

# 조립을 위한 새로운 전방향 시각장치의 설계

## Design of a New Omnidirectional Image Sensing System for Assembly(OISSA)

김완수, 조형석, 김성권  
(W. S. Kim, H. S. Cho and S. K. Kim)

**Abstract :** In assembly, misalignment must be detected and compensated for during the mating period, regardless of the complexity of the cross-sectional shape. To this end, we propose a novel omnidirectional image sensing system for assembling parts with complicated shapes(OISSA) and its feasibility for detecting the misalignment between mating parts is shown by a series of simulations. This system encompasses a camera with an optical unit attached to the front of the camera. The optical unit consists of a pair of plane mirrors and a pair of conic mirrors. Utilizing the proposed sensing system, a  $2\pi$  coaxial image of the misalignment along the mating boundary interface between mating parts can be immediately obtained without experiencing self-occlusion.

**Keywords :** assembly, misalignment, conic mirror, omnidirectional sensing, image sensor

### I. 서론

조립은 제조공정의 한단계로서 위치결정 작업이다. 조립 작업시 발생하는 두 부품사이의 위치 및 각도오차는 조립부품사이에 매우 큰 반력을 초래하여 조립을 방해하고 종종 로봇 또는 부품에 손상을 초래하게 된다. 조립에서 이러한 문제를 극복하고자 오차의 감지 및 보정방법에 대해서 많은 연구성과가 있었다[1]. 그러나 지금까지 이러한 연구의 대부분이 단순한 대칭부품에 대해서 이루어져 왔고[2]-[5], 전방향의 오차의 이해가 필요한 복잡한 비대칭형상에 대한 연구는 미미한 상황이다[6]. 사각부품을 포함한 복잡한 형상을 갖는 부품의 조립을 위해서는 보정 방법과 아울러서 시각영역없이 전방향오차를 감지할 수 있는 효과적인 감지방법이 요구된다.

일반적으로 자동조립에서 조립부품사이의 오차를 측정하기 위해서 근접(proximity) 센서, 접촉(tactile) 센서, 역각(force) 센서와 시각(vision) 센서 등을 이용한 많은 방법들이 개발되어 왔다[1][7][8]. 그러나 이 센서들을 이용한 방법은 국부적인 정보를 얻기에 적합하며 전방향오차를 측정하는 데는 많은 시간이 소요되는 등의 문제가 발생하여 그 적용에 한계가 있다. 다시 말하면, 접촉센서를 포함한 역각센서는 접촉반력을 최소로 유지하여 부품 및 로봇에 손상을 방지할 수 있으나, 국부적인 접촉특성에 의해서 목표탐색을 하므로 복잡한 형상의 경우 접촉상태를 해석하기 어렵고 전방향의 오차측정에 시간이 많이 걸린다. 한편, 시각센서는 부품결합 전에 비접촉으로 물체의 형상과, 상대적인 위치 및 방향오차 정보를 얻을 수 있으므로 결합시 보정에 요하는 시간과 오차에 의한 충격의 영향을 줄일 수 있다. 이 때문에 실제로 다양한 조립작업에 응용되고 있다. 조립에 있어서 시각센서의 응용분야는 주로 PCB 부품의 조립[9][10]과 원형 및 각형과 같은 단순 대칭형상의 기계부품[11]-[13] 등이다. 이러한 연구의 대부분은 고정방법(fixed method)과 재배치 방법(relocation method)의 두가지로 분류할 수 있다. 고정방법은 그림1(a)에서와 같이 카메라(camera)를 기

울여서 측정물체의 정보를 가장 잘 얻을 수 있는 방향과 위치에 고정설치하고, 이때 이 센서로써 조립부품들 사이의 상대위치 및 자세오차 정보를 측정하는 방법이다.

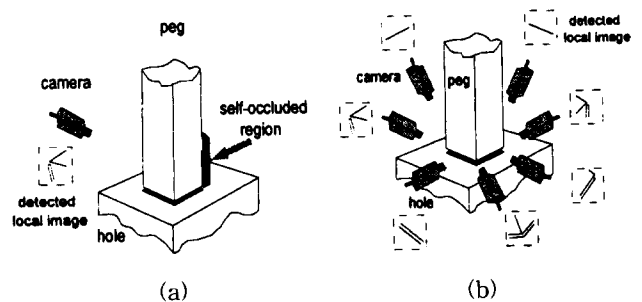


그림 1. 시각센서를 이용한 상대오차의 측정방법 : (a) 고정방식, (b) 재배치 방식.

Fig. 1. Sensing methods for relative geometric errors using a camera : (a) a fixed method, (b) a relocation method.

이 방법은 활상각도 (viewing angle)가 고정되어 있기 때문에 조립물체 자체에 가리워서 조립대상이 보이지 않게 되는 사각(self-occlusion)영역의 발생을 피할 수 없게 된다. 그러므로 단지 카메라의 설치방향과 일치하는 방향에 대한 부분적인 정보만을 얻을 수 있으며 조립부품들 사이의 원주방향으로의 전방향오차는 측정이 곤란하다. 더우기, 획득된 국부정보의 유실이 발생하는 경우에 오차의 추정이 곤란할 뿐만 아니라, 전방향오차 정보를 필요로 하는 복잡한 형상을 갖는 물체의 경우에 그 적용이 곤란하게 된다. 한편, 그림 1(b)에서와 같이 재배치 방식 [13][14]은 활상각도(viewing angle)를 달리하면서 많은 정보를 얻는 방법으로, 고정방식에서 유발되는 사각(occlusion)의 문제를 상당부분 극복할 수 있다. 물론 이외에도 센서수를 증가시켜서 이같은 문제를 극복할 수 있다. 그러나 이 방법들은 센서수의 증가에 따르는 비용의 증가외에도 센서의 방향과 위치의 변경에 따르는 시간소모적 이동량의 증가와 정보처리량의 증대로 시간이 많이 소요된다. 따라서 이같은 방법들은 조립작업에서 요구되는 조립시간을 만족시키는 것이 곤란하다.

접수일자 : 1996. 8. 22., 수정완료 : 1998. 1. 21.

김완수 : 삼성전자(주) 자동화연구소

조형석 : 한국과학기술원 기계공학과

김성권 : 삼성전자 생산기술센터

본 논문에서는 한쌍의 원뿔거울과 한쌍의 평면거울의 조합을 통해서 복잡한 형상을 갖는 부품의 조립을 위한 새로운 전방향 측정장치[15]에 대한 해석적 설계방법을 제시한다. 그리고 다단거울에서의 영상의 변환관계에 대해서 기술하고, 모의실험(simulation)을 통해서 이 장치의 특성 및 조립에의 응용 가능성을 보이고자 한다.

II. 전방향 시각측정장치

1. 전방향 장치의 구조 및 원리

그림2(a)는 전방향센서의 기본구조로서 원뿔거울쌍과 평면거울쌍, 카메라 그리고 부품취급용 그리퍼(gripper) 등의 4가지 요소로 이루어져 있다.

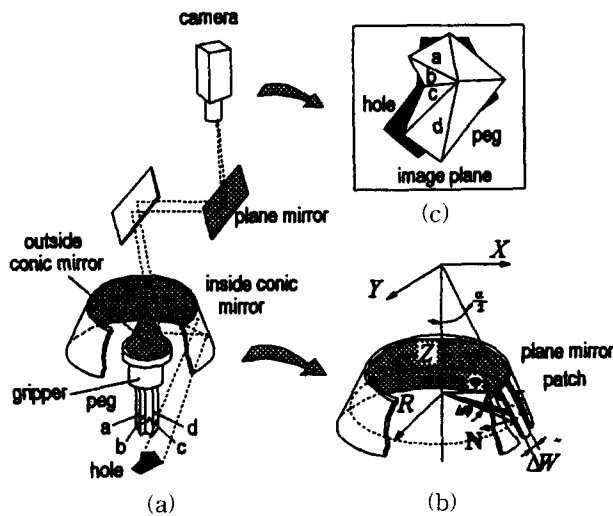


그림 2. 제안된 측정장치의 개념도 : (a) 측정장치의 구성, (b) 원뿔거울의 배치원리, (c) 조립물체 사이의 예상 이미지.

Fig. 2. Schematic diagram of the proposed sensing system : (a) the configuration, (b) the arrangement principle of the inside conic mirror, (c) an expected image between a peg and a hole.

여기서 안쪽이 거울면으로 되어있는 내면원뿔거울(inside conic mirror)은 측정대상물체의 둘레에 대한 전방향의 형상을 원주방향을 따라서 연속적으로 펼쳐져 있는 그 거울면에 모두 투영시키기 위해서 사용되어진다. 이것을 이용하여 시각영역없이 물체 둘레로의 전방향 영상을 얻을 수 있게 된다. 다시 말해서, 그림2(b)에서 처럼 어떤 유한한 반지름을 갖는 원의 원주상에  $\frac{\alpha}{2}$  만큼 기울여서 폭이  $\Delta W$  인 평면거울(plane mirror)을 유한개 배치한 구조를 가정하자. 이때, 이 거울면의 법선벡터  $N$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$N = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \left( -\cos\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right), -\sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right), \tan \frac{\alpha}{2} \right)^t$$

만일 원주상에 배치된 이 평면거울들의 중앙부에 어떤 물체를 놓았다고 할 때, 이 물체 둘레의  $2\pi$ 영상이 원주상에 설치된 유한개의 평면거울에 각각 투영되게 된다. 하지만 유한개의 거울 배치인 경우, 거울과 거울사이에서 거울면이 존재하지 않는 불연속 영역이 출현하게 되어 영상정보의 손실이 발생하게 된다. 따라서 이러한 정보손실을 보전하기 위해서 무한히 작은 거울폭을 갖는 거울조각을 원주상에 무한개로 연속해서 배치한다고 가정할 때, 결국 이 거울

의 배치형상은 꼭지각(vertex angle)이  $\alpha$ 이고 다음과 같은 법선벡터의 거울면을 갖는 내면원뿔거울(inside conic mirror)이 된다.

$$N = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \left( -\cos\varphi, -\sin\varphi, \tan \frac{\alpha}{2} \right)^t$$

따라서 어떤 물체의 전방향의 형상이 내면원뿔거울의  $2\pi$ 의 거울면 전체에 투영되게 된다. 한편, 이  $2\pi$ 로 펼쳐져 있는 영상을 감지하기 위해서 카메라를 사용하며, 로봇트 선단등에 이장치를 장착할 경우, 이 카메라는 동축상에 설치하는 것이 어려우므로 편위시킨다. 이때, 이 카메라의 영상평면에 내면원뿔거울의  $2\pi$ 영상을 투영시키기 위해서 그 내면원뿔거울의 내부중심에 외면원뿔거울(outside conic mirror)을 동축상에 배치하고 이 거울의 상부에 평면거울쌍을 설치한다. 이로써, 내면원뿔거울에 투영된  $2\pi$ 영상이 외면원뿔거울의  $2\pi$ 주위로 모여지고, 다시 이 영상은 두개의 평면거울쌍 즉, 외면원뿔거울 바로위에 설치된 평면거울과 카메라 바로 밑에 설치된 평면거울을 통해서 광로가 꺾이여 편위된 카메라에 투영되어 진다. 이 같은 원리에 의해서 결국 그림2(c)와 같은 어떤 한 물체의 측면영상 a,b,c,d를 포함한 둘레에 대한 동축의  $2\pi$ 영상을 얻을 수 있게 된다.

이것은 이동로봇의 주위환경인식용도의 다른 전방향장치들[16]-[18]과 구분되는 중요한 특징이다. 즉, 다른 전방향장치들은 그 장치를 둘러싸고 있는 외부 환경으로부터 들어오는 전방향의 영상을 얻을 수 있도록 고안되었기 때문에, 주위환경에 대한 전방향 영상은 얻을 수 있지만 어떤 특정물체에 대해서는 전방향의 영상이 아닌 국부적인 영상이 얻어지게 된다.

2. 전방향 장치의 설계

2.1 설계변수

측정장치의 설계시 그림2(a)와 같이 3차원 공간구조는 이를 구성하는 각 거울의 위치 및 자세 등의 설치변수와 거울의 크기등이 관련된 변수들을 합해서 약 39개의 변수들을 고려해야 한다. 하지만 변수해석이 때때로 비선형이고 복잡하기 때문에 모든 변수를 고려하여 기구학적인 변수들을 찾는 것은 쉽지않다. 한편, 이 전방향장치의 구성을 대칭의 2차원 구조로 설계하면 설계변수는 약 15개로 3차원구조에 비해서 약 38%정도로 줄일 수 있다. 따라서 이 장치의 설계는 2차원의 대칭구조에 대해서 설계하고자 한다. 그림3은 그림2(a)의 3차원 구조를 2차원 대칭구조의 설계문제로 단순화시킨 그림이다. 이 설계모델은 광축에 평행한 방위각을 갖는 수직단면을 보인 것으로 카메라는 영상면에서의 영상의 반전을 피하기 위해서 전위영상면(front image plane)을 이용하였다.

이 전방향장치의 설계는 이 설계모델로부터 2차원 상의 설계변수들을 결정하는 것이다. 따라서 설계에 앞서, 각변수들의 정의가 필요하다. 먼저, 거울에 반사된 광선들의 광로 해석을 위해서, 각 거울에 의해서 꺾인 광로를 펼쳐서 얻어진 가상의 광중심(virtual optical center)  $O'_i$ 를 이용하여 그림 3에서와 같이 등가구조로의 표현이 필요하다. 만일 가상의 광중심에서 광축을 따라서 출사각  $\beta=0$ 로 출발한 어떤 광을 기준광(reference ray)이라 정의하자.

이때, 가상의 광중심과 물체평면(object plane) 사이의 이 기준광의 광로의 합  $O'_i P_A$ 을 기준측정거리(reference measurement distance)  $w_i$ 라 하고 다음과 같이 정의 할 수 있다.

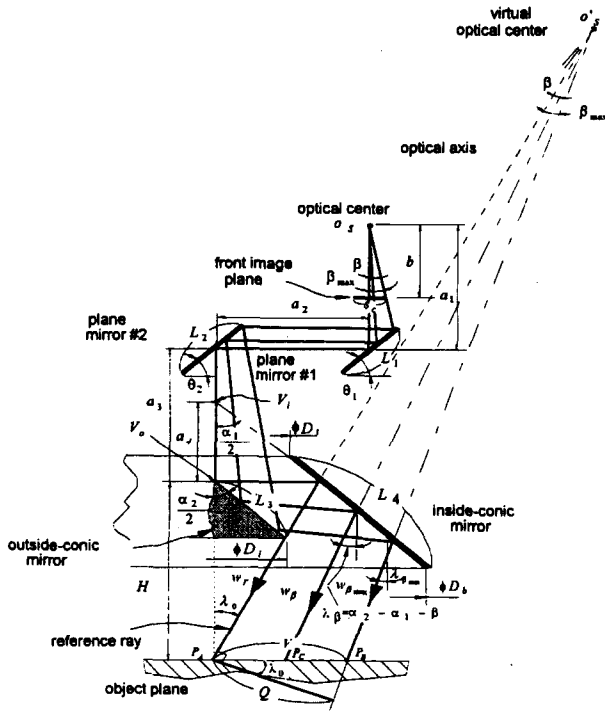


그림 3. 측정장치의 설계변수.  
Fig. 3. Parametric configuration of the sensing system.

$$w_r = d_3 + a_4 \tan \frac{\alpha_1}{2} + \frac{a_4 \tan \frac{\alpha_1}{2}}{\sin \lambda_0} \quad (1)$$

$$d_3 = a_1 + a_2 + a_3 \quad (2)$$

$$\lambda_0 = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (3)$$

여기서  $\lambda_0$ 는 측정평면과 기준광 사이의 기울기이며,  $\alpha_1$ 는 내면원뿔거울의 꼭지각,  $a_1$ 는 광중심(optical center)  $O_s$ 에서 평면거울 #1의 중심까지의 상대거리,  $a_2$ 는 두 평면거울사이의 상대거리,  $a_3$ 는 평면거울 #2의 중심에서 외면원뿔거울의 꼭지점  $V_0$ 까지의 상대거리,  $a_4$ 는 외면원뿔거울의 꼭지점  $V_0$ 와 내면원뿔거울의 꼭지점  $V_i$ 사이의 수직거리, 그리고  $d_3$ 외면원뿔거울의 설치거리로 광중심  $O_s$ 로부터 격어진 광축을 따라서 외면원뿔거울의 꼭지점까지의 거리의 합으로 정의된다. 한편, 만일 가상의 광중심  $O'_s$ 에서 출사각  $\beta$ 를 갖고 출발한 광이 물체 평면에 도달한다고 가정하자. 이때, 측정거리  $w_\beta$ 는 어떤 광선이 광중심  $O_s$ 에서 출사각  $\beta$ 를 갖고 출발하여 광학계를 거쳐서 물체평면까지 이동한 거리의 합과 같다. 따라서 등가적으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_\beta = \overline{O'_s P_c} = \frac{w_r \tan \beta}{\sin \lambda_0 \tan \beta + \cos \lambda_0} \times \frac{\cos \lambda_0}{\sin \beta} \quad (4)$$

한편, 유사한 방법으로 광중심  $O_s$ 에서  $\beta = 0$ 과  $\beta = \beta^{\max}$ 로 출발한 두 광선들이 물체평면  $P_A$ 와  $P_B$ 에 각각 부딪힌다고 하자. 이때, 기준촬상범위  $fov_r$ 은  $P_A$ 와  $P_B$ 사이의 거리의 2배의 제곱으로 정의한다. 이때, 이 기준촬상범위,  $fov_r$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$fov_r = 2V \times 2V \quad (5)$$

$$V = \overline{P_A P_B} = \frac{w_r \tan \beta_{\max}}{\cos \lambda_0 + \tan \beta_{\max} \sin \lambda_0} \quad (6)$$

$$\tan \beta_{\max} = \frac{s_c}{2b} \quad (7)$$

여기서  $V$ 는 기준촬상범위의 크기,  $s_c$ 는 CCD 크기, 그리고  $\beta_{\max}$ 는 카메라의 최대화각에 해당한다. 그리고 이 장치에서 간섭높이  $H$ 는 외면원뿔거울의 꼭지점으로부터 그리퍼에 의해서 파지된 부품의 하면까지의 평균거리로 다음과 같이 정의한다.

$$H = \frac{a_4 \tan \frac{\alpha_1}{2}}{\tan \lambda_0} \quad (8)$$

결국, 기준측정거리  $w_r$ , 기준측정범위  $fov_r$ , 그리고 간섭높이  $H$ 는 설계입력변수로서 부품의 크기, 그리퍼의 크기, 그리고 조립환경 등을 고려하여 미리 결정되어진다. 따라서 제안된 장치의 설계를 위해서 전자제품 예를 들면 VTR, 캠코더, 콤팩트 디스크 등을 구성하는 소형기구부품의 크기와 이 부품의 취급을 위한 그리퍼의 장착등을 고려하여 각각  $w_r = 363mm$ ,  $H = 179.72mm$ ,  $fov_r = 42 \times 42mm^2$  정도로 결정하였다. 그러므로 이러한 제한조건을 충족시킬 제어가능한 설계변수들은 평면거울의 설치각도 ( $\theta_1, \theta_2$ ) 및 거울크기 ( $L_1, L_2, L_3, L_4$ ), 원뿔거울의 원뿔각(vertex angle) ( $\alpha_1, \alpha_2$ )와 직경 ( $D_i, D_j, D_b$ ), 카메라 렌즈의 초점거리(focal length)  $f$ 와 포커스거리(focus distance)  $b$ 이고 또한, 거울사이의 거리  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 이다. 여기서,  $D_i$ 는  $L_3$ 와  $\alpha_2$ 로부터 결정되어지며  $D_b$ 는  $D_i$ 와  $L_4$  그리고  $\alpha_1$ 으로부터 결정되어진다. 따라서  $D_i$ 와  $D_b$ 를 제외한 이 15개의 변수들을 결정하기 위한 설계과정을 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다.

2.2 카메라 렌즈의 선정

그림 4에서 처럼 카메라의 광중심  $O_s$ 로부터 기준측정거리  $w_r$ 만큼 떨어진 위치에 카메라의 광축에 수직하게 크기  $2Q$ 인 어떤 물체가 놓여 있다고 하자. 이때, 이 물체가 상면에 가득히 투영되기 위한 얇은렌즈(thin lens)의 리  $f$ 와 이 물체의 상이 명확하게 맺히게 하기위한 포커스 거리  $b$ 는 원근투사(perspective projection) 및 핀홀(pin-hole) 카메라모형을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다[19].

$$f = \frac{s_c \times w_r}{s_c + Q} \quad (9)$$

$$b = \frac{s_c \times w_r}{Q} \quad (10)$$

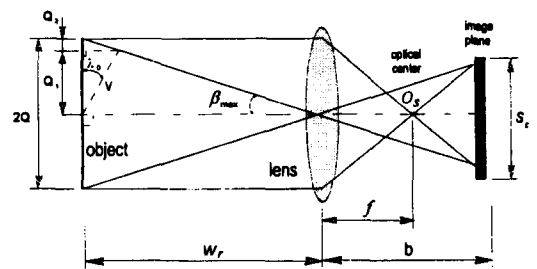


그림 4. 물체의 크기와 영상면의 크기와의 관계.  
Fig. 4. Relationship between the horizontal size of an object and the detective range of an image plane for a thin lens.

기준광에 대해서  $\lambda_0$ 만큼 기울어져 있는 측정평면의 크기  $V$ 와 광축에 수직한 물체의 크기  $Q$  사이에는 그림 4로 부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$Q = V(\cos \lambda_0 + \tan \beta_{\max} \sin \lambda_0) \quad (0 \leq \lambda_0 \leq 90^\circ) \quad (11)$$

만일 기준축정거리  $w_s = 363mm$  인 위치에 놓인 크기  $Q = 40 \sim 43mm$  의 물체를  $s_s = 6.6mm$  인 2/3인치 CCD 카메라를 이용하여 영상면에 가득차게 촬상할 경우에, (9)와 (10)의 관계로부터 초점거리와 포커스 거리를 찾으면 표 1과 같다.

표 1. 렌즈의 사양 결정.  
Table 1. Determination of a lens specification.

object size, Q (mm)	focal length, f (mm)	focal distance, b (mm)
40.0	51.41	59.90
40.5	50.87	59.16
41.0	50.33	58.43
41.316	50.00	57.99
41.5	49.81	57.73
42.0	49.30	57.04
42.5	48.80	56.37
43.0	48.30	55.72

이 표 1로부터 설계조건을 만족시키기 위한, 렌즈의 초점거리  $f$  와 영상면의 포커스 거리  $b$  는 다음과 같은 범위를 갖는다.

$$48.3mm \leq f \leq 514mm \quad (12)$$

$$55.72mm \leq b \leq 59.90mm$$

따라서 이 결과로부터 설계입력값을 만족시키는 상용의  $f = 50mm$  의 초점거리를 갖는 렌즈를 선정하였다. 이때, 이 값에 대해서 다시 포커스거리 및 물체의 크기를 계산하면  $b = 57.987mm$ ,  $Q = 41.316mm$  이 된다. 또한, (11)의 관계로부터 촬상범위  $fov = 42 \times 42mm^2$  를 만족시키는 기준광선에 대한 측정평면의 경사각도  $\lambda_0$  를 구하면  $\lambda_0 = 14.1^\circ$  가 된다. 그리고 외면원뿔거울의 설치거리  $d_3$  를 구하기 위해서 먼저 (6)과 (8)을 (1)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$d_3 = \frac{V(\cos^2 \lambda_0 + \tan \beta_{max} \sin \lambda_0 \cos \lambda_0)}{2 \cos \lambda_0 \tan \beta_{max}} \frac{H(1 + \sin \lambda_0)}{\cos \lambda_0} \quad (13)$$

따라서 외면원뿔거울의 설치거리  $d_3$  는 촬상범위 및 간섭높이  $H$ , 그리고 기준광선에 대한 측정평면의 기울기  $\lambda_0$  로 부터 계산하면  $d_3 = 132.52mm$  가 된다.

2.3 평면거울의 설계

동축영상을 얻기위한 두개의 평면거울의 설치각도는 외면원뿔거울에 투영된 영상을 카메라로 투영시킬 때, 그 관계를 간단하게 하기 위해서  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  라고 가정한다.

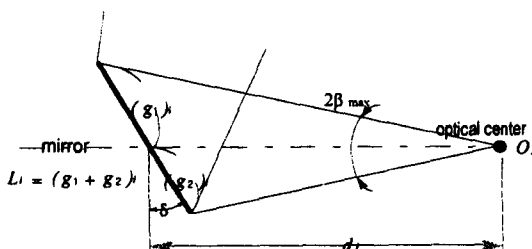


그림 5. 렌즈의 화각과 가시범위.  
Fig. 5. Relationship between viewing angle and viewing range of a lens.

한편, 평면거울의 거울면의 크기  $L_i$  는 그림 5에서 처럼 카메라렌즈의 최대화각(maximum viewing angle)  $\beta_{max}$  일때의 가시범위로부터  $L_i = (g_1 + g_2)_i$  로 정의되며, 이때 각도  $\delta$  대신 각각 그림 3에서 정의된 평면거울의 설치각도  $\theta_1, 90^\circ - \theta_2$ 로 치환하여 다음과 같이 계산된다.

$$L_1 = \frac{2d_1 \tan \beta_{max} \cos \theta_1}{\cos^2 \theta_1 - \tan^2 \beta_{max} \sin^2 \theta_1}, \quad 0 \leq \theta_1 \leq 90^\circ \quad (14)$$

$$L_2 = \frac{2d_2 \tan \beta_{max} \cos \theta_2}{\cos^2(90^\circ - \theta_2) - \tan^2 \beta_{max} \sin^2(90^\circ - \theta_2)}, \quad 0 \leq \theta_2 \leq 90^\circ \quad (15)$$

여기서  $d_i$  는 평면거울의 설치거리로 다음과 같다.

$$d_i = \sum_{k=1}^i a_k, \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

여기서  $a_1$  와  $a_2$  는 간섭및 장치의 소형화를 고려하여 (13)의 외면원뿔거울의 설치거리  $d_3$  의 구축조건을 만족하도록 미리 결정되어지는 값이다. 이때  $a_3$  도 함께 고려한다.

2.4 외면원뿔거울의 설계

외면원뿔거울의 꼭지각은  $45^\circ$ 로 배치된 평면거울에의 투영을 고려하여  $\alpha_2 = 90^\circ$  이라고 가정한다. 그리고 이 거울면의 최소크기  $L_3$  는 그림 5의  $g_2$  해당하며, 이때 거울의 설치각도는  $\delta$  대신 그림 3에서 정의된 설치각  $90^\circ - \frac{\alpha_2}{2}$  를 치환하여 다음과 같이 계산된다.

$$L_3 = \frac{d_3 \tan \beta_{max}}{\cos(90^\circ - \frac{\alpha_2}{2}) - \tan \beta_{max} \sin(90^\circ - \frac{\alpha_2}{2})} \quad (17)$$

한편, 이 외면원뿔거울의 직경  $D_i$  는 그림 3으로부터 평면거울과 마찬가지로 다음의 관계로 구할 수 있다.

$$D_i = 2L_3 \sin \frac{\alpha_2}{2} \quad (18)$$

2.5 내면 원뿔거울의 설계

내면원뿔거울은 측정영역의 구조 및 측정범위와 매우 밀접한 관계가 있는 중요부분이다. 내면원뿔거울은 꼭지각  $\alpha_1$ , 거울의 크기  $L_4$ , 상부 및 하부의 직경을 각각  $D_b, D_i$ , 그리고 설치위치  $a_4$  로 표현 할 수 있다. 이 가운데 제한조건을 만족하는 꼭지각  $\alpha_1$  과 설치위치  $a_4$  는 각각 (3)와 (8)의 관계로 부터 구할 수 있다. 그 결과는  $\alpha_1 = 75.9^\circ$ ,  $a_4 = 57.88mm$  이다. 또한, 이같은 결과들을 이용하여 거울의 폭  $L_4$  은 다음과 같이 주어진다.

$$L_4 = \frac{d_4 \tan \beta_{max}}{\cos \frac{\alpha_1}{2} + \tan \beta_{max} \sin \frac{\alpha_1}{2}} \quad (19)$$

$$d_4 = \sum_{k=1}^3 a_k + a_4 \tan \frac{\alpha_1}{2} \quad (20)$$

여기서  $d_4$  는 내면원뿔거울의 설치위치로서 광학중심  $O_s$  로부터 출사각  $\beta = 0$  를 갖고 출발한 광이 광축을 따라서 이동하여 내면원뿔거울에 부딪힌 위치까지의 거리의 합이다. 따라서 결국 남은 변수는 원뿔거울의 직경이다. 이 변수는 거울의 크기와 원뿔각을 이용하여 다음의 관계식으로 구해진다.

$$D_b - D_i = 2L_4 \sin \frac{\alpha_1}{2} \quad (21)$$

이러한 일련의 과정을 통해서 확정된 측정시스템의 설계변수는 표 2에 요약해 놓았다. 이 표에서 센서의 성능에 영향을 미치는 매우 중요한 설계변수인 각도 및 설치위치를 제외하고, 거울의 크기와 관련된 치수는 여유치를 두어 설계하였다.

표 2. 전방향 장치의 설계값.  
Table 2. The designed parameters of the proposed sensing system.

Parameter	Designed value
reference field of view	$fov_x = 42 \times 42 \text{ mm}^2$
reference working distance	$w_x = 363 \text{ mm}$
measurement height	$H = 179.72 \text{ mm}$
focal length	$f = 50 \text{ mm}$
focus distance	$b = 57.987 \text{ mm}$
camera	CCD, $s_x = 6.6 \text{ mm}$
vertex angles	$\alpha_1 = 75.9^\circ, \alpha_2 = 90^\circ$
size of mirror	$L_1 = 19.6 \text{ mm}, L_2 = 38.5 \text{ mm}$ $L_3 = 15.4 \text{ mm}, L_4 = 38.5 \text{ mm}$ $D_i = \phi 28 \text{ mm}, D_o = \phi 117 \text{ mm}$ $D_s = \phi 80 \text{ mm}$
position	$a_1 = 19 \text{ mm}, a_2 = 74 \text{ mm}$ $a_3 = 39.52 \text{ mm}, a_4 = 57.92 \text{ mm}$
mounting angles	$\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 45^\circ$
resolution	0.088 mm

III. 전방향장치의 영상변환모델

이 전방향 측정장치를 실제로 조립에 적용하기 위해서는 센서공간(sensor space)과 작업공간(task space) 사이의 사상(mapping) 관계를 알아야 한다. 그림 2(a)와 같이 이 전방향 측정장치는 여러개의 거울을 사용한 복잡한 광학계로 이루어져 있어 공간상의 임의의 한점에서 반사된 빛이 카메라로 입사되기 위해서는 거울에 의해서 여러차례 광로가 꺾이게 되므로 결국 공간상의 한점에 대한 영상면으로의 사상 관계는 기본적으로 거울의 반사법칙으로 표현할 수 있다. 이를 위해서, 어떤 물체를 기술하기 위해 물체상에 좌표계  $\{i\}$ 를 설정하자. 또한, 이 좌표계로부터  ${}^{i+1}P_{ORG}$  만큼 떨어진 곳에 놓인 법선벡터  $N_{i+1}$ 를 갖는 거울에 좌표계  $\{i+1\}$ 를 설정하자. 그러면, 그 물체상의 한점  $X_i$ 에서 방향 코사인(direction cosine)  $S_i$ 로 출발한 어떤 빛이,  $\{i+1\}$ 의 거울표면의  $X_{i+1}$ 점에 부딪히고, 이 광선은 다시 방향 코사인(direction cosine)  $S_{i+1}$ 를 갖고 반사되게 된다. 이때, 광선의 궤적은 위치  $X_i$ 와  $X_{i+1}$ , 방향 코사인  $S_i$ 와  $S_{i+1}$ 에 의해서 결정된다. 따라서 이들 사이의 관계를 벡터해석에 의해서 보이면, 다음과 같이 된다[15].

$$S_{i+1} = S_i - 2(S_i \cdot N_{i+1})N_{i+1} \quad (22)$$

$$X_{i+1} = X_i + \frac{({}^{i+1}P_{ORG} - X_i) \cdot N_{i+1}}{S_i \cdot N_{i+1}} S_i \quad (23)$$

여기서  $X_i = (x^i, y^i, z^i)^t$ ,  $S_i = (s_x^i, s_y^i, s_z^i)^t$ ,  $X_{i+1} = (x^{i+1}, y^{i+1}, z^{i+1})^t$ ,  $S_{i+1} = (s_x^{i+1}, s_y^{i+1}, s_z^{i+1})^t$ ,  ${}^{i+1}P_{ORG} = ({}^{i+1}p_x, {}^{i+1}p_y, {}^{i+1}p_z)^t$ ,  $N_i = (n_x^i, n_y^i, n_z^i)^t$ ,  $N_{i+1} = (n_x^{i+1}, n_y^{i+1}, n_z^{i+1})^t$ 이다. 위의 변수정의에서 오른쪽 위첨자  $i$ 는 벡터의 전치(transpose)를 의미한다. 이 (22)과 (23)의 관계를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$S_{i+1} = {}^{i+1}F_i S_i \quad (24)$$

$$X_{i+1} = {}^{i+1}T_i X_i \quad (25)$$

여기서 행렬  ${}^{i+1}F_i$ ,  ${}^{i+1}T_i$ 는 각각 반사행렬(reflection matrix)[20], 동차변환행렬(homogeneous matrix)로 다음과 같다.

$${}^{i+1}F_i = \begin{pmatrix} 1 - 2(n_x^{i+1})^2 & -2n_x^{i+1}n_y^{i+1} & -2n_x^{i+1}n_z^{i+1} \\ -2n_x^{i+1}n_y^{i+1} & 1 - 2(n_y^{i+1})^2 & -2n_y^{i+1}n_z^{i+1} \\ -2n_x^{i+1}n_z^{i+1} & -2n_y^{i+1}n_z^{i+1} & 1 - 2(n_z^{i+1})^2 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$${}^{i+1}T_i = \begin{pmatrix} 1 - \frac{n_x^{i+1}}{r_{i+1}} s_x^i & -\frac{n_y^{i+1}}{r_{i+1}} s_x^i & -\frac{n_z^{i+1}}{r_{i+1}} s_x^i & \frac{m_{i+1}}{r_{i+1}} s_x^i \\ -\frac{n_x^{i+1}}{r_{i+1}} s_y^i & 1 - \frac{n_y^{i+1}}{r_{i+1}} s_y^i & -\frac{n_z^{i+1}}{r_{i+1}} s_y^i & \frac{m_{i+1}}{r_{i+1}} s_y^i \\ -\frac{n_x^{i+1}}{r_{i+1}} s_z^i & -\frac{n_y^{i+1}}{r_{i+1}} s_z^i & 1 - \frac{n_z^{i+1}}{r_{i+1}} s_z^i & \frac{m_{i+1}}{r_{i+1}} s_z^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$\rho_{i+1} = S_i \cdot N_{i+1} = S_x^i n_x^{i+1} + S_y^i n_y^{i+1} + S_z^i n_z^{i+1} \quad (28)$$

$$m_{i+1} = {}^{i+1}P_{ORG} \cdot N_{i+1} = {}^{i+1}p_x n_x^{i+1} + {}^{i+1}p_y n_y^{i+1} + {}^{i+1}p_z n_z^{i+1} \quad (29)$$

여기서  $\rho_{i+1}$ : 거울  $\{i+1\}$ 에 대한 입사광의 수직성분,  $m_{i+1}$ : 거울  $\{i+1\}$ 과  $\{i\}$ 사이의 수직거리이다. 이 관계를  $m$ 개의 거울을 갖는 광학시스템에서의 관계로 일반화시키면 (24)와 (25)는 다음과 같이 된다.

$$S_n = {}^nF_{n-1} {}^{n-1}F_{n-2} \cdots {}^1F_0 S_0 \quad (30)$$

$$X_n = {}^nT_{n-1} {}^{n-1}T_{n-2} \cdots {}^1T_0 X_0 \quad (31)$$

그러므로 (31)의 영상변환모델을 이용하여 이 전방향장치에서의 영상변환 관계를 모델링할 수 있다.

그림 6은 4개의 거울과 한대의 camera로 구성된 광학계의 좌표계를 보인다. 각 좌표계를 설명하면 다음과 같다. 먼저, 물체상에 이 물체를 기술하기 위한 좌표계(object frame)를  $\{W\}$ 라 한다. 그리고 광학계의 중심을  $O_s$ 라 하고 이 점을 원점으로 갖는 센서 좌표계를  $\{S\}$ 라 하자. 이때, 이 센서좌표계의 Z축을 광학계 중심축 또는 광축(optical axis)이라 정의한다. 한편, 광학계의 중심축과 같은 Z축을 갖고  $O_s$ 로부터 광학계의 중심축을 따라서 Z축만큼 떨어진 곳에 영상좌표계  $\{C\}$ , 그리고 센서좌표계  $\{S\}$ 로부터 순차적으로 거울과 각 거울에 의해서 꺾인 광축과의 교점을 각각 원점으로 하는 거울좌표계  $\{M_1\}$ ,  $\{M_3\}$ ,  $\{M_2\}$ ,  $\{M_4\}$ 를 설정하자.

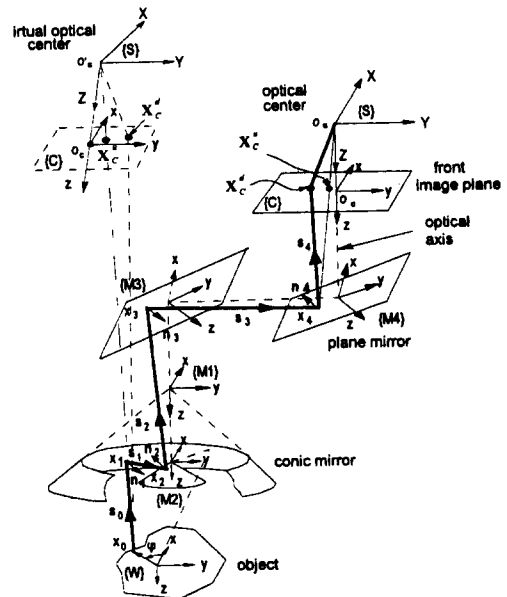


그림 6. 측정 시스템의 좌표계.  
Fig. 6. Coordinate system of the proposed sensing system.

그러면, 작업대상물과 각각의 거울 또는 센서 사이의 사상관계(mapping relation)는 (30)과 (31)의 관계식을 사용하

여 기술할 수 있다. 즉, 물체좌표계  $\{W\}$ 에서 정의된 물체 위의 한점  $\mathbf{X}_0$ 에서 방향벡터  $\mathbf{S}_0$ 으로 광이 출발하여 4개의 거울로 구성된 광학계를 거쳐서 결국에는 영상면의 한점  $\mathbf{X}_s$ 에 투영되게 된다. 이때, 영상면도 하나의 평면거울로 가정할 수 있으며, 이경우에 이 광선의 투영관계는 어떤 센서 좌표계  $\{S\}$ 에 대해서 기술하면 다음과 같이 된다.

$${}^S(\mathbf{S}_c) = {}^S({}^c\mathbf{F}_0) {}^S(\mathbf{S}_0) \quad (32)$$

$${}^S(\mathbf{X}_c^u) = {}^S({}^c\mathbf{T}_0) {}^S({}^w\mathbf{X}_0) \quad (33)$$

여기서 각 변수는  $\mathbf{S}_0 = (s_x^0, s_y^0, s_z^0)'$ ,  $\mathbf{S}_c = (s_x^c, s_y^c, s_z^c)'$ ,  ${}^w\mathbf{X}_0 = ({}^w x_0, {}^w y_0, {}^w z_0, 1)'$ ,  $\mathbf{X}_c^u = (x_c^u, y_c^u, z_c^u, 1)'$ 이며,  ${}^c\mathbf{F}_0$ 는 물체와 영상면사이의 반사행렬로서 다음과 같이 정의 된다.

$${}^S({}^c\mathbf{F}_0) = {}^S({}^c\mathbf{F}_4) {}^S({}^4\mathbf{F}_3) {}^S({}^3\mathbf{F}_2) {}^S({}^2\mathbf{F}_1) {}^S({}^1\mathbf{F}_0). \quad (34)$$

마찬가지로, 이관계의 역변환은

$${}^S(\mathbf{S}_0) = {}^S({}^0\mathbf{F}_c) {}^S(\mathbf{S}_c) \quad (35)$$

$${}^S({}^w\mathbf{X}_0) = {}^S({}^0\mathbf{T}_c) {}^S(\mathbf{X}_c^u) \quad (36)$$

이 관계에서, 처음과 마지막의 방향코사인은 다음과 같이 계산된다.

$${}^S(\mathbf{S}_0) = \frac{O_s' - {}^S({}^w\mathbf{X}_0)}{\|O_s' - {}^S({}^w\mathbf{X}_0)\|} \quad (37)$$

$${}^S(\mathbf{S}_c) = \frac{{}^S(\mathbf{X}_c^u) - O_s}{\|{}^S(\mathbf{X}_c^u) - O_s\|} \quad (38)$$

이 영상의 변환관계는 거울의 법선벡터(normal vector) 및 거울사이의 변위벡터(translation vector)의 함수이다. 원뿔 거울의 법선벡터는 반경방향의 접선벡터와 축방향의 접선벡터의 곱(cross-product)으로 계산되며 꼭지각(vertex angle)  $\alpha$ 와 방위각(azimuth angle)  $\varphi$ 에 의해서 정의되어 진다. 따라서 내면원뿔거울, 외면원뿔거울, 평면거울쌍 그리고 영상면등의 법선벡터  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$ 와  $\mathbf{n}_c$  또한, 이들의 변위 벡터를 각각  ${}^1\mathbf{P}_{ORG}, {}^2\mathbf{P}_{ORG}, {}^3\mathbf{P}_{ORG}, {}^4\mathbf{P}_{ORG}$  및  ${}^c\mathbf{P}_{ORG}$ 라고 각각 표기하면 그림 6으로 부터 이들 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{n}_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \begin{pmatrix} -\cos \varphi & -\sin \varphi & \tan \frac{\alpha}{2} \end{pmatrix}' \quad (39)$$

$$\mathbf{n}_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & -\tan \frac{\alpha}{2} \end{pmatrix}'$$

$$\mathbf{n}_3 = (0, 0, 1)'$$

$$\mathbf{n}_4 = (0, 0, -1)'$$

$$\mathbf{n}_c = (0, 0, 1)'$$

$${}^{i+1}\mathbf{P}_{ORG} = \begin{pmatrix} {}^{i+1}p_x & {}^{i+1}p_y & {}^{i+1}p_z \end{pmatrix}', \quad i = 1, 2, 3 \quad (40)$$

$${}^c\mathbf{P}_{ORG} = \begin{pmatrix} {}^c p_x & {}^c p_y & {}^c p_z \end{pmatrix}' \quad (41)$$

여기서  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 각각 내면 및 외면원뿔거울의 꼭지각이며,  $\varphi$ 는 원뿔거울에서의 방위각(azimuth angle)을 나타낸다. 그리고 (39)~(42)에서의 각 벡터의 성분은 표 2에서의 설계변수들에 의해서 정의되는 값이다. 한편, 이 벡터들을 센서좌

표계(sensor frame)  $\{S\}$ 에 대해서 기술하면 다음과 같다.

$${}^S\mathbf{n}_i = {}^S\mathbf{R}_{iZYX}(\phi_i, \psi_i, \theta_i)\mathbf{n}_i \quad (42)$$

$${}^S \begin{pmatrix} i+1\mathbf{P}_{ORG} \end{pmatrix} = TRANS(t_x, t_y, t_z) {}^{i+1}\mathbf{P}_{iORG} \quad (43)$$

여기서  $\phi_i, \psi_i, \theta_i$ 와  $t_x, t_y, t_z$ 는  $\{S\}$ 에 대한  $i$ 번째 거울좌표계 각각 센서좌표계  $\{M_i\}$ 의 ZYX 오일러 각도[21]와 변위량이다. 그리고 (39), (40)의 법선벡터는 영상변환식에 적용시 다음과 같이 단위벡터로 만들어 사용한다.

$${}^S\mathbf{N}_i = \frac{{}^S\mathbf{n}_i}{\|{}^S\mathbf{n}_i\|} \quad (44)$$

한편, 위 (33)와 (36)에서  $\mathbf{X}_c^u$ 는 렌즈의 왜곡을 고려하지 않았을 때의 투영된 점이다. 하지만, 실제로는 렌즈의 왜곡  $\mathbf{D}$ 가 존재하므로 이 점은 왜곡되어  $\mathbf{X}_c^d$ 에 투영되게 된다. 카메라 렌즈에서 왜곡은 일반적으로 반경방향의 렌즈왜곡(radial lens distortion)이 현저하게 영향을 미친다[26]. 따라서 여기서 왜곡  $\mathbf{D}$ 는 반경방향의 왜곡을 나타낸다. 한편, 반경방향의 왜곡은 산업용비전에서 첫째항만을 고려해도 충분하므로 따라서 이들사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[26].

$$\mathbf{X}_c^u = \mathbf{X}_c^d + \mathbf{D} \quad (45)$$

$$\mathbf{D} = (X_c^d k_1 r^2, Y_c^d k_1 r^2, 0, 0)'$$

여기서  $\mathbf{X}_c^d = (X_c^d, Y_c^d, b, 1)'$ 는 렌즈의 왜곡을 고려한 위치이며,  $r = \sqrt{(X_c^d)^2 + (Y_c^d)^2}$ 은 영상면의 중심  $O_c$ 에서 왜곡된 점  $\mathbf{X}_c^d$ 까지의 반경거리,  $k_1$ 는 왜곡인자이다. 그런데 실제로 이 영상면상의 감지위치  $\mathbf{X}_c^d$ 는 프레임 그라버(frame grabber)에 의해서 디지털화된 위치로 얻어진다. 그러므로 만일  $\mathbf{X}_c^d$ 에 해당하는 화소점을  $\mathbf{X}_c^f = (X_c^f, Y_c^f)'$ 라 할 때, 이점은 다음과 같이 정의된다[26].

$$\mathbf{X}_c^f = (S_x d_x'^{-1} X_c^d + C_x, d_y'^{-1} Y_c^d + C_y)'$$

$$d_x' = d_x \frac{N_{\alpha}}{N_{\beta}} \quad (46)$$

여기서  $S_x$ 는 수평영상 비례인자이며,  $(C_x, C_y)'$ 는 영상면의 중심화소 위치이며,  $d_x$ 와  $d_y$ 는 X, Y축으로 CCD 셀(cell)에서 인접 셀사이의 평균거리이다. 그리고  $N_{\alpha}$ 와  $N_{\beta}$ 는 수평추사선상의 센서의 셀 갯수와 화소수를 각각 나타낸다. 결국 이 변환 모델 (33)와 (36)에서  $\mathbf{X}_c^u$ 는 렌즈의 왜곡과 디지털화된 영상을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{X}_c^u = \begin{pmatrix} (X_c^f - C_x) \frac{d_x'}{S_x} + (X_c^f - C_x) \frac{d_x'}{S_x} k_1 r^2 \\ (Y_c^f - C_y) d_y + (Y_c^f - C_y) d_y k_1 r^2 \\ b \\ 1 \end{pmatrix} \quad (47)$$

따라서 이같은 (33), (36) 그리고 (50)을 이용하여 투영된 점의 화소 위치와 물체상의 한점사이의 사상관계를 알아낼 수 있다.

#### IV. 전방향장치의 특성분석

##### 1. 측정영역(Field of view)

그림 7은 이 전방향장치 OISSA의 측정영역구조를 보이

는 것이다. 측정영역은 외면 및 내면원뿔거울에 의해서 원주방향으로 균일하게 나뉘어진다. 2차원 단면구조는 삼각형 모양으로 단순한 형상을 하고 있으나 3차원의 형상은 그리 간단하지가 않다. 먼저,  $(0, 0, -Z_H)$ 에 꼭지점을 두고 있는 원뿔  $U_C$ 와  $(0, 0, Z_H)$ 에 꼭지점을 두고 있는 사면체  $U_P$ 가 있다고 가정하자. 이때 이 장치의 3차원 측정영역의 구조는 이 원뿔과 사면체가 상부할상구조를 이룬다. 그리고 하부는 이 원뿔과 사면체를  $Z = -Z_H$ 와  $Z = Z_H$ 인 위치에서의 X축에 대해서 각각  $180^\circ$  회전이동 시킬때 만들어지는 원뿔  $\bar{U}_C$ 와 사면체  $\bar{U}_P$ 로 이루어진다.

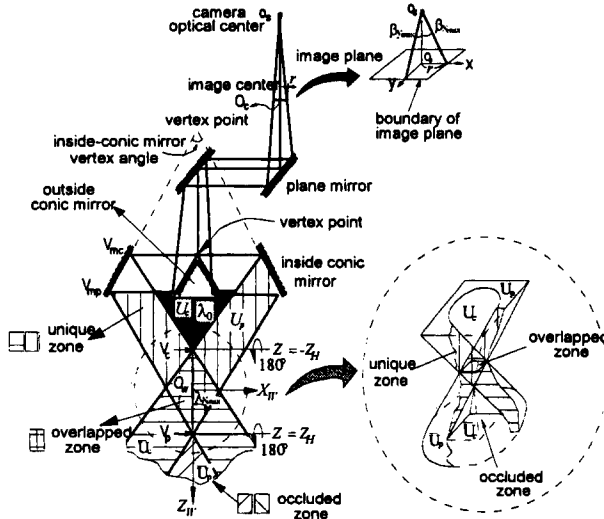


그림 7. 촬상영역의 구조.  
Fig. 7. Configuration of the field of view.

따라서 이 측정영역을 구성하고 있는 도형들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

1) 상부구조

$$U_C = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | X^2 + Y^2 \leq (Z + Z_H)^2 \tan^2 \lambda_0 \\ \text{and } Z \leq -Z_H \end{array} \right\} \quad (51)$$

$$U_P = U_a \cap U_c \quad (52)$$

여기서  $U_a$ ,  $U_b$ 는 각각 사면체의 X, Y축 방향의 영역에 해당하며 다음과 같이 정의된다.

$$U_a = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | |X| \leq (Z_H - Z) \tan \lambda_{X \max} \\ \text{and } Z \leq Z_H \end{array} \right\} \quad (53)$$

$$U_b = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | |Y| \leq (Z_H - Z) \tan \lambda_{Y \max} \\ \text{and } Z \leq Z_H \end{array} \right\} \quad (54)$$

여기서  $\lambda_0$ 는 원뿔영역의 꼭지각의 반을 나타내며,  $\lambda_{X \max}$ ,  $\lambda_{Y \max}$ 는 각각 사면체영역의 X, Y방향의 꼭지각의 반에 해당하는 각으로  $\lambda_{X \max} = |\alpha_2 - \alpha_1 - \beta_{X \max}|$ 와  $\lambda_{Y \max} = |\alpha_2 - \alpha_1 - \beta_{Y \max}|$ 로 정의된다.

2) 하부구조

$$\bar{U}_C = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | X^2 + Y^2 \leq (Z + Z_H)^2 \tan^2 \lambda_0 \\ \text{and } Z \geq -Z_H \end{array} \right\} \quad (55)$$

$$\bar{U}_P = U_c \cap U_f \quad (56)$$

여기서  $U_c$ ,  $U_f$ 는 각각 사면체의 X, Y축 방향의 영역에 해당하며 다음과 같이 정의 된다.

$$U_c = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | |X| \leq (Z - Z_H) \tan \lambda_{X \max} \\ \text{and } Z \geq Z_H \end{array} \right\} \quad (57)$$

$$U_f = \left\{ \begin{array}{l} (X, Y, Z) | |Y| \leq (Z - Z_H) \tan \lambda_{Y \max} \\ \text{and } Z \geq Z_H \end{array} \right\} \quad (58)$$

이와같은 측정영역은 이 곳에 놓인 어떤 물체가 영상면으로 투영되어지는 모양에 따라서 3개의 영역 즉, 유일영역(unique zone), 중복영역(overlapped zone) 그리고 사각영역(occluded zone)으로 나뉜다. 유일영역  $A_{UZ}$ 은 그림 7에서 처럼 수직, 수평의 빗살로 표시된 영역으로 다음과 같이 집합으로 나타내어진다.

$$A_{UZ} = \begin{cases} U_P \cap (U_C)^c & \text{for } Z \leq -Z_H \\ U_P \cap (\bar{U}_C)^c & \text{for } -Z_H < Z \leq 0 \\ (U_P)^c \cap \bar{U}_C & \text{for } 0 < Z \leq Z_H \\ \bar{U}_C \cap (\bar{U}_P)^c & \text{for } Z > Z_H \end{cases} \quad (59)$$

이 유일영역 가운데 주된 사용영역은  $Z \geq 0$ 구간에 존재하는 영역이다. 그리고 이영역에 놓인 공간상의 한점은 영상면에 점모양 그대로 일대일 사상(mapping)되는 특성을 갖는다. 중복영역은  $180^\circ$  회전후 사면체와 원뿔의 두 도형이 겹쳐지는 영역으로 그림 7에서 격자모양으로 보이는 부분이다. 이 영역을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_{OZ} = U_P \cap \bar{U}_C \quad \text{for } -Z_H \leq Z \leq Z_H \quad (60)$$

사각영역은 거울에 반사되지 않는 영역이기 때문에 이곳에 놓인 물체는 검출되지 않는다. 이 영역을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_{OCZ} = U_C \cup \bar{U}_P \quad \text{for } Z \leq -Z_H \text{ or } Z \geq Z_H \quad (61)$$

위 식에서 알 수 있듯이 이 영역은 상부의 사면체형상과 하부의 원뿔모양이 중복되는 내부영역이다. 이 영역에 놓인 공간상의 한점은 내면원뿔거울의 원주방향으로의 거울면전체에 원형의 띠 모양으로 투영되어지며, 결국 카메라 영상면에 도넛 모양으로 나타나게 된다. 한편, 사각영역은 보이지 않는 영역이므로 이곳에 놓인 물체는 볼 수가 없게 된다. 따라서 실제 사용상의 제약이 없는 범위는 유일영역이 된다. 하지만 중복영역도 불투명한 기둥형상의 물체가 놓인 경우에는 외면원뿔거울에 투영될 때, 반대편의 시야가 기둥에 의해서 가리워져서 분리가 된다. 이로써 중복해서 보이는 영역이 없어져서 유일영역으로 바뀌게 되므로 이러한 조건하에서는 중복영역도 사용이 가능하다. 이와 같은 촬상범위의 특성을 갖는 이 전방향장치를 조립에 이용할 경우에 있어서, 이 장치의 광학계 중심축에 설치된 그리퍼로 물체를 집으면 일반적으로 그리퍼의 자동중심조정(self-centering)기능에 의해서 이 물체는 항상 전방향장치의 광학계 중심부에 오도록 조정이 된다. 또한 이 물체의 하부는 설계에서 언급한 것처럼 평균적으로 기준측정거리에 일치하도록 설계되어 있기 때문에 이 물체의 중요한 정보를 포함하고 있는 물체 둘레의 경계선 부분은 항상 유일영역에 놓이게 된다. 따라서 이 전방향장치를 이용할 경우 어떤 물체의 경계선 주위의 전방향정보를 용이하게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 또한, 물체의 측면정보도 동시에 얻어진다. 이로써 이 전방향장치는 실제로 조립물체의 내부보다는 상호접촉이 발생하는 경계선 주위의 정보가 더욱 중요한 조립에서 효과적으로 상대오차정보를 얻는 수단을 제공할 수 있다.

2. 방위각의 불변

그림 8은 마치 카메라를 외면원뿔거울 상부에 동축으로 직접 설치된 것처럼 간단히 재구성된 측정장치의 모양이다. 이 등가구조는 두 원뿔거울의 꼭지점을 지나는 축에 대해서 두 평면거울에 의해 격인 광학계 중심  $O_c$ 에서 두번째 평면 거울까지의 광로를 등가적으로 펼쳐서 얻어진다. 만일

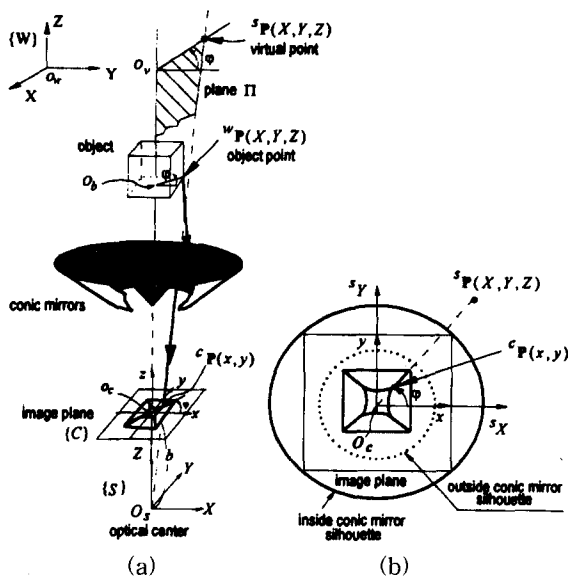


그림 8. 방위각의 불변특성: (a) 등가 모델, (b) 투영 특성.  
 Fig. 8. Invariability of azimuth angle : (a) a simplified model, (b) a mapping feature.

$O_w - XYZ$ 에 원점을 둔 물체좌표계  $\{W\}$ 에서 정의된 물체상의 한점  ${}^wP(X, Y, Z)$ 가 원뿔거울에 의해서 격이어 영상면의 한점  ${}^cP(x, y)$ 으로 투영된다고 가정하자. 이때,  $O_s - XYZ$ 에 원점을 둔 센서좌표계  $\{S\}$ 에 대해서 원뿔거울에 의해서 격인 광로마저 펼쳐서 얻어지는  ${}^wP(X, Y, Z)$ 에 해당하는 가상의 점  ${}^sP(X, Y, Z)$ 이 방위각  $\varphi$ 를 갖는 평면  $\Pi$ 상에 존재하게 된다. 이 평면  $\Pi$ 는 방위각  $\varphi$ 와 각 점  $O_b, O_c$ 에 의해서 정의된다. 결국, 이 가상의 점이 영상면의 한점  ${}^cP(x, y)$ 으로 투영되는 것과 같은 것이며, 이때, 원뿔거울 표면에서의 반사법칙과 카메라의 원근투사(perspective projection)에 의해서 다음의 관계가 얻어진다.

$$\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{Y}{X} \quad (62)$$

이 결과는 어떤 물체가 이 시스템을 통해서 투영될 때, 방위각이 변하지 않는다는 것을 의미한다. 다시말해서 3차원 물체공간상에서 방위각  $\varphi$ 를 갖는 모든 점들은 영상면의 중심  $O_c$ 를 지나는  $x$ 축에 대해서 정의된 동일 방위각  $\varphi$ 를 갖는 반경직선상으로 투영된다(그림 8(b)).

3. 심도

이 전방향장치는 내면원뿔거울에 의해서 광선이 사선방향으로  $\lambda_\beta$ 만큼 기울어져 밖에서 안으로 입사됨으로 이것은 상대적으로 측정평면이 광축에 대해서  $\lambda_\beta$ 만큼 기울어진 것과 같은 효과이다. 따라서 동일 평면상에 놓인 물체라 하더라도 그림 9(a)에서 보인 것처럼 광선이 카메라의 영상면에 입사되는 입사각도  $\beta$ 에 따라서 거리의 차이가 다소 발생하게 된다.

이 차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta w = w_r - w_\beta \cos \beta \quad (63)$$

이것을 그림으로 보이면 그림 9(b)와 같다. 이 결과는 설계된 기준측정범위  $fov = 42 \times 42mm^2$  내의 위치에 따라서 최대 약 7mm 정도의 거리차가 발생함을 보이고 있다. 이러한 차이는 카메라의 심도에 영향을 미치게된다. 따라서 동일 평면상에 놓인 평면물체를 촬상할 경우에 정확하게 설정된 측정거리(working distance)를 전후로 디포커싱(defocusing)

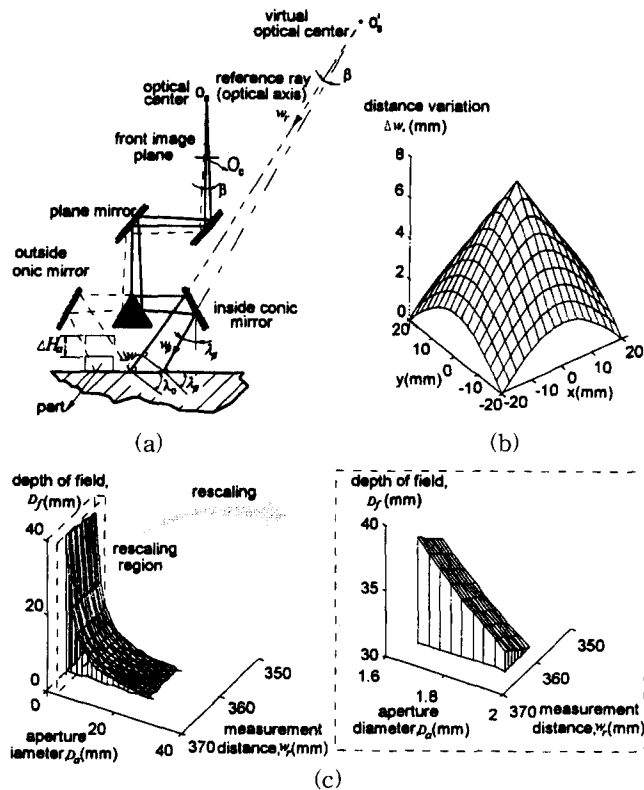


그림 9. 전방향 센서의 FOV내에서의 심도 및 측정거리의 변화 : (a) 측정영역내에서의 측정거리변화를 기술하기위한 광학계의 단순모델, (b) 기울어진 측정영역내에서의 측정거리 변화분포, (c) 조리개의 크기와 측정거리의 변화에 따른 심도와와의 관계.

Fig. 9. Variation of depth and measurement distance in the system's field of view : (a) a simplified geometry of the optical system to describe the measurement distance variation in the oblique measurement plane, (b) measurement distance variation in the field of view, (c) depth variation depending on the size of the aperture and the measurement distance.

되어 분해능이 저하되므로 이 심도에 대한 영향을 고찰하는 것이 필요하다.

카메라의 심도는 이론적으로 다음과 같이 주어진다[22].

$$D_f = \frac{2wD_a D_b f (w - f)}{D_a^2 f^2 - D_b^2 w^2} \quad (64)$$

여기서  $w_r$ : 정확하게 초점이 맺히는 렌즈와 물체사이의 거리(well focused working distance),  $f$ : 렌즈의 초점거리 (focal length),  $D_a$ : 아퍼쳐 직경 (aperture diameter),  $D_b$ : 모호원의 크기 (blurring circle diameter or confusion diameter). 이 관계로부터 아퍼쳐와 측정거리, 그리고 심도와의 관계를 그림 9(c)에 보였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 심도는 측정거리(working distance)에 대한 영향보다 아퍼쳐(aperture)의 크기에 의해서 좌우된다. 조리개의 크기가  $D_f = 27.8mm$ 이고 초점거리가  $f = 50mm$ 인 렌즈를 갖는 2/3인치 CCD 카메라를 사용하여 촬상하여 광학계의 중심으로부터  $w = w_r$  만큼 떨어진 위치에 놓인 물체상을 촬상할 때, 이 물체상의 한점이 정확하게 영상면의 1개의 화소에 포커싱(focusing)되는 심도를 (64)을 이용하여 계산하면 약 2.3mm 정도이다. 그런데 그림 9(c)의 확대그림에서 처럼 아퍼쳐의 크기를  $\phi 1.8mm$  정도로 줄일때, 심도는 35mm 정도가



된다. 이 값은 촬상평면에서의 최대높이 변화 7mm 보다 크므로 동일 평면상에서의 측정거리의 변화는 크게 영향을 미치지 못한다. 한편, 조립시스템에서 다양한 부품을 다룰때, 선명하게 그 영상을 얻기 위해서는 심도의 범위내에서 부품의 높이변화를 허용하게 된다. 만일 심도의 크기를 벗어나는 경우에는 디포커싱(defocusing)되어 정확한 영상을 얻을 수 없다. 따라서 시스템이 허용가능한 부품의 높이변화를  $\Delta H_a$ 라 할때, 이 물체의 크기 변화는 물체평면의 수직방향에 대해서 정의 된다. 한편, 심도는 광축을 따라서 정의되므로 이 두 방향사이에는 각도차  $\lambda_0$ 가 존재한다. 따라서 이것과 물체의 허용 수직높이변화 그리고 심도사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta H_a = D_f \cos \lambda_0 \tag{65}$$

여기서  $\lambda_0$ 는 광축방향과 물체평면에 수직한 방향사이의 각도이다. 따라서 이 시스템에서 허용높이변화  $\Delta H_a$ 는 설계치인  $\lambda_0 = 14.1^\circ$ 와 이론적인 심도 35mm에 대해서 계산을 하면 약 34mm가 얻어진다. 따라서 이 시스템을 이용하여 물체를 촬상할 경우 그 물체의 수직높이 변화를 34mm까지 허용할 수 있다.

### V. 컴퓨터 모의실험

#### 1. 시스템의 구현

그림 10은 설계된 시스템의 외관도이다.

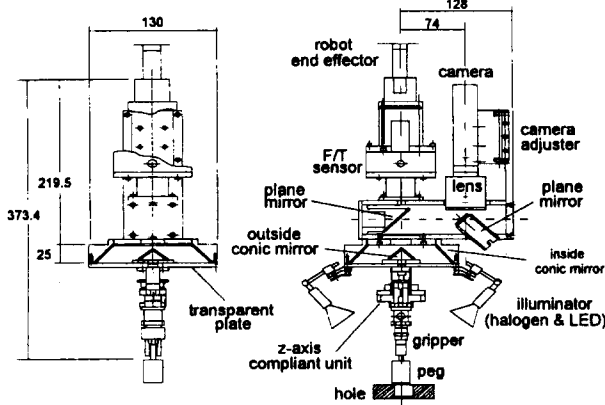


그림 10. 제안된 센서의 조립도.

Fig. 10. A schematic diagram of the proposed sensing system.

이 시스템은 카메라, 조명장치, 그리퍼, 그리고 원뿔거울쌍과 평면거울쌍등으로 이루어진 광학장치등의 4개의 중요한 부분으로 구분된다. 이 장치는 그리퍼를 내면거울쌍의 하단에 취부하기 위해서 투명아크릴판을 사용한다. 만일 이판이 불투명할 경우 물체가 보이지 않게 됨으로 이를 피하기 위해서 투명한 것을 사용한다. 이 아크릴판위에 외면원뿔거울을 고정하였으며 그 하부에 그리퍼를 부착하였다. 그리고 이 판을 내면원뿔거울의 하면에 부착하였다. 이 장치는 또한 원뿔거울의 구면수차에 의한 영향을 줄이기 위해서 약  $\phi 1.8mm$  정도로 조리개를 닫아서 사용한다. 하지만 이 경우에 광량이 부족하게 되어 강한 조명이 없는 촬상이 곤란하게 된다. 따라서 이 장치는 링형상(ring type)의 LED 조명과 할로젠 램프를 사용하였으며, 이 할로젠 램프는  $90^\circ$ 각도로 4개를 배치하여 그림자에 의한 영향을 상쇄시켰다. 또한, 이 할로젠 램프는 약  $110^\circ$  정도의 수직방향으로 조사각도의 조절이 가능하게 하여 측정거리의 변화에 따른 조명위

치변화에 의한 잡음을 최소화 하도록 하였다. 그리고 각 거울은 전면반사(front reflection)를 하도록 알루미늄을 가공하여 만들었다. 만일 일반거울을 사용할 경우 원뿔거울의 제작이 어렵고 또한 후면반사가 이루어 지므로 거울의 두께만큼 굴절이 발생하여 광로해석이 어렵게 되므로 정밀한 계측을 위해서는 전면반사를 고려해야 한다. 한편, 이 시스템이 장애물과 충돌등에 의한 파손을 방지하기 위해서 그리퍼는 수직방향으로 약 10mm 수축이 가능한 충돌흡수 구조를 장착하고 있으며 또한 이것의 감지를 위한 2개의 근접센서를 장착하고 있다.

#### 2. 모의 실험

그림 11(a)는 측정장치에 대해서 수평인 동일평면상에 놓인 사각형물체의 높이를 2mm 간격으로 변화시킬때의 모양이다. 그림 11(b)는 각 높이에서 이 사각형을 영상면으로 (32)와 (33)를 이용하여 정방향투영을 하여 얻은 영상면상에서의 모양이다. 그림 11(b)에서 A로 표기한 것처럼 전방향장치로부터 사각형의 물체가 멀리 떨어져 있을 때는 배럴(barrel)왜곡이 발생된다. 이 물체를 센서에 대해서 점점 가까이 접근시키면 배럴왜곡의 크기가 점점 줄어들다가 어떤 거리에서는 C로 표기한 것처럼 왜곡이 전혀 발생하지 않는 특성을 보인다. 이 거리를  $Z_0$ 라 표기하고 기준높이라 정의하자. 이 기준높이는 기준측정거리에  $w_r$ 에 해당하는 높이로 약 238mm이다. 한편, 이 기준높이를 지나서 물체를 더욱 가까이 접근시키면 이번에는 왜곡의 크기가 바뀌어 B로 표기한 것처럼 핀쿠션(pin-cushion)의 왜곡이 발생되고 거리를 더욱 가까이 갈수록 그 크기가 커져감을 알 수 있다. 그런데,  $-45^\circ$ 의 수직선은 반경방향의 대각선으로 투영

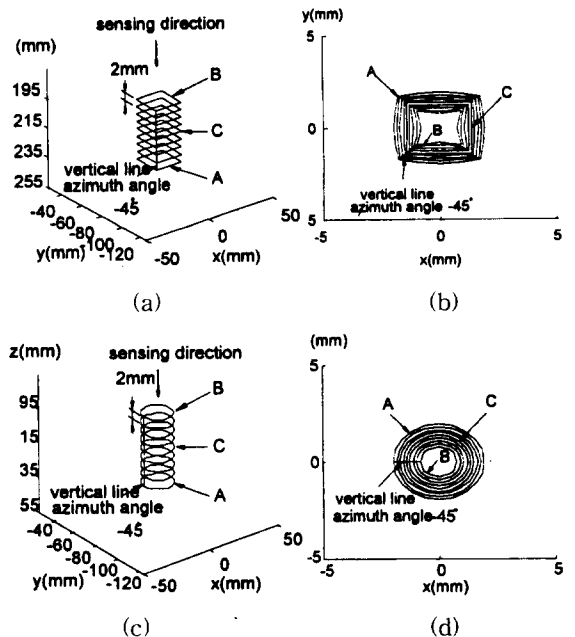


그림 11. 물체의 형상 및 거리의 변화에 따른 투영특성의 변화 : (a) 사각형의 대상물체, (b) 사각형의 투영모양, (c) 원형의 대상물체, (d) 원형형상의 투영.

Fig. 11. Projection feature variation with change of object shape and measurement distance : (a) a rectangular shape with change of measurement distance, (b) projected image of the rectangular shape, (c) a circular shape with change of measurement distance and (d) projected image of the circular shape.

되며 왜곡이 보이지 않고 또한 그 방위각이 같은  $-45^\circ$ 를

보인다. 한편, 형상을 달리하면서 그 영향을 고찰 하였다. 그림 11(c)와 (d)는 마찬가지로 방법으로 원형의 형상에 대한 결과이다. 그림 11(c)는 원형의 평면물체를 2mm 간격으로 높이를 변화시킨 물체의 모양이고 그림 11(d)는 그것을 제안된 전방향 센서를 이용하여 영상면으로 투영시킬때 얻어진 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 대각선의 방위각은 사각형과 마찬가지로 변화가 없으며 직선의 모양을 그대로 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그런데 원형의 형상에는 원형의 모양을 그대로 유지하며 그 크기(scale)만 달라져 보인다.

이 모의실험으로부터 이 광학계가 갖는 왜곡현상을 추정 하면 다음과 같다. 먼저 원의 경우에 투영된 후에도 일정하게 그 원의 형상을 유지함을 보이며 사각형의 경우는 중심에서 가까우면 크게 왜곡되고 먼 꼭지점 부근은 덜 왜곡되는 현상을 보인다. 이것은 센서로부터 물체까지의 측정거리가 동일한 거리에 놓인 평면상의 물체가 투영될 때, 영상면의 중심으로부터 반경방향으로 투영된 물체까지의 거리에 관계없이 그 왜곡량의 절대값의 크기가 일정하기 때문에 나타나는 현상이다[27]. 한편, 그 원의 크기가 가까우면 작고 멀면 커지고 또한 사각형의 경우 가까우면 핀쿠션(pin-cushion), 멀면 배럴형태의 왜곡을 보인다. 이것은 그 왜곡량의 부호가 기준측정높이  $Z_0$ 를 기준으로 이 높이에서는 그 크기가 0이며, 이보다 가까우면 음의 부호 그리고 이보다 멀면 양의 부호를 갖기 때문에 나타나는 모양이다[27]. 결국 이 결과를 종합할 때, 이 광학계는 물체의 투영시 방위각이 보존되지만, 왜곡의 특성을 보인다. 하지만 그 왜곡은 그림11(b)에서 볼 수 있듯이 수평직선의 경우는 높이에 따라서 배럴에서 핀쿠션(pin-cushion)으로 선형적인 변화를 보이고 있어 거리추정을 위한 좋은 단서를 제공한다.

그림 12는 정육면체를 영상면으로 정방향투영시킨 모의 실험결과이다.

그림 12(a)는 수직으로 똑바로 놓인 정육면체를 보인 것이다. 그림 12(b)는 이 정육면체의 하면을 앞에서 정의한 기준높이  $Z = Z_0$ 에 수직으로 놓고 (32)와 (33)을 이용하여 영상면으로 정방향 투영시킨 모의실험결과로써 이 장치는 동축의 영상뿐만이 아니라 전방향의 측면영상정보도 동시에 얻을 수 있음을 보여준다. 또한, 그림 11에서 고찰한 것처럼 물체의 활상거리가 가까운 상면의 수평직선은 핀쿠션왜곡이 선명하게 발생되었다. 그러나 방위각이 일정하고, 중심축으로부터 같은 거리에 있는 수직모서리는 왜곡이 없이 보여 지므로 이로써 방위각이 보존됨을 알 수 있다. 그림12(c)는 그림 12(a)의 정육면체를 홀(hole)에 삽입하는 모양을 보인 것이다. 하지만 그림 12(a)에서와는 달리 정육면체 모양의 페그가 홀(hole)에 대해서  $-2^\circ, 5^\circ$ 의 요잉(yawing) 및 피칭(pitching)각도로 기울어져 있고, 또한  $Trans(2, -1, -2)$ 로 이동하여 수평오차를 갖는 조건하에서 그림 12(b)에서와 마찬가지로 방법으로 정방향투영시킨 모의실험결과이다. 홀과 페그사이의 전방향의 오차가 예상대로 사각영역없이 2차원의 동축영상으로 얻어짐을 알 수 있다.

이로써 일반적으로 이 전방향 센서의 사용으로 peg와 hole사이의 상대오차의 보정은 2차원의 형상정합(pattern matching) 문제가 되어 복잡한 비대칭의 형상의 조립오차라도 이미 많은 사람들에 의해서 개발된 형상정합방법[23][24]을 이용하면 쉽게 보정이 가능하게 된다. 그러므로 제안된 센서를 이용하면 조립부품 사이의 단면형상의 복잡도에 관계없이 조립오차를 추정하여 보정하는 것이 가능하게 된다. 한편, 물체공간에서의 정확한 조립오차 정보를 알아내기 위해서는 광학계의 기구정수의 보정이 매우 중요하다.

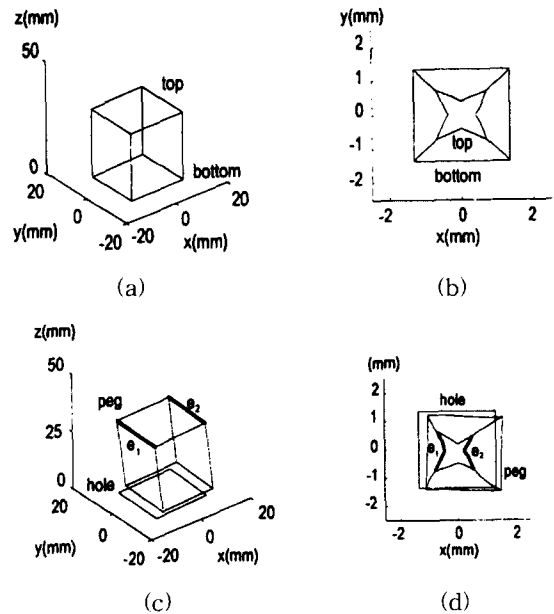


그림 12.  $Z = 238mm$ 에 놓인 정육면체의 투영 : (a) 수직으로 놓인 정육면체, (b) 투영된 모양, (c) 홀에 대해서 요잉각  $-2^\circ$ , 피칭각  $5^\circ$  그리고  $x=2mm, y=-1mm, z=2mm$ 로 변환된 정육면체, (d) 기울어진 물체의 투영모양.

Fig. 12. A projection of a cube at  $Z = 238mm$  : (a) an upright cube, (b) the projected image of (a), (c) a tilted cube rotated by yawing  $-2^\circ$  and pitching  $5^\circ$  and translated by  $x=2mm, y=-1mm, z=2mm$  relative to a hole, and (d) the projected image of (c).

이 기구정수의 보정은 시스템의 실제작시 가공 및 조립오차에서 비롯되는 거울의 위치 및 자세등의 불확실성을 알아내어 보상해 주는 것으로 이 전방향장치의 보정을 위해서 델타학습법(delta-learning method)[25]을 이용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

VI. 결론

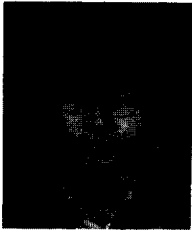
조립작업에서 요구되는 조립부품사이의 상대위치 및 방향오차를 사각영역없이 측정할 수 있는 전방향 측정장치를 제안하였고, 그것의 설계방법과 다단거울에서의 영상변환모델을 기술하였다. 그리고 모의실험을 통해서 그 가능성을 확인하였다.

이 장치는 대칭단면 뿐 아니라 복잡한 형상의 비대칭 단면을 갖는 조립부품사이의 전방향의 형상오차를 측정하기 위해서 방향을 바꾸어 가면서 여러번 측정해야 가능하던 기존방법과는 달리 단 한번의 활상으로 사각영역없이 물체의 측면영상을 포함한 전방향의 영상과 원주방향 전체의 위치 및 각도오차를 측정할 수 있는 영상을 얻을 수 있다. 이로써 물체의 인식이 용이하고 형상의 복잡도에 관계없이 그 정렬오차를 즉시 추정하는 것이 가능하다.

참고문헌

[1] H. S. Cho, H. J. Warnecke and D. G. Gwon, "Robotic assembly : a synthesizing overview," *Robotica*, vol. 5, pp. 153-165, 1987.  
 [2] M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," *IEEE Trans.*

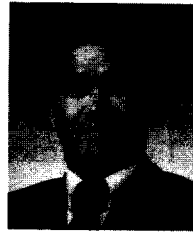
- Syst., Man, Cybern.* vol. SMC-11, pp. 418-432, 1981.
- [3] T. Lozano-Perez, M. T. mason and R. H. Taylor, "Automatic synthesis of fine-motion straties for robots," *Int. J. Robotics Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 3-24, 1984.
- [4] D. E. Whitney, "Quasi-static assembly of compali- antly supported rigid parts," *J. Dyn. Syst., Meas., Contr.* pp. 65-77, 1982.
- [5] H. Inoue, "Force feedback in precise assembly tasks," *Artificail Intelligence : An MIT Pers- pective*, vol. II, P. H. Winston and R. H. Brown, pp. 223-241, 1983.
- [6] G. C. Burdea and H. J. Wolfson, "Solving jigsaw puzzles by a robot," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 6, pp. 752-763, 1989.
- [7] A. C. Sanderson and G. Perry, "Sensor-based robotic assembly systems : research and applica- tions in electric manufacturing," *IEEE Proc.* vol. 71, pp. 856-871, July. 1983.
- [8] N. Takanashi, H. Ikeda, T. Horiguchi and H. Fukuchi, "Hierachical robot sensors application in assembly tasks," *15th ISIR*, pp. 829-836, 1985.
- [9] J. J. Hill, D. C. burgess and A. Pugh, "The vision-guided assembly of high-power semicon- ductor ddiodes," *Proc. 14th, Int. Sym. on Industrial Robots*, Gothenburg, Sweden, pp. 449-460, 1984.
- [10] P. Caloud and P. Durand, "Automatic insertion on non-standard electronic components," *Proc. 15th int. Symp. on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, pp. 787-794, 1985.
- [11] J. E. Byun and H. S. Cho, "A study on assembly task of parts with rectangular cross-sectional area by robot vision system," MS Thesis PE, 1987, KAIST.
- [12] Y. Shirai and H. Inoue, "Guiding a robot by visual feedback in assembly tasks," *Pattern Recognition*, vol. 5, pp. 99-108, 1973.
- [13] J. Miura and K. Ikeuchi, "Generating visual sensing strategies in assembly task," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1912-1918, 1995.
- [14] S. A. Hutchison and A. C. Kak, "Planning sensing strategies in a robot workcel with multi-sensor capabilities," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, RA-5(6), pp. 765-783, 1989.
- [15] W. S. Kim, H. S. Cho and S. Kim, "Omni- directional sensing device for assembly of a part with Arbitrary cross-section," *KACC*, pp. 153-156, 1995.
- [16] H. Ishiguro, M. YTamamoto and S. Tsuji, "Omni-directional stereo for making global map," in *Proc. 3rd Int. Conf. Computer Vision*, 1990.
- [17] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall, "Dynamic omnidirectional vision for mobile Robots," *J. Robotics Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, 1986.
- [18] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida, "Map- based navigation for a mobile robot with omnidirectional image sensor COPIS," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 5, pp. 634-647, 1995.
- [19] E. Hecht, *Optics*, Addison-Welsley Publishing Co. Inc., 1987.
- [20] R. Kingslake, *Applied Optics and Optical Engin- eering : Optical Components*, vol. 3, Academic Press, New York, pp. 269-308, 1965.
- [21] J. J. Craig, *Introduction to Robotics*, Addison 634-647, 1995. Welsley, pp. 15-53, 1986.
- [22] E. Krotkov, "Focusing," *Int. J. of Computer Vision*, vol. 1, pp. 223-237, 1987.
- [23] N. Ayache and O. D. Faugeras, "A new approach for the recognition and positioning of two- dimensional objects," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 1, Jan., 1986.
- [24] T. H. Reiss, *Recognition planar Objects Using Invariant Image Features*, Springer-Verlag, New- York, 1993.
- [25] Jacek M. Zurada, *Introduction to Artificial Nueral Systems*, West Publish Co., New York, 1992.
- [26] R. Y. Tsai, "Versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. Ra-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [27] W. S. Kim, H. S. Cho and S. Kim, "Distortion analysis in an omni-directional image sensing system for assembly," *Proc. IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, August 7-9, California, USA, pp. 257-262, 1997.



**김 완 수**

1964년생. 1987년 서울대학교 기계설계학과(학사). 1989년 한국과학기술원 생산공학과(석사). 1993년~현재 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(박사과정). 1987년~현재 삼성전자(주) 자동화연구소 근무. 주관심분야는 생산자동화, 비

전응용 시스템, 센서 및 원격측정, 자율주행로봇 그리고 인공지능응용.



**조 형 석**

1944년생. 1971년 서울대학교 공업 교육학과(학사). 1973년 Northwestern Uni. 기계공학과(석사). 1977년 Uni. of California at Berkely (박사). 1978년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 1990년~1993년 IFAC Manufacturing Com-

mittee의 부회장. 현재 국제 Journal인 Robotica, Control Engineering Practice와 Advanced Robotics의 편집위원. 주관심분야는 인공지능응용, 비전시스템, 공정제어, 보로틱스 그리고 조립자동화임.

**김 성 권**

1949년생. 1972년 동아대 공대 기계공학과(학사). 1986년 Uni. of Minnesota 기계공학과(석사). 1988년 Uni. of Minnesota 기계공학과(박사). 1976년 금성사(주) 근무, 1988년~현재 삼성전자 생산기술센터 센터장, 전무이사. 주관심분야는 보로틱스 및 자동화.