

# Self-calibration의 초점 거리 추정에서 특징점 위치의 영향

정회원 홍 유 정\*, 종신회원 이 병 욱\*\*

## Impact of Feature Positions on Focal Length Estimation of Self-Calibration

Yoo-Jung Hong\* *Regular Member*, Byung-Uk Lee\*\* *Lifelong Member*

### 요 약

3차원 정보 복원이나 형상 복원, 가상 물체 삽입 등의 과정을 수행하기 위해서는 영상 촬영에 사용된 카메라의 위치와 방향, 그리고 초점 거리 등의 변수가 필요하다. 본 논문에서는 이차원 영상간의 대응관계를 이용하여 카메라 내부 변수인 초점 거리를 추정하는 셀프 캘리브레이션(self-calibration) 과정에서 특징점의 위치가 초점 거리 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 캘리브레이션에 사용하는 특징점과 주점과의 거리에 따라 초점 거리 추정 결과에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통하여 검증하고, 이를 바탕으로 오차 민감도를 줄일 수 있는 특징점 선택 방법을 제안한다.

**Key Words** : focal length, self-calibration

### ABSTRACT

Knowledge of camera parameters, such as position, orientation and focal length, is essential to 3D information recovery or virtual object insertion. This paper analyzes the error sensitivity of focal length due to position error of feature points which are employed for self-calibration. We verify the dependency of the focal length on the distance from the principal point to feature points with simulations, and propose a criterion for feature selection to reduce the error sensitivity.

### I. 서 론

카메라의 변수에는 카메라의 위치, 방향 등의 외부 변수(external parameter)와 초점거리, 화소 크기 등의 내부 변수(internal parameter)가 있다. 3차원 좌표를 알고 있고 이에 대응되는 영상의 2 차원 좌표를 구할 수 있는 경우, 이 대응 관계를 사용하여 카메라 변수를 계산하는 방법을 카메라 캘리브레이션이라고 한다.

지금까지 캘리브레이션에 관한 많은 연구는 카메라

의 내부 변수가 고정되어 있다고 가정하고 수행된 경우가 많았다. 하지만 영상 취득 과정에서 초점 거리와 같은 내부 변수는 카메라 주밍(zooming)의 동작에 의해 그 값이 변하는 경우가 흔히 발생한다.

셀프 캘리브레이션에서 초점 거리를 추정하는 가장 간편한 방법은 Bougnoux에 의해 제안된 방법<sup>[1]</sup>이 있다. 이 방법은 2차원 영상간의 대응점을 찾아서 계산한 기본 행렬(fundamental matrix)과 캘리브레이션에 사용된 두 영상에 대한 카메라 주점(camera principal point)을 이용하여 카메라의 초점 거

※ 본 연구는 대학 IT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음.

\* 이화여자대학교 정보통신학과 영상처리 연구실 (hyjj@hanafos.com), \*\* 이화여자대학교 정보통신학과 (bulee@ewha.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-02-089, 접수일자 : 2005년 2월 27일, 최종논문접수일자 : 2006년 3월 29일

리를 계산한다. 이 연구에서도 역시 카메라 주점을 영상의 중앙이라고 가정하였다. 하지만 카메라 주점은 실제로 정확하게 영상의 중앙에 위치하지 않으며 그 오차 값이 초점 거리 결과 값에 매우 큰 영향을 주기 때문에 정확한 초점 거리 계산을 위해서는 적합한 가정이 아니다<sup>2, 3</sup>. 따라서 이 방법을 사용할 경우, 특징점 좌표의 오차가 작고, 카메라 주점에 대한 정확한 예측이 가능할 경우에만 신뢰성 있는 초점 거리 예측이 가능하다<sup>4</sup>. 셀프 캘리브레이션에 기반을 두고 카메라의 내부 변수를 추정하는 방법은 셀프 캘리브레이션 자체의 불안정성과 내부 변수 추정 과정에서 발생하는 오차 성분 때문에 오차에 매우 민감한 특성을 보인다. 그러므로 보다 정확한 캘리브레이션 결과를 얻기 위해서는 내부 변수 추정 결과에 영향을 미치는 오차 성분에 대해 분석하고, 오차 민감도를 줄임으로써 내부 변수 추정 결과를 개선할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

기존의 초점 거리 계산 방법에서 초점 거리 예측에 영향을 주게 되는 오차 성분에는 다음과 같은 두 가지가 있다. 첫 번째는 카메라 주점의 위치를 잘못 예측함으로써 발생하는 오차이고, 두 번째는 캘리브레이션을 위해 사용한 영상의 특징점에 존재하는 오차이다. 첫 번째에 해당하는 카메라 주점의 위치 오차에 대한 분석은 Hartley의 논문<sup>2</sup>에서 기하학적인 분석을 통해 밝힌 바 있다. 그러나 특징점의 좌표에 존재하는 오차 성분이 초점 거리 예측에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 발표된 것이 없다. 특징점 좌표 값에는 카메라 렌즈의 왜곡에 의해 영상 취득 과정에서 발생하는 양자화 오차 등이 항상 존재하므로 정확한 값을 얻는다는 것이 실제적으로 불가능하다. 따라서 오차에 대한 민감도를 최대한 줄일 수 있는 방향으로 특징점을 선택하는 것이 신뢰성 있는 캘리브레이션 결과를 얻는 데에 매우 중요하다. 본 논문에서는 초점 거리 예측에 영향을 주는 두 번째 오차 성분인 특징점의 좌표 오차에 대해 분석하고, 오차의 크기뿐 아니라 오차의 방향이 카메라 초점 거리 예측 결과에 미치는 영향을 알아본다. 또한 영상에서 특징점의 위치에 따라 같은 오차 성분이라도 초점 거리 예측 결과 값이 미치는 영향이 다르다는 것을 증명하고, 이를 바탕으로 초점 거리 오차 민감도를 줄일 수 있는 특징점 선택 방법을 제안한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 초점 거리

추정 방법을 소개하고 3장에서는 특징점 좌표 오차의 방향을 분석한다. 4장에서는 영상에서 특징점의 위치에 따른 초점 거리 오차 민감도를 분석하고 특징점 선택 방법을 제안한다. 5장에서는 제안된 방법을 모의 실험을 통해 증명하고 결과를 분석한 후, 마지막으로 결론을 내린다.

## II. 초점 거리 추정 방법 소개

본 논문에서는 Bougnoux<sup>11</sup>가 제안한 초점 거리 추정 방법을 사용한다. 이 방법에서는 카메라 주점의 위치를 영상의 중심으로 고정하였다. 하지만 Hartley의 분석에 따르면 카메라 주점의 위치는 초점 거리를 결정하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. Hartley는 카메라 주점의 위치가 초점 거리의 오차에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라 주점의 위치를 잘못 예측할 경우 초점 거리 제공 값이 음수가 되는 잘못된 결과가 나올 수 있음을 보였다<sup>2</sup>. 여기에서는 Hartley의 기하학적인 분석에 따라서 초점 거리를 추정하는 방법을 소개한다.

영상으로부터 세 방향의 소실점<sup>5</sup>을 찾으면 소실점에 의해 결정되는 삼각형의 수심을 구할 수 있고 이것이 바로 카메라 주점이 된다. 세 점 중에서 수직 정점으로부터 나머지 두 소실점을 연결한 수평선까지 수선을 내렸을 때 수평선과 만나는 점을  $h$ 라 하고 수직 정점을  $v$ 라 하자. 이 때 카메라 주점은  $v$ 와  $h$ 의 연결선상에 존재하며 이것은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 이 때 초점 거리의 제공 값은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f^2 = -d(p, h) d(p, v) \tag{1}$$

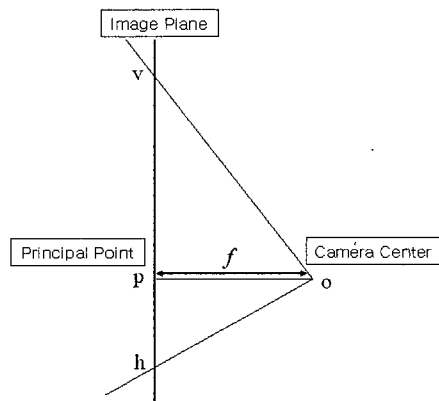


그림 1. 카메라의 주축을 포함하는 수직 단면

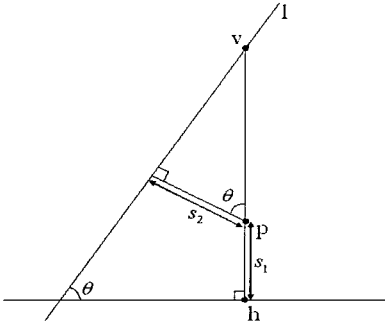


그림 2. 영상 평면 위의 직선 l을 이용하여  $d(p, v) = s_2 / \cos\theta$ 를 계산한다

그림 2와 같이 수직 정점으로부터 카메라 주점을 지나지 않으면서 수평선과 만나는 다른 직선 l을 정의하자. 이 때 식 (1)의  $d(p, v)$ 는 카메라 주점으로부터 직선 l까지의 거리  $s_2$ 와 수평선과 직선 l이 이루는 각도  $\theta$ 를 이용하면  $s_2/\cos\theta$ 과 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 식 (1)은 영상 평면상에 존재하는 수평선과 직선 l까지의 거리를 이용하여 아래 식과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$f^2 = -s_1 s_2 / \cos\theta \quad (2)$$

좌, 우 두 장의 영상을 사용하여 오른쪽 영상에서의 카메라 초점 거리를 구하는 경우에 대하여 생각해 보자. 그림 2를 우측 영상이라고 하고, 여기의 수평선은 왼쪽 영상의 카메라 주점에 해당하는 에피폴라 라인이라고 하자. 에피폴라 평면에 수직을 이루며 왼쪽 카메라의 중심을 통과하는 직선을 정의하였을 때, 그림 2의 직선 l은 이 직선을 포함하는 에피폴라 평면에 의해 오른쪽 영상에 그려지는 에피폴라 라인을 의미한다. 이 때 두 영상에서 카메라 주점의 위치를  $p_1$ 과  $p_2$ 라 하고 왼쪽 에피폴을  $e_1$ 이라 하면, 오른쪽 영상의 초점 거리 제곱 값은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 식 (3)은 앞의 식 (2)를 기본행렬 F와 에피폴, 카메라 주점을 이용해 에피폴라 기하(Epipolar Geometry)에 따라 나타낸 것이다. 본 논문에서는 이 식을 사용하여 초점거리를 구하였다. 다음 식에서  $[e_1]_x$ 는 벡터의 외적을 행렬의 곱으로 나타낸다.

$$\tilde{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad e_1 = (e_1, e_2, e_3)^T$$

$$[e_1]_x = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f_2^2 = - \frac{(p_1^T [e_1]_x \tilde{I} F^T p_2)(p_1^T F^T p_2)}{p_1^T ([e_1]_x \tilde{I} F^T \tilde{I} F) p_1} \quad (3)$$

### III. 특징점 오차의 방향

셀프 캘리브레이션에서 대응점으로 사용한 각 특징점 좌표의 오차가 초점 거리 추정 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 모든 특징점에 대해 같은 크기의 오차를 주고 각각의 특징점 오차에 대한 초점 거리 오차 민감도를 계산한다. 이 경우에 모든 특징점에 동일한 오차 환경을 제공하기 위해 오차의 크기뿐만 아니라 오차의 방향을 고려하는 것이 필요하다. 오차의 크기가 같아도 오차의 방향이 에피폴라 라인에 평행한가 혹은 수직인가에 따라서 결과에 미치는 영향은 달라지기 때문이다.

오차의 방향을 고려하기 위해서는 에피폴라 기하를 고려해야 한다. 에피폴라 제약 조건(Epipolar Constraint)에 의해 같은 장면에 대해 얻은 두 장의 영상은 점과 점 사이의 대응이 아닌 점과 선 사이의 대응 관계를 갖게 된다. 다시 말해 왼쪽 영상의 점 x는 오른쪽 영상의 에피폴라 라인 l'와 대응되며, 이 때 점 x의 대응점인 x'은 에피폴라 라인 l' 상에 존재한다. 두 영상으로부터 x와 x'이라는 특징점 쌍이 주어진 경우 특징점 x'에 있어서 에피폴라 라인 방향으로 오차가 발생하는 경우는 그림 3과 같다. 즉, 오른쪽 특징점의 위치가 x'에서 에피폴라 라인을 따라 오차가 발생하여 x1' 또는 x2'로 이동할 경우라 할지라도 에피폴라 제약 조건에 의한 점 x와 에피폴라 라인 l' 간의 대응관계는 그대로 유지

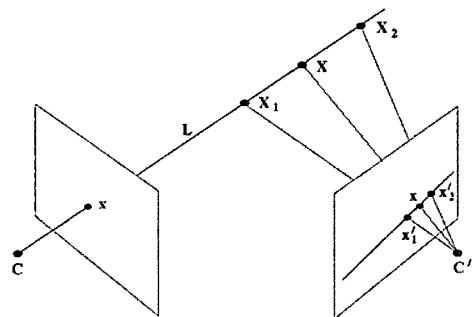


그림 3. 에피폴라 라인 상에서의 좌표 오차

된다. 특징점  $x'$ 을 오차에 의해  $x_1'$ 이나  $x_2'$ 으로 잘못 인식하면 공간상의 점  $X$ 가 에피폴라 평면 상에서 이동할 뿐이지 에피폴라 평면이나 에피폴라 라인, 에피폴라의 위치와 방향은 변함이 없다. 즉, 에피폴라 라인을 따라 발생한 오차는 기본행렬이나 초점 거리 예측 결과에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 논문에서는 특징점 위치에 같은 크기의 오차가 발생할 경우 그 방향이 에피폴라 라인과 수직을 이룰 때 기본행렬이나 초점 거리 예측에 미치는 영향이 최대가 되기 때문에 모든 특징점에 대해 에피폴라 라인에 수직인 방향으로 같은 크기의 오차를 주어서 그 오차가 초점 거리 추정에 미치는 영향을 분석하였다.

#### IV. 특징점 위치에 따른 초점거리 오차 민감도

본 논문에서는 기본 행렬과 카메라 주점의 위치를 이용해 초점 거리를 추정한다. 이 때 추정된 초점 거리 예측 결과에 Hartley가 분석한 바와 같이 카메라 주점의 위치를 잘못 예측함으로써 오차가 발생할 수 있다. 또한 기본 행렬을 추정하는데 사용한 특징점 좌표의 노이즈에 의한 오차 성분도 존재한다. 본 절에서는 특징점 좌표에 존재하는 오차 성분이 초점 거리 예측에 미치는 영향을 분석하고, 그것을 바탕으로 특징점의 위치에 따른 초점 거리 오차 민감도를 고려한 특징점 선택 방법을 제안한다.

그림 4는 영상에서 특징점의 위치가 초점 거리의 오차 민감도에 어떤 영향을 주는지를 설명하기 위한 것이다. 카메라 주점으로부터의 거리가 다른 두 점  $u_1$ 과  $u_2$ 에 대해 같은 크기의 오차  $\Delta u$ 가 존재한다고 할 때, 이 오차로 인해 초점 거리 결과에 유발되는 오차는 각각  $\Delta f_1$ 와  $\Delta f_2$ 가 된다. 이 때 그

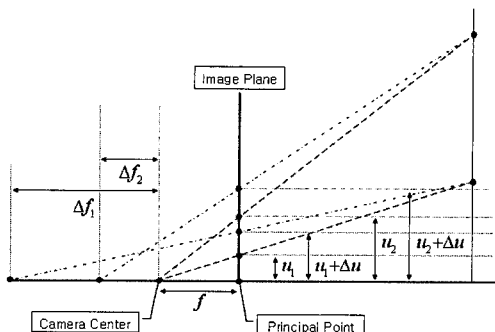


그림 4. 카메라 주점으로부터 거리가 다른 두 점의 오차 민감도

림으로부터

$$\Delta f_1 > \Delta f_2 \tag{4}$$

가 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 카메라 주점으로부터 가까이 위치하는 점의 오차에 따라서 초점 거리 추정 값이 민감하게 변한다.

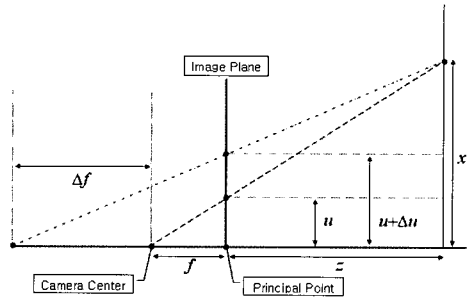


그림 5. 특징점 좌표에 오차가 발생할 경우의 초점 거리

식 (4)를 수식으로 증명하기 위해 대응점 좌표의 오차와 초점거리간의 관계를 분석한다. 공간상에 한 점을  $x$ 라 하고, 영상에서 이 점에 해당하는 좌표를  $u$ 라고 하자. 이 때 영상 좌표  $u$ 에  $\Delta u$ 만큼의 오차가 발생하였다고 하면, 이에 의하여 초점 거리  $f$ 에는  $\Delta f$ 만큼의 오차가 발생하게 된다. 그림 5에서  $f' = f + \Delta f$ 와  $u' = u + \Delta u$ 의 관계를 보여준다. 실제 캘리브레이션 과정에서는 여러 특징점 간의 대응 관계를 이용한다. 그러나 여기에서는 다른 특징점 들은 정확하다고 가정하고, 한 점에 대한 오차만을 생각하였다. 오차가 작은 경우 각 오차의 영향이 선형적으로 더해진다고 생각할 수 있다. 그림 5에서 공간상의 점  $x$ 는 일정하므로 아래와 같은 식을 유도할 수 있으며, 다음 두 식으로부터  $\Delta f$ 와  $\Delta u$ 사이의 관계를 유도할 수 있다.

$$f : u = f + z : x \Rightarrow x = \frac{u(f+z)}{f} \tag{5}$$

$$f' : u' = f' + z : x \Rightarrow x = \frac{u'(f'+z)}{f'} = \frac{(u+\Delta u)(f+\Delta f+z)}{f+\Delta f} \tag{6}$$

식 (5)와 (6)에서의  $x$ 가 동일한 점이므로 이를 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{\Delta f}{\Delta u} = \frac{f}{u} \left( \frac{f}{z} + \frac{\Delta f}{z} + 1 \right) \tag{7}$$

실제로 물체까지의 거리  $z$ 는  $f$ 와  $\Delta f$ 보다 매우 크므로 식 (7)의 우변에서  $f/z$ 와  $\Delta f/z$  항이 거의 무시된다고 가정하면 식 (7)을 간단히 정리할 수 있다.

$$\frac{\Delta f}{\Delta u} \approx \frac{f}{u} \quad (8)$$

즉, 영상 좌표의 오차  $\Delta u$ 에 의해 초점 거리 추정에서  $\Delta f$ 만큼의 오차가 발생하였을 때, 좌표 오차에 대한 초점 거리 결과 값의 민감도는  $f/u$ 에 비례한다. 따라서 초점 거리 추정에 사용된 특징점에 모두 같은 크기의 오차가 발생하여도 특징점의 위치에 따라서 좌표 오차가 초점 거리 추정 결과에 미치는 영향이 달라진다는 결론을 내릴 수 있다. 카메라 주점으로부터 가까이 위치하는 점일수록 좌표 오차에 대한 초점 거리 추정 값의 민감도는 증가한다.

실제로 카메라를 이용해 촬영한 영상에는 영상 취득 과정에서 여러 가지 요인에 의해 왜곡이 발생하므로 특징점 좌표에는 언제나 오차가 존재한다. 따라서 보다 정확한 초점 거리 추정을 위해서는 기본 행렬을 예측하기 위해 특징점을 선택할 때 이런 오차의 영향을 줄일 수 있도록 특징점을 선택하는 과정이 필요하다. 초점 거리 추정 시에 카메라 주점으로부터 가까이 위치한 점을 특징점 집합에서 제외함으로써 좌표 오차가 초점 거리 추정 결과에 미치는 영향을 줄이는 것이 가능하다.

### V. 실험 결과 및 분석

실험을 위해 9개의 대응점으로 구성된 실험 영상을 사용하였다. 카메라 주점으로부터 거리에 따른 오차 민감도를 비교하기 위해 9개의 대응점이 카메라 주점으로부터 가까운 거리부터 먼 거리까지 고르게 위치하도록 실험 좌표를 그림 6과 같이 구성하였다. 9개의 대응점 중 단 하나의 점에 오차를 주었을 경우, 이 때 계산한 초점 거리 결과 값을 실험 좌표 생성 시 사용한 초점 거리 값과 비교하면 오차의 영향을 분석할 수 있다. 이 과정을 9개의 특징점에 대해 같은 크기의 오차를 주면서 반복하였다.

각 점에 대한 오차를 줄 때 정확한 비교를 위해 모든 좌표에 대해 같은 크기의 오차를 줘야 한다. 이 때 앞에서 분석한 바와 같이 오차의 크기뿐 아니라 오차의 방향도 고려해야 하므로 해당 점을 지나는 에피폴라 라인에 수직인 방향으로 같은 크기의 오차를 주어 실험 하였다.

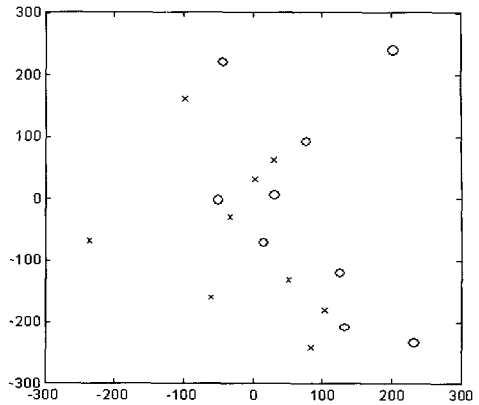


그림 6. 실험에 사용된 특징점 좌표(x: 좌측 영상 특징점, o: 우측영상 특징점 좌표)

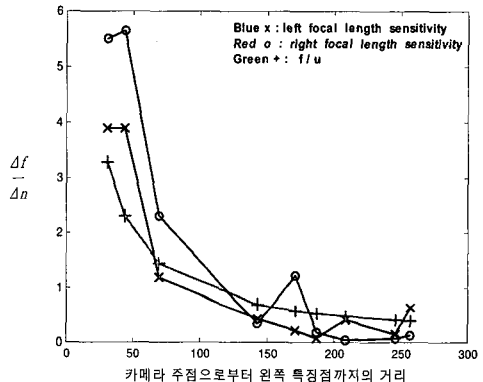


그림 7. 왼쪽 주점으로부터의 거리에 따른 초점거리 오차 민감도

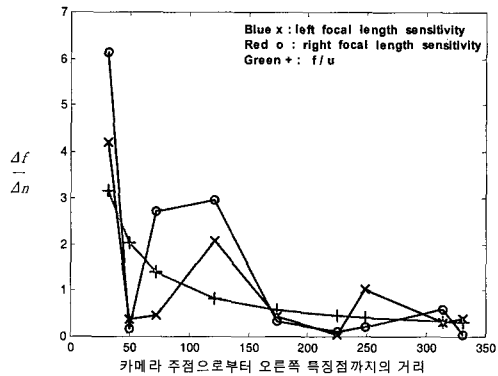


그림 8. 오른쪽 주점으로부터의 거리에 따른 초점거리 오차 민감도

그림 7과 그림 8은 각각 왼쪽과 오른쪽의 영상에 대해 9개 특징점을 카메라 주점으로부터 가까이 있는 점부터 오차를 주어 초점 거리의 오차 민감도를 본 것이다. 그래프에서 +로 표시된 선은 식 (8)에서

의  $f/u$ 를 나타낸다. 즉 초점 거리를 카메라 주점으로부터 각 특징점까지의 거리로 나눈 것이다. 이 곡선을 각 점에서의 오차 민감도를 나타내는 나머지 두 곡선과 비교함으로써 식 (8)이 성립하는 것을 확인하였다.

위의 두 그래프를 보면 식 (8)의  $\Delta f/\Delta u \approx f/u$  과 같은 경향을 나타내지 않는 몇 개의 특징점이 존재한다. 이것의 원인을 분석해 보면 다음과 같다. 셀프 캘리브레이션은 기준이 되는 고정 좌표계가 존재하지 않는다. 대신 두 개의 카메라 좌표계 중 하나를 기준으로 삼아 기준에 대한 다른 카메라 좌표계의 상대적인 위치와 방향을 구하게 된다. 즉, 모든 것에 대해 고정되어 있는 기준이 존재하는 것이 아니라 매번 새로운 기준 좌표계가 생성되고, 그 좌표계에 대해 상대적인 위치와 방향 값을 가지고 다른 하나의 카메라 좌표계를 구성한다. 우리는 각 특징점의 오차 성분에 대해 초점 거리의 변화만을 고려하였다. 그러나 실제로는 영상 평면의 오리엔테이션이나 카메라 주축(principal axis)의 방향, 3차원 공간 좌표 등이 특징점에 발생한 오차에 의해 매번 변하게 된다. 이러한 요소들의 이동은 에피폴라 기하에 변화를 가져오며, 따라서 초점 거리에도 영향을 미치게 된다. 따라서 오차 민감도 식을 모델링할 때에 반영하지 못한 공간상의 에피폴라 라인의 변화로 인하여 제안된 오차 민감도와는 다른 현상이 나타나며, 식 (8)이 정확하게 성립하지 못한다.

그러나 카메라 주점으로부터 가까운 점일수록 그 점에 발생한 오차가 초점거리 예측 결과에 미치는 영향이 매우 크다는 사실은 두 개의 실험 그래프로부터 분명히 확인할 수 있다. 실제 영상에서는 모든 점에 있어서 오차 성분이 존재한다. 따라서 기본 행렬 예측을 위해 특징점을 선택할 때 오차에 대한 민감도가 높은 점들을 특징점 후보에서 제외하면 신뢰성 있는 결과를 얻는데 큰 도움이 된다. 스테레오 영상으로부터 여러 개의 대응점을 얻을 수 있는 경우, 카메라 주점 주변에 위치하는 점들을 특징점 집합에서 제외함으로써 영상 좌표에 존재하는 잡음이 초점 거리 예측 결과에 미치는 영향을 줄일 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 3차원 복원을 위해 초점 거리를 추정하는 과정에서 특징점 오차가 주는 영향을 분석하였다. 특징점 오차 성분을 에피폴라 라인 방

과 그에 수직인 성분으로 나누고, 에피폴라 라인 방향의 오차는 카메라 파라미터에 전혀 영향을 미치지 않는 것을 보였다. 또한 특징점에 에피폴라 라인에 대한 수직 방향의 오차가 발생할 때 초점 거리의 오차 민감도는 카메라 주점으로부터 특징점까지의 거리와 반비례 관계를 갖는다는 것을 간단한 식으로 유도하였다. 시뮬레이션을 통해 특징점이 카메라 주점으로부터 가까이 위치할수록 같은 크기의 오차에 대한 초점 거리 추정 값의 오차 민감도가 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 셀프 캘리브레이션 과정에서 카메라 주점과 가까이 위치하는 점들을 특징점 집합에서 제외함으로써 더욱 신뢰성 있는 초점거리 예측 결과를 얻을 수 있다.

3차원 복원에 있어서 초점 거리 추정은 매우 중요한 의미를 갖는다. 대부분의 실제 영상은 캘리브레이션 과정에서의 가중과는 다르게 주밍(zooming)과 포커싱(focusing)과 같은 내부 변수의 변화가 발생하므로, 3차원 복원을 위해서는 초점 거리의 정확한 추정이 필수적이다. 추가적으로는 초점 거리 추정에 있어 두 가지 오차 성분인 카메라 주점의 위치 오차와 특징점의 좌표 오차 각각에 대해 초점 거리 오차 민감도를 비교 분석해 볼 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 더 큰 영향을 주는 오차 요인을 명확히 하여 초점 거리 추정에 활용한다면 보다 정확한 3차원 복원 결과를 얻는 것이 가능하다.

## 참고 문헌

- [1] S. Bougnou, "Projective to Euclidean space under any practical situation, a criticism of self-calibration," *In Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay, India*, pp. 790-796, January 1998.
- [2] Richard I. Hartley, Robert Kaucic, "Sensitivity of Calibration to Principal Point Position," *EECV*, pp. 433-446, May 2002.
- [3] 오인환, 윤용인, 최중수, "비 교정 영상에서의 영상합성을 위한 카메라 정보 복원에 관한 연구," *한국통신학회논문지*, Vol. 29, No. 2C, pp. 229-237, Feb. 2004.
- [4] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2000.
- [5] 김중수, 김태용, 최중수, "기하학 정보와 객체 추출을 통한 실시간 높이 측정," *한국통신학*

회논문지, Vol. 29, No. 12C, pp. 1652-1659, Dec. 2004.

[6] Richard I. Hartley, "In Defence of the Eight-Point Algorithm," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 6, pp. 580-593, June 1997.

[7] Richard I. Hartley, "Extraction of focal lengths from the fundamental matrix," Technical report, G.E. CRD, Schenectady, NY, 1993.

[8] Richard I. Hartley, "Estimation of Relative Camera Positions for Uncalibrated Cameras," *ECCV*, pp. 579-587, May 1992.

[9] A. Ruiz, P.E. Lopez de Teruel, G. Garcia-Mateos, "A Note on Principal Point Estimability," *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 304-307, Quebec, Canada, 2002.

[10] R. I. Hartley, "Kruppa's equations derived from the fundamental matrix," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 2, pp. 133-135, February 1997.

홍 유 정 (Yoo-Jung Hong)

정회원



2002년 2월 이화여자대학교 정보통신학과 졸업

2004년 2월 이화여자대학교 정보통신학과 석사

2004년 2월~현재 삼성전자 디지털 미디어 총괄 AV 사업부 <관심분야> 영상처리, 영상인식

이 병 옥 (Byung-Uk Lee)

종신회원

이화여자대학교 정보통신학과 교수

한국통신학회 논문지 제 22권 6호 참조