

가상 체스보드 패턴 기반 카메라 캘리브레이션 방법

*김준수, 윤국진, 정준영, 정원식, 서정일
한국전자통신연구원

*joonsookim@etri.re.kr

A Method for Camera Calibration using Virtual Checkerboard Pattern

*Joonsoo Kim, Kugjin Yun, Jun Young Jung, Won-sik Cheong, Jeongil Seo
Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문에서는 가상의 체스보드판을 이용한 카메라 캘리브레이션 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 카메라 포즈나 체스보드판의 움직임을 모사하기 위해 가상 카메라로 획득한 여러 포즈의 체스보드 이미지를 디스플레이에 표시하고 디스플레이를 캘리브레이션 대상이 되는 카메라로 촬영한다. 가상 체스보드 격자점좌표와 촬영된 이미지의 체스보드 격자점좌표 사이의 homography 행렬로부터 카메라 파라미터에 대한 제한조건을 추출할 수 있음을 보였고, 렌즈 왜곡을 고려한 전체 카메라 캘리브레이션 방법 또한 제안하였다.

1. 서론

카메라 캘리브레이션은 이미지나 영상을 통한 3차원 정보 획득에 있어 필수적인 과정이다. 카메라가 캘리브레이션 되어 있지 않다면 복수의 위치에서 촬영된 이미지에서 대응되는 점들을 모두 찾아낸다고 하더라도 projective ambiguity에 의해 3차원 공간에 대한 정보를 유일하게 결정하지 못하기 때문이다. 복수의 카메라 캘리브레이션 알고리즘이 존재하나, 가장 흔하게 사용되는 알고리즘 중 하나는 Zhang의 방법이다 [1]. 이 방법은 평면 패턴을 여러 카메라 포즈에서 촬영하고 각 포즈에 대응하는 homography 행렬들로부터 카메라 내부 파라미터를 추출하는 방식인데, 높은 정확도로 카메라 파라미터를 계산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 Zhang의 방법은 카메라 1대 당 다수의 촬영이 필요하며 평면 패턴의 대응점들이 특정 위치에 물리지 않도록 주의해야 한다. 또한 촬영된 시퀀스가 critical motion sequence에 해당하지 않도록 충분히 복잡하게 카메라 포즈를 조정하며 평면 패턴을 촬영해야 한다. 이러한 작업의 복잡성으로 인하여 많은 수의 카메라를 캘리브레이션 하는데 상당한 시간이 소요되게 되는데, 이 문제는 추후 3차원 공간을 획득하기 위한 카메라 구조가 더욱 확장되어감에 따라 더욱 심각해질 것으로 예상된다.

본 논문에서는 물리적 평면 패턴의 포즈 변화를 대체하기 위해 가상의 공간에서 움직이는 평면 패턴을 LCD 디스플레이에 표시하는 카메라 캘리브레이션 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 가상 패턴 기반 카메라 캘리브레이션 개념

본 논문에서 제안하고자 하는 카메라 캘리브레이션은 그림 1과 같은 셋업에서 수행된다. 먼저 가상 공간 상에서 평행이동과 회전을 하는 체스보드 패턴을 가상 카메라로

촬영한 영상들을 생성한다. 촬영된 영상들은 캘리브레이션에 사용하고자 하는 LCD 디스플레이와 동일한 해상도로 생성된 뒤에 디스플레이에 표시된다. 가상 공간에서 체스보드 i -번째 격자점의 3차원 좌표를 $[\mathbf{x}_i^T \ 0]^T$ 로, 가상공간에서 체스보드 패턴의 움직임에 대응되는 homography 행렬을 H_v 로 표시하면, 해당 격자점은 다음을 만족하는 디스플레이 좌표 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 에 대응되게 된다:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim H_v \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

다음으로 캘리브레이션을 수행해야 하는 카메라는 디스플레이에 표시된 가상 패턴 영상을 촬영한 뒤, \mathbf{x}_i 에 대응되는 체스보드 격자점 \mathbf{u}_i 를 찾아 다음을 만족하는 homography 행렬 H 를 계산한다:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim H \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

\mathbf{u}_i 는 디스플레이 좌표 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 이 실제 카메라에 투사된 점이므로 아래의 식 또한 성립한다:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim K \begin{bmatrix} R | t \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_i \\ 1 \end{bmatrix} \sim K \begin{bmatrix} R | t \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_v \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ 1 \end{bmatrix} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\sim K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ 1 \end{bmatrix} H_v \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ 1 \end{bmatrix}.$$

여기에서 K 는 카메라 내부 파라미터 행렬, R 과 t 는 카메라 외부 파라미터를 나타내며, r_i 는 회전행렬 R 의 i -번째 열벡터를 의미한다. 일반적인 카메라 캘리브레이션과 상이한 부분은 H_v 가 삽입된 부분인데, 체스보드 영상 생성과정에서 이미 H_v 를 알고 있으므로 Zhang의 방법과 같이 회전행렬이 직교행렬이라는 점을 활용하면 내부 파라미터에 대한 제한조건들을 구할 수 있게 된다.

여기에서 LCD 디스플레이가 가상의 프로젝터를 모사하는 것과 같은 역할을 하고 있음에 주목하면, 사실 상기 과정이 카메라 기반 프로젝터 캘리브레이션의 inverse problem을 해결하는 과정이라는 것을 알 수 있다 [2, 3]. 차이점은 가상의 프로젝터가 완벽하게 캘리브레이션 되어있다는 점과 실제 프로젝터가 물리적으로 이동할 필요가 없다는 점이다. 또다른 관점에서 보면 상기 과정을 통해 해결하고자 하는 문제는 변형된 카메라 캘리브레이션 문제로, 카메라의 포즈가 변하는 것이 아니라 캘리브레이션 object의 구조가 투사변환에 의해 변형되는 경우로 볼 수 있다. 캘리브레이션 object가 2차원 물체이라는 점과 적용된 투사변환에 대한 정보를 가지고 있기 때문에 내부 파라미터에 대한 제한조건을 추출할 수 있다.

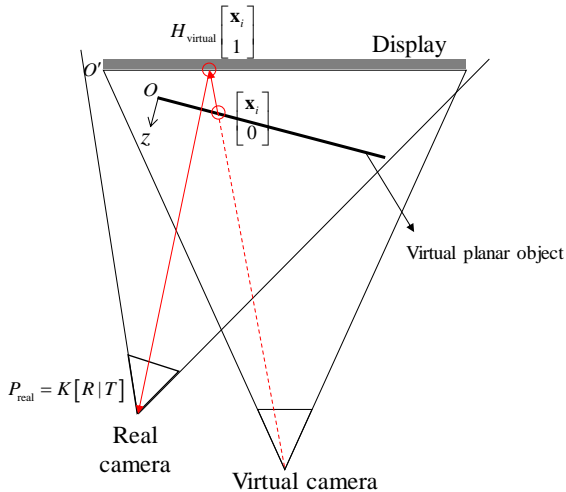


그림 1. 가상 체스보드의 격자점이 캘리브레이션을 수행하는 카메라에 이미징되는 과정

3. 캘리브레이션 알고리즘

여기서는 상기 셋업에서 카메라 파라미터를 추출하는 과정을 기술한다. 수식 (2)와 수식(3)을 종합하면 아래와 같이 쓸 수 있다:

$$K^{-1}H \sim [r_1 \ r_2 \ t]H_v \sim \begin{bmatrix} H_{v,11}r_1^t + H_{v,21}r_2^t + H_{v,31}t^t \\ H_{v,12}r_1^t + H_{v,22}r_2^t + H_{v,32}t^t \\ H_{v,13}r_1^t + H_{v,23}r_2^t + H_{v,33}t^t \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 $H_{v,ij}$ 는 H_v 의 (i,j) -th element를 의미한다. t 에 무관한 제한조건을 얻기 위해 elementary column operation으로 t 를 소거하면 아래와 같은 수식을 얻는다:

$$\begin{aligned} H_{v,32}K^{-1}h_1 - H_{v,31}K^{-1}h_2 &= s[(H_{v,11}H_{v,32} - H_{v,12}H_{v,31})r_1 \\ &\quad + (H_{v,21}H_{v,32} - H_{v,22}H_{v,31})r_2], \\ H_{v,33}K^{-1}h_2 - H_{v,32}K^{-1}h_3 &= s[(H_{v,12}H_{v,33} - H_{v,13}H_{v,32})r_1 \\ &\quad + (H_{v,22}H_{v,33} - H_{v,23}H_{v,32})r_2]. \end{aligned} \quad (5)$$

h_i 는 H 의 i -th 열벡터를, s 는 scalar를 의미한다. r_1 와 r_2 의 길이가 같고 내적이 0이라는 점을 이용하면 Zhang의 방법과 마찬가지로 $B = K^{-1}K$ 에 대한 제한조건 2개를 얻을 수 있다.

체스보드 영상 1장당 제한조건 2개를 얻으므로 3장 이상의 영상을 입력하면 대칭행렬 B 를 up to scale로 구할 수 있으며, 이것을 분해하면 카메라 내부 파라미터 행렬 K 를 구할 수 있다. K 가 구해지면 수식 (4)로부터 R, t 를 구할 수 있다.

여기에 더해 렌즈 왜곡을 고려하기 위한 카메라 파라미터 정제과정을 수행할 수 있다. 예를 들어, Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하여 내부 파라미터 행렬 K 와 외부 파라미터 R, t 그리고 왜곡계수들을 아래의 제투사 오류를 최소화하는 방향으로 정제할 수 있다:

$$E(K, R, t, d) = \sum_i \left| \mathbf{u}_i - \text{distort} \left(K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} H_v \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ 1 \end{bmatrix}, d \right) \right|^2 \quad (7)$$

여기에서 $\text{distort}(X)$ 는 동차 이미지 좌표를 왜곡된 좌표로 보내는 함수이고 d 는 왜곡 계수들을 나타낸다.

4. 결론

LCD 디스플레이와 가상 공간에서 회전과 평행이동을 하는 체스보드를 사용한 카메라 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 먼저 가상 체스보드의 격자점이 디스플레이에 표시되고 최종적으로 실제 카메라에 이미징되는 과정을 설명하였다. 이어서 기존의 캘리브레이션 알고리즘을 확장하여 가상 체스보드와 실제 카메라의 homography 행렬들로부터 카메라 파라미터를 추출할 수 있음을 보였다. 제안된 카메라 캘리브레이션 방법은 캘리브레이션 object나 카메라의 물리적 이동이 필요 없기 때문에 많은 수의 카메라를 보다 짧은 시간 내에 캘리브레이션 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정보(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2017-0-00072, 초실감 테라미디어를 위한 AV 부호화 및 LF 미디어 원천기술 개발)

참고문헌

- [1] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22(11), pp. 1330-1334, 2000.
- [2] Z. Huang, J. Xi, Y. Yu, and Q. Guo, "Accurate projector calibration based on a new point-to-point mapping relationship between the camera and projector images," Appl. Opt., vol. 53(3), pp. 347-356, 2015.
- [3] I. Din, H. Anwar, I. Syed, H. Zafar, L. Hasan, "Projector calibration for pattern projection systems," J. Appl. Res. and Technol., vol. 12(1), pp. 80-86, 2014.