

정밀영상 획득을 위한 카메라와 로봇 보정에 관한 연구

A Study of Camera and Robot Calibration for Fine Image Acquisition

정 원* · 박 종 락**
Won Jung · Jong-Rak Park

Abstract- 줌렌즈 카메라 보정은 매우 중요하고 적어도 두 가지 면에서 어려운 문제이다. 첫 번째는 실시간의 변화에 따라 카메라 내부 파라미터의 보정이고 두 번째는 단일 렌즈 시스템의 핀홀모델은 줌렌즈시스템이 바로 적용하기가 어렵다. 그래서 이 논문에서는 이러한 문제의 일부분을 렌즈의 굴절현상, 초점 거리의 보정과 모델링, 확대에 관한 중요한 원리들뿐만 아니라 실제적으로 유용한 부분들을 기술하였다. 컴퓨터에 의해 제어되는 줌, 초점, 그리고 구경들의 실험결과가 제시되어 있다.

Zoom lens camera calibration is an important and difficult problem for two reason at least. First , the intrinsic parameters of such a camera change over time, it is difficult to calibration them on-line . Secondly, the pin-hole model for single lens system can not be applied directly to a zoom lens system. In this paper, We address some aspects of this problem

1. 서론

줌렌즈는 비전 시스템에서 더욱더 보편적으로 널리 사용되고 있다. 깊이 재형성, 유동적인 비전, 3차원 위치확인에 유동성을 준다. 유동적인 비전 시스템의 시각적인 파라미터 즉 줌, 포커스와 구경들은 컴퓨터에 의한 모터로 제어된다. 줌은 서로 다른 해상도의 이미지를 얻는데 사용이 되는데 빛의 정도에 따라 구경이 자동으로 조절되는 동안 망막의 중심, 서로 다른 거리에 있는 물체의 초점, 또는 흐릿하게 함으로서 깊이 정보를 계산할 때 사용된다. 보정 작업은 최소한 두 가지 이유에서 어렵고 중요하다.

첫 번째는 이러한 파라미터들이 계속해서 변하기 때문에 매우 어렵고 만약 가능하다고 해도 매시간마다의 변화를 실시간으로 보정한다는 것은 거의 불가능하다. 두 번째는 단일 렌즈 시스템에 사용되는 핀홀 모델은 줌렌즈시스템에 직접적으로 적용하기는 어렵다.

이러한 시스템의 보정 방법의 하나는 파라미터의 일부는 변화에 크게 반응하지 않으면서 제한 할 수도 있다. Willson의 논문이 가장 줌 렌즈 카메라 모델에 대한 이해하기 쉬운 논문이다.

* 대구대학교 산업공학과

** 대구대학교 산업공학과 박사과정

본 논문에서는 카메라 보정에 대한 새로운 이론이나 알고리즘에 관한 것이 아니라, 특히 줌렌즈 시스템의 모터 제어에 관해서는 실제적이고 실험적인 것으로 첫 번째로는 카메라 보정에 사용되는 알고리즘을 소개하고, 그리고 나서 카메라 보정에 있어서 실제적인 면, 즉 보정과 관련한 물체, 카메라 고정에 관한 기하학적인 구조, 목표점 확인과 정확한 위치에 관해 논했다. 이러한 점들을 수행하기 위해서 광범위한 컴퓨터에 의해서 줌, 초점, 구경이 제어되는 한 쌍의 카메라 렌즈가 장착된 시스템을 가지고 실험을 했다.

2. 최소 제곱근 카메라 보정

카메라 보정에 쓰이는 알고리즘을 간단히 소개한다. 단일 렌즈를 사용한 핀홀 카메라 렌즈는 적합하지 않다. 그러나 줌 렌즈의 각각 부품들은 하나의 핀홀 카메라로 인식할 수 있다. 내부 파라미터는 주점 (x_0, y_0) , 초점거리 (f_x, f_y) , 그러기 때문에 픽셀의 외관 비율 $k=f_y/f_x$ 이다. 그리고 구체의 곡면에 대한 3가지 파라미터 (a_1, a_2, a_3) 를 사용하고 탄젠트 왜곡에 대해서는 (p_1, p_2, p_3) 를 사용했다.

내부 파라미터들은 회전행렬 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 인데 이것은 3 회전각 함수 (α, β, γ) 이고 그리고 보정관련 함수와 카메라 시스템의 변환벡터는 $T=(T_x, T_y, T_z)^T$ 이다.

2.1 수학적 모델

3 차원점 $P(X, Y, Z)$ 와 이것을 2차원을 투사했을 때의 점 $p(x, y)$ 의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_x = \bar{x} - d_x + f_x \frac{r_{11}(X - T_x) + r_{12}(Y - T_y) + r_{13}(Z - T_z)}{r_{31}(X - T_x) + r_{32}(Y - T_y) + r_{33}(Z - T_z)} \quad (1)$$

$$v_y = \bar{y} - d_y + f_y \frac{r_{21}(X - T_x) + r_{22}(Y - T_y) + r_{23}(Z - T_z)}{r_{31}(X - T_x) + r_{32}(Y - T_y) + r_{33}(Z - T_z)} \quad (2)$$

여기에서 $\bar{x} = x - x_0$, $\bar{y} = y - y_0$, r_{ij} 는 회전행렬 R 의 구성 요소이고, (v_x, v_y) 는 (x, y) 잔차 오차이고, (d_x, d_y) 는 곡면 왜곡에 대한 왜곡 구성요소들이다.

$$d_x = \bar{x}(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6)$$

$$d_y = \bar{y}(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6)$$

그리고 탄젠트 왜곡은

$$d_{x_i} = [p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}y](1 + p_3 r^2)$$

$$d_{y_i} = [p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}y](1 + p_3 r^2)$$

Φ 를 파라미터 벡터로 놓으면 (1), (2)는 다음과 같은 식으로 쓰여 질 수 있다.

$$V = F(\Phi) - L \quad (3)$$

문제는 $V^T V$ 를 최소화함으로서 Φ 에 대해 푸는 것인데 비선형 문제이다. 이것을 풀이하는 한 방법중의 하나는 Φ_0 에 근사함으로써 식(3)을 선형화 하여 계산하고, 그리고 $d\Phi$ 즉 선형시스템으로 계산하는 것이다.

$$V = Ad\Phi - L' \quad (4)$$

$A = F'_{\Phi_0}$ 는 Φ_0 에서 Φ 값을 반영한 F에서 유도할 수 있다. Φ_0 에 Φ 를 새로운 초기값으로 추가하여 수렴할 때까지 그 과정을 되풀이함으로써 가능하다. 측정치에 대한 가중행렬을 W 라 놓고 (4)의 가중에 의한 최소제곱근 풀이는 $(V^T W V)$ 를 최소화함으로써 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$d\Phi = (A^T W A)^{-1} (A^T W L') \quad (5)$$

정확도 할당 : (5)의 최소제곱근의 평가에서 잔차 벡터 V 를 계산 할 수 있다.

$$\tilde{V} = [A(A^T W A)^{-1} A^T W - I] L' \quad (6)$$

영상좌표의 잡음 σ_0 는 뒤에 평가한다.

$$\tilde{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{V}^T W \tilde{V}}{N - n} \quad (7)$$

N 개의 총 측정 개수와 n 개의 알려지지 않은 파라미터들을 가진다. 각각의 개별치에 대한 파라미터는 ψ_i , 이것의 표준편차는 $\tilde{\sigma}_{\psi_i}$, 다음 식에 의하여 계산되어진다.

$$\tilde{\sigma}_{\psi_i}^2 = \tilde{\sigma}_0^2 c_{ii} \quad (8)$$

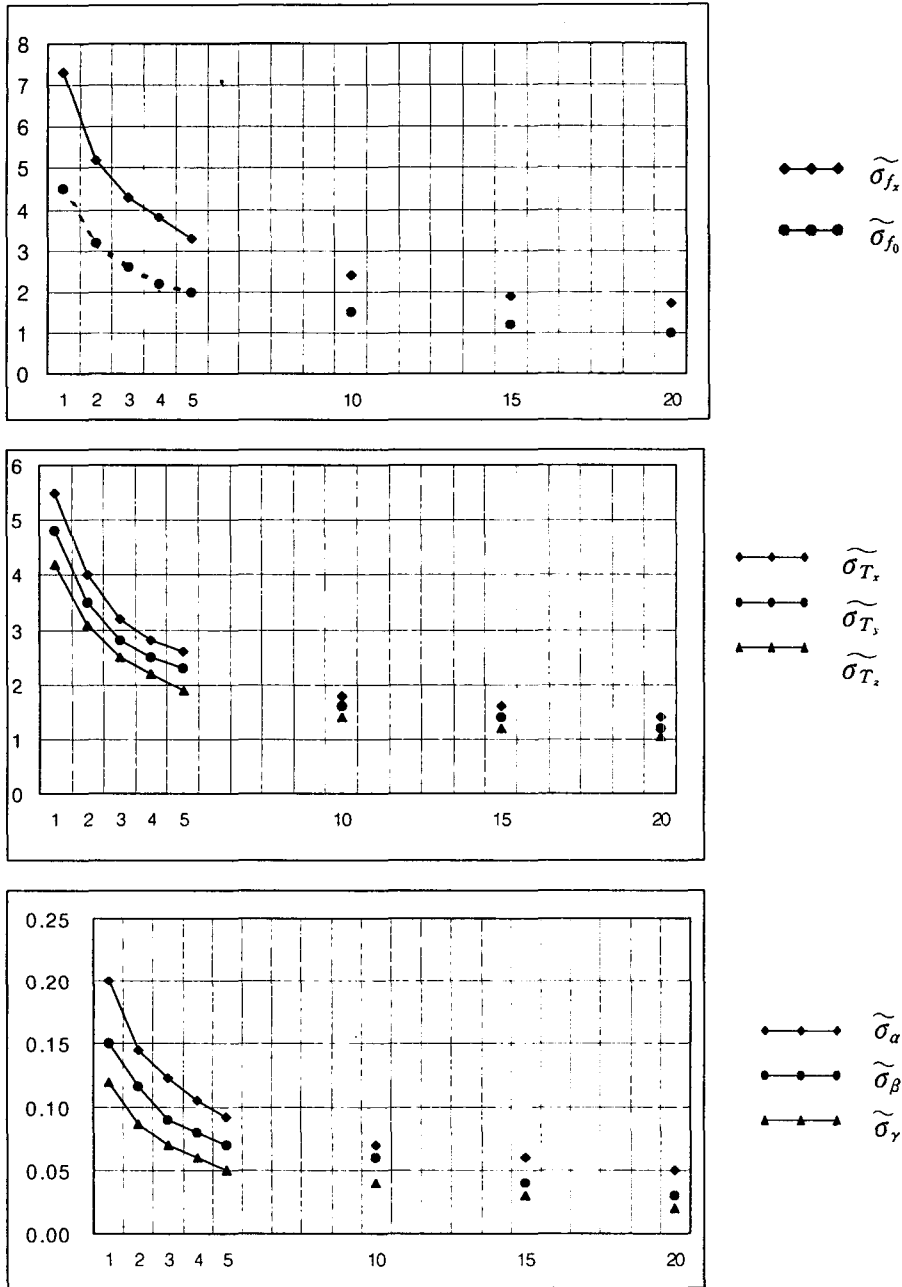
여기에서 c_{ii} 는 파라미터 $C_{\Phi} = (A^T W A)^{-1}$ 의 i 번째 공통인자라 불리는 분석요소이다.

2.2. 다중 이미지보정

보정 중에서 가장 많이 실수는 하는 것들 중의 하나는 측정 에러다. 이것을 개선하기 위한 하나의 방법은 측정량을 늘리는 것이다. 예를 들어 내부 파라미터의 변화 없이 다른 거리나 같은 거리에서 같은 카메라로부터 얻은 하나 이상의 이미지를 조합하는 것이다. 이러한 경우 모든 이미지들의 내부파라미터는 모두 같다.

최소사승에 의한 잉여관계가 증가하면 할 수록 해법의 정확도와 신뢰성이 증가한다. 이것은 또한 계산을 증가시키지만 치명적이지 않다면 다중 이미지는 정확도를 증가시키는데 매우 유용하다. [그림 1]은 다중이미지 보정에 사용된 이미지 숫자의 함수로서 보정된 파라미터들의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 그림으로 영상의 수가 증가하면 할

수록 극적으로 계산된 파라미터들의 정확도가 증가함을 알 수 있다.



<그림1> 이미지 수에 의한 다중 이미지보정

3. 보정패턴에 대한 고려

정확한 특성치와 보정 결과를 얻기 위해서는 3차원 보정패턴이 구성이나 보정점이 측정되는데 특별히 조심해야 한다. 이러한 획득은 곧바로 진행할 일이 아니고 이러한 보정 단계에서 보정에 의한 비선형시스템이 포함된 해법에 있어서는 잘못된 결과를 유도

하거나 대부분 불안정으로 유도한다.

3.1 3차원 보정패턴 구성

적어도 3차원 보정패턴을 구성하기 위해서는 3가지 접근방법이 있다.

1)평면을 한 축에 수직으로 변환. 이 패턴은 매우 평평하고 정확하게 위치하고 변환 축을 중심으로 수직으로 움직이며 이러한 것을 알기 위해서 특별한 장치가 필요하다. 이것은 유연성이 있으며 보정을 하기 위해서 얼마간의 영상이 필요하다.

2)3면을 볼 수 있는 3차원 입방체. 입방체를 사용함에 있어서의 이익은 보정을 위해서 소멸점을 사용하는 것이다[6]. 이것이 이 실험에 사용된 방법이다. 왜냐하면 조그마한 패턴이 필요한 가까운 거리의 적용에 있어서 완벽한 입방체가 정확하게 생산될 수 있다. 그러나 큰 패턴의 경우, 이것은 3개의 평면 패턴이 각각 직각으로 되어있고 이것은 3차원점의 좌표점이 정확하지 않을 수 있다.

3)3차원 테스트-필드. 이것은 정확도가 고려되어진다면 3차원 보정 패턴을 하는데 가장 좋은 해법일 것이다. 이 방법은 가까운 거리나 먼 거리 두 가지 조건에서 실험이 가능하다. 테스트-필드에서의 3차원측정은 경위를 이용하였는데, 이것은 높은 정확도를 주지만 많은 시간이 소요된다. 다른 결점의 하나는 움직일 수 없다는 것이다. 다른 실험에서는 각 목표점에 바코드를 붙여서 쉽게 자동으로 인식할 수 있도록 했다.

3.2 카메라와 보정 패턴과의 구성

카메라와 보정 패턴 사이의 기하학적인 구성은 또한 보정에 있어서 중요한 역할을 한다. 같은 패턴이지만 다른 환경구성에서는 파라미터들간의 상관관계가 다르고 그러기 때문에 정확도가 다른 결과가 나타난다. 본 논문에서 시뮬레이션을 통해서 그러한 효과들을 보여준다. 주어진 카메라 파라미터와 3차원 보정 패턴은 평면이 3번에 걸쳐 각 수직방향으로 물체 보정을 구성하기 위해서 2장에서 주어진 모델을 3차원 점을 뒤로 투사시켰다. 그리고 영상점에 Gaussian noise $\sigma_0 \approx 0.2$ pixel을 추가하였다. 결국 이러한 오염 점을 사용하여 카메라 파라미터를 계산할 수 있다. [표 1]은 같은 패턴에서 두 가지 경우를 나타내는데, 다른 환경의 카메라를 사용하였다. 이 경우 I 패턴 영상평면에 평행하고 II의 경우는 영상평면에 30° 를 회전을 시켰다. 보는 바와 같이 같은 $\tilde{\sigma}_0$ 를 가져야 하지만 각 계산된 파라미터가 다르게 나타난다. [표 2]는 이러한 두 경우에 대해서 연산된 파라미터간의 표준화된 상관계수를 나타낸다. 절대값이 크면 클수록 그 상관계수 값이 크다. 표에서 명확하게 알 수 있는 것은 II의 경우보다 I의 경우는 상관도가 적다. 아는바와 같이 만약 두 파라미터들이 상관이 있다면 각각에 대해 충분히 만족시킬 것이다. 즉 만약에 어느 하나의 파라미터가 에러가 있다면 상관이 있는 파라미터는 이것을 보충함으로써 전체 효과가 최소화된다. 이러한 시뮬레이션은 구성에 따라서 파라미터들 간에 서로 다른 상관을 가진다는 것을 나타내기 때문에 보정에 따른 서로 다른 정확도를 나타낸다. 일반적 보정패턴은 가능한 한 영상을 덮어야 하며 보정 목표점은 영상에 가능한 한 많이 나타나야한다. 두 가지 입방체 보정패턴은 우리의 줌렌즈 보정에 실험에 사용되어 왔다. 각각은 3평면의 급속성 양극 처리한 패턴으로 구성되어

있다. 두 입방체는 각각 $0.4 \times 0.4 \times 0.4\text{m}^3$ 와 $0.15 \times 0.15 \times 0.15\text{m}^3$ 크기이다. 줌렌즈 보정은 줌 위치의 큰 스케일에 모든 파라미터를 평가하기 위해서는 여러 가지 패턴이 필요하다. 보정목표로 이 입방체를 선택한 것은 카메라 파라미터를 자동으로 적절한 값을 계산하기 위해서 소멸점 기술을 사용했기 때문이다.

<표 1> 서로 다른 구성하의 정확도

| | CASE I : $\tilde{\sigma}_0=0.1922$ | | | CASE II : $\tilde{\sigma}_0=0.1920$ | | |
|----------|------------------------------------|---------|-----------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------|
| | True | comp. | $\tilde{\sigma}_\phi$ | true | comp. | $\tilde{\sigma}_\phi$ |
| f_x | 1000.0 | 999.363 | 0.307 | 1000.0 | 1000.75 | 0.365 |
| f_y | 1000.0 | 999.314 | 0.307 | 1000.0 | 1000.710 | 0.365 |
| x_o | 350.0 | 350.012 | 0.277 | 350.0 | 349.504 | 0.299 |
| y_o | 0.0 | 350.479 | 0.277 | 350.0 | 349.378 | 0.296 |
| T_x | 2300.0 | 0.101 | 0.133 | 800.0 | 800.586 | 0.280 |
| T_y | 0.0 | 0.032 | 0.133 | 800.0 | 800.374 | 0.281 |
| T_z | 0.0 | 2298.87 | 0.519 | 2000.0 | 2001.18 | 0.561 |
| α | 0.0 | 0.026 | 0.016 | 29.0 | -29.033 | 0.018 |
| β | 0.0 | 0.002 | 0.016 | 26.5 | 26.524 | 0.017 |
| γ | 0.0 | -0.003 | 0.003 | 5.0 | 5.011 | 0.008 |

<표 2> 파라미터간의 상관계수

| | f_x | f_y | x_o | y_o | T_x | T_y | T_z | α | β | γ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|----------|
| f_x | 1 | .95 | .00 | .00 | .00 | .00 | .97 | .00 | .00 | -.0 |
| f_y | .96 | 1 | .00 | .00 | .00 | .00 | .97 | -.0 | -.0 | -.00 |
| x_o | -.01 | -.02 | 1 | -.0 | .01 | -.0 | .00 | -.0 | -.97 | .00 |
| y_o | -.00 | -.00 | -.03 | 1 | .00 | .01 | .00 | .97 | -.0 | -.0 |
| T_x | .89 | .88 | -.02 | -.03 | 1 | .00 | .00 | .00 | .24 | -.0 |
| T_y | .88 | .89 | -.06 | .01 | .77 | 1 | .00 | -.24 | -.0 | .00 |
| T_z | .97 | .97 | -.08 | -.06 | .85 | .85 | 1 | .00 | -.0 | -.0 |
| α | .08 | .08 | .05 | .96 | .05 | -.02 | .05 | 1 | .00 | -.0 |
| β | -.06 | -.06 | -.96 | .12 | .05 | -.04 | -.02 | .04 | 1 | -.0 |
| γ | -.07 | -.08 | -.09 | -.90 | -.04 | .01 | -.04 | -.94 | .01 | 1 |

3.3 보정목표와 위치측정

영상 포인트의 측정어려움은 카메라 보정에서 기원된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이것에 대해 두 가지 면이 있다. 첫 번째는 목표의 패턴 유형이 중요하다. 두 번째는 영상에서 정확한 포착과 그것들의 위치 측정이 또한 중요한 단계이다. 실험에서는 교차목표 점을 사용했다. 여기에서 정확하게 십자형 위치측정에 관해 서술하면 예지 추출에 의한 정보를 사용하는 대신 기본적인 생각은 그레이 레벨을 사용함으로써 십자의 좌표를 직접적으로 찾아내는 것이다. 여기에서 물체의 모양에 대한 표면 분석의 표현방법 십자

형 주위의 빛의 반응과 매우 가깝다.

$$F(x, y) = a + bx + cy + d_1^2 \exp^{-e_1^2(x \cos \theta_1 + y \sin \theta_1 + l_1)^2} + d_2^2 \exp^{-e_2^2(x \cos \theta_2 + y \sin \theta_2 + l_2)^2}$$

$F(x, y)$ 를 십자형 주위에 작은 원도우에 고정시킴으로 비선형 최적화 문제에 의해 파라미터 ($a, b, c, d_1, e_1, l_1, \theta_1, d_2, e_2, l_2, \theta_2$) 들은 연산되어 진다. 그러면 이러한 파라미터들로부터 패턴의 중심이 연산되어 진다. 이러한 방법으로 보정 목표의 위치가 정확하게 측정된다. 이 실험에서는 전형적인 에지 추출을 사용함으로써 정확한 결과를 얻을 수 없음을 보이고 반면에 이것을 사용함으로써 정확도가 상당히 개선되었음을 보여준다.

4. 실험 및 결과

실험을 로봇과 줌렌즈 카메라 시스템에서 실시되었는데 컴퓨터에 의해 줌과 초점, 구경이 제어되는 한 쌍의 카메라가 장착된 정적인 시스템에서 수행되었다.

4.1 줌에 의한 중심점 결정

4.1.1. 줌의 특성

영상중심에 대한 여러 가지 다양한 정의가 있다. 핀홀 모델의 경우 영상중심 또는 주점을 영상면 광학축의 교차점을 말한다. 만약 렌즈의 광학축이 영상면에 수직이고 광축이 초점을 맞추거나 확대하는데 변하지 않는다면 교차점은 같은 위치에 있다. 위의 가정에서 초점을 맞추거나 확대하거나 같은 물체의 영상점은 “팽창점” 이라고 불리는 교차점의 선을 따라 점진적으로 움직인다. 만약 서로 다른 초점과 줌에서 연속적인 영상을 얻는다면 그리고 각 영상의 상호 반응점을 찾고, 그것들을 서로 겹쳐서, 몇 개의 영상점의 궤도에 의해 결정되는 선은 팽창점이라고 불리는 일반점에서 교차할 것이다. 만약 이러한 가정에서 팽창점은 주점과 같다. 이것은 이상적인 경우이다. 실제에 있어서는 줌렌즈 시스템의 광학축은 초점을 맞추거나 확대를 할 때 변한다. 그래서 두 영상의 사이의 팽창점은 변한다. 다시 말해서, 만약 변화가 중요하지 않으면 주점으로서 팽창의 중심의 평균을 취할 수 있다.

4.1.2 실험 결과

팽창의 중심이 변하는지 그렇지 않은지 알기 위해서 약간의 실험을 했다. 전체적인 범위에 걸쳐서 줌의 위치를 변화하면서 영상을 취하였다. 그리고 팽창의 중심을 계산하기 위하여 서로 다른 조합들을 취하였다. [표 3]은 두 예의 결과를 나타낸다. 실험 I에서는 7가지 줌 고정에서 7영상을 취하였으며 반면에 실험 II에서는 3주후에 실시되었는데 서로 다른 초점에서 11개의 줌 고정에서 11개의 영상을 취하였다. 표에서 보는 바와 같이 팽창의 중심이 평균에서 ± 0.5 픽셀 정도 움직였으며 이것은 어떤 적용에 있어서 나쁘진 않다. 이 평균을 팽창 중심의 주점으로 취할 수 있다. 그리고 시스템은 서로 다른 초점거리에서 안정적이라는 것을 알 수 있다.

이러한 실험에서 초점을 맞추거나 확대 그리고 다른 기계적인 그리고 시각적인 카메라의 움직임 팽창점은 일정한 부분까지는 안정적이고 고정된 주점을 사용될 수 있다.

물론 이것은 카메라 렌즈에 많이 영향을 받고, 결론을 유도하기 전에 시스템의 이것에 대해서 확인해야 한다.

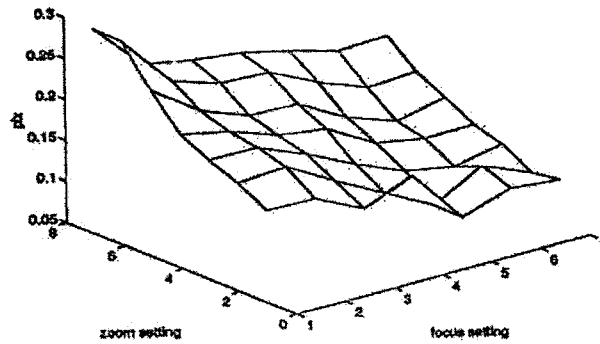
<표 3 > 실험 결과

| | ZOOM COMB. | ZOOM IN | | ZOOM OUT | |
|---------|---------------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | | x_o | y_o | x_o | y_o |
| EXP. I | 1-3 | 368.59 | 283.00 | 370.25 | 283.54 |
| | 2-4 | 369.98 | 283.36 | 369.69 | 283.12 |
| | 3-5 | 369.89 | 23.54 | 369.65 | 283.42 |
| | 4-6 | 369.89 | 283.77 | 370.19 | 284.11 |
| | 5-7 | 370.07 | 28.04 | 370.38 | 284.43 |
| | 1-7 | 369.84 | 283.72 | 369.95 | 283.70 |
| | mean | $\bar{x}_o=369.86 \pm 0.44,$ | | $\bar{y}_o=283.65 \pm 0.39$ | |
| EXP. II | 1-3 | 369.54 | 284.31 | 369.60 | 284.56 |
| | 2-4 | 369.33 | 284.21 | 368.60 | 284.55 |
| | 3-5 | 369.46 | 284.28 | 369.82 | 284.74 |
| | 4-6 | 369.79 | 284.09 | 370.42 | 284.62 |
| | 5-7 | 369.91 | 283.89 | 370.28 | 284.51 |
| | 6-8 | 370.0 | 283.75 | 369.84 | 283.77 |
| | 7-9 | 370.14 | 283.3 | 369.44 | 282.88 |
| | 8-10 | 369.95 | 283.60 | 369.53 | 282.62 |
| | 9-11 | 369.67 | 283.46 | 369.17 | 282.28 |
| | 1-11 | 369.59 | 283.98 | 369.75 | 284.21 |
| | mean | $\bar{x}_o=369.70 \pm 0.42,$ | | $\bar{y}_o=283.87 \pm 0.69$ | |

4.2 최소자승 보정법

줌렌즈 보정에 관한 여러 가지 실험의 결과들을 소개하면 여기에 나타난 모든 결과는 확대함으로서 보정된 고정된 주점을 사용하였다. 줌과 초점의 고정이 바뀔 때 렌즈가 따라 움직이므로, 보정은 두 파라미터의 각 조합에 대해 수행되었다. 기술적인 목적을 위해서 모터제어는 각 고정점에 대해 1에서 32 사이의 값을 사용하였다. 초점의 1단계는 물체와 카메라 사이를 가까이 (~0.8 m)이고 32단계는 무한대에 반응한다. 줌의 단계 1과 32는 각각 최소와 최대의 확대를 나타내고 조리개의 1과 32단계는 닫고 열림을 나타낸다. 결과를 평가하기 위한 미터법은 잔차 에러 $\tilde{\sigma}_o$ 이고, 이것은 데이터와 모델간의 적합도 지표이다. [그림 2]는 모든 고정점에 대한 $\tilde{\sigma}_o$ 를 나타낸다. $\tilde{\sigma}_o$ 의 범위는 0.1-0.3 픽셀이다. $\tilde{\sigma}_o$ 의 편차는 영상에서 얼마나 많은 점을 볼 수 있는냐에 달려 있으며, 영상에 얼마나 넓게 덮을 수 있는지를 나타낸다. 더 많은 점과 영역을 덮으면 더 좋은 결과

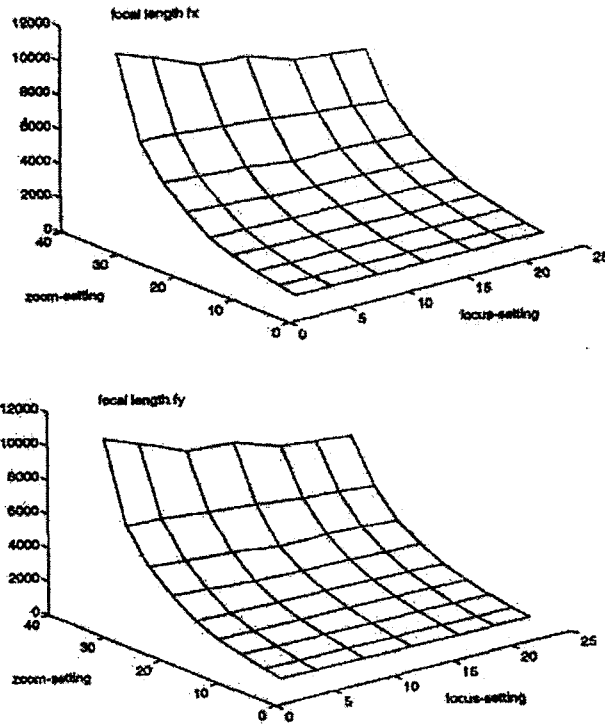
를 얻을 수 있다.



[그림 2] 잔차 오차: 서로 다른 줌과 초점 고정에 대한 모델과 데이터의 적합도
4.2.1 초점거리 (f_x, f_y)와 픽셀율 (f_x/f_y)

실험은 아래의 조건하에서 수행되었다. 조리개는 고정하고 보정은 서로 다른 줌과 초점의 고정하에서 수행되었다. 2개의 3차원 입방체는 카메라에서 0.8 m에서 4.5 m까지 범위 안에 두었다. 이 범위는 시스템이 반응하는 범위이다. [그림 3]은 보정된 초점거리 f_x, f_y 를 줌과 초점위치의 함수로서 나타낸다. 이 그림에서 다음을 알 수 있다.

- 1) 초점은 줌과 초점 파라미터에 의한 완전한 함수임을 알 수 있다.
- 2) f_x 와 f_y 에 대한 보정의 결과는 거의 가고 픽셀율 (f_x/f_y)는 0.9999와 같다. 이 결과는 거의 1.0에 가깝고 이것은 비디오 신호에 의한 재표본에 때문이다. 재표본 빈도는 사각형 픽셀을 얻기 위해서 영상획득장치에 고정시켜 놓았다.
- 3) 보정의 결과는 초점이 변경될 때 변한다. 초점 효과는 근거리에서는 그렇게 중요하지 않다. 그러나 원거리에 대해 점진적으로 증가한다. 이러한 데이터를 얻은 후에 f_x 와 f_y 에 대한 Look up Table 구성하는 방법은 여러 가지다. [14]에서는 표면 모델에 대해서 5개의 순차 다항식이 사용되었다. 최선은 아니지만 가장 간단한 것은 쌍일차 또는 쌍입체 함수의 구간 탐색법을 만들거나 비스듬한 보간 표면에 의한 데이터에 맞게 만드는 것이다.

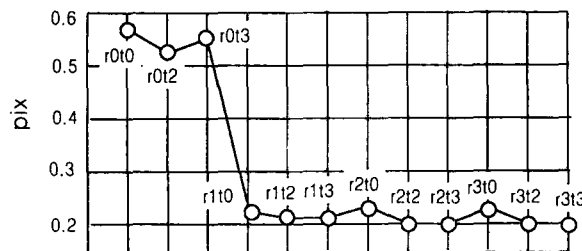


[그림 3] 줌렌즈가 장착된 시스템의 초점거리 (f_x, f_y)의 보정 결과

4.2.2 렌즈의 왜곡

곡면과 탄젠트 왜곡에 대해 각각 3개의 파라미터를 사용하였다. 이것의 중요성은 [그림 4]에서 왜곡 파라미터의 서로 다른 조합 결과를 나타내는데 여기서 r_{ij} 는 곡면의 첫 번째 i 파라미터와 탄젠트의 첫 번째 j 파라미터를 사용했음을 나타낸다. 그림으로부터 곡면 왜곡이 중요함이 명백한 반면 곡면과 탄젠트에 대한 세 번째 파라미터는 중요하지 않음을 알 수 있다. 최적의 조합은 r_2t_2 , 즉 (a_1, a_2, b_1, b_2) 이다. 물론 이것은 렌즈의 품질에 좌우된다. 왜곡에 있어서 다른 면은 확대와 초점을 바꾸는 가이다. 실험에서는 서로 다른 줌과 초점 고정에서 왜곡파라미터를 부정했다.

결과는 곡면과 탄젠트 왜곡을 나타낸다. 그러나 두드러지지 않다. 지금까지의 적용에서 특히 영상의 중심 안에서 상수로 간주된다.



[그림4] 서로 다른 왜곡이 잔차 모델의 조합

4.2.3 조리개는 초점 거리를 변화시키는가?

핀홀 모델에서 확대하거나 초점을 맞출때 초점 거리가 변한다는 것을 알았다. 조리개는 초점, 왜곡 파라미터, Z축 방향으로 변환에 상당히 영향을 끼친다는 것을 알았다. 본 실험에서 초점과 줌을 고정시키고 조리개를 바꿈으로 여러 이미지를 얻었다. [표 4]의 왼쪽은 서로 다른 조리개의 노출에 따라 보정된 초점거리를 나타낸다. 이 표는 조리개는 초점 변화시키지 않고, 그러나 표준편차는 조리개가 열릴수록 증가함을 알 수 있다. 조리개가 열리면 영상의 밝기가 변하고 이것은 어두운 배경에 밝은 부분을 확대된다. 그러나 확대는 물체의 중심점에 대해 지역적이기 때문에 이미지에 전체적이지 못하다.

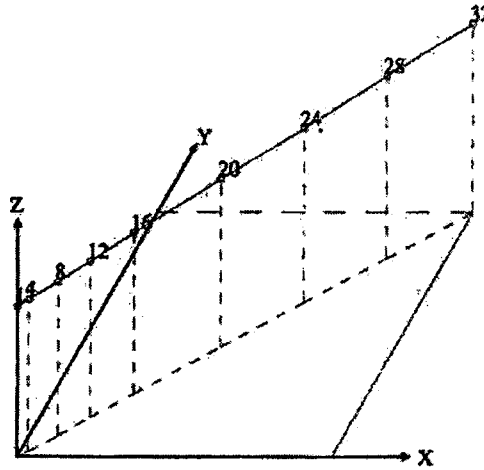
[표 4] 왼쪽: 서로 다른 조리개 노출 하에서의 초점 거리 보정 결과
오른쪽: 서로 다른 줌 고정하의 각도 보정 결과

| ape | $f_x(\text{pix})$ | σ_{f_x} | angle in degree | | | | |
|-------|-------------------|----------------|-----------------|----------|---------|----------|--------|
| close | 2008.57 | 6.039 | step | α | β | γ | |
| | 2009.31 | 6.124 | | | | | |
| | 2005.80 | 6.187 | 1 | -37.976 | 35.069 | 25.481 | |
| | 2005.87 | 6.218 | 4 | -37.928 | 35.085 | 25.477 | |
| | 2007.32 | 6.379 | 8 | -37.974 | 35.124 | 25.507 | |
| ↓ | 2007.53 | 6.397 | 12 | -38.009 | 35.111 | 25.524 | |
| | 2009.25 | 6.677 | 16 | -37.956 | 35.051 | 25.487 | |
| | 2008.73 | 7.739 | 20 | -37.939 | 35.096 | 25.461 | |
| | open | 2007.37 | 7.751 | 24 | -37.919 | 35.168 | 25.455 |
| | | 2009.65 | 8.003 | 28 | -37.939 | 35.116 | 25.486 |
| | | | 32 | -37.952 | 35.144 | 25.458 | |

4.2.4 외부 파라미터

확대하거나 초점을 맞춤으로서 시각의 중심을 분석할 수 있다. 또한 광학 축 방향도 호가대하는 동안 변한다고 볼 수 있다. [그림 5]는 확대되는 동안 광학축이 지나가는 통로를 나타낸다. 광학 축이 그림에서 공간상에 직선으로 지나감을 알 수 있고 즉 광학축을 말한다. 그러나 범위 354.1mm는 초점거리 12.5-75mm 범위에 반응하지 않는다. 이것은 핀홀모델은 줌렌즈에 맞지 않는다. 만약 시스템이 핀홀 모델이면 시각의 중심은 가상점이고 이 점은 확대함에 따라 움직인다. 물체와 중요한 평면(CCD 행렬)은 고정파라미터로 고려되지 않는다. 이러한 현상의 완벽한 설명을 이해하기 위해서 두터운 시각 모델이 고려되었다.

[표 4] 오른쪽은 확대하는 동안 α , β 그리고 γ 에 대해 회전각의 계산의 결과를 나타낸다. 여기서 각각의 값이 보정정확도가 예측된 것으로부터 기대 분산치 범위 안에 매우 가까운 것을 알 수 있다. 이것은 시각 중심과 광학축의 가상의 위치 변환을 나타내고 광학축은 확대하는 동안 광학축의 변화 없고 적어도 변화가 없고, 직선에 근사한다.



[그림 5] 확대 상태에서의 광학 중심의 이동 경로

5. 결론

이 논문을 통해서 좋은 보정값을 얻기 위한 몇 가지 요점들을 기술하였다. 보정은 수학적 기법에만 의존하지 않고 파라미터를 이용해서 계산한다. 3차원 보정패턴의 정확도와 구성을 위해서 상당한 주의가 필요하고 보정점들은 영상에서 측정되고 확인되어야 한다. 최소자승법은 영상에서 에러를 최소화하는데 사용되었으며 동시에 내부와 외부뿐만 아니라 곡면과 탄젠트 파라미터들을 계산하는데 사용되었다.

통계적인 분석은 잔차와 공분산 행렬을 사용함으로써 수행되었다. 이러한 보정기술은 실험과 이 논문에서 주어진 결과는 머신비전에서 카메라 부분을 다루는 다른 사람들에게 유용할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. L. Abbott, "Dynamic Integration of Depth cues for surface Reconstruction from Stereo Images", PhD thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Jan. 1991.
- [2] H. A. Beyer, "Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System", PhD thesis, Institut fur Geodasie und Photogrammetrie, Nr 51, ETH, Zurich, May 1992.
- [3] K. Pahlavan, "Active Robot vision and Primary Ocular process", PhD dissertation, Dept. of Numerical Analysis and Computing Science, KTH(Royal Inst. of Technology), May 1993.
- [4] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no.10, PP.65-980, Oct. 1992

- [5] K. Tarabanis, R. Y. Tsai, and D. S. Goodman, "Modeling of a computer-Controlled Zoom Lens", Proc. IEEE Int'l conf. Robotics and Automation , PP. 1,545-1,551, Nice, France, May 1992.
- [6] R. G. Willson, "Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses", PhD thesis, CMU-RI-TR-94-03, Robotics Inst. Carnegie Mellon. Univ, Jan. 1994.