

시각측정시스템의 캘리브레이션 및 측정성능 검토

김진영*, 조형석**

Calibration and Investigation into Measurement Performance of a Visual Sensing System

Jin Young Kim*, Hyung Suck Cho**

ABSTRACT

It is necessary to calibrate measurement systems to enhance its measurement accuracy. The visual sensing system that is presented in our previous work has to be calibrated, too. It is a multiple mirror system for three-dimensional measurement, which is composed of a camera and a series of mirrors. It is important to calibrate the positions and orientations of the mirrors relative to the camera because they have direct influence on the relationship between the image plane and the task space. This paper presents the calibration method for the visual sensing system. To confirm the measurement performance of the implemented system, its measurement accuracy in measuring the locations in three-dimensional space is investigated. A series of experiments for measuring the locations of the circle-shaped marks are performed. Experimental results show that the sensing system can be effectively used for three-dimensional measurement.

Key Words : Visual sensing system (시각측정시스템), Calibration (캘리브레이션), Measurement accuracy (측정정도), Three-dimensional measurement (3차원측정), Stereo vision (스테레오비전), Multiple mirror system (다중거울시스템), Pyramidal mirror (사각뿔거울), Camera (카메라)

1. 서론

측정시스템을 이용하여 대상물체를 측정하는 경우에 측정정도를 향상시키기 위해서는 시스템의 캘리브레이션이 이루어져야 한다. 본 논문에서 다루는 시각측정시스템의 경우에도 측정정도를 높이고 얻어진 측정결과와 신뢰도를 향상시키기 위하여 캘리브레이션이 수행되어야 할 필요가 있다.

이 시스템은 저자들의 이전 연구¹⁾에서 3차원 측정을 위해 제안되어진 것으로 하나의 카메라와 몇 개의 거울로 이루어진 다중거울시스템(multiple

mirror system)으로써, 스테레오 비전(stereo vision) 원리에 기초하여 한 장의 영상만으로 3차원 측정이 가능할 뿐 아니라, 다방향 측정성(multi-directional measurement)을 갖고 있어서 폐색에 의한 정보 누락을 극복할 수 있다. 따라서 측정시간이 단축되고, 또한 로봇에 쉽게 부착할 수 있는 구조로 되어 있어서 로봇을 이용한 조립 등 실제 작업에 쉽게 적용할 수 있도록 되어 있다. 특히 이 시스템의 주요 대상인 유연부품의 조립작업(flexible parts assembly)에 있어서는, 성공적인 조립을 위한 필수조건이면서도 그 동안의 많은 연구들

* 동명정보대학교 로봇시스템공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

구멍이 다부지 않았던 임의 방향의 부품변형 및 부품과 폐색된 구멍(occluded hole) 사이의 상대오차를 둘 다 측정하는 문제를 효과적으로 수행할 수 있도록 되어 있다.

제안된 시스템은 카메라를 포함한 다중거울시스템이기 때문에 카메라와 다중거울시스템의 캘리브레이션이 이루어져야 하는데, 이는 카메라와 거울들의 설치위치 및 각도 등의 실제 값을 측정함으로써 설계값과의 오차를 보정해 주는 것을 의미한다. 즉 카메라에 투영된 실제 영상으로부터 대상물체의 3차원 정보를 올바르게 추출하기 위해서는 각종 계지를 이용한 각 설계변수의 직접측정 또는 이미 알고있는 위치의 측정정보를 이용한 간접측정 등의 방법을 이용하여 캘리브레이션해야만 한다. 제안된 시스템에 있어서도 실제 영상으로부터 올바른 측정결과를 얻기 위해서는 카메라와 거울들 사이의 위치 및 각도를 포함한 오차보정이 이루어져야 한다.

카메라의 경우에는 카메라 캘리브레이션 방법^(5,6)을 이용하여 그 위치 및 방향 그리고 초점거리를 비롯한 카메라의 내부인자(internal parameter)에 대해 캘리브레이션할 수 있다. 그러나 구현된 시스템에서는 카메라 렌즈로써 고정초점 렌즈를 사용했기 때문에 초점거리 등의 내부인자에 대해서는 굳이 캘리브레이션 할 필요성이 적고, 다만 영상면과 작업공간 사이의 상관관계에 직접적으로 영향을 미치는 카메라에 대한 각 거울들의 상대적인 위치 및 각도오차의 캘리브레이션이 중요하다. 이에 본 논문에서는 이러한 내용을 중심으로 하는 캘리브레이션 방법을 제안한다.

한편 캘리브레이션된 시스템이라 할지라도 분해능, 조명의 영향, 캘리브레이션 오차 등 여러 원인에 의해 측정오차가 발생하게 되는데, 이에 따라 시스템에 의한 측정오차가 어느 정도 되는지를 파악하고 이를 통해 시스템의 측정성능을 평가할 필요가 있다. 제안된 시스템의 경우에는 3차원 측정을 기본목적으로 하고 있고, 이에 따라 부품변형 등 임의 공간 상의 절대위치를 측정해야 하기 때문에 본 논문에서는 이와 같은 3차원 공간 상의 임의의 점의 위치측정 실험을 통해 시스템의 측정성능을 확인하고자 한다. 3차원 측정의 방법으로는 에피폴라(epipolar) 구속조건에 기초한 스테레오 매칭(matching)⁽⁷⁾을 이용한다. 다시 정리하면 한 장의 영상만으로 3차원 측정이 가능한 측정시스템에 대해 캘리브레이션 방법 및 측정성능을 검토하는 것이 본 논문의 목적이다.

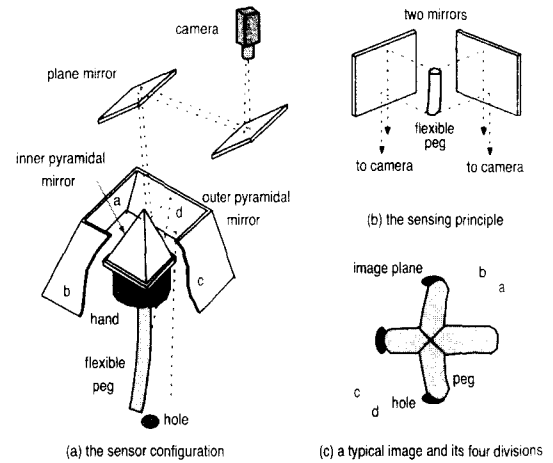


Fig. 1 The schematic of the sensing system

2. 시각측정시스템

Fig. 1(a)는 제안된 측정시스템의 기본구조로써 현대의 카메라와 두개의 평면거울(plane mirror), 두개의 사각뿔거울(pyramidal mirror) 그리고 부품을 파지하기 위한 핸드(hand)로 이루어져 있는데, 현대의 카메라로 3차원 위치 및 형상을 측정하기 위하여 Fig. 1(b)와 같은 원리로 두개의 거울에 비친 영상을 조합하여 이로부터 대상물체의 3차원 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

외측 사각뿔거울(outer pyramidal mirror)은 사각뿔대(frustum), 내측 사각뿔거울(inner pyramidal mirror)은 사각뿔(pyramid)의 형상을 하고 있는데, Fig. 1(a)에 보여진 것처럼 측정 대상물의 임의의 한 점에서 출발한 빛은 먼저 외측 사각뿔거울의 내부 4개면에 투영되고 이로부터 내측 사각뿔거울의 대응하는 4개면을 거쳐 위로 향하게 된다. Fig. 1(c)는 카메라에 투영된 영상의 예로써 사각뿔거울의 4개면에 대응하여 영상면이 4분할 되어있음을 알 수 있다.

사각뿔거울의 4개면에 비친 영상이 하나의 카메라에 투영됨으로써, 결국 4대의 카메라를 사용한 것과 같은 효과를 얻고 있다. 스테레오 비전을 이용하기 위해서는 두 대의 카메라 즉 거울 두개면만 있으면 되지만, 사각뿔의 4개면을 모두 이용함으로써 사각뿔의 두 면 만에 의해서는 보이지 않는 반대편에 대한 정보까지 이용할 수 있도록 함으로써 폐색에 의한 정보누락을 방지하는 다방

향(multi-directional) 측정성을 갖고 있다.

한편 제안된 시스템의 캘리브레이션은 Fig. 2에 보여진 절차에 의해 행해질 수 있는데, Fig. 3과 Fig. 5에 보여지는 것처럼 카메라와 내측 사각뿔거울 사이의 캘리브레이션, 내측 사각뿔거울과 외측 사각뿔거울 사이의 캘리브레이션으로 나누어질 수 있다. 단 여기에서 두 평면거울 및 두 사각뿔거울은 충분히 정밀하게 가공되어 있다고 가정한다. 즉 두 사각뿔의 각 면은 90°의 등간격으로 배열되어 있고, 각 면의 기울기도 모두 동일하게 설계값대로 가공되어 있다고 가정한다. 물론 이러한 항목들은 모두 직접 측정 가능하고 조립 이전에 가공 정도의 검사를 통해 확인될 수 있다.

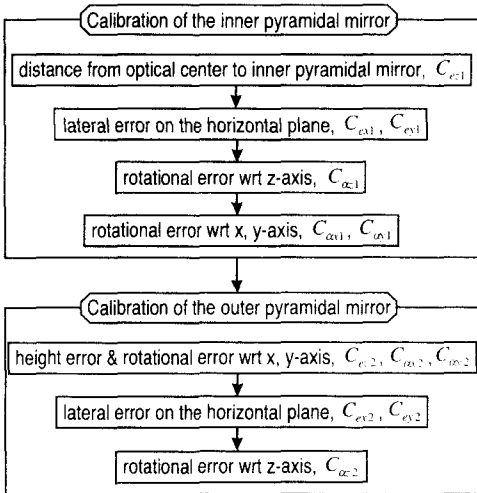


Fig. 2 Calibration procedures of the system

3. 내측 사각뿔거울의 캘리브레이션

카메라로부터 두개의 평면거울을 포함한 내측 사각뿔거울 사이의 캘리브레이션은 가공품인 내측 사각뿔거울의 측정 치수와 Fig. 4에 보여지는 카메라 영상면에 투영된 내측 사각뿔거울의 영상으로부터 수행될 수 있다. 즉 사각뿔 밑면의 두 변 및 대각선 영상의 직선의 방정식을 구하고 이로부터 필요 정보를 추출함으로써 카메라와 내측 사각뿔거울의 상대적인 위치 추정이 가능하다. 단 이와 같은 캘리브레이션의 결과에는 두 평면거울의 영향이 포함되어 있다.

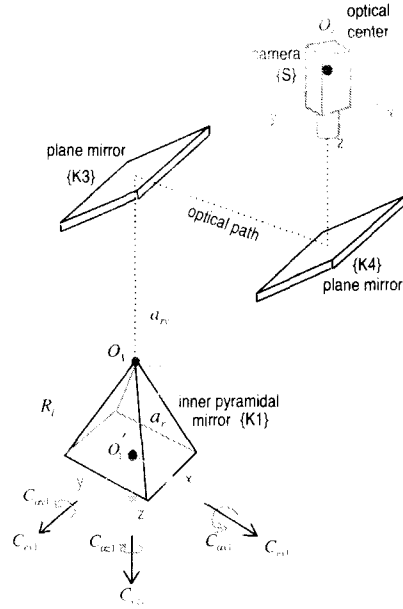


Fig. 3 Calibration parameters of the inner pyramidal mirror

3.1 광학중심에서 내측 사각뿔거울까지의 상대거리오차 (C_{e1})

카메라에 대한 사각뿔의 상대적인 기울어짐이 없다면 사각뿔 밑면의 한 변의 실제 길이를 R_l , 영상면에 투영된 길이를 r_l , 그리고 시스템에 사용된 고정 초점렌즈의 초점거리를 f 라 할 때 얇은 렌즈공식(thin-lens formula)⁽⁸⁾으로부터 광학계의 중심 O_c 에서 내측 사각뿔거울의 밑면의 중심 O'_l 까지의 실제 설치거리 a_r 과 설계값 a_d 와의 오차 C_{e1} 은 다음과 같이 구해진다.

$$a_r = \left(\frac{R_l + r_l}{r_l} \right) f$$

$$C_{e1} = a_d - a_r \tag{1}$$

Fig. 3과 Fig. 4는 R_l , r_l , a_r 을 보여준다.

3.2 수평면상의 상대위치오차 (C_{e11}, C_{e12})

Fig. 4는 수평면 상의 상대위치오차가 존재할 때 영상면 상에 보이는 내측 사각뿔거울의 윤곽선 모습이다. 영상면 상에서 영상면의 원점 O_c 와

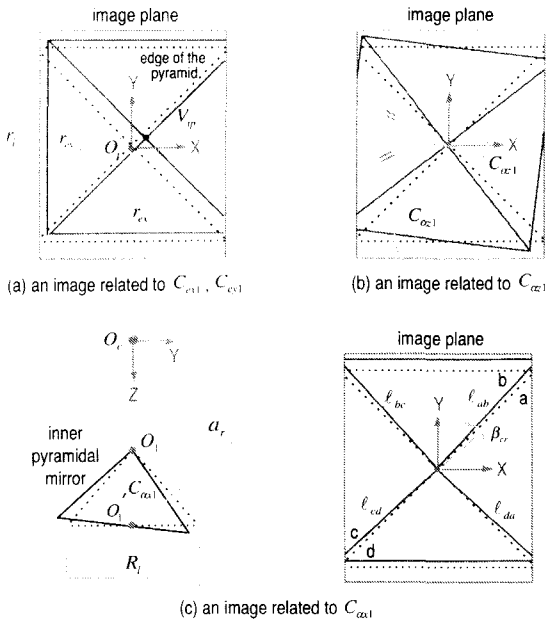


Fig. 4 Calibration between the camera and the inner pyramidal mirror
(----- without error, — with error)

내측 사각뿔거울의 원점인 꼭지점의 영상 V_{ip} 사이의 x, y 방향 오차를 각각 r_{ex}, r_{ey} 라 하면 내측 사각뿔거울의 실제 오차 C_{ex1}, C_{ey1} 은 얇은 렌즈 공식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$C_{ex1} = \left(\frac{a_{rv} - f}{f}\right)r_{ex}$$

$$C_{ey1} = \left(\frac{a_{rv} - f}{f}\right)r_{ey} \quad (2)$$

여기서 a_{rv} 는 광학계의 중심 O_c 에서 내측 사각뿔거울의 꼭지점 O_1 까지의 실제거리이다.

3.3 z축에 대한 상대각도오차 (C_{ax1})

카메라와 내측 사각뿔거울 사이에 z축에 대한 상대각도오차가 없다면 내측 사각뿔거울 밀면의 두 변은 영상면 상의 x, y 축과 서로 평행을 이룰 것이다. 이를 이용하면 Fig. 4(b)에서 보는 것처럼 실제 사각뿔 영상에서의 한 변과 수평 또는 수직선과의 각도가 곧 카메라에 대한 내측 사각뿔거울의 z축에 대한 각도오차 C_{ax1} 임을 알 수 있다. 한

편 사각뿔의 x, y 축 방향 기울어짐오차가 없다면 사각뿔의 구역 경계선인 두 대각선 사이의 각도를 이등분하는 중심선은 수평 또는 수직이어야 하므로 이를 이용하여 실제 사각뿔 영상에서의 중심선과 수평 또는 수직선과의 각도로부터 C_{ax1} 을 구할 수도 있다.

3.4 x, y축에 대한 상대기울어짐오차 (C_{ax1}, C_{ay1})

Fig. 4(c)에 보여지는 것처럼 사각뿔의 기울어짐 C_{ax1} (또는 C_{ay1})이 발생하면 사각뿔의 각 면 사이의 경계선 l_{ab} 와 l_{cd} 는 서로 직선을 이루지 못하고 어느 각도 β_{cr} 를 갖게 된다. 따라서 이들 정보로부터 C_{ax1} (또는 C_{ay1})을 추정할 수 있고, 역으로 각 면의 경계선이 직선을 이루도록 함으로써 기울어짐이 없는 상태로 만들 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 매우 복잡한 C_{ax1} (또는 C_{ay1})의 추정식을 이용하지 않고 후자의 방법으로 오차가 없는 상태가 되도록 조정하였다. 이와 같이 함으로써 기울어짐오차가 없어지는 것 이외에 사각뿔의 다른 변수의 캘리브레이션이 훨씬 간편하게 수행되어질 수 있다.

3.5 두 평면거울의 영향

카메라와 내측 사각뿔거울 사이의 상대적인 위치 및 각도를 보정하는데 있어서, 앞에서 기술한 것과 같은 방법의 경우 카메라와 내측 사각뿔거울 사이에 위치한 두 평면거울이 영향을 미치지 않기 때문에 그 결과는 두 평면거울의 상태가 포함되어 나타나게 된다. 이를 고찰해 보면 Fig. 3에서 평면거울에 x, z 방향의 위치오차가 생기게 되면 내측 사각뿔의 영상이 영상면의 중심으로부터 편심되어 나타나는 효과가 발생한다. 그러나 이는 앞에서 기술한 카메라와 내측 사각뿔거울 사이의 캘리브레이션에 그 효과가 포함되기 때문에 영상면에서의 정보로부터 실제 대상물체의 올바른 측정 결과를 얻고자 하는 최종목적을 달성하는데 있어서 문제될 것이 없다. 또한 평면거울의 y 방향 위치오차는 카메라 영상에 어떤 영향도 미치지 않기 때문에 이는 당연히 문제되지 않는다.

다만 두 평면거울의 x, y, z 축에 대한 각도오차는 내측 사각뿔거울의 캘리브레이션에 직접적으로

영향을 미치고, 그 각도오차에 의해 내측 사각뿔 거울이 잘못된 값으로 캘리브레이션 될 수 있다. 그러나 제안된 시스템의 경우 기계가공에 의해 만들어진 두 평면거울은 거울의 반대편이 외부로 드러나 있기 때문에 두 평면거울의 위치 및 각도를 계이지를 이용하여 외부에서 직접 측정하는 것이 가능하다⁽¹⁾. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 방법으로 직접 측정에 의해 두 평면거울의 위치 및 각도에 오차가 생기지 않도록 조정함으로써 평면거울의 영향을 제거하고, 내측 사각뿔거울의 캘리브레이션을 용이하게 할 수 있도록 하였다.

4. 외측 사각뿔거울의 캘리브레이션

내측 사각뿔거울과 외측 사각뿔거울 사이의 상대적인 위치 및 각도의 캘리브레이션은 위치를 알고 있는 임의의 점의 영상을 통해 행해질 수 있다. 여기서 위치를 알고 있는 기준점 p_{ref} 는 Fig. 5(b)에 보여지는 것처럼 내측 사각뿔거울과의 상대 위치를 직접측정에 의해 정확히 알 수 있는 기준핀(reference pin)을 이용하여 구할 수 있다.

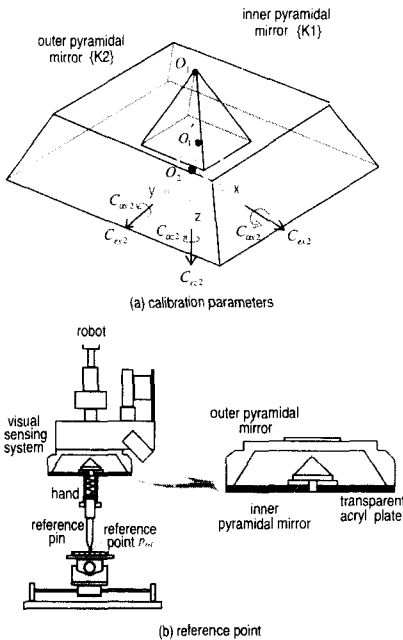


Fig. 5 Calibration parameters of the outer pyramidal mirror

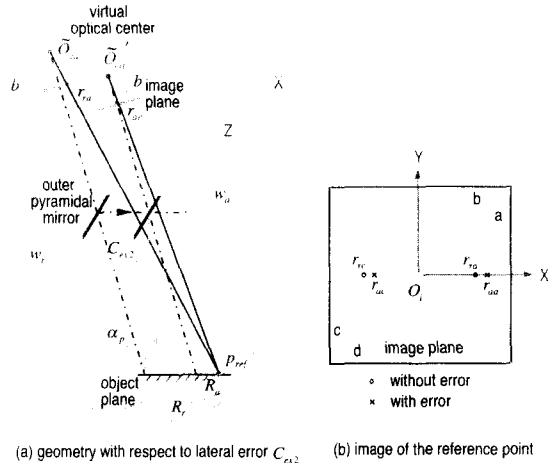


Fig. 6 Lateral error of the outer pyramidal

4.1 수평면상의 상대위치오차 (C_{ex2} , C_{ey2})

Fig. 6에 보여지는 것처럼 내측 사각뿔거울에 상대적인 외측 사각뿔거울의 위치가 x 방향으로 C_{ex2} 만큼 편심되면 그에 따라 대응하는 영상도 바뀌게 되는데, 편심량과 대응하는 영상의 위치 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \frac{r_{ra}}{R_r} &= \frac{b}{w_r} \\ \frac{r_{rae}}{R_a} &= \frac{b}{w_a} \\ R_r &= R_a + C_{ex2} \cos \alpha_p \\ w_r &= w_a + C_{ex2} \sin \alpha_p + C_{ex2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 r_{ra} 는 오차가 없는 경우 영상면 영역 a에서의 p_{ref} 의 투영점이고 R_a 및 R_r 은 각도오차가 있는 경우와 없는 경우에 있어서 p_{ref} 로부터 영상면의 중심에 대응하는 기준 광로까지의 거리이다. w_a 및 w_r 은 각각 오차가 있는 경우와 없는 경우의 p_{ref} 의 측정거리(working distance)이고, α_p 는 기준 광로와 물체평면의 법선 사이의 각도이며, b 는 상거리(image distance)를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 C_{ex2} 는 다음과 같이 된다.

$$C_{ex2} = \frac{(r_{ra} - r_{rae})w_r}{r_{ae}(1 + \sin \alpha_p) - b \cos \alpha_p} \quad (4)$$

여기서 r_{av} 는 실제 경우에 있어서 p_{ref} 의 투영점의 등가거리로써, 오차가 있는 경우와 없는 경우에 영상면 영역 a와 c 사이에서의 p_{ref} 의 투영점을 각각 r_{aa} , r_{ac} , r_{ca} , r_{cc} 라고 하면 다음과 같이 주어진다.

$$r_{cr} = r_{ra} + \frac{r_{aa} + r_{cc}}{2} \quad (5)$$

여기서 r_{aa} 와 r_{cc} 의 부호는 서로 반대이다. 또한 y 방향으로의 상대위치오차 C_{cy2} 의 경우에도 C_{cx2} 와 방향만 다를 뿐 같은 방법으로 구할 수 있다.

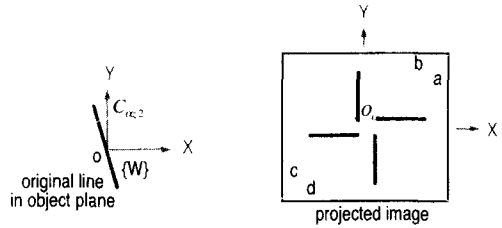
4.2 z축에 대한 상대각도오차 ($C_{\alpha 2}$)

내측 사각뿔거울에 대한 외측 사각뿔거울의 z축에 대한 상대각도오차 $C_{\alpha 2}$ 가 존재할 때 물체 평면상의 직선이 투영된 모습은 Fig. 7(a)에 보여지는 바와 같이 물체평면 상에서 x, y축과 $C_{\alpha 2}$ 의 각도를 갖는 직선이 영상면 상에서는 수평, 수직으로 보이게 되는데, 이때 네 개의 영역에 해당되는 영상이 영상면의 중심 O_i 에서 만나지 않게 된다. 따라서 각 영역에서의 영상이 수평 또는 수직을 이루고 또한 이들이 영상면의 중심에서 만나도록 함으로써 $C_{\alpha 2}$ 가 0이 되도록 할 수 있다.

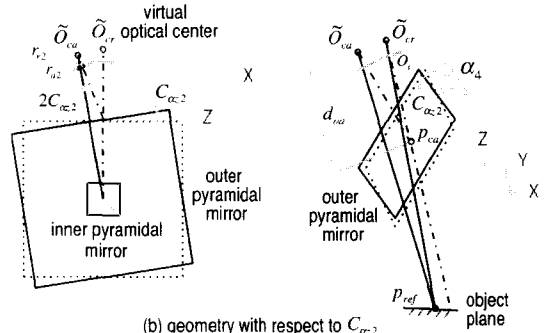
한편 Fig. 7(b)에 보여진 것처럼 각도오차가 없는 경우와 있는 경우의 가상초점 \tilde{O}_{cr} , \tilde{O}_{ca} 는 \tilde{O}_{cr} 로부터 영상면의 원점 O_i 를 지나는 광로와 사각뿔 한면의 교점을 p_{ca} 라 하고 \tilde{O}_{cr} 로부터 p_{ca} 까지의 거리를 d_{ou} 라 하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tilde{O}_{cr} &= (-d_{ou} \sin \alpha_4, 0, d_{ou} \cos 2\alpha_4) \\ \tilde{O}_{ca} &= (-d_{ou} \sin 2\alpha_4 \cos 2C_{\alpha 2}, -d_{ou} \sin \alpha_4 \sin 2C_{\alpha 2}, d_{ou} \cos 2\alpha_4) \end{aligned} \quad (6)$$

단 p_{ca} 의 좌표를 (0, 0, 0)이라고 가정한 것이며, α_4 는 외측 사각뿔거울 각 면의 경사각을 나타낸다. 또한 Fig. 5(b)에서처럼 이미 그 위치를 알고 있는 기준점 p_{ref} 에 대해 $C_{\alpha 2}$ 와 이에 따른 영상면에서의 투영점 사이의 관계는 다음과 같이 구해질 수 있다.



(a) projection of a line with a rotation angle $C_{\alpha 2}$



(b) geometry with respect to $C_{\alpha 2}$

Fig. 7 Rotational error with respect to z-axis of the outer pyramidal mirror

$$\begin{aligned} (x - r_{r2}) \cdot \overline{\tilde{O}_{ca} p_{ca}} &= 0 \\ x &= \tilde{O}_{ca} + t \cdot \overline{\tilde{O}_{ca} p_{ref}} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 교점을 구하기 위해 t를 소거하면

$$r_{a2} = \tilde{O}_{ca} + \frac{f \cdot \left| \overline{\tilde{O}_{ca} p_{ca}} \right|}{\overline{\tilde{O}_{ca} p_{ref}} \cdot \overline{\tilde{O}_{ca} p_{ca}}} \overline{\tilde{O}_{ca} p_{ref}} \quad (8)$$

여기서 r_{a2} 는 오차가 있는 경우의 p_{ref} 의 투영점이기 때문에 영상면에서 측정할 수 있고, f는 렌즈의 초점거리로써 설계 시 주어지는 값이다. 또한 p_{ref} , p_{ca} 는 이미 그 좌표값을 알고 있는 것이며, \tilde{O}_{ca} 는 단지 $C_{\alpha 2}$ 만의 함수로 정의되고 있기 때문에 수치해석적 방법을 이용하면 $C_{\alpha 2}$ 를 구할 수 있다.

4.3 상대높이 및 기울어짐오차 (C_{ez2} , $C_{\alpha 2}$, C_{cy2})

내측 사각뿔거울과 외측 사각뿔거울은 Fig. 5(b)에서 보여지는 것처럼 아크릴 평판의 윗면에

같이 취부되어 있다. 내측 사각뿔거울 및 외측 사각뿔거울의 가공정도와 아크릴 평판의 평면도는 충분히 정밀하다고 가정할 수 있기 때문에 가공오차를 무시하면 내측 사각뿔거울에 상대적인 외측 사각뿔거울의 높이오차 C_{ex2} 및 기울어짐오차 C_{ax2} , C_{ay2} 는 거의 없는 것으로 무시할 수 있다.

한편 이들을 측정하고자 한다면 측정시스템의 완성품 조립 이전에 아크릴 평판 위에 취부된 내측 및 외측 사각뿔거울만을 가지고 측정기를 이용하여 직접 측정할 수도 있다. 4.1절과 4.2절에서 기술한 C_{ex2} , C_{ay2} , C_{ax2} 의 캘리브레이션 방법은 C_{ex2} , C_{ax2} , C_{ay2} 를 0으로 가정한 것으로, 이는 실제 구현에 문제가 없을 뿐 아니라, 시스템의 캘리브레이션을 보다 더 단순하고 쉽게 이루어 질 수 있도록 한다.

5. 임의 점의 위치 측정

5.1 실험 방법

일반적으로 시각센서를 이용한 측정시스템에서는 비록 캘리브레이션 되었다 할지라도 시각센서의 분해능, 조명 및 대상물체 그리고 외부환경에 의한 영상의 불확실함, 캘리브레이션 오차 등에 의해 측정오차가 존재한다. 제안된 시스템의 경우에도 조명의 불완전함으로 인하여 깨끗한 영상이 아닌 잡음(noise)이 많이 섞인 영상이 얻어지게 되고 이로 인하여 정확한 정보 추출이 곤란하게 된다. 또한 시스템이 갖는 분해능의 한계, 캘리브레이션 오차 등이 합해져서 측정오차가 발생하게 되는데, 위치를 알고 있는 임의 점의 위치를 측정함으로써 시스템에 의한 측정오차가 어느 정도 되는지를 파악하고 이를 통해 시스템의 측정 성능을 평가할 필요가 있다. 특히 제안된 시스템의 경우에는 3차원 측정을 기본 목적으로 하고 있고, 이에 따라 부품변형 등 임의 공간 상의 절대 위치를 측정해야 하기 때문에 이와 같은 3차원 위치 측정 시의 측정 성능을 알아보하고자 한다.

이를 위하여 본 논문에서는 Fig. 8(a)에 보여진 것처럼 측정영역 내에서 5 mm 간격의 9점을 선택하여 10 mm 간격의 3개의 높이에서 각각 측정하는 실험을 통해 실제 위치와의 측정오차를 파악하였다. 측정점들의 절대위치 확인은 Fig. 8(b)에 보여지는 것처럼 측정점들이 표시된 시험종이(test

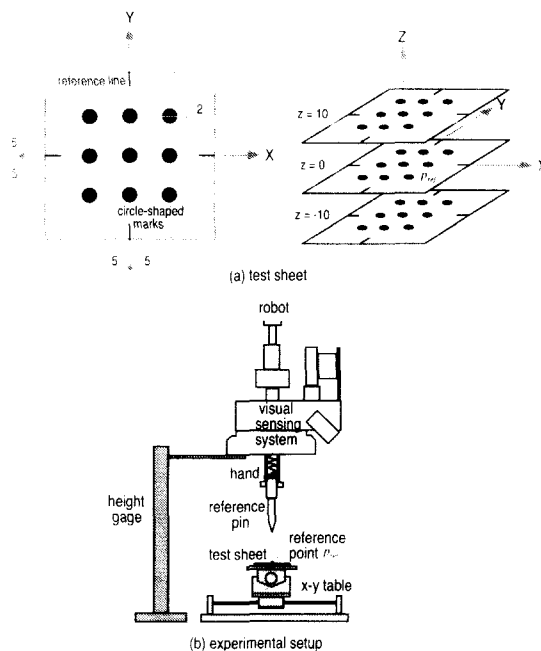


Fig. 8 Experimental setup for measuring the locations of marks

sheet)를 xy table 위에 올려 놓고 기준핀을 이용하여 기준핀의 선단인 기준점(reference point) p_{ref} 와 측정점의 중심을 일치시킴으로써 확인하였다. 즉 3차원 공간상의 위치를 알고 있는 기준점을 이용하여 측정점들을 정확하게 위치시키고, 이로부터 높이 측정용 게이지(height gage)를 이용하여 측정시스템의 높이만을 변화시켜 가면서 측정을 수행하였다.

한편 같은 점에 대응하는 두 영역에서의 영상을 이용하여 3차원 공간 상에 재구성할 때 측정오차로 인하여 두 광로에 해당하는 두 직선이 만나지 않는 경우가 있기 때문에, 이에 대비하여 한 영역에서의 실제 투영점으로부터 극선(epipolar line)까지의 가장 근접점을 새로운 대응점으로 취하여 재구성하도록 하였다.

5.2 실험 결과

시험종이 상의 9개의 측정점들에 대한 임의 높이에서의 카메라 영상면의 투영영상 및 이로부터 역으로 재구성한 9점의 측정 위치가 Fig. 9에 보여진다.

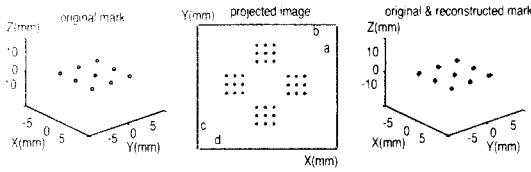


Fig. 9 Experimental projection and reconstruction of the marks

Table 1은 영상면에서의 투영오차를 나타낸 것으로서 실제 투영위치와 캘리브레이션되어 보정된 거울의 위치로부터 이론적으로 계산된 위치와의 오차를 측정높이에 따라 그리고 영상면에서의 투영 영역에 따라 구분하여 나타낸 것인데, 9점에 대한 측정오차의 평균과 최대값, 최소값 그리고 4개의 영역 모두에 대한 평균과 3개의 높이 모두에 대한 평균값을 보여주고 있다. 여기서 이들 모두의 평균값은 약 0.027 mm로써 영상면에서의 2화소(pixel) 정도에 해당한다.

Table 1 Error in projection of marks

(unit : mm)						
item		view 'a'	view 'b'	view 'c'	view 'd'	average of 4 views
z = 0	average	0.020	0.020	0.036	0.024	0.025
	min	0.005	0.007	0.024	0.003	
	max	0.031	0.037	0.049	0.046	
z = 10	average	0.025	0.017	0.037	0.023	0.026
	min	0.010	0.003	0.026	0.010	
	max	0.037	0.024	0.050	0.033	
z = -10	average	0.016	0.034	0.025	0.048	0.031
	min	0.005	0.015	0.011	0.025	
	max	0.024	0.053	0.035	0.072	
average of 3 z-values	average	0.020	0.024	0.033	0.032	0.027

Table 2 Error in reconstruction of marks

(unit : mm)										
item		view 'ac'	view 'ba'	view 'bc'	view 'cb'	view 'cd'	view 'dc'	view 'da'	view 'ad'	average of 8 views
z = 0	average	0.428	0.477	0.566	0.706	0.747	0.677	0.517	0.551	0.584
	min	0.174	0.214	0.274	0.479	0.477	0.440	0.175	0.378	
	max	0.646	0.786	0.895	0.929	1.090	0.956	0.965	0.787	
z = 10	average	0.665	0.62	0.869	0.934	1.021	0.936	0.471	0.498	0.752
	min	0.427	0.440	0.740	0.774	0.651	0.808	0.182	0.195	
	max	0.871	0.870	1.114	1.134	1.393	1.076	0.659	0.739	
z = -10	average	0.733	0.899	0.797	0.794	0.78	0.989	1.385	1.258	0.954
	min	0.580	0.650	0.507	0.684	0.514	0.490	0.970	1.029	
	max	0.931	1.190	1.109	0.906	1.035	1.478	1.779	1.524	
3 z-values	average	0.609	0.665	0.744	0.812	0.849	0.867	0.791	0.769	0.763
	min	0.467	0.482	0.561	0.675	0.677	0.674	0.584	0.631	
	max	0.717	0.881	1.014	0.981	1.058	1.133	1.101	0.944	

Table 2는 측정점들의 3차원 공간 상의 실제 위치와 시스템에 의해 측정된 위치 사이의 오차를 보여주는데, 영상면의 4영역 중 2영역을 어느 것

으로 선택하는가와 측정높이에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 9점에 대한 측정오차의 평균과 최대값, 최소값을 보여주고, 또한 8개의 영역 조합 모두에 대한 총평균, 그리고 3개의 높이 모두에 대한 총평균과 최대값들의 평균, 최소값들의 평균을 보여주고 있다. 여기서 측정높이와 영역 선택에 따른 모든 경우에 대한 측정점들의 측정오차 평균은 약 0.763 mm이었고, 영역 선택에 따라 측정오차가 최소로 되는 경우들의 평균은 약 0.609 mm이었는데, 이들은 카메라 영상면에서의 약 3, 4화소에 해당한다.

6. 결론

본 논문에서는 시각측정시스템의 측정정도를 향상시키기 위한 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 제안된 캘리브레이션 방법은 카메라 영상면에 보이는 내측 사각뿔거울의 영상과 공간 상의 절대 위치를 알고 있는 기준점의 영상을 이용하여 카메라에 상대적인 내측 사각뿔거울의 위치, 외측 사각뿔거울의 위치를 구하고 있다. 또한 구현된 측정시스템의 측정성능을 파악하고자 위치를 알고 있는 3차원 공간 상의 임의 점의 위치를 측정하는 실험을 수행하였는데, 카메라 영상면에서의 투영 위치는 이론값과 약 2화소 정도의 오차를 보여 주었으며, 투영영상으로부터 재구성에 의해 실제 위치를 측정된 결과는 가장 유리한 영역 선택 시에 약 3화소 정도의 오차를 나타내었다. 이러한 측정오차는 주로 조명 및 외부환경에 의한 영상잡음, 시스템이 갖는 분해능의 한계 등에 의해 발생한다.

이상의 실험결과 3차원 측정을 위해 제안된 측정시스템 및 시스템의 캘리브레이션 방법이 유효함을 보여주고 있고, 특히 다방향 측정성이 요구되는 폐쇄이 발생하는 조립작업 등에서 더욱 유용함을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 김진영, 조형석, 김성권, "유연성있는 부품의 조립을 위한 부품변형 및 상대오차 측정장치," 한국 자동제어 학술회의, pp. 632-635, 1996.
2. Inoue, H., and Inaba, H., "Hand-Eye Coordination in Rope Handling," The 1st Int. Sym. on Robotics

- Research, pp. 163-174, 1985.
3. Chen, C., and Zheng, Y. F., "Deformation Identification and Estimation of One-Dimensional Objects by Vision Sensors," J. of Robotic Systems, Vol. 9, No. 5, pp. 595-612, 1992.
 4. Nakagaki, H., Kitagaki, K., Ogasawara, T., and Tsukune, H., "Study of Insertion Task of a Flexible Wire into a Hole by Using Visual Tracking Observed by Stereo Vision," Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3209-3213, pp. 1996.
 5. Tsai, R. Y. "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. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
 6. Lenz, R. K., and Tsai, R. Y., "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology," IEEE Trans. PAMI, Vol. 10, No. 5, pp.713-720, 1988.
 7. Lasserre, P., and Grandjean, P., "Stereo Vision Improvements," The 6th Int. Conf. on Advanced Robotics. pp. 679-685, 1995.
 8. Pedrotti, F. L., and Pedrotti, L. S., "Introduction to Optics," Prentice-Hall, Inc., 1987.