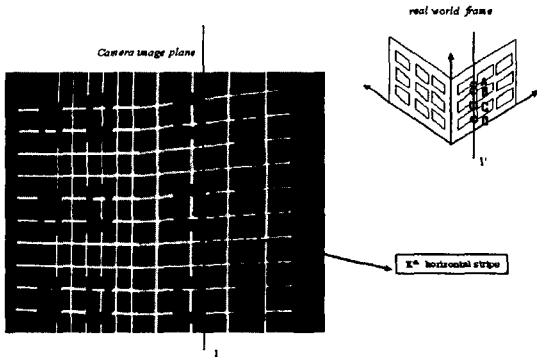


그림 2. 교차율을 이용한 실 세계 좌표 획득

다음으로 영상평면상의 점 c에 (그림 3)대응하는 패턴평면상의 좌표를 구하기 위해서, 점 c의 가로 줄무늬 ID와 두 영상 평면 간의 기본행렬을 알고 있어야 한다. 만약, 점 c가 k번째 가로 줄무늬에 존재한다고 가정하면, 가로 줄 무늬 아이디 k를 통해 점 c의 패턴평면에서의 y좌표를 알 수 있다. 또한 두 영상 평면 사이에 결정되는 기본행렬, F, 을 알고 있다면, 점 c와 기본행렬에 의해 구해지는 대응 점은 에피폴라 직선상(식 (7))에 존재한다. 따라서 점 c에 대응하는 패턴 평면상의 화소 좌표는 식 (8)로 구할 수 있다. 이때 기본행렬을 추정하기 위해 사용되는 두 평면간의 좌표 쌍은 프로젝트 보정 패턴의 교점으로했다.

$$F\tilde{c} = \tilde{m} \quad (7)$$

여기서 \tilde{m} 은 2차원 사영 공간상에서 직선을 나타

내는 벡터가 되고 이 벡터와 가로 줄무늬에 의한 직선이 \tilde{n} 이라고 할 때, c에 대응되는 패턴 평면상의 좌표 \tilde{c}' 는

$$\tilde{c}' = \tilde{m} \times \tilde{n} \quad (8)$$

이렇게 구한 대응 쌍을 이용한 프로젝트 보정은 카메라와 같이 DLT알고리즘[3]을 통해 구한다.

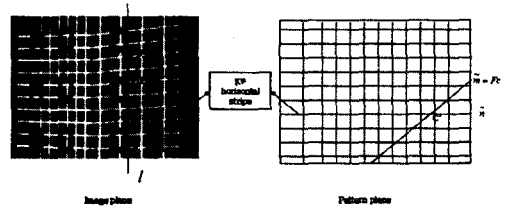


그림 3. 기본행렬과 가로 줄무늬 ID를 통한 화소 좌표 획득

IV. 3 차원 데이터 복원

3차원 복원을 위한 카메라 보정과 프로젝트의 보정은 시스템 사용 전에 결정된다. 이후에 카메라로부터 영상을 획득 받아 줄무늬 패턴을 디코딩한다. 디코딩 정보와 카메라와 프로젝트의 보정 정보로부터 삼각 측량과정을 통해 3차원 데이터를 구한 후, 마지막으로 3차원 복원을 한다. 삼각 측량을 이용한 피사체의 3차원 복원은 카메라와 보정행렬과 비슷한 과정을 통해 얻어진다. 카메라 보정행렬을 C_{cam} , 프로젝트 보정행렬을

C_{proj} 이라 할 때, 실 세계 좌표와 각 평면상의 좌표관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_{cam} [x \ y \ z \ t]' &= \lambda [u \ v \ 1]' \\ C_{proj} [x \ y \ z \ t]' &= \lambda' [u' \ v' \ 1]' \end{aligned} \quad (8)$$

위 식을 실 세계 좌표에 관해 정리하면,

$$Q[x \ y \ z \ t]' = 0 \quad (9)$$

$$Q = [c_1 - uc_3 \quad c_2 - vc_3 \quad c_1' - u'c_3' \quad c_2' - v'c_3']$$

여기서 c_i, c_i' 는 C_{cam} 과 C_{proj} 의 i번째 행 벡터에 해당한다. 따라서 최종 복원되는 실 세계 좌표는 QQ' 의 가장 작은 고유 값에 해당하는 고유벡터

(eigen vector)에 해당한다[4].

V. 실험 결과 및 결론

실험에 사용된 구조적 조명 시스템은 1024x768 의 해상도를 지원하는 DLP 프로젝터와 동일 해상도의 컬러 카메라로 구성하였다 (그림 4 좌측).



그림 4. 실험환경과 컬러로 부호화된 패턴

본 논문에서 적색, 청색, 녹색의 컬러로 부호화된 패턴을 (그림 4 우측) 이용해 선을 구별하는 방법을 사용하였다 [1]. 특히 적색 선은 반드시 검출되는 중심선으로 가정하고, 주변의 녹색과 청색 선들은 이 중심선을 통해 위치를 찾았다. 표 1 은 추정된 카메라 내부 변수와 프로젝터의 내부변수를 보여준다. 이로부터 카메라 CCD 셀의 가로세로 비가 카메라의 경우 0.98846, 프로젝터는 0.97287로 추정됐다. 또한 추정된 영상평면의 중심과 프로젝터 평면의 중심이 영상 평면의 중앙이 아님을 알 수 있었다.

표 1 추정된 카메라와 프로젝터의 내부 변수

	α_x	α_y	x_0	y_0	k
Camera	3441.3	3389.2	508.35	321.66	0.0030701
Projector	2466.1	2399.3	89.441	91.765	-0.03755
Unit	pixel	pixel	pixel	pixel	none

제안한 방법을 통한 보정행렬 추정의 평가를 위해 residual error[3]를 통해 성능을 평가했다. 그림 5 에서 보는 바와 같이 카메라 행렬의 경우 약 2.6 픽셀의 에러를 보인 반면, 프로젝터 보정 행렬은 3.2 픽셀의 에러를 나타냈다.

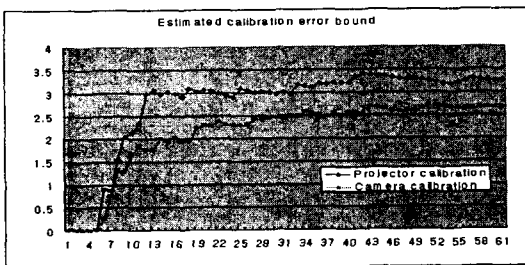


그림 5. Residual error

3 차원 복원 성능을 평가하기 위해 피사체의 특징지점을 컬러를 갖는 마커를 이용해 표시하고 (그림 6 좌측), 이 특징 점간의 거리를 제안한 방법에 의해 측정하고 (그림 6 우측)그 결과를 상용 제품에 의해 복원된 결과 (그림 6 가운데)와 비교하였다. 표 2 를 통해 측정결과 오차가 알 수 있다. 제안한 방법은 약 6% 정도의 오차를 보였다.



그림 6. 마커를 이용한 거리측정

표 2 3차원 복원 데이터 오차 비교

	1	2	3	4
3 차원스캐너	58.47	79.96	83.91	70.66
제안 방법	52.41	76.88	79.32	65.57
오차	6.16	2.98	4.59	5.09

단위(mm)

VI. 결론

구조적 조명을 점 대 점 보정을 위한 3차원-2차원 대응 쌍을 프로젝터 보정 패턴과 두 평면간의 사영 기하(projective geometry)조건을 이용해 구할 수 있었다. 향후 높은 해상도의 3차원 복원을 위한 적절한 패턴과 이에 따른 부호화 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학기술 재단 지정 생체인식 연구 센터(BERC)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] J. Battle, E. Mouaddib, J. Salvi, "A survey: Resent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem" Pattern recognition, vol. 31, no. 7, pp. 963-982, 1998
- [2]D. Q. Huynh, R. A. Owen, P. E. Hartmann, "Calibrating structured light system: A novel approach" International Journal of Computer Vision, vol. 33, no. 1, pp. 73-86, March, 1999.
- [3] Richard Hartley, and Andrew Zisserman, "Multiple view Geometry in computer vision" Cambridge University Press, 2000
- [4]David Fofi et al, "Uncalibrated reconstruction: an adaptation to structured light" Pattern recognition, vol. 36, No. 7, pp.1631-1644, July, 2003.