

## 유연부품조립을 위한 시각측정시스템의 설계

김진영<sup>†</sup>

동명정보대학교 로봇시스템공학과  
 ④ 608-711 부산시 남구 용당동 535번지

조형석

한국과학기술원 기계공학과  
 ④ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1번지

(2002년 4월 1일 받음, 2002년 6월 10일 수정본 받음)

유연부품은 조립 시에 변형이 발생하기 때문에 로봇을 이용한 자동조립에서 이의 성공적인 조립을 위해서는 부품변형 및 상대오차를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 이에 본 논문에서는 시각센서를 이용하여 상대오차 및 부품변형을 측정할 수 있는 3차원 측정시스템의 설계방법을 제안한다. 시스템의 광로해석을 통해 실제 작업공간과 카메라 영상면 사이의 사상관계를 해석하고, 이를 토대로 시스템의 설계방법을 제안한다. 또한 구현된 실제 시스템을 이용한 조립실험을 통해 제안된 시스템의 유효성을 검증한다.

주제어 : visual sensing system, flexible parts assembly, system design, mirror.

### I. 서 론

로봇을 이용한 조립의 성공을 위해서는 조립부품간의 상대오차 보정이 필요하다. 이러한 조립문제 해결을 위한 연구로써 그 동안 단단한 부품(rigid part)을 대상으로 많은 연구<sup>[1-3]</sup>가 이루어져 왔지만, 유연부품조립(flexible parts assembly)에 관해서는 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 유연부품조립에 관한 연구로써 Merlet<sup>[4]</sup>는 유연한 원형팩의 삽입작업에서 힘과 변형 사이의 관계를 유도하였고, Zheng<sup>[5]</sup> 등은 1차원 변형보(beam)의 삽입작업에서 조립전략을 수립하였다. Nakagaki<sup>[6]</sup> 등은 1차원 변형 유연보의 삽입작업에서 삽입시의 좌굴모양 및 힘 관계를 해석하였다.

유연부품의 경우에는 자중 또는 조립반력에 의하여 부품변형이 발생하기 때문에 단단한 부품에서처럼 힘 센서에 의해 측정된 조립반력으로부터 상대오차를 알아내기가 어려울 뿐 아니라, 부품자체의 강성이 작아 힘 정보의 유용성도 반감된다. 따라서 유연부품의 성공적인 조립을 위해서는 부품변형 및 상대오차를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 필요한데, 이는 시각 센서에 의해 이루어 질 수 있다.

본 논문에서는 상대오차 및 부품의 변형형상을 측정할 수 있는 3차원시각 측정시스템의 설계방법을 제안하고, 시스템의 광로해석을 통해 실제 작업공간과 카메라 영상면 사이의 사상관계를 해석한다. 또한 시스템의 실제 구현 및 조립실험을 통해 제안된 시스템의 유효성을 검증한다.

### II. 시각측정시스템

그림 1은 제안된 측정시스템<sup>[7,8]</sup>의 기본구조로써 현대의 카메라와 두개의 평면거울, 두개의 사각뿔거울 그리고 부품을 파지하기 위한 핸드로 이루어져 있는데, 현대의 카메라로 3차원 위치 및 형상을 측정하기 위하여 그림 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, 내측

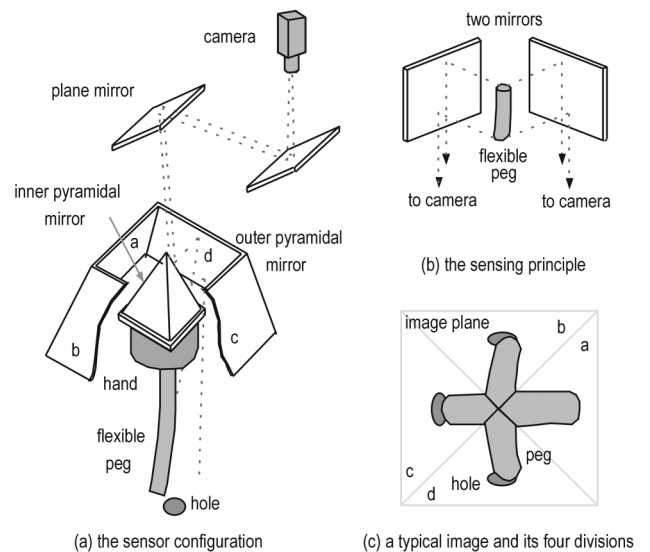


그림 1. 시각측정시스템의 구조.

<sup>†</sup>E-mail: k jy@tmic.tit.ac.kr

사각뿔거울(inner pyramidal mirror)은 사각뿔의 형상을 하고 있는데, 그림 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. 그림 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. 사각뿔의 4개면을 모두 이용함으로써 사각뿔의 두면 만에 의해서는 보이지 않는 반대편에 대한 정보까지 이용할 수 있도록 함으로써 조립시 폐색(occlusion)에 의한 정보누락을 방지하는 다방향(multidirectional) 측정성을 갖고 있다.

### III. 광로해석

#### 3.1. 하나의 거울에 대한 해석

제안된 측정시스템에서 실제 부품의 위치 및 변형형상과 카메라에 투영된 영상사이의 관계 즉 실제 작업공간과 센서공간 사이의 사상(mapping)관계를 구하기 위하여 우선 하나의 거울에 대한 광로해석<sup>1)</sup>을 수행한다. 공간상의 한점  $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ 에서 방향 코사인  $\mathbf{s}_i = (l_i, m_i, n_i)^T$ 로 출발한 빛이 법선벡터가  $\mathbf{N}_{i+1} = (L_{i+1}, M_{i+1}, N_{i+1})^T$ 인 거울면에 부딪히는 위치  $\mathbf{X}_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, 1)^T$ 과 반사되는 빛의 방향 코사인  $\mathbf{S}_{i+1} = (l_{i+1}, m_{i+1}, n_{i+1})^T$ 은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{R}_{i+1} \mathbf{X}_i \tag{1}$$

$$\mathbf{s}_{i+1} = \mathbf{r}_{i+1} \mathbf{s}_i \tag{2}$$

$$\mathbf{R}_{i+1} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_{i+1}l_i}{\rho_{i+1}} & -\frac{M_{i+1}l_i}{\rho_{i+1}} & -\frac{N_{i+1}l_i}{\rho_{i+1}} & \frac{P_{i+1}l_i}{\rho_{i+1}} \\ -\frac{L_{i+1}m_i}{\rho_{i+1}} & 1 - \frac{M_{i+1}m_i}{\rho_{i+1}} & -\frac{N_{i+1}m_i}{\rho_{i+1}} & \frac{P_{i+1}m_i}{\rho_{i+1}} \\ -\frac{L_{i+1}n_i}{\rho_{i+1}} & -\frac{M_{i+1}n_i}{\rho_{i+1}} & 1 - \frac{N_{i+1}n_i}{\rho_{i+1}} & \frac{P_{i+1}n_i}{\rho_{i+1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{r}_{i+1} = \begin{bmatrix} 1 - 2L_{i+1}^2 & -2L_{i+1}M_{i+1} & -2L_{i+1}N_{i+1} \\ -2L_{i+1}M_{i+1} & 1 - 2M_{i+1}^2 & -2M_{i+1}N_{i+1} \\ -2L_{i+1}N_{i+1} & -2M_{i+1}N_{i+1} & 1 - 2N_{i+1}^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서  $P_{i+1}$ 은 좌표계  $\{i\}$ 의 원점에서  $(i+1)$ 번째 좌표계인 거울면까지의 수직거리이고,  $\rho_{i+1}$ 은 입사광선  $\mathbf{s}_i$ 의  $(i+1)$ 번째 거울에 수직인 성분으로써  $\rho_{i+1} = \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{N}_{i+1}$ 으로 주어진다.

#### 3.2. 시스템의 투영관계

식 (1)에서 식 (4)를 제안된 시스템에 적용하기 위하여 그림 2와 같이 좌표계를 설정한다. 여기서  $\{K1a\}$ ,  $\{K2a\}$ 는 외측 사각뿔거울 및 내측 사각뿔거울의 네면 중에서 각각 한면에 해당하는 좌표계이며,  $\{K3\}$ ,  $\{K4\}$ 는 두 평면거울의 좌표계,

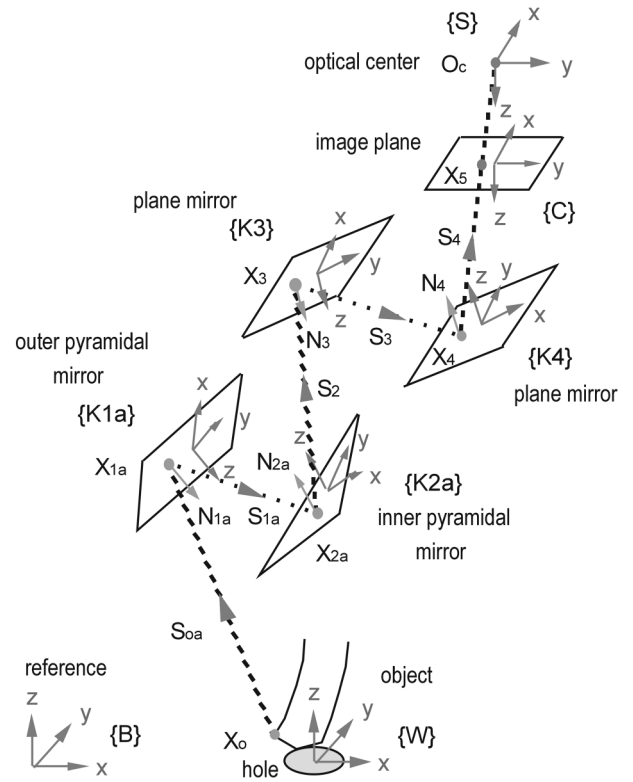


그림 2. 측정시스템의 좌표계.

그리고  $\{C\}$ 는 카메라 영상면의 중심에 원점을 갖는 좌표계이다. 또한  $\{S\}$ 는 광학계의 중심  $O_c$ 에 원점을 갖는 센서 좌표계이며,  $\{W\}$ 는 측정 대상물을 기술하기 위한 작업공간의 좌표계로써 사각뿔거울의 중심축과 대상물이 놓여있는 물체평면(object plane)의 교점에서 원점을 갖는다.

우선 작업공간으로부터 사각뿔거울의 한면을 통해 센서공간으로 투영(projection)되는 관계는 다음과 같이 구할 수 있다. 측정 대상물의 임의의 한점  $\mathbf{X}_0$ 에서  $\mathbf{S}_{0a}$ 의 방향으로 출발한 빛이  $\{K1a\}$ ,  $\{K2a\}$ ,  $\{K3\}$ ,  $\{K4\}$ 의 네개의 거울면에 반사된 후  $\mathbf{S}_4$ 의 방향으로 되어 카메라 영상면의 한점  $\mathbf{X}_5$ 에 투영된다고 할 때  $\mathbf{X}_5$  및  $\mathbf{S}_4$ 를  $\mathbf{X}_0$ 와  $\mathbf{S}_{0a}$ 를 이용하여 기준좌표계  $\{B\}$ 에 관해서 기술하면 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_5 = \mathbf{R}_5 \mathbf{R}_4 \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_{5,1} \mathbf{X}_0 \tag{5}$$

$$\mathbf{S}_4 = \mathbf{r}_4 \mathbf{r}_3 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_1 \mathbf{S}_{0a} = \mathbf{r}_{4,1} \mathbf{S}_{0a} \tag{6}$$

한편  $\mathbf{S}_{0a}$ 는 다음과 같은 방법에 의하여 구할 수 있다. 영상면에 투영되는 빛은 측정 대상물의 한 점에서 출발하여 광학중심(optical center)을 향하여 나아가므로 결국  $\mathbf{X}_0$ 에서 출발하여  $O_c$ 를 지나도록 하는 빛의 방향이  $\mathbf{S}_{0a}$ 가 된다. 그런데  $\mathbf{X}_0$ 에서 출발한 빛은 여러 개의 거울에 의해 광로가 꺾이면서  $O_c$ 에 도달하게 되므로  $\mathbf{S}_{0a}$ 를 용이하게 구하기 위하여 그림 3에 보여진 것처럼 가상의 광학중심(virtual optical center)  $\tilde{O}_{ca}$ 와  $O'_c, O''_c, O'''_c$ 을 정의한다.

우선 두번째 평면거울에 대한 가상의 광학중심  $O'_c$ 은 광학중심  $O_c$ 과 두번째 평면거울의 좌표계인  $\{K4\}$ 의 원점  $O_4$ , 그

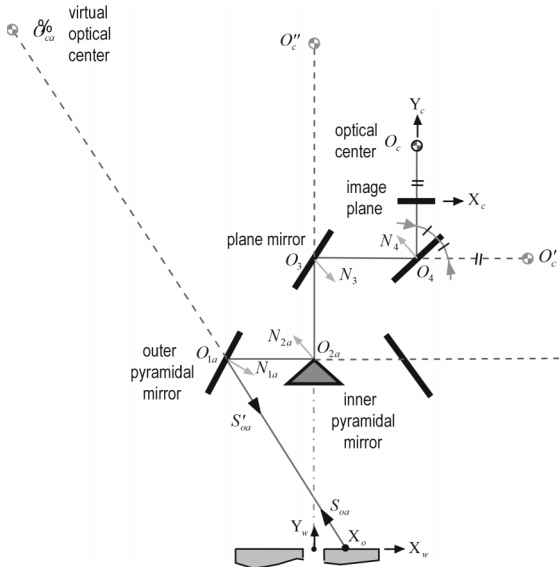


그림 3. 측정시스템의 가상 광학중심.

리고 거울에의 단위 법선벡터  $N_4$ 를 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$O'_c = O_c + 2((O_4 - O_c) \cdot N_4)N_4 \quad (7)$$

같은 방법으로 몇 개의 거울에 대해 반복함으로써  $O''_c, O'''_{ca}$  그리고 원하는 가상의 광학중심  $\tilde{O}_{ca}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$O''_c = O'_c + 2((O_3 - O'_c) \cdot N_3)N_3 \quad (8)$$

$$O'''_{ca} = O''_c + 2((O_{2a} - O''_c) \cdot N_{2a})N_{2a} \quad (9)$$

$$\tilde{O}_{ca} = O'''_{ca} + 2((O_{1a} - O'''_{ca}) \cdot N_{1a})N_{1a} \quad (10)$$

여기서  $O_3, O_{2a}, O_{1a}$ 는 각각 거울 좌표계  $\{K3\}, \{K2a\}, \{K1a\}$ 의 원점이고,  $N_3, N_{2a}, N_{1a}$ 는 대응하는 각각의 거울에 대한 법선 벡터이다. 식 (7)에서 식 (10)까지의 관계로부터  $\tilde{O}_{ca}$ 는 각 거울들의 위치와 단위법선벡터, 그리고 광학중심  $O_c$ 의 함수임을 알 수 있는데, 이때는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{oa} = (\tilde{O}_{ca} - X_0) / \|\tilde{O}_{ca} - X_0\| \quad (11)$$

### 3.3. 시스템의 역투영관계

센서공간으로부터 작업공간으로의 역투영(inversion)관계는 식 (5)와 (6)의 투영관계를 역변환 함으로써 구할 수 있다. 대상물의 한점  $X_0$ 에 대응하는 영상면의 두 대응점(corresponding point)  $X_{5a}$ 와  $X_{5b}$ 를 알면 이들에 대응하는 외측 사각뿔거울 위의 점  $X_{1a}, X_{1b}$ 와 이들로부터  $X_0$ 를 향하는 방향  $S'_{oa}, S'_{ob}$ 을 다음식으로부터 구한다.

$$X_{1a} = R_{5,2}^{-1} X_{5a} = R_2^{-1} R_3^{-1} R_4^{-1} R_5^{-1} X_{5a} \quad (12)$$

$$S'_{oa} = r_{4,1}^{-1} S_{4a} = r_1^{-1} r_2^{-1} r_3^{-1} r_4^{-1} S'_{4a} \quad (13)$$

$$S'_{4a} = (X_{5a} - O_c) / \|X_{5a} - O_c\| \quad (14)$$

$X_{1b}$ 와  $S'_{ob}$ 도 식 (12)에서 식 (14)와 같은 방법으로 구할 수 있다.  $X_{1a}$ 를 지나고  $S'_{ob}$ 의 방향을 갖는 직선을  $l_a$ 라 하고,  $X_{1b}$ 를 지나고  $S'_{ob}$ 의 방향을 갖는 직선을  $l_b$ 라 하면  $X_{5b}$  및  $X_{5a}$ 에 대응하는 대상물의 한점  $X_0$ 는  $l_a$ 와  $l_b$ 의 교점으로 주어진다.

## IV. 시스템 설계

### 4.1. 설계변수

측정시스템의 설계목적은 측정거리(working distance)와 측정범위(field of view) 등의 주어진 사양을 만족하는 설계변수(design parameters)를 결정하는 것이다. 설계시에는 3차원 구조의 모든 설계변수를 고려해야 하지만 제한된 시스템은 대칭 구조이므로 그림 4와 같이 2차원 상에서 대부분의 설계변수가 결정될 수 있다. 여기에 추가되어야 하는 것은 단지 두 개의 평면거울과 외측 사각뿔거울의 한면에 대한 폭  $B_1, B_2, B_3$  뿐이다.

측정거리  $w$ 는 시스템의 광학중심(optical center)  $O_c$ 에서 물체까지의 거리로 정의되고, 이는 카메라로부터의 입사각  $\theta$  및 설계변수들에 따라 변화한다. 따라서 두 평면거울의 설치각도  $\alpha_1, \alpha_2$ 를  $45^\circ$ 로 가정하고  $\theta=0^\circ$ 일 때를 기준으로 하여 측정거리  $w_0$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$w_0 = d_1 + d_2 + d_3 + d_{r1} + d_{r2} \quad (15)$$

여기에서 광로의 길이는 외측 사각뿔거울의 경사각을  $\alpha_4$ 라 할 때 다음과 같다.

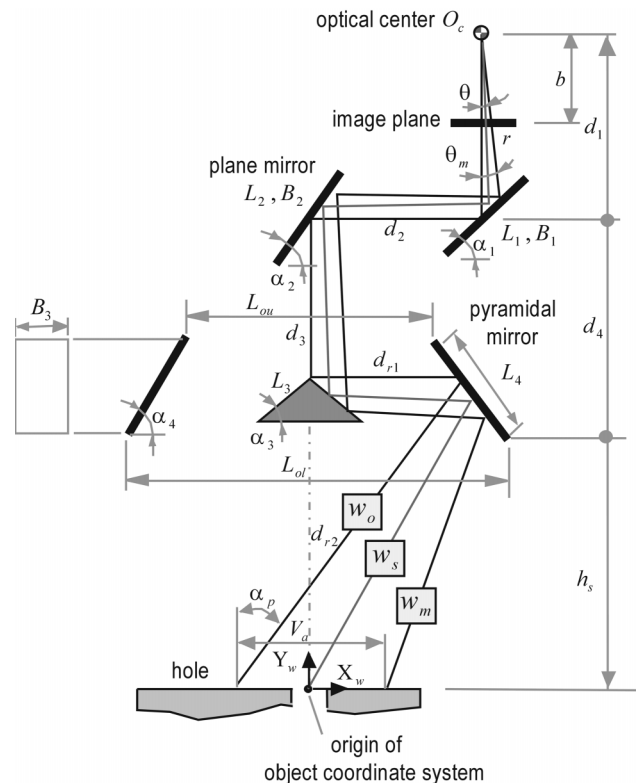


그림 4. 측정시스템의 설계변수.

$$d_{r1} = \frac{L_{ol}}{2} - (d_4 - d_3) \cot \alpha_4 \quad (16)$$

$$d_{r2} = \frac{d_4 - d_3 + h_s}{\sin(2\alpha_4)} \quad (17)$$

여기서  $h_s$ 는 물체평면(object plane)으로부터 외측 사각뿔거울의 밑면까지의 높이이다. 한편 실제 대부분의 부품들은 높이를 가지고 있기 때문에 부품의 모든 점들이 같은 평면상에 있지 않고 따라서 물체가 놓여있는 물체평면은 어떤 고정된 높이에서 정의될 수 없다. 그러나 설계방법의 간단한 기술을 위하여 고정된 높이를 갖는 물체평면에 대해서 설계방법을 기술하고자 하는데 이는 높이변화를 고려한 설계문제에서도 쉽게 적용될 수 있다. 물체평면이 사각뿔거울의 밑면에 평행한 것으로 가정하고, 사각뿔거울의 한면에 의해 볼 수 있는 물체평면상의 최대길이를 측정범위  $V_a$ 라 하면 이는 다음과 같이 주어진다.

$$V_a = \frac{w_o \tan \theta_m}{\cos \alpha_p + \sin \alpha_p \tan \theta_m} \quad (18)$$

여기서  $\theta_m$ 은  $\theta$ 의 최대값이고  $\alpha_p$ 는  $\theta=0^\circ$ 의 광로인 광축과 물체평면의 법선이 이루는 각으로써  $\alpha_1, \alpha_2$  및 내측 사각뿔거울의 경사각  $\alpha_3$ 를 모두  $45^\circ$ 로 가정할 때 다음과 같이 된다.

$$\alpha_p = 2\alpha_4 - 90^\circ \quad (19)$$

측정시스템의 측정거리와 측정범위는 측정시스템의 사용환경 즉 조립하려는 대상부품의 크기와 이를 파지할 핸드의 크기, 그리고 측정시스템이 장착될 로봇의 크기, 장착공간 등을 고려하여 결정해야 한다. 따라서 본 설계에서는 측정거리, 측정범위 및 측정시스템의 설치높이  $h_s$ 에 대한 초기사양을  $w_o=508 \text{ mm}$ ,  $V_a=40 \text{ mm}$ ,  $h_s=185 \text{ mm}$ 로 결정하였다.

4.2 카메라 렌즈의 선정

물체거리(object distance), 물체크기(object height), 영상면의 크기(image height)가 각각  $w_o, V_p, r$ 인 경우에  $V_p$ 가  $r$ 에 가깝게 투영된다고 하면 얇은 렌즈공식(thin-lens formula)으로부터 상거리(image distance)  $b$ 와 렌즈의 초점거리(focal length)  $f$ 는 다음과 같이 구해진다<sup>9)</sup>.

$$b = \frac{r w_o}{V_p} \quad (20)$$

$$f = \frac{r w_o}{V_p + r} \quad (21)$$

여기서  $V_p$ 는 카메라의 광축에 수직한 평면에 놓인 물체의 크기이므로 그림 5에 보여진 것과 같은 원리를 이용하여 측정범위  $V_a$ 와의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_p = V_a (\cos \alpha_p + \sin \alpha_p \tan \theta_m) \quad (22)$$

여기서  $\theta_m$ 은 촬상소자의 크기  $r$ , 그리고  $b$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tan \theta_m = \frac{r}{b} \quad (23)$$

한편 카메라의 경우 본 설계에서는 설치공간 등의 조건을 고려하여 1/2인치 CCD 카메라를 선정하였다. 그리고 로 가정하면 식 (19)에서 식 (23)까지를 이용하여 초기사양을 만족하는  $f$ 와  $b$ 를 구할 수 있는데 그 값은  $b=32.4 \text{ mm}$ ,  $f=30.4 \text{ mm}$ 로 된다. 따라서 카메라의 렌즈는 계산값으로부터 가장 적절한 상용렌즈인  $f=25 \text{ mm}$ 를 선정하였다. 따라서  $f=25 \text{ mm}$ 에 대해  $b$  및  $V_a$ 를 다시 계산하면  $b=26.3 \text{ mm}$ ,  $V_a=48.9 \text{ mm}$ 이 된다.

4.3. 거울의 설계

측정시스템에서 사용된 거울의 크기는 그림 5에서 나타내듯이 광학중심으로부터 거리  $a$  만큼 떨어져서 카메라의 광축에 수직하게 놓여있는 평면  $P$ 와 경사각  $\alpha$ 를 가지고 기울어져 있는 평면  $P_\alpha$  사이의 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_r = \frac{a \tan \theta_{mh}}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \theta_{mh}} \quad (24)$$

$$L_l = \frac{a \tan \theta_{mh}}{\cos \alpha - \sin \alpha \tan \theta_{mh}} \quad (25)$$

$$L = L_r + L_l = \frac{2a \cos \alpha \tan \theta_{mh}}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \tan^2 \theta_{mh}} \quad (26)$$

$$B = (a + L_l \sin \alpha) \tan \theta_{mv} \quad (27)$$

여기서  $\theta_{mh}$ 와  $\theta_{mv}$ 는 카메라 렌즈의 수평방향과 수직방향의 입사각이며,  $L$ 과  $B$ 는 거울의 길이 및 폭에 대응한다.

4.3.1 평면거울의 설계

카메라의 중심축과 실제 작업공간에 있는 물체 좌표계의 원점 사이에는 서로 편심되어 있기 때문에 동축영상을 얻기 위하

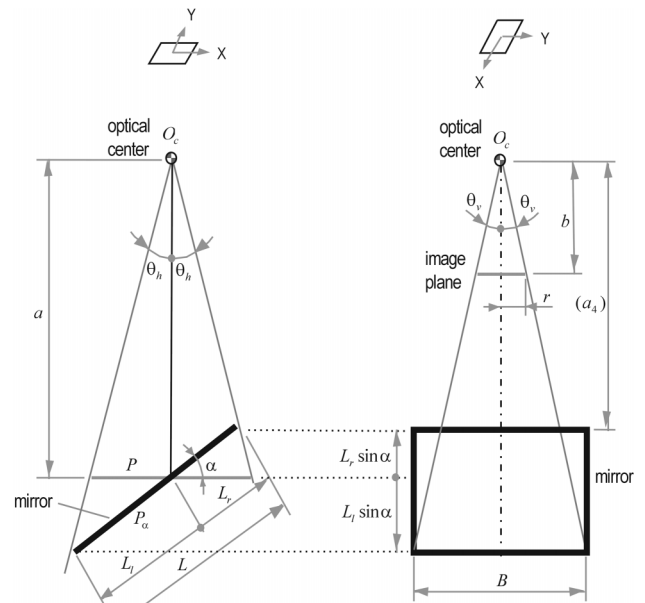


그림 5. 거울의 길이와 폭.

여 본 설계에서는 두 평면거울의 경사각도를  $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ 로 하였으며, 두 거울의 설치위치  $d_1, d_2$ 는 측정시스템의 소형화 및 주변과의 간섭을 고려하여  $d_1 = 55 \text{ mm}, d_2 = 90 \text{ mm}$ 로 하였다.

이때 식 (24)에서 식 (27)을 이용하면 평면거울의 최소 길이 및 폭  $L_i$ 와  $B_i$  그리고 설치거리  $a_i$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$L_i = \frac{2a_i \cos \alpha_i \tan \theta_{mh}}{\cos^2 \alpha_i - \sin^2 \alpha_i \tan^2 \theta_{mh}}, \quad i = 1, 2 \quad (28)$$

$$B_i = \left( a_i + \frac{L_{li}}{2} \sin \alpha_i \right) \tan \theta_{mv}, \quad i = 1, 2 \quad (29)$$

$$a_i = \sum_{k=1}^i d_k, \quad i = 1, 2 \quad (30)$$

$$L_{li} = \frac{a_i \tan \theta_{mh}}{\cos \alpha_i - \sin \alpha_i \tan \theta_{mh}}, \quad i = 1, 2 \quad (31)$$

#### 4.3.2 내측 사각빨거울의 설계

내측 사각빨거울의 경사각  $\alpha_3$ 는  $45^\circ$  경사진 평면거울로의 투영을 고려하여  $\alpha_3 = 45^\circ$ 로 하였으며, 평면거울과의 설치간격  $d_3$ 는  $d_3 = 48.5 \text{ mm}$ 로 하였다. 이때 거울의 크기  $L_3$ 와 설치거리  $a_3$ 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$L_3 = \frac{a_3 \tan \theta_{mh}}{\cos \alpha_3 - \sin \alpha_3 \tan \theta_{mh}} \quad (32)$$

$$a_3 = \sum_{i=1}^3 d_i \quad (33)$$

#### 4.3.3 외측 사각빨거울의 설계

외측 사각빨거울의 경사각  $\alpha_4$ 는 측정범위 등을 고려하여  $\alpha_4 = 57.2^\circ$ 로 하였으며, 평면거울과의 설치간격  $d_4$ 는  $d_4 = 80.9 \text{ mm}$ 로 하였다. 또한 사각빨대(frustum)의 밑면의 길이  $L_{ol}$ 은  $130 \text{ mm}$ 로 결정하였다. 이때 거울의 최소길이 및 폭  $L_4$ 와  $B_4$ , 그리고 설치거리  $a_4$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_4 = \frac{a_4 \tan \theta_{mh}}{\sin \alpha_4 - \cos \alpha_4 \cdot \tan \theta_{mh}} \quad (34)$$

$$B_3 = (a_4 + L_4 \sin \alpha_4) \tan \theta_{mv} \quad (35)$$

$$a_4 = \sum_{i=1}^3 d_i + \frac{L_{ol}}{2} - (d_4 - d_3) \cot \alpha_4 \quad (36)$$

### V. 시스템의 구현 및 조립실험

앞 절에서 기술한 바와 같이 결정해야 할 설계변수가 많은 뿐 아니라, 그들 사이의 관계가 매우 복잡해서 설계변수들은 일련의 과정에 의하여 한번에 결정되기 어렵고, 시행착오법(trial and error method)에 의하여 서로의 영향을 검토하면서 결정해야 한다. 이와 같은 과정을 통해 결정된 설계변수에 의해 구현된 측정시스템이 그림 6에 보인다. 그림 1의 구조를 실현시키

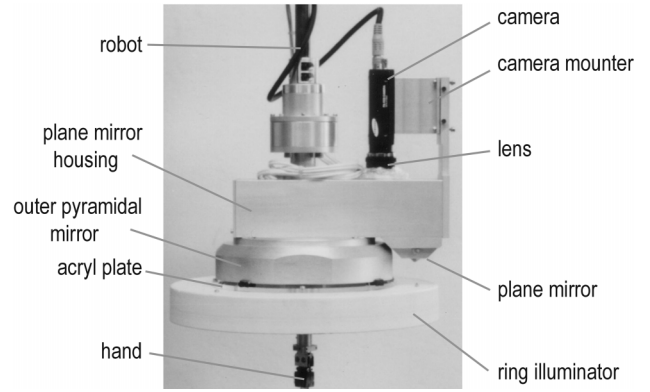
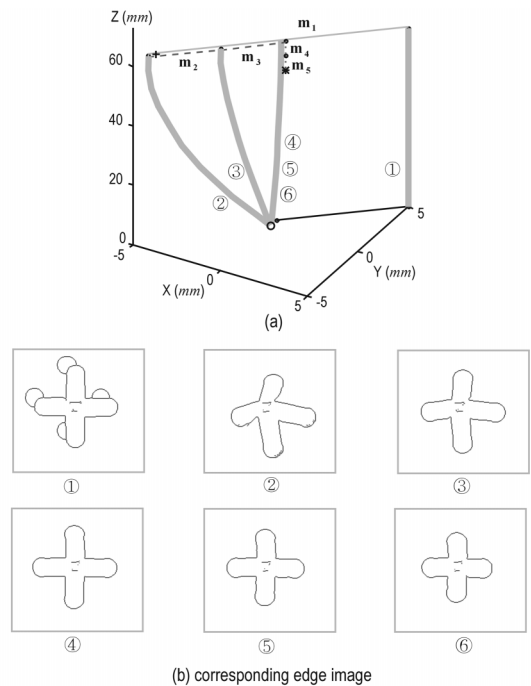


그림 6. 구현된 시각측정시스템.



+ location where searching is finished  
 \* location where insertion is finished  
 — measured value of initial misalignment ( $e_m, \phi_h$ )  
 — corrective motion  $m_1 (m'_1, m''_1)$  for lateral misalignment  
 - - - corrective motion  $m_2, m_3$  for a peg's inclination  
 ○ hole center  
 — peg's configuration  
 ···· motion  $m_4, m_5$  for insertion

그림 7. 유연부품 조립실험 예 ( $e_m = 7 \text{ mm}, c_r = 7 \text{ mm}, \phi_h = 45^\circ$ ).

기 위하여 투명 아크릴 위에 내측 사각빨거울을 올려 놓고, 이것을 외측 사각빨거울의 밑면에 부착하였다. 그리고 부품을 파지하기 위한 핸드는 아크릴 판의 밑면에 부착하였다. 평면거울 및 사각빨거울은 알루미늄을 경면가공하여 사용하였다.

그림 7은 제안된 측정시스템을 이용한 유연부품 조립실험의 한 예로써 구형중심과 부품 밑면 중심사이의 거리 즉 횡방향 상대오차의 크기를  $e_m$ , 구형중심과 부품 윗면 중심사이의 평면상 거리를  $c_r$ , 횡방향 상대오차의 방위각을  $\phi_h$ 라 할 때,  $e_m = 7 \text{ mm}, c_r = 7 \text{ mm}, \phi_h = 45^\circ$ 인 경우에 대해 한번의 보정운동  $m_1$ 으로 횡방향 오차가 보정된 것을 보여준다. 이때의 부품 상태는 ②와 같고, 여기에서  $m_1$ 과 반대 방향의 직선운동  $m_2, m_3$ 가 수행되면 ②에서 존재하는 각도오차가 보정될 수 있다.

④는 횡방향 오차뿐만 아니라 각도오차 까지 보정된 상태이며, ⑤는 ④에서 부품을 구멍 속으로 5 mm씩 삽입한 상태이며 ⑥은 ⑤에서 다시 5 mm를 더 삽입한 상태이다. 이 실험을 통해 직선운동 만에 의한 각도오차 보정이 가능함을 확인할 수 있었고, 상대적인 위치오차와 각도오차가 보정되면 구멍 속으로의 삽입도 가능함을 확인하였다. ①에서 ⑥까지의 부품 상태에 대해 해당되는 윤곽선 영상이 그림 7(b)에 보여진다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 유연부품조립에 있어서 해석적 모델 없이 임의 방향의 부품변형 및 조립 상대물 간의 상대오차를 측정하기 위한 시각측정시스템의 설계방법을 제안하였다. 제안된 측정시스템은 평면거울과 사각뿔거울로 이루어진 몇 개의 거울들과 하나의 카메라 그리고 부품을 파지하기 위한 핸드로 이루어져 있으며, 다방향 측정성(multi-directional sensing)을 갖고 있고, 로봇 선단에 쉽게 부착할 수 있어서 실제 조립작업 적용에 용이하다.

실제 작업공간과 센서공간 사이의 사상관계를 구하기 위하여 광로해석을 수행하였고, 또한 측정시스템의 변수해석을 통해 주어진 사양을 만족하는 시스템의 설계방법을 제시하였다. 제안된 설계방법에 의해 설계변수를 결정하고, 이로부터 실제 시스템을 구현하였으며, 실제 영상 촬상에 의한 간단한 조립 실험을 통해, 구현된 시스템의 캘리브레이션 및 측정성능 검토 결과<sup>18)</sup>와 더불어 제안된 시스템이 유연부품조립에 유효함을 확인할 수 있었다. 향후 다양한 조건하에서의 조립실험 등 지속적인 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연

구되었음(KRF-2001-003-E00054).

## 참고문헌

- [1] H. S. Cho, Warnecke, H. J., and D. G. Kwon, "Robotic assembly: a synthesizing overview," *Robotica*, vol. 5, pp. 153-165, 1987.
- [2] D. E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," *ASME J. Dynam. Syst. Measur. Control*, vol. 104, pp. 65-77, 1982.
- [3] Y. K. Park, and H. S. Cho, "Fuzzy Rule-based Assembly Algorithm for Precision Parts Mating," *Mechatronics*, vol. 3, pp. 433-450, 1993.
- [4] J. P. Merlet, "A Control Law for the Insertion of a Flexible Peg by Using a Robot," *Proc. of 3rd Int. Conf. of RoViSec.*, pp. 453-460, 1983.
- [5] Y. F. Zheng, R. Pei, and C. Chen, "Strategies for Automatic Assembly of Deformable Objects," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2598-2603, 1991.
- [6] H. Nakagaki, K. Kitagaki, and H. Tsukune, "Study of Insertion Task of a Flexible Beam into a Hole," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 330-335, 1995.
- [7] J. Y. Kim, H. S. Cho, and S. Kim, "A Visual Sensing System with Multi-views for Flexible Parts Assembly", *The 8th Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 979-984, 1997.
- [8] 김진영, 조형석, "시각측정시스템의 캘리브레이션 및 측정성능 검토," 한국정밀공학회지, 제16권 제8호, pp. 113-121, 1999.
- [9] R. Kingslake, *Applied Optics and Optical Engineering: Optical Components*, vol. 3, Academic Press, New York, pp. 269-308, 1965.
- [10] F. L. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Prentice-Hall, Inc., 1987.

## Design of a visual sensing system for flexible parts assembly

Jin Young Kim<sup>†</sup>

Department of Robot system Engineering,  
Tongmyong University of Information Technology, Busan 608-711, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: kji@tmic.tit.ac.kr

Hyung Suck Cho

Department of Mechanical Engineering,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA

(Received April 1, 2002 ; revised manuscript received June 10, 2002)

Unlike rigid parts, flexible parts can be deformed by contact force during assembly. In robotic assembly, information about their deformation as well as possible misalignment between the holes and their respective mating parts is essential for successful assembly. This paper presents a method to design a visual sensing system for measuring parts deformation and misalignment in flexible parts assembly. This paper performs ray-trace analysis of the system. A series of experiments for flexible parts assembly by using the implemented system are performed.

Classification code : OE.050.