

# 카메라 회전을 이용한 능동적인 캘리브레이션 기법에 관한 연구

유원필, 정연구

한국전자통신연구원 컴퓨터.소프트웨어 연구소 컴퓨터비전연구팀  
e-mail : ywp@etri.re.kr

## A Study on Active Calibration Technique for Rotating Camera

Wonpil Yu, Yunkoo Chung

ETRI, Computer & Software Research Laboratory, Computer Vision Research Team

### 요 약

본 논문에서는 pan/tilt 회전이 가능한 카메라 시스템을 이용한 캘리브레이션 기법에 대하여 소개한다. 제안된 방법을 이용하여 optical center, 초점거리를 추정할 수 있다. 캘리브레이션 대상물체는 포인트(point)특징점을 이용하고 있으며 카메라 구동부에서 제공되는 각도 정보를 이용하여 캘리브레이션 대상 물체에 대한 기하학적 사전 지식이나 3 차원 정보를 필요로 하지 않는다. 각각의 캘리브레이션 파라메터를 구하기 위해서 두 프레임의 필요로 한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 캘리브레이션 방법의 실용 가능성을 보인다.

### 1. 서론

카메라 캘리브레이션은 컴퓨터 비전 연구에 있어서 매우 오래된 문제이면서 현재까지도 계속해서 연구되고 있는 카메라 영상을 이용하여 카메라의 외부 변수(extrinsic parameters)와 내부 변수(intrinsic parameters)를 추정하는 분야를 일컫는다. 전통적인 캘리브레이션 방식에서는 기하학적인 형태나 3 차원 정보를 미리 알고 있는 캘리브레이션용 대상체의 2 차원 이미지를 이용하여 카메라 외부 변수와 내부 변수를 추정한다[6]. 카메라를 이용한 3 차원 거리 측정, 형상 복원, 영상 합성 등의 과정을 수행하기 위해 캘리브레이션 과정은 필수적인 단계이지만 작업 과정은 상당한 노력과 인내가 필요하며 특히 캘리브레이션 대상 물체에 대한 정교성이 요구되는 등 매우 세심한 배려가 필요한 부분이다. 하지만, 주밍(zooming)이나 카메라 모션, 자동 포커싱 등 카메라의 능동적인 움직임에 의한 3 차원 정보 추출이나 로봇 네비게이션, 3 차원 형상 복원 등 자동화가 필요한 부분에 있어서 각 파라메타의 변화시 마다 캘리브레이션을 다시 수행하는 것은 매우 곤란한 일이다. 카메라 내부 변수의 경우 해당 시스템이 동작하는 동안에는 변하지 않으나 초점거리는 최

근의 주밍을 이용한 적용 사례가 늘어나면서 간단하게 현장에서 캘리브레이션을 해야 할 필요성이 증대되고 있다[7].

이러한 요구에 의해 최근에는 카메라 영상만을 이용하여 이미지상의 특징점을 추출하고 카메라 영상을 획득한 관점(viewpoint)간의 관계를 자동으로 추출하려는 연구가 진행되고 있다[2, 6]. 이것은 소위 "self-calibration" 방식으로 분류할 수 있는 것으로서 캘리브레이션 방식 자체에 대한 수고를 덜기 위한 것으로 생각할 수 있다. 그 중에서 특히 주목을 끄는 것은 카메라 자체의 움직임을 이용한 것으로서 현재 pan/tilt 정도의 회전은 손쉽게 제어할 수 있으므로 특히 로봇 텍스 분야에서 상당한 논문이 발표되고 있는 실정이다.

한편, 최근의 PC 산업의 동향은 기존의 데스크탑 기반에서 PDA, Pocket PC 등 이른바 차세대 PC(Post-PC)로 분류되어지는 다양한 형태의 정보 단말이 출현하고 있다. 특히 카메라는 이러한 정보 단말기에 액세서리 형태로 사용자의 필요에 따라 구입할 수 있으며 현재의 정보 통신 인프라를 이용할 수 있는 영상 정보처리 서비스에 대한 요구가 크게 증대하고 있는 실정이다. 본 연구에서 제안하는 캘리브레이션 기법은

이러한 시대적 추세에 대응하여 일반 사용자들도 손쉽게 사용할 수 있는 캘리브레이션 기법을 개발하고자 하는 의도하에 시도된 것이다.

본 논문에서는 캘리브레이션 대상 물체에 대한 제한을 없애고 영상 작업 중에도 필요시 마다 매우 간단하게 캘리브레이션을 할 수 있는 기법에 대해 소개하고자 한다. 제안된 방법에서 미리 주어지는 정보는 pan/tilt 각도에 대한 정보이며 현재의 기술 수준이나 가격을 고려해 볼 때 실용적인 가정이라고 여겨진다.

본 논문의 2 절에서는 pan/tilt 회전이 가능한 카메라의 회전시 이미지 상에서의 특징점의 궤적에 대한 모델링을 소개한다. 3 절에서는 2 절에서 소개한 모델링에 기반한 새로운 캘리브레이션 기법을 소개하며 4 절에서 제안된 방법에서의 오차의 특성을 시뮬레이션을 통해 나타낸다. 제안된 방법에 대한 논의와 추후 연구 과제를 5 절에 나타내었다.

2. 카메라 모델링

본 연구에서는 컴퓨터 비전 연구에서 적용되는 핀홀(pinhole)카메라 모델을 적용하고 카메라의 회전을 포함한 식을 유도한다. 대부분의 경우에 카메라 좌표계는 렌즈의 중심에 위치하고 있으며 결과적으로 레퍼런스 좌표계와 카메라 좌표계간의 관계는 두 좌표계간의 회전과 거리벡터로 나타내어진다. 카메라가 장착된 김발(gimbal)의 회전중심으로부터 표현되는 카메라 좌표계간의 관계는 회전중심과 카메라 렌즈간의 물리적인 거리가 존재하기 때문에 pan/tilt 인 경우에는 그림 1 과 같이 모델링 할 수 있다.

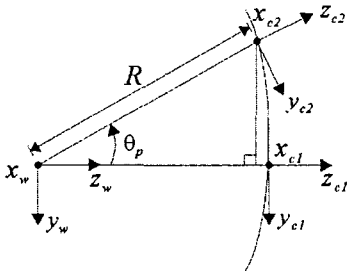


그림 1. 카메라 회전 모델링

그림 1 에서 카메라 구동축 \$\{x\_w, y\_w, z\_w\}\$ 과 카메라 좌표축 \$\{x\_c, y\_c, z\_c\}\$ 간의 변위는 \$R\$ 로 표시되었다. \$R=0\$ 이거나 카메라가 소실점(vanishing point)을 트래킹하는 경우에는 두 좌표계가 일치하는 것으로 간주할 수 있다. Pan 모션에 의해 발생하는 초기 위치에서의 카메라 좌표축과 회전 후의 좌표축간의 변이차는 다음 식으로 표현된다.

$$T = [\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z]^T = [0, R \sin \theta_p, -R(1 - \cos \theta_p)]^T \quad (1)$$

공간상에 위치한 캘리브레이션 포인트를 그림 1 에서와 같이 초기 위치에서 \$\theta\_p\$ 각도만큼 \$x\_w\$ 축을 중심으로 회전하는 경우 회전 후에 카메라 좌표계에 의한 표현

식은 다음과 같다.

$$X_{c1} = R_p(X_{c0} + T)$$

Pan 모션인 경우에 위의 식을 전개하면 다음과 같다.

$$u_2 = f_x \frac{x_c}{-(y_c + \Delta T_y) \sin \theta_p + (z_c + \Delta T_z) \cos \theta_p} + u_0,$$

$$v_2 = f_y \frac{(y_c + \Delta T_y) \cos \theta_p + (z_c + \Delta T_z) \sin \theta_p}{-(y_c + \Delta T_y) \sin \theta_p + (z_c + \Delta T_z) \cos \theta_p} + v_0.$$

여기서 \$(u\_2, v\_2)\$는 이미지 상에서의 포인트 특징점이 맺힌 좌표를 나타낸다.

Tilt 모션인 경우에도 pan 모션에서와 같은 방식으로 아래 식을 유도할 수 있다.

$$u_2 = f_x \frac{(x_c + \Delta T_x) \cos \theta_t - (z_c + \Delta T_z) \sin \theta_t}{-(x_c + \Delta T_x) \sin \theta_t + (z_c + \Delta T_z) \cos \theta_t} + u_0,$$

$$v_2 = f_y \frac{y_c}{-(x_c + \Delta T_x) \sin \theta_t + (z_c + \Delta T_z) \cos \theta_t} + v_0.$$

위의 두 식에서 \$(u\_0, v\_0)\$은 카메라 중심의 어긋남을 나타내는 양이다. 본 캘리브레이션 방법에서 구하고자 하는 변수는 \$(u\_0, v\_0), (f\_x, f\_y)\$로서 카메라 픽셀의 skew 파라메타는 다루지 않는다. 대부분의 경우에 skew 파라메타는 1로 가정하더라도 큰 무리가 없는 경우가 많다.

3. 카메라 캘리브레이션

앞에서도 밝혔듯이 카메라의 회전각은 모터 회전각으로부터 알고 있다고 가정하였기 때문에 위의 카메라 회전식은 pan 인 경우에 다음과 같이 유도할 수 있다. 이 결과는 tilt 인 경우에도 마찬가지로 적용할 수 있다.

$$u_2 = f_x \frac{x_c/z_c}{-(y_c/z_c + \Delta T_y/z_c) \sin \theta_p + (1 + \Delta T_z/z_c) \cos \theta_p} + u_0$$

$$\cong \frac{u_1}{-v_1 \sin \theta_p + \cos \theta_p} + u_0$$

위의 식에서 \$z\_c\$가 충분히 큰 경우에 \$\Delta T\_y/z\_c, \Delta T\_z/z\_c\$는 무시할 수 있다고 가정하였다. 4 절에서 \$z\_c\$의 크기에 따른 캘리브레이션 결과의 정확성에 대해 설명하기로 한다. \$(u\_1, v\_1)\$는 카메라의 회전이 발생하기 전의 이미지 좌표값을 나타낸다.

$$u_1 = f_x \frac{x_c}{z_c} + u_0,$$

$$v_1 = f_y \frac{y_c}{z_c} + v_0.$$

\$v\_2\$도 마찬가지로 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$v_2 = \frac{v_1 \cos \theta_p + f_y \sin \theta_p}{-v_1 \sin \theta_p + \cos \theta_p} + v_0 = \frac{v_1 \cos \theta_p + f_y \sin \theta_p}{u_1/u_2} + v_0$$

제한된 캘리브레이션 방법에서는  $(u_0, v_0)$  값이  $(0, 0)$  이라고 가정한 상태에서 이미지 좌표 방향으로의 초점 거리를 먼저 구한다. 이 때 구해진 값을 이용하여  $(u_0, v_0)$  값을 구하는 절차를 취한다.

Pan 회전각을 알고 있는 경우에 위의 식으로부터  $f_x$  는 다음과 같이 구해진다.

$$f_y = \left( \frac{v_2 u_1}{u_2} - v_1 \cos \theta_p \right) / \sin \theta_p. \quad (2)$$

이미 알려진 바와 같이 pan 모션에서는  $f_y$  만을 구할 수 있으며  $f_x$  를 구하기 위해서는 tilt 모션을 취해야 한다. 이런 방식을 취한 이유는  $u_0$  를 계산에 포함하더라도  $v_2, v_1$  의 값에 비해 상대적으로 작은 값을 가지기 때문이다. 대부분의 경우에  $u_0$  의 값은 10 픽셀 내외의 값을 유지하기 때문이다.  $f_y$  를 구한 상태에서는  $v_0$  의 값을 구할 수 있다.

$v_0$  를 구하는 것은  $v_2$  를 구하는 식과  $v_1$  를 구하는 식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\sin \theta_p v_0^2 - (v_1 + v_2) \sin \theta_p v_0 + (v_1 - v_2) f_y \cos \theta_p + f_y^2 \sin \theta_p + v_1 v_2 \sin \theta_p = 0. \quad (3)$$

위의 식에서 생기는 두 개의 근 중에서 작은 쪽을 취하여  $v_0$  를 구할 수 있다. Tilt 모션인 경우에도 같은 방식으로  $u_0, f_x$  를 구할 수 있으며 아래에 그 결과만을 나타내었다.

$$f_x = \left( u_1 - \frac{u_2 v_1}{v_2} \right) / \sin \theta_t.$$

$$\sin \theta_t u_0^2 - (u_1 + u_2) \sin \theta_t u_0 + (u_2 - u_1) f_x \cos \theta_t + f_x^2 \sin \theta_t + u_1 u_2 \sin \theta_t = 0.$$

#### 4. 시뮬레이션

본 절에서는 3 절에서 소개한 캘리브레이션 방법의 성능을 살펴보기 위해 수행한 시뮬레이션 결과에 대해 소개하기로 한다. 시뮬레이션에 사용된 영상시스템 파라메타는 12 mm 렌즈(Navitara 사의 DO1212), TM-6710(Pulnix)의 제조사 데이터를 참고하여 카메라의 물리적 파라메타를 설정하였고 pan/tilt 기구의 물리적 크기는 directed perception 사의 PTU-46-70 의 데이터를 참고하였다. 이 때 pan/tilt 의 회전 중심으로부터 카메라 좌표 중심까지의 거리 벡터는 위의 물리적 데이터를 고려하여  $[0.0964, 0, 0.0719]^T$  (m)로 정하였다. CCD 소자의 데이터로부터 시뮬레이션에 사용한 scale factor 는  $k_v = (648/512) \times 10^6 / 9$ ,  $k_u = 10^6 / 9$ 로 설정하였다.

먼저 카메라의 회전축과 렌즈 중심간의 거리(R)가 0 인 경우에 대해 카메라가 pan 모션을 취함에 따라 3 차원 상의 점이 이미지 평면상에 그리는 패적에 대해 살펴보면 그림 2 와 같다. 이 때 카메라는 소실점을 트래킹 하고 있다고도 볼 수 있다. 이 때 3 차원 공간 상의 점은  $(0.1, 0.1, 3)$ m 에 위치하고 있다고 가정하였다.

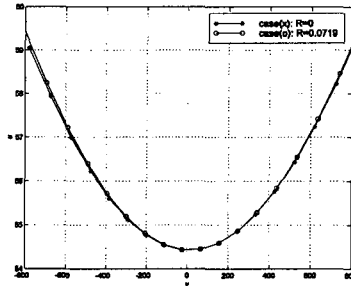


그림 2.  $-27^\circ \sim 24^\circ$  의 범위를  $3^\circ$  간격으로 pan 모션을 취했을 때의 이미지 상에서의 패적. '\*'으로 표시된 것은 소실점 혹은 R=0 인 경우, 'o'으로 표시된 것은 R = 0.0719 m 인 경우를 나타낸다.

그림 2 는 이미지 캡처 하드웨어에서의 A/D 변환시의 양자화 효과를 무시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각도가 15 도 이상을 벗어나면 이미지 버퍼의 영역을 벗어날 뿐만 아니라 R 의 효과에 의해 오차가 점점 커짐을 알 수 있다. 이것은 식 (1)에서 각이 커짐에 따라 y 축 방향의 오프셋을 무시할 수 없기 때문이다. 또한 양자화 효과를 고려하면 위의 패적은 오차가 매우 커지게 되어 실제 캘리브레이션의 결과에 상당한 영향을 미치게 된다. 이러한 사실로부터 실제 캘리브레이션을 수행하는 경우 첫 번째 위치로부터 pan 모션을 취하는 경우 각도는 10 도 이내로 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

R 이 0 이 아닌 경우에  $f_y$  을 구하는 경우에 대해 살펴보기로 하자. 이 때 이미지 버퍼 중심의 오프셋은 각각  $u_0 = 10, v_0 = 10$  픽셀을 가진다고 가정하였다. 식 (2)에 의하여 3 차원 공간상의 점의 위치를  $z=1$  에서 20 m 까지 변화시켰을 때  $f_y$  의 추정값을 그림 3 에 나타내었다. 이 때, 회전각은  $2^\circ$ ,  $x=0.1, y=0.2$  m 로 설정한 것이다.

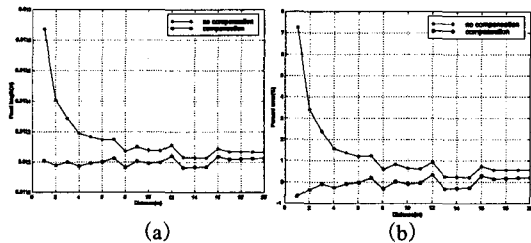


그림 3. 3 차원 공간상의 점의 위치가 1 m 에서 20 m 으로 변화할 때  $f_y$  추정치의 변화.

그림 3 의 (a), (b)에 거리에 따른 초점거리의 변화와 오차 백분율을 보이고 있다('no compensation'에 해당). 그림 3 에서 알 수 있듯이 거리가 증가할수록 초점거리에 대한 추정치는 참값에 근접함을 알 수 있다. 거리 3, 6, 15 m 에서 오차는 각각 0.0003, 0.0002, 0.0001m 로 2.5, 1.67, 0.83%오차를 보이고 있다.

캘리브레이션 작업을 수행하는 거리가 대부분의 경우에 3~5 m인 점을 고려하면 3%이내의 오차를 제공하고 있음을 알 수 있다. 소실점을 이용하는 경우 보다 더 나은 성능(3~5m 인 경우에 0.3%이내의 오차율)을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 카메라 중심오차( $u_0, v_0$ )의 변화에 영향을 거의 받지 않는다.  $u_0, v_0$  값을 (0,0)으로 가정했을 경우와 (10,10)으로 가정한 경우의  $f_y$ 의 변화율은 그림 3의 시뮬레이션 설정에서 (0,0)인 경우와 비교하여 3~5 m 범위 내에서 최대 0.183%이내의 변화만을 보였다. 이러한 현상은 식 (2)에서 pan 모션인 경우에  $u_1, u_2$ 는 거의 변화가 없게 되고 회전 각도가 작은 경우에 (2)식에서  $u_0$ 는 분자항에서 상쇄되어 버리기 때문으로도 생각할 수 있다. 한편, 시뮬레이션 설정에서 이미지 획득시의 A/D 양자화효과를 고려하여 이미지 resampling 효과를 적용하여 0.1 픽셀의 정밀도를 준 경우와 원래의 이미지를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교한 경우에도 큰 변화를 보이지 않았다. 즉, 3~5m 범위내에서 이미지 interpolation 효과는 최대 0.8%변화율을 보였다. 보다 더 정확한  $f_y$  값을 구하고자 하는 경우에는 카메라 회전축과 렌즈 중심간의 거리(R)를 보상해 주어야 한다. 3 차원 공간상에 위치한 포인트 특징점과 렌즈 중심간의 거리( $z_s$ )를 알고 있고 R 을 알고 있다고 가정했을 경우에는 다음의 식에 의하여  $f_y$ 를 구할 수 있다.

$$f_y = \frac{v_2 u_1 / u_2 - v_1 \cos \theta_p}{T_y \cos \theta_p / z_s + \sin \theta_p}$$

이 때의 에러율은 0.02%이내로 발생하였고 이처럼 3 차원 정보를 하나 추가함으로써 상당한 성능 개선 효과를 볼 수 있다. 그림 3에서 'compensation'로 표시한 그림이 이 때의 결과에 해당한다.

$u_0, v_0$ 의 값을 추정하는 경우에는  $f_y$ 를 구하는 과정에서 나타난 수치 계산상의 안정성이 매우 떨어진다. 이것은 카메라 중심 좌표값의 오프셋이 대부분 10 픽셀 이내로 생각할 수 있으며 식 (3)에서도 알 수 있듯이  $f_y$ 의 값은  $v_0$ 에 비해 매우 크기 때문에 아주 작은 오차에 의해서도  $v_0$ 의 값은 큰 변화율을 보이게 된다.  $u_0, v_0$ 의 값을 구하기 위해서는 포인트 특징점의 이미지의 위치에 대한 정확도와  $f_y$  값의 정확도에 의해 큰 영향을 받게 되므로 수치 계산상으로 보다 강건한 알고리즘의 개발이 필요하다.

캘리브레이션 결과의 성능을 살펴보기 위해 카메라 중심의 어긋남을 (10, 10)픽셀로 설정하고 3 차원 공간상의 포인트 특징점의 z 축상의 위치는 3 m로 설정하였다. 캘리브레이션으로 구한 파라미터를 이용하여 역계산을 한 결과  $x_c, y_c$  축으로부터 멀어질수록 거리 오차가 줄어드는 현상을 보였다. 이 때의 오차는 0.1 m 이내의 값을 가짐을 확인하였다. 소실점을 이용하는 경우에는 당연한 결과로 거리 오차가 더욱 감소하였으며 최종적으로 카메라 중심의 어긋남에 의한 효과만을 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 카메라의 회전을 이용하여 두 장의 이미지에서 추출한 포인트 특징점을 이용하는 캘리브레이션 방법에 대해 소개하였다. 본 방법의 특징은 캘리브레이션을 위한 페퍼런스 대상체가 필요없다는 장점을 가지며 추적해야 할 특징점의 개수가 하나만 필요하다는 간편함을 가진다.

본 연구에서 카메라 캘리브레이션에 관한 기존의 방법을 바탕으로 보다 간편한 방법을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 캘리브레이션 파라미터 추정 성능을 보였다. 카메라 중심의 어긋남에 대한 보정은 수치 계산상의 안정성이 떨어짐을 보였으나 초점 거리에 대한 추정 방식은 상대적으로 안정적인 성능을 보였다.

$u_0, v_0$ 를 정확히 측정하기 위한 방법으로 [7]에서 소개된 주밍효과를 이용한 방법과 같이 초점거리를 구하는 방식과는 다른 정밀한 캘리브레이션이 필요하다.  $u_0, v_0$ 를 구하는 방식과 초점거리를 구하는 방식은 별개의 과정으로 여길 수 있으므로 이 때 구해진 카메라 중심위치를 이용하여 더 정확한 값을 얻을 수 있다.

앞으로의 연구 과제로 카메라 파라미터의 정확도를 높이는 방법에 대한 것과 실험을 통한 제안된 방법의 검증, 카메라 회전 각도에 대한 정보를 이용하지 않고도 캘리브레이션을 할 수 있는 방법에 대한 것을 들 수 있다. 이러한 방식을 통해서 비로소 다양한 환경에서도 임의의 대상체를 이용한 캘리브레이션이 가능해질 것이며 향후 Post-PC에 적용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] P. F. McLauchlan and D. W. Murray, "Active Camera Calibration for Head-Eye Platform Using the Variable State-Dimension Filter," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, no. 1, pp. 15—21, 1996.
- [2] Anup Basu, "Active Calibration of Cameras: Theory and Implementation," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, no. 2, pp. 256—265, 1995.
- [3] K. Daniilidis and J. Ernst, "Active Intrinsic Calibration Using Vanishing Points," *IEEE Int. Conf. On Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 708—713, 1996.
- [4] Prazdny, "Determining the Instantaneous Direction of Motion From Optical Flow Generated by a Curvilinearly Moving Observer," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 17, pp. 238—248, 1981.
- [5] R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323—344, 1987.
- [6] W. Yu, et al., "Self Calibration of Focal Length and Rotation Parameters Using Cross Ratio," *IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, pp. 1828—1833, 1998.
- [7] J. Lavest, et al., "Three Dimensional Reconstruction by Zooming," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, no. 2, pp. 196—207, 1993.