

# 각도 정보를 이용한 카메라 보정 알고리즘

## A Calibration Algorithm Using Known Angle

하종은\*, 권인소  
(Jong-Eun Ha and In-So Kweon)

**Abstract** : We present a new algorithm for the calibration of a camera and the recovery of 3D scene structure up to a scale from image sequences using known angles between lines in the scene. Traditional method for calibration using scene constraints requires various scene constraints due to the stratified approach. Proposed method requires only one type of scene constraint of known angle and also it directly recovers metric structure up to an unknown scale from projective structure. Specifically, we recover the matrix that is the homography between the projective structure and the Euclidean structure using angles. Since this matrix is a unique one in the given set of image sequences, we can easily deal with the problem of varying intrinsic parameters of the camera. Experimental results on the synthetic and real images demonstrate the feasibility of the proposed algorithm.

**Keywords** : camera calibration, angle, 3D reconstruction

### I. 서론

최근에 활발히 연구되어 지고 있는 가상 현실, 증감 현실 등의 응용 분야에서는 실제 이미지에 의한 주어진 환경의 복원을 위해 보다 손쉽고 정확한 카메라 보정 알고리즘을 요구하고 있다. 이미지를 이용하여 주어진 3차원 공간을 복원하는 전통적인 방법은 각각의 카메라 보정, 두 장의 이미지 상의 대응점의 획득 과 삼각 측량법에 의한 복원의 과정을 거치고 있다. 전통적인 카메라 보정 방법[1,2]은 3차원 공간상에 보정 물체를 두고 기지의 3차원 좌표를 이용한다. 이와 같은 경우 3차원 측정 자체가 어려우며 카메라의 내부 변수가 변화하는 경우 다시 보정을 수행해야 하므로 온라인으로 수행하기에는 어려움이 있다.

기지의 3차원 좌표이외의 주어진 공간상의 정보를 이용한 카메라 보정 방법으로는 다음의 것들이 있다. Faugeras[3]는 공간상의 두 직선사이의 기지의 각도를 이용한 카메라 보정 방법을 제시하고 있다. 카메라 보정을 위해 카메라의 광학적 중심을 통과하는 두 직선사이의 각도와 절대 코닉(absolute conic)의 이미지상의 투영 사이의 관계식을 제시하고 있다. 이를 3차원 공간상의 임의의 두 직선사이의 각도 정보로 확장하기 위해서는 두 장의 이미지가 필요하며, 사영(projective) 복원, 아파인(affine) 복원, 유클리디안 복원의 순차적인 접근 방법을 제시하고 있다. Faugeras 등.[4]은 공간상의 기지의 정보를 이용한 순차적인 3D복원 방법을 제시하고 있다. 아파인 복원을 위해서는 3차원 공간상의 평행한 직선, 평행한 직선들 사이의 길이비등을 이용하며, 유클리디안 복원을 위해서는 각도나 길이비 정보등을 이용하고 있다.

Boufama 등.[5]은 사영 복원과 유클리디안 복원 사이의 변환 행렬을 주어진 공간상의 다양한 제약조건을 이용하여 구하고 있다.

본 연구에서 제안하는 방법은 주어진 영상들 사이에 유일

하게 존재하는 사영 복원과 유클리디안 복원 사이의 변환 행렬을 3차원 공간상의 두 직선이 이루는 각도 정보를 이용하여 구하며, 카메라의 내부 변수가 변화하는 경우에도 유일한 변환 행렬을 이용하여 다시 카메라의 보정과정 없이 쉽게 대처할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 제안하는 각도를 이용한 카메라의 보정 방법은 기존의 절차적인 방법들에서 요구되는 각 단계에서의 영상내의 서로 다른 제약 조건들을 요구하지 않을 뿐더러 직접 사영 복원에서 유클리디안 복원으로 넘어가기 때문에 알고리즘의 신뢰성에서 장점을 가지고 있다.

### II. 호모그래피 행렬과 형상 복원

3차원 공간상의 한 점의 이미지상으로의 투영 과정은 homogenous 좌표계를 이용하는 경우 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다. 먼저 세계 좌표계에 기준한 점  $X_w$ 와 카메라 좌표계에 기준한 점  $X_c$  사이의 강제 변환이 이루어지며 다음으로는 점  $X_c$ 의 정규화된 이미지상의 점  $x$ 로의 사영 투영 과정이다. 최종적으로, 카메라의 내부 변수에 의한 변환 과정을 통해 픽셀 좌표계상의 점  $m = (u, v, 1)^T$ 로의 변환과정이다. 이러한 일련의 과정은 다음과 같이 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$m = P_{enc} X_w \quad (1)$$

$$P_{enc} = AP_0T = \begin{bmatrix} \alpha_u & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$P_{enc}$ 는 핀홀 카메라 가정에 의한 투영 행렬이며,  $\alpha_u$ 와  $\alpha_v$ 는 각각 이미지상의 x,y 방향으로의 카메라 내부 인자이다.  $\gamma$ 는 이미지상의 두 축의 기울어짐 정도를 나타내는 인자이며,  $u_0$ 와  $v_0$ 는 이미지 중심이다.

본 연구에서는 카메라 내부 인자에 대해 다음과 같은 가정을 한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문집수 : 2004. 1. 2., 제책확정 : 2004. 3. 25.

하종은 : 동명정보대학교 멀티미디어공학과(jeha@tit.ac.kr)

권인소 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(iskweon@ee.kaist.ac.kr)

$$\gamma = 0 \tag{2}$$

비보정 카메라에 의한 두 장의 이미지상에서, 이미지상의 정보만을 이용하는 경우 사영 변환(projective transform)하의 복원을 수행할 수 있게 된다[6,7]. 이 경우 투영식은 다음과 같다.

$$\mathbf{m}_j^i \cong \mathbf{P}_{proj}^i \mathbf{Q} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{X}_{proj}^j \tag{3}$$

$\mathbf{m}_j^i$  는 j번째 점의 i번째 카메라에 의한 이미지상의 점이며,  $\mathbf{Q}$  는  $P^3$  상의 역행렬이 존재하는 임의의 4X4행렬이며,  $\mathbf{X}_{proj}^j$  는 4X1의 사영 좌표이다.

(3)에서 역행렬이 존재하는 임의의 행렬  $\mathbf{Q}$ 는 주어진 투영식을 만족하므로 이에 대응하는 프로젝티브 투영 행렬과 좌표는 무수히 많음을 알 수 있다. 무수히 많은 변환 행렬  $\mathbf{Q}$ 중에서 구해진 사영 복원을 유클리디안 복원으로 변환하는 유일한 행렬이 존재한다. 주어진 이미지에서 유일한 변환 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 구함으로써 카메라 보정과 3차원 복원을 수행할 수 있게 된다. 이러한 행렬  $\mathbf{Q}$ 는 다음의 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{euc}^i &\cong \mathbf{P}_{proj}^i \mathbf{Q} \\ \mathbf{X}_{euc}^j &\cong \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{X}_{proj}^j \end{aligned} \tag{4}$$

첫 번째 카메라의 광학적 중심을 좌표계 기준으로 설정하는 경우, 사영 투영 행렬과 유클리디안 투영 행렬은 각각  $\mathbf{P}_{proj}^0 = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_3]$  과  $\mathbf{P}_{euc}^0 = [\mathbf{A}_0 \ \mathbf{0}_3]$ 로 나타낼 수 있다. 이들을 (4)에 대입하면 다음과 같이  $\mathbf{Q}$ 를 구성하는 인자를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{euc}^0 &\cong \mathbf{P}_{proj}^0 \mathbf{Q} \Leftrightarrow [\mathbf{A}_0 \ \mathbf{0}_3] \cong [\mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_3] \mathbf{Q} \\ &\Leftrightarrow \exists (q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4) \left| \mathbf{Q} \cong \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{0}_3 \\ q_1 & q_2 & q_3 & q_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

$\mathbf{Q}$ 는 스케일하에서 성립하므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ q_1 & q_2 & q_3 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

첫 번째 카메라의 광학적 중심을 기준 좌표계로 하고 (6)의  $\mathbf{Q}$ 를 구한 경우 (4)에 의해 스케일하의 유클리디안 복원을 수행할 수 있다. 이와 같은 경우, 공간상의 세 점 A, B, C가 이루는 각은 스케일하의 유클리디안 복원에서 불변이며 다음과 같다.

$$\cos \theta_{ABC} = \frac{\vec{\mathbf{BA}} \cdot \vec{\mathbf{BC}}}{\|\vec{\mathbf{BA}}\| \|\vec{\mathbf{BC}}\|} = \frac{\vec{\mathbf{B}'A'} \cdot \vec{\mathbf{B}'C'}}{\|\vec{\mathbf{B}'A'}\| \|\vec{\mathbf{B}'C'}\|} = \cos \theta_{A'B'C'} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{BA}} &= \mathbf{X}_w^A - \mathbf{X}_w^B, \quad \vec{\mathbf{BC}} = \mathbf{X}_w^C - \mathbf{X}_w^B, \quad \vec{\mathbf{B}'A'} = s\mathbf{X}_w^A - s\mathbf{X}_w^B, \\ \vec{\mathbf{B}'C'} &= s\mathbf{X}_w^C - s\mathbf{X}_w^B \text{이며, } \mathbf{A}', \mathbf{B}', \mathbf{C}' \text{ 는 카메라를 기준으로} \end{aligned}$$

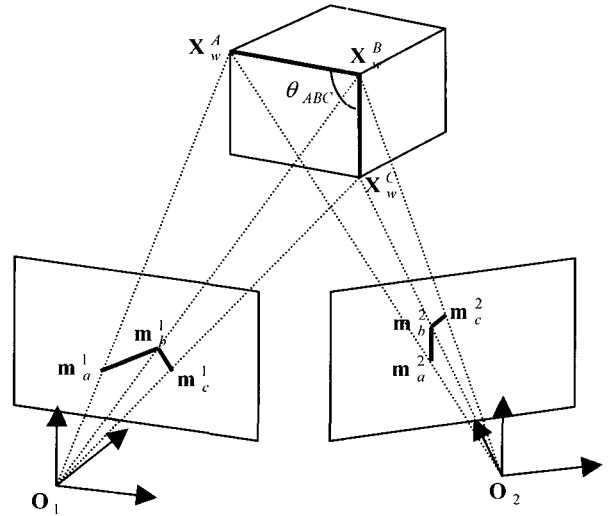


그림 1. 이미지 획득 시스템의 구성.  
Fig. 1. Configuration of image acquisition system.

한 스케일하의 복원을 나타낸다.

### III. 각도 정보에 의한 카메라 보정

이 절에서는 3차원 공간상의 두 직선 사이의 기지의 각도 정보를 이용한 카메라 보정에 대해 설명한다. 그림 1에서와 같이 공간상의 세 점 A, B, C가 주어진 경우, 이들의 첫 번째, 두 번째 이미지상으로의 투영점  $\{\mathbf{m}_i^1\}$ 와  $\{\mathbf{m}_i^2\}$ 를 이용하여 사영 변환하의 복원을 할 수 있게 된다[6,7].

$\mathbf{Q}^{-1}$ 과 j번째 점의 프로젝티브 좌표를 다음과 같이 설정한다.

$$\mathbf{Q}^{-1} = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_1 & q_2 & q_3 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_1^{-T} \\ \mathbf{Q}_2^{-T} \\ \mathbf{Q}_3^{-T} \\ \mathbf{Q}_4^{-T} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_{proj}^j = \begin{pmatrix} p_j \\ q_j \\ r_j \\ s_j \end{pmatrix} \quad (j = A, B, C) \tag{8}$$

$\mathbf{Q}_i^{-T}$ 는  $\mathbf{Q}^{-1}$ 의 i번째 행을 나타낸다.

(8)을 (4)에 대입하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{X}_{euc}^j = \begin{pmatrix} X_{euc}^j \\ Y_{euc}^j \\ Z_{euc}^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{Q}_1^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j}{\mathbf{Q}_4^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j} \\ \frac{\mathbf{Q}_2^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j}{\mathbf{Q}_4^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j} \\ \frac{\mathbf{Q}_3^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j}{\mathbf{Q}_4^{-T} \cdot \mathbf{X}_{proj}^j} \end{pmatrix} \quad (j = A, B, C) \tag{9}$$

(9)를 이용하여,  $\theta_{ABC}$ 를 (6)의  $\mathbf{Q}$ 의 인자로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{ABC} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{\mathbf{BA}} \cdot \vec{\mathbf{BC}}}{\|\vec{\mathbf{BA}}\| \|\vec{\mathbf{BC}}\|} \right) = f(\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0, q_1, q_2, q_3) \tag{10}$$

(10)을 통해, 3차원 공간상의 두 직선이 이루는 기지의 각도

표 1. 각도 정보를 이용한 카메라 보정 알고리즘.

Table 1. Camera calibration algorithm using angles.

1. N 장의 이미지에서 각각의 두 장의 이미지로부터 사영 복원을 수행한다.
2. 처음 두 장의 이미지의 사영 투영 행렬을 이용하여  $(\alpha_u, \alpha_v, q_1, q_2, q_3)$ 의 초기값을 구한다.
3. (11)의 비선형 최소화 과정을 통해 해를 구한다.
4. (4)를 이용하여, 유클리디안 투영 행렬과 스케일 이하의 유클리디안 좌표를 구한다.

표 2. 가변 카메라 설정시 사용된 내부 인자값.

Table 2. Intrinsic value of camera used in the experiment.

	Camera1	Camera2	Camera 3	Camera4	Camera5
$\alpha_u$	700	750	650	800	600
$\alpha_v$	700	750	650	800	600
$u_0$	256	256	256	256	256
$v_0$	256	256	256	256	256

표 3. 합성 이미지 생성시 사용한 외부 인자값.

Table 3. Extrinsic value of camera used in the experiment.

	Rotation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ [deg]	Translation $(t_x, t_y, t_z)$ [cm]
Image 1-2	$(7^\circ, -5^\circ, 10^\circ)$	(2.5, 5.0, 2.5)
Image 1-3	$(-2^\circ, -10^\circ, -15^\circ)$	(5.0, -5.0, 5.0)
Image 1-4	$(3^\circ, -15^\circ, 20^\circ)$	(7.5, 5.0, 7.5)
Image 1-5	$(-5^\circ, -20^\circ, -10^\circ)$	(9.0, -5.0, 9.0)

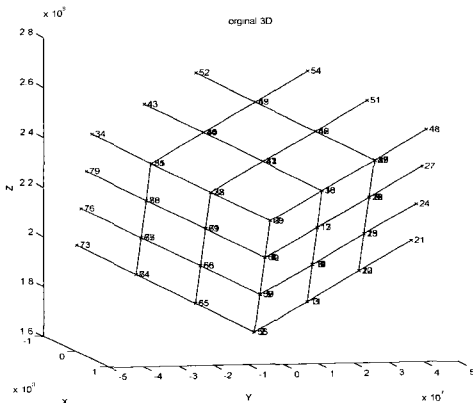


그림 2. 합성 이미지 생성시 사용한 3차원 물체: 각 면에서 두 직선으로 이루어진 각도를 사용.

Fig. 2. 3D structure used in the generation of synthetic image: used angle consisted of two lines from each face.

정보를 카메라 보정을 위한 제약식으로 사용할 수 있게 된다. 3차원 공간상의 N장의 직선의 각도를 아는 경우, 이는

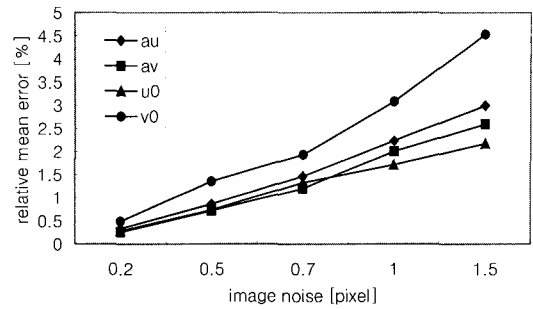


그림 3. 두 번째 카메라의 추정된 내부 인자의 상대 오차.  
Fig. 3. Relative error of the estimated intrinsic value of the second camera.

다음과 같은 비선형 최소화 문제로 구성할 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^N \left( \theta_{ABC} - \cos^{-1} \left( \frac{\vec{B}_i A_i \cdot \vec{B}_i C_i}{\|\vec{B}_i A_i\| \|\vec{B}_i C_i\|} \right) \right)^2 \quad (11)$$

$$= \min \sum_{i=1}^N (\theta_{ABC} - f_i(\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0, q_1, q_2, q_3))^2$$

(11)의 비선형 최소화 문제는 Levenberg-Marquardt[8] 방법을 이용하여 푼다. 비선형 최소화를 위한 초기값은 [9]의 방법을 따른다. 비선형 최소화 과정을 통해 해를 찾으므로 초기해에 민감한 결과를 얻게 된다.

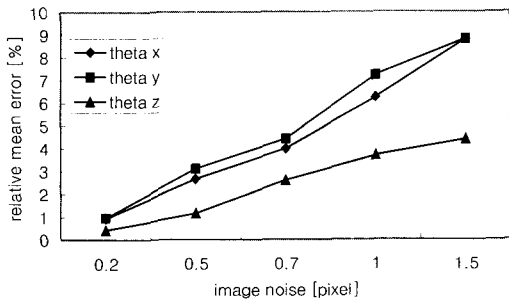
각도를 이용한 카메라 보정과 3차원 복원의 전체 과정은 표 1과 같다. 두 장의 이미지상의 대응점만을 이용한 사영 복원은 먼저 기본 행렬(Fundamental matrix)[6,7]을 구한 후 이를 이용하여 두 카메라의 사영 투영 행렬을 구하며, 삼각 측량법에 의해 사영 복원을 수행한다.

초기값을 구하는 과정에서 이미지 중심은 첫 번째 이미지의 중심으로 두고 수행한다. 각각의 두 장의 이미지를 이용하여 사영 복원을 수행한 후 이들을  $P^3$  상의 동일 좌표계로 변환 후 이후의 과정을 진행한다.

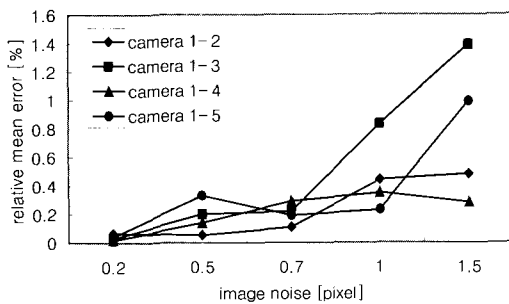
#### IV. 실험 결과

제안한 알고리즘을 합성 이미지와 실제 이미지를 이용하여 실험 하였다. 합성 이미지는  $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$  크기의 정육면체를 발생하여 사용하였으며 이는 그림 2에 나타나 있다. 카메라 내부 인자값은 표 2에서와 같이 가변 인자값을 사용하였으며, 표 3의 외부 인자값을 이용하여 5장의 이미지를 생성하였다. 노이즈에 의한 알고리즘의 성능을 알아보기 위하여 이미지상의 투영점에 백색 가우시안 노이즈를 추가하여 실험을 수행하였다.

그림 3은 제안된 알고리즘에 의한 두 번째 카메라의 추정된 내부 인자값의 에러를 나타내며, 한 노이즈 레벨에서 50회 수행 후 산출한 통계량이다. 예상대로, 노이즈가 증가함에 따라 에러가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 4는 외부 인자 추정시 에러를 나타내고 있다. 외부 인자는 (4)의 과정을 통해 구한 유클리디안 투영 행렬의 분리를 통해 구한다.



(a)



(b)

그림 4. 추정된 외부 인자의 상대 오차 (a) 카메라 1,2의 회전 성분의 오차 (b) 변위 성분의 오차.

Fig. 4. Relative error the estimated extrinsic parameter (a) error of the rotation between camera 1 and 2 (b) error of the translation.

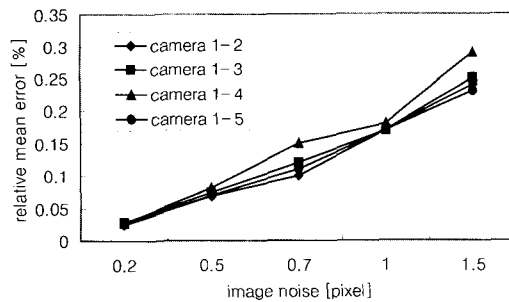
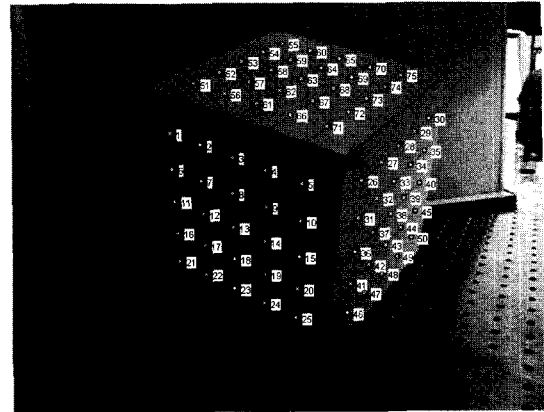


그림 5. 추정된 스케일하의 유클리디안 복원에 의한 각도 에러.  
Fig. 5. Error of the estimated angle from the Euclidean reconstruction under scale.

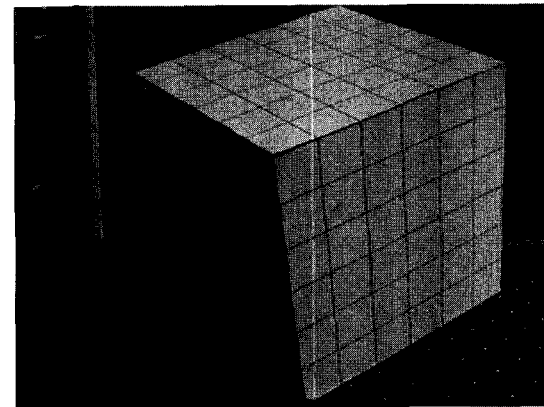
노이즈에 대해 내부 인자의 경우와 비슷한 경향성을 보여 주고 있다. 그림 5는 제안한 알고리즘에 의한 스케일하의 3 차원 유클리디안 좌표를 복원후, 이에 의해 추정된 세 점사이의 각도의 에러를 보여주고 있다.

합성 이미지 실험 결과를 통해, 제안된 알고리즘은 카메라의 내부 인자가 변화하는 경우에도 잘 대처함을 알 수 있다.

그림 5-(a)는 머신 비전분야에서 널리 쓰이고 있는 Tsai[1] 보정 알고리즘과의 비교를 위한 보정 박스 이미지를 보여주고 있다. Tsai[1] 알고리즘의 경우 미리 알고있는 제어점의 3 차원 좌표와 이의 이미지상의 좌표점을 이용하여 카메라 보정을 수행하고 있다. 본 연구에서는 카메라의 내부 인자의



(a)



(b)

그림 6. Tsai[1] 알고리즘에 의한 카메라 보정을 위한 (a) 보정 박스 및 좌표계 (b) 6번째 이미지.

Fig. 6. (a) calibration box and coordinate system (b) 6th image used in calibration method by Tsai[1].

표 4. 복원된 내부인자값의 비교( $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$ ).

Table 4. Comparison of recovered intrinsic parameters( $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$ ).

Tsai[1]	Proposed
(758.9, 760.0,340.4, 230.3)	(759.3, 759.3,340.6, 228.8)
(880.2, 881.0,352.2, 223.2)	(880.8, 880.2,352.3, 221.5)
(859.9, 861.2,366.6, 220.8)	(860.3, 860.3,366.9, 219.1)
(1091.6, 1094.1,332.6, 232.1)	(1092.2, 1093.1,332.8, 230.1)
(1007.1, 1007.6,335.4, 234.7)	(1007.6, 1006.6,335.6, 232.8)
(1032.0, 1034.5,326.5, 231.5)	(1032.7, 1033.5,326.6, 229.7)

변화에 따른 비교를 위해 각각의 단계에서 카메라의 내부 인자를 변경하면서 6장의 이미지를 획득하였다. 그림 6-(b)는 6번째 이미지를 보여주고 있다. 표 4는 복원된 카메라 내부인자를 제안한 방법과 Tsai[1]의 방법과 비교하고 있다. Tsai[1] 방법의 경우 카메라의 내부 인자가 변화하는 경우에는 각 이미지에 대해 전체 보정 과정을 다시 수행하여야 한다. 제안한 알고리즘의 경우에는 전체 보정과정을 한번만 수행하면 되는 장점이 있다.

표 5와 6은 구해진 외부 보정인자값을 나타낸다. 변위 벡터의

표 5. 복원된 회전각의 비교 [deg].

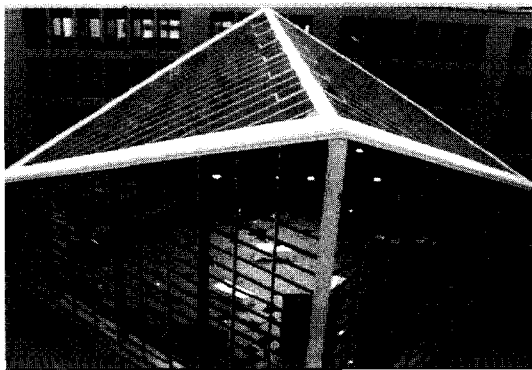
Table 5. Comparison of recovered rotation value [deg].

	Tsai[1]	Proposed
1-2	(-1.028,-15.38,-4.071)	(-1.027,-15.39,-4.046)
1-3	(1.512,-9.616,-2.655)	(1.510,-9.621,-2.641)
1-4	(1.039,-15.76,-3.248)	(1.0378,-15.762,-3.223)
1-5	(1.472,-11.11,-1.945)	(1.471,-11.11,-1.927)
1-6	(0.8954,-23.56,-4.386)	(0.8946,-23.57,-4.349)

표 6. 복원된 변위 벡터의 비교.

Table 6. Comparison of recovered translation vector.

	Tsai[1]	Proposed
1-2	(-0.9697,0.0697,0.2343)	(-0.9695,0.0702,0.2344)
1-3	(-0.6883,-0.1493, 0.7099)	(-0.6883,-0.1482,0.7100)
1-4	(-0.7549,-0.0335, 0.6550)	(-0.7547,-0.0322,0.6552)
1-5	(-0.7404,-0.1194, 0.6615)	(-0.7403,-0.1183,0.6616)
1-6	(-0.8644,-0.0775,0.4968)	(-0.8643,-0.0766,0.4970)



(a)



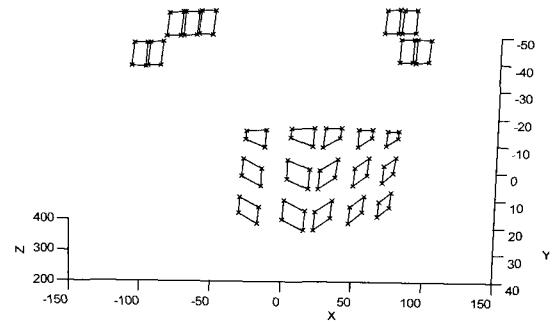
(b)

그림 7. 캠코더를 이용하여 획득한 건물 이미지 (a) 첫번째 이미지와 보정 과정에 사용한 제어점들 (b) 두 번째 이미지와 3차원 복원에 사용한 대응점들.

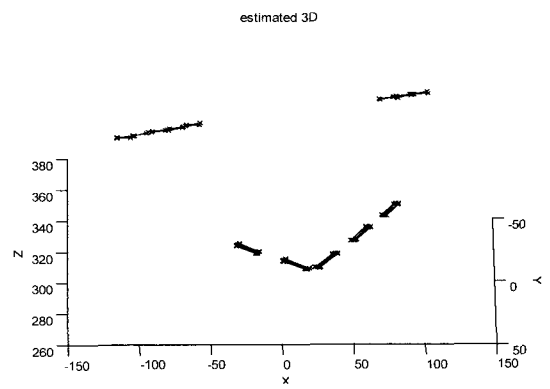
Fig. 7. Building image acquired using cam-corder (a) first image and control points used in the calibration (b) second image and corresponding point used in the reconstruction.

경우 제안한 알고리즘은 절대 크기를 알수 없으므로 단위 벡터로 나타내었다.

Tsai[1] 알고리즘과의 비교를 통해 제안한 알고리즘의 경우



(a)



(b)

그림 8. 제안된 알고리즘에 의해 복원된 스케일하의 유클리디안 3차원 형상 (a) 전면에서 바라본 형상 (b) 위에서 바라 본 형상.

Fig. 8. Euclidean 3D shape under scale by proposed algorithm (a) front view (b) up-down view.

Tsai[1]알고리즘의 성능에 가까운 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 캠코더를 이용하여 획득한 외부의 빌딩을 나타낸다. 카메라 보정을 위한 세 점으로 이루어진 점들은 손으로 지정하였으며 이는 그림 7-(a)에 나타나 있다.

보정시 사용한 두 직선사이의 각도의 참값은 90°로 가정하였으며, 이는 그림 7-(a)를 볼 때 타당함을 알 수 있다. 제안된 알고리즘에 의해 추정된 직선 사이의 각도의 평균과 분산은 92.2°/3.27 이다. 추정된 유클리디안 행렬의 분리를 통해 구해진 두 이미지 사이의 회전 성분값은  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = (-6.75, -13.3, -3.96)$  이며 단위 변위 성분값은  $(T_x, T_y, T_z) = (0.984, 0.00976, 0.178)$ 이다. 이러한 값들은 그림 7의 두 장의 이미지와 비교할 때 타당한 값을 알 수 있다. 그림 8-(a)는 그림 7-(b)의 대응점들의, 제안한 알고리즘에 의해 복원된 3차원 좌표를 보여주고 있다.

그림 8-(b)는 또 다른 시점에서 바라본 경우이며, 대상물의 평면성등을 잘 보존함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 3차원 공간상의 직선들간의 기지의 각도

정보를 이용한 카메라 보정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존의 순차적인 방법들이 각 단계에서 서로 다른 영상내의 제약 조건을 요구하는 반면에 단지 영상내의 기지의 각도의 정보만을 이용하여 사영 구조에서 유클리안 구조로의 직접적인 변환 행렬을 구할 뿐만 아니라, 카메라의 내부 변수가 변화하는 경우에도 잘 대처할 수 있다. 제안한 알고리즘은 인간에 의해 만들어진 구조물-평면으로 이루어진 빌딩등-의 형상 복원시 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 카메라 렌즈의 왜곡 변수를 고려하는 접근 방식도 필요하리라 본다.

#### 참고문헌

- [1] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, Aug, 1987.
- [2] O. D. Faugeras and G. Toscani, "Camera calibration for 3D computer vision," *Proceedings of International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, Tokyo, Japan, 1987.



#### 하 종 은

1968년 11월 20일생. 1992년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1994년 서울대학교 기계공학과 석사. 2000년 한국과학기술원 기계공학부 박사(Computer Vision). 2000. 2~2002. 8 삼성코닝 2002. 8~현재 동명정보대학교 멀티미디어공학과 재직. 관

심분야는 자율보정을 통한 삼차원 복원, 마크프리 모션 캡처, 인공 지능.

- [3] O. Faugeras, "Stratification of three-dimensional vision: projective, affine and metric representations," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.12, no. 3, pp. 465-484, 1995.
- [4] O. Faugeras, S. Laveau, L. Robert, G. Csuska and C. Zeller, "3-D reconstruction of urban scenes from sequences of images," *INRIA RR-2572*, 1995.
- [5] B. Boufama, R. Mohr and F. Veillon, "Euclidean constraints for uncalibrated reconstruction," *International Conference on Computer Vision*, pp. 466-470, 1993.
- [6] O. Faugeras, "What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?," *Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision*, pp. 563-578, 1992.
- [7] R. Hartley, R. Gupta, and T. Chang, "Stereo from uncalibrated cameras," *Proceedings of IEEE Int. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 761-764, 1992.
- [8] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.
- [9] S. Bounoux, "From projective to euclidean space under any practical situation, a criticism of self-calibration," *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, pp. 790-796, 1998.

#### 권 인 소

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 4 권 제 3 호 참조.