카메라 칼리브레이션에서 PPM과 제어점과의 관계

The relationship between PPM and control points in camera calibration

송 원 석, 유 용 현, 문 정 환, 김 민 기
고려대학교 전자정보공학과
전화 : 02-3290-3977 / 핸드폰 : 018-321-0136

Won Seok Song, Yong Hyun Yoo, Jeoung Hwan Moon, Min Gi Kim
Dept. of Elec. & Info. Engineering, Korea University
E-mail : originalstone40@hotmail.com

Abstract

Camera calibration is the method of finding the relationship between world coordinates and image coordinates with respect to camera coordinate. It is represented by PPM(Perspective Projection Mateix) compactly. And the PPM is effected by positions, intervals and distribution of control points. This paper presents to the relationship between PPMs and control points by experiment.

I. 서론

카메라에서 얻어진 영상과 카메라 변수들이 주어지면 특징이 뚜렷한 물체에서는 대략적인 3차원 위치 계산이 가능하지만 3차원 영상으로부터 정확한 3차원 정보 추출은 어려운 실정이다. 3차원 정보는 카메라의 위치, 렌즈의 굴곡, 초점, 외부 변수등에 따라 크게 달라진다. 이러한 문제를 해결하고 좀 더 정확한 정보를 구하기 위해 필요한 작업이 카메라 칼리브레이션이다.

카메라 칼리브레이션을 위해 직육면체에 제어점(control point)을 설정하여 PPM을 계산하면 물체의 공간 좌표(world coordinate) (x_w, y_w, z_w)에서 2D 영상에 나타난 좌표 (u, v)를 찾을수 있다. 이 과정에서 제어점의 위치에 따라 PPM이 달라지고 다시 3D 공간 좌표를 2D 영상 평면의 좌표로 복원시켰을때 제어점의 설정에 의해 오차율이 달라진다는 것을 알게 되었다. 따라서 본 논문은 카메라 칼리브레이션 과정에서 제어점과 PPM과의 관계를 실험 값 중심으로 설명하고자 한다.

II. 카메라 모델

그림 1에서 3D 공간 좌표상에서 물체의 점 w에 관한 3D 좌표를 (X^w, Y^w, Z^w)라 하고 3D 카메라 좌표를 (X^c, Y^c, Z^c)라 하며 영상 평면에 대한 좌표 m을 (u,v)라 하자. 영상 평면과 광학축 z와 교차되는 부분이 영상의 기준점(principle point) O이고 초점거리 f는 영상 평면과 광학 중심(optical center) c사이 거리이다.

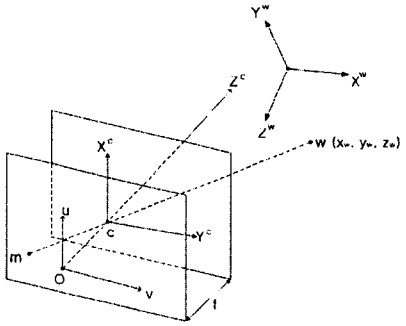


그림1. 3D 공간 좌표와 카메라 좌표, 2D 영상 평면 좌표와의 관계

공간상의 물체 w의 좌표를 (x_w, y_w, z_w)라고 하고 image plane의 m 좌표를 (u,v)라 할 때 PPM $\tilde{P} = [Q|\tilde{q}]$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda \tilde{m} = \tilde{P}\tilde{w}, \qquad \left(\tilde{m} = \begin{vmatrix} u \\ v \\ s \end{vmatrix} \quad \tilde{w} = \begin{vmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{vmatrix}\right) \qquad (1)$$

λ는 임의의 scale factor 이다.

* 본 연구는 식품의약품안전청 연구과제(기화안 203)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

QR factorization을 이용해 $\tilde{P}$를 본질적 변수(intrinsic parameter) A와 외부적 변수(extrinsic parameter)로 분해하면 다음과 같다.

$$\tilde{P}=[Q|\tilde{q}]=\tilde{P}=A[R|t],(\text{where } t=-Rc) \quad (2)$$

광학 중심 c는 $\tilde{P}\begin{vmatrix} c \\ 1 \end{vmatrix}=0$ 에서 $c=-Q^{-1}\tilde{q}$ 로 나타낼 수 있다.[2] 이 식들을 이용하여 3D 공간상의 좌표 w를 확인할 수 있다.

$$w=c+\lambda Q^{-1}\tilde{m} \qquad \lambda \in R \quad (3)$$

III. 실험 구성 및 결과

실험을 위해 CCD Camera로부터 그림 2와 같이 640*480사이즈의 크기를 가지는 이미지를 얻어 실험하였다.

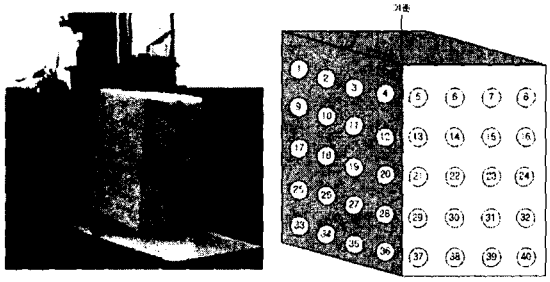


그림 2. 사용된 제어점을 가진 모델 이미지

제어점이 PPM에 어떠한 영향을 미치는지 확인을 위해 그림 3과 같이 수행하였다.

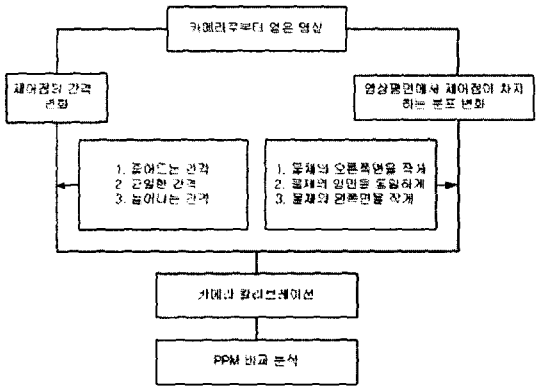
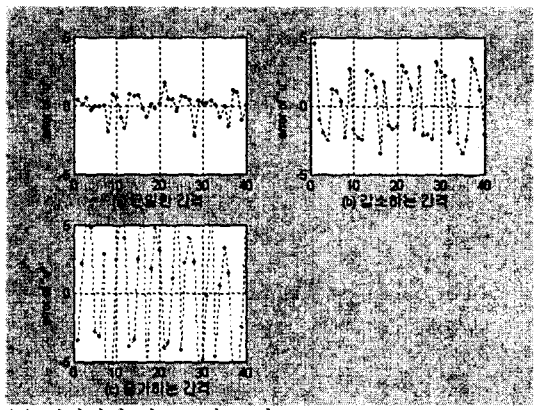
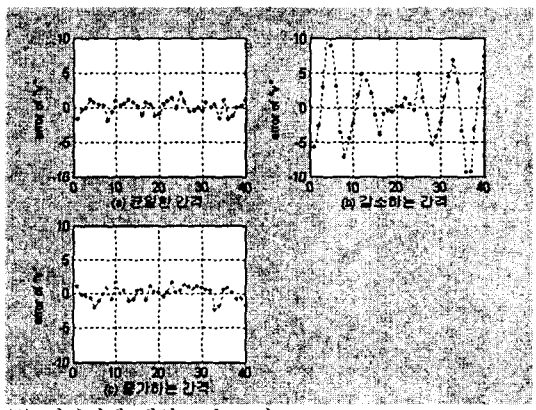


그림 3. 실험 과정 흐름도

공간 좌표상에서 제어점간의 간격 변화와 영상 평면상에서 동일간격의 제어점이 차지하는 분포를 변화의 독립 변수로 두어 실험을 하였다. 먼저 제어점의 간격 변화가 PPM에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 균일한 간격일때와 점점 줄어들거나 늘어가는 간격으로 40개의 제어점을 설정하여 실험하였다. 제어점이 증가하고 감소하는 모양은 모델 이미지에서 두 면이 만나는 기준을 중심으로 설정했다. 즉 첫번째 줄에서 보면 4에서 1로, 5에서 8로 제어점의 간격을 변화 시켰으며 증가량과 감소량를 1cm로 설정하였다. 나머지 줄도 마찬가지로 설정하여 실험 모델을 만들었다.



(1) 제어점에 따른 u의 오차



(2) 제어점에 대한 v의 오차

제어점에 따른 영상	RMS (pixel)	
	u	v
(a) 균일한 간격	0.0252	1.0531
(b) 감소하는 간격	6.3945	1.6703
(c) 증가하는 간격	2.1290	7.3127

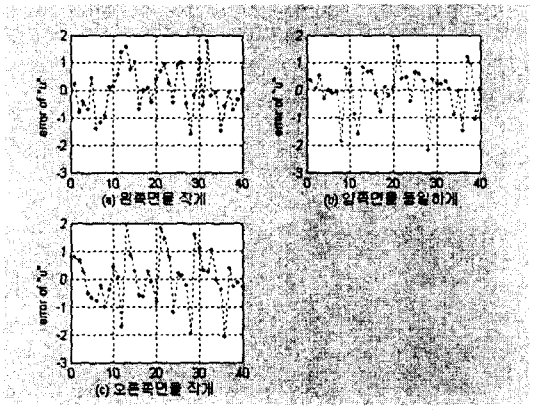
(3) u, v의 오차량 (RMS: Root Mean Square)

그림 4. 제어점 간격 변화에 따른 실험 결과

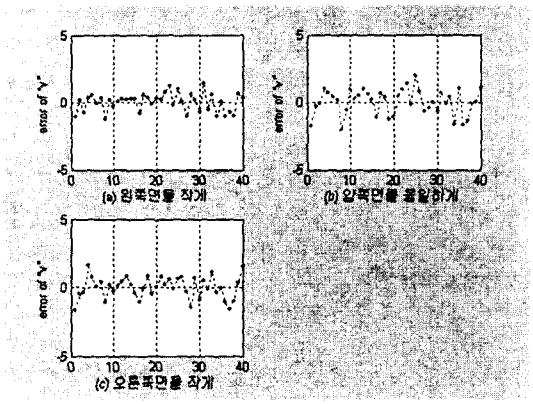
그림 4에서 오차는 입력된 2D의 영상평면 좌표값 (u,v)에서 PPM을 이용한 식 (1)을 이용하여 구한 영상평면 좌표값 (u,v)의 차를 의미한다. 그림 4의 (3)에서 보면 제어점에 따른 PPM은 균일한 간격일때 u, v의 RMS가 가장 작다는 것을 확일할 수 있다.

다음은 제어점을 일정하게 설정하였어도 카메라를 물체의 어느 면에 초점을 두었느냐에 따라 2D 영상평면

상에서는 제어점의 간격이 조밀할 수도 있고 넓어질 수도 있기 때문에 영상에서 제어점이 차지하는 분포를 변화시키면서 실험하였다. 그림 3의 실험 과정 흐름도와 같이 2D 영상평면 상에서 물체의 오른쪽면을 작게, 왼쪽면을 작게 그리고 동일한 면이 보이게 설정하여 40개의 제어점을 가지고 PPM을 비교하였다.



(1) 제어점이 차지하는 분포에 따른 u의 오차



(2) 제어점이 차지하는 분포에 따른 v의 오차

분포에 따른 영상	RMS (pixel)			
	오른쪽면 (u,v)		왼쪽면 (u,v)	
	u	v	u	v
(a) 왼쪽면이 작은 영상	4.0123	3.4691	3.3364	2.7721
(b) 양쪽면이 동일한 영상	3.4691	3.7528	3.7618	4.5393
(c) 오른쪽면이 작은 영상	3.3639	3.5696	3.9268	3.5955

(3) 분포에 따른 각각의 영상면에 대한 u, v의 오차량

그림 5. 제어점이 차지하는 분포 변화에 따른 실험 결과

그림 5의 오차 역시 입력된 2D의 영상평면 좌표값 (u,v)에서 PPM을 이용한 식 (1)을 이용하여 구한 영상평면 좌표값 (u,v)의 차를 의미한다. 그림 3의 (3)에서 보면 영상이 왼쪽면이 작은 영상에서는 왼쪽면에서 RMS가 작고 오른쪽면이 작은 영상에서는 오른쪽면에서 RMS가 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 PPM이 영상에서의 제어점들의 분포에 대한 적합한(affine) 값을 취하기 때문에 분포가 조밀한 곳에서 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

실험 결과로 볼 때 PPM은 제어점의 간격이 일정하게 설정할수록 정확도를 높일수 있고 또한 제어점의 분포가 조밀한 곳에 영향을 많이 받는다는 것을 살펴볼 수 있었다. 이러한 결과를 가지고 가장 좋은 조건상의 제어점과 카메라의 초점을 설정하여 PPM에 따른 영상에서의 좌표의 이동을 추적해 보았다.

Point	INPUT DATA					OUTPUT DATA			
	Image 2-D (u,v)		3-D Coordinates (x_w, y_w, z_w)			2-D Fit Data(u,v)		Residuals (u,v)	
1	228	198	26	2	25	238.5	198.4	-0.5	-0.4
2	265	201	26	7	25	264.6	202.1	0.4	-1.1
3	291	205	26	12	25	291.7	206.0	-0.7	-1.0
4	320	212	26	17	25	320.0	210.0	-0.0	2.0
5	379	217	21	22	25	379.0	215.0	-0.0	1.0
⋮									
38	391	373	16	22	5	395.9	372.7	0.1	-0.7
39	413	370	11	22	5	423.2	370.1	-0.2	-0.1
40	449	368	6	22	5	449.3	367.7	-0.3	0.3

CALIBRATION MATRIX

$$\tilde{P} = \begin{vmatrix} -6.2513 & 3.7046 & 0.5037 & 356.7441 \\ -0.9211 & -0.0751 & -6.7464 & 370.9078 \\ -0.0037 & -0.0037 & 0.0000 & 1.0000 \end{vmatrix}$$

$$c = \begin{vmatrix} 139.0631 \\ 133.6698 \\ 34.5038 \end{vmatrix}$$

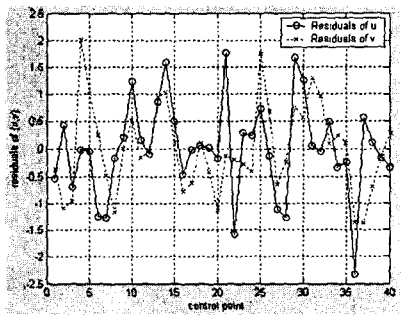


그림 6. 카메라 칼리브레이션 결과

Residuals(u,v)은 INPUT DATA(u,v) - OUTPUT DATA(u,v) 에서 계산된 값이다.

계산된 PPM이 공간상에서 얼마만큼의 영향력을 갖는지 알아보기 위해서 움직이는 물체의 2D 영상 평면의 좌표를 계산하여 살펴보았다. 이 실험에서 63개의 움직이는 물체 좌표를 사용하였고(그림 7) 결과는 그림 8에서 볼 수 있다. 그래프를 볼 때 7개 좌표 간격으로 Residuals이 크게 변화하는 것을 알수 있는데 그러한 이유는 그림 7에서와 같이 X^w축으로 7개의 움직이는

물체점 좌표를 설정하였기 때문이다. 그리고 움직이는 물체가 칼리브레이션에서 사용된 제어점에서 벗어날수록 Residuals값이 커진다는것 역시 알 수 있다. (63번째 좌표의 Residuals)

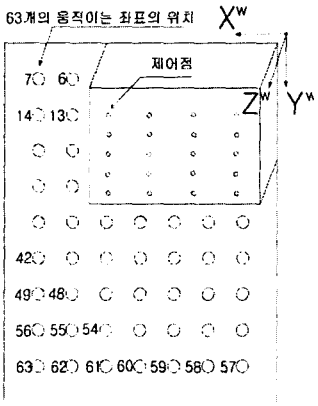


그림 7. 실험할 공간 좌표 (X^w, Y^w, Z^w)

Point	INPUT DATA: Image 2-D (u,v)		INPUT DATA: 3-D Coordinates (x_w, y_w, z_w)			OUTPUT DATA: 2-D Fit Data(u,v)		OUTPUT DATA: Residuals (u,v)	
1	356	376	5	5	2	358.3	366.0	-2.3	10.0
2	331	379	10	5	2	332.2	368.3	-1.2	10.7
3	303	381	15	5	2	305.1	370.7	-2.1	10.3
4	276	383	20	5	2	276.9	373.1	-0.9	9.9
5	246	385	25	5	2	247.5	375.7	-1.5	9.3
6	218	387	30	5	2	216.8	378.4	1.2	8.6
7	187	390	35	5	2	184.8	381.2	2.2	8.8
8	383	381	5	10	2	384.9	372.7	-1.9	8.3
⋮									
61	473	437	25	45	2	496.9	446.7	-23.9	-9.7
62	443	440	30	45	2	466.3	451.8	-23.3	-11.8
63	411	443	35	45	2	434.2	457.1	-23.2	-14.1

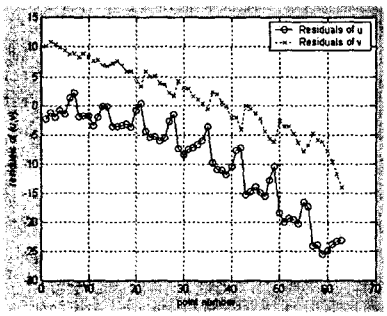


그림 8. PPM을 이용하여 찾은 2D의 영상좌표

VI. 결론

카메라 칼리브레이션시 제어점의 간격 설정과 함께 제어점의 분포는 정확한 PPM을 구할 때 중요한 문제로 작용될 수 있다. 제어점 간격을 균일하게 설정하고 실험으로 찾고자 하는 물체에서 좌표들의 분포를 감안하여 영상 평면 이미지상에서 설정한 제어점의 분포를 맞춰준다면 정확한 PPM을 계산할 수 있다.

추후 연구 과제로는 정밀한 칼리브레이션의 PPM 계산을 위해 영상 평면상의 정확한 제어점 추출 알고리즘과 영상 평면상에서 이상적인 영상과 렌즈 왜곡에 의해 생성된 영상 사이의 관계를 적용하는 방법 구현이 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] Roger Y. Tsai, "A Versatile Cmera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, August, 1987

[2] A. Fusiello, E. Trucco, and A. Verri, " Rectification with unconstrained stereo geometry". *Research Memorandum RM/98/12, Department of Computing and Electrical Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK*, 1998. (PostScript) Andrea Fusiello, "Tutorail on Rectification of Stereo Images"

[3] E. Trucco, and A. Verri, "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, chapter 6", *Prentice Hall*, 1998

[4] Linda G. Shapiro, George C. Stockman, "Compuet Vision, chapter 13", *Prentice Hall*, 2001

[5] 송원석, 유용현, 문정환, 김민기, "블록 매칭 기반에서 디스페리티의 블록킹 현상을 줄이는 알고리즘", *대한전자공학회 하계학술 논문집*, 2003