1182 大韓機械學會論文集 第18卷 第5號, pp. 1182~1191, 1994

〈論 文〉

슬릿광 3차원 형상측정에서 측정분해능 최적화를 위한 시스템설계 및 카메라보정

박현구* · 김명철** · 김승우*

(1993년 12월 23일 접수)

System Design and Camera Calibration of Slit Beam Projection for Maximum Measuring Accuracy

Hyun-Goo Park, Myung-Cheol Kim and Seung-Woo Kim

Key Words: Three Dimensional Profile Measurement(삼차원 형상측정), Optical Triangulation (광삼각법), Slit Beam Projection(슬릿광 형상측정법), Moire Topography(무아레 토포그라피), Camera Calibration(카메라보정), Sculptured Surface(자유곡면), Sub-Pixel(서브-픽셀), Image Processing(영상처리), Curve Fitting(곡선맞춤)

Abstract

This paper presents an enhanced method of slit beam projection intended for the rapid measurement of 3-dimensional surface profiles of dies and molds. Special emphasis is given to optimizing the design of optical system so that the measuring accuracy can be maximized by adopting the two-plane camera calibration together with sub-pixel image processing techniques. Finally, several measurement examples are discussed to demonstrate that an actual measuring accuracy of ±0.2 mm can be achieved over the measuring range of 500 mm×300 mm× 200mm.

I. 서 론

금형생산을 비롯한 다양한 분야에서 3차원형상 측정에 대한 수요가 매우 증대되고 있다.[1] 현재 가장 널리 사용되고 있는 3차원 형상측정기술은 3차원 좌표측정기(Coordinate Measuring Machine : CMM)에서 접촉식프로브를 이용하는 방법이다. 이 방법은 고정도의 측정이 가능하나 측정시간이 많이 소요되어 경제적인 측면에서 비효율적이고, 접촉에 의해 형상이 변형될 수 있는 부드러운 물체는 측정이 곤란한 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안으로서 광학을 이용한 비접촉식 측정에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 현재 사용되고 있는 광학식측정법은 크게 점, 선 그리고 면적 측정방식 등으로 분류할 수 있다. 점 측정방식은 광삼각법 또는 자동초점(auto-focusing) 기능을 응용한 1차원 변위센서를 3차원 좌표측정기와 같은 기계적인 구동시스템에 장착하여 3차원형상을 측정하는 방식이고, 선 측정방식은 슬릿광 형상측정법과 같이 한 단면씩 측정하여 형상을 재현하는 방식이며 면적 측정방식은 모아레측정법(moire topography)[2]이나 스테레오비젼[3]과 같이 한번에 형상재현을 하는 방식이다. 이러한 방법중에서 슬릿광 형상측정법[4,5]은 빠른 측정속도와 비교적 높은 정확도를 얻을 수 있으면서 자동화가 용이한 장점으로 인해 많은 연구 및 상품화가 이루어지고 있는 추세이다.

본 연구에서는 슬릿광 형상측정법을 이용한 측정시스템의 설계방법을 제시하고 구현이 용이한 형상

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과
**삼성전자(주)

재현알고리즘과 분해능향상법 등에 관한 총괄적인 연구를 수행하고자 하였다. 슬릿광 형상측정법은 센서로 사용되는 카메라와 슬릿광사이의 단순한 기하광학, 즉 광삼각법을 이용하여 삼차원 자유곡면의 형상을 측정하는 방법이다. 기존의 방법에서는 카메라보정[6,7]을 통해 카메라와 슬릿광사이의 관계변수들과 카메라 내부변수(intrinsic parameters : 초점길이, CCD소자의 크기 등)들을 정확히 산출하여야 하지만 본 연구에서는 이러한 변수들을 산출하지 않고도 정확한 측정이 가능한 유한요소보정법을 제시하고 측정알고리즘을 개발하여 다양한 물체에 대해 측정을 수행하였다.

2. 측정원리

슬릿광 형상측정법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 카메라사이의 기하광학을 이용하여 삼차원형상을 측정하는 기술이다. 슬릿광 형상측정법을 이용한 측정시스템은 Fig. 1에서와 같이 하나의 슬릿광원과 두 대의 카메라 그리고 측정물체를 주사하기 위한 이송테이블로 구성된다. 측정의 기본과정은 다음과 같다. 측정대상물에 슬릿광을 투영하여 표면상에 형성된 광궤적을 카메라를 이용하여 획득한다. 이 광궤적은 3차원 형상의 정보를 갖게 되며, 이를 슬릿광의 공간상의 위치와 더불어 영상처리기법을 이용하여 3차원 좌표값을 산출하게 된다. 그리고 측정물체를 일정간격으로 이송시키면서 전체 표면에 대해 이러한 과정을 연속적으로 수행함으로써 3차원 형상을 재현하게 된다. Fig. 2는 세부 측정원리를 보여준다. 측정물체를 기준으로 그림에서와 같이 $x_1x_2x_3$-직교좌표계를 설정하여 측정물체상의 임의의 점을 $p(x_1, x_2, x_3)$로 표현하면, 측정물체의 표면 S의 3차원 형상은 물체상에 위치한 점들의 집합으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S=\{p(x_1, x_2, x_3)|p(x_1, x_2, x_3)\in S\} \qquad (1)$$

또한, 점 $q(y_1, y_2)$는 점 $p(x_1, x_2, x_3)$에 대응되는 영상점으로 카메라의 영상면에 설정된 2차원 y_1y_2-직교좌표계상의 한 점으로 정의한다. 측정점은 영상점에 대한 영상선이 슬릿광의 투영면과 만나는 점이다. 만일 영상점 $q(y_1, y_2)$에 대한 영상선의 단위방향벡터가 $\vec{v}$이고 영상선상에서의 한 점이 $p_1(x_{11}, x_{21}, x_{31})$이라면 영상선은 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{x2} & -v_{x1} & 0 \\ v_{x3} & 0 & -v_{x1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} v_{x2}x_{11}-v_{x1}x_{21} \\ v_{x3}x_{11}-v_{x1}\ x_{31} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

영상선의 단위방향벡터는 다음식에 의해서 얻을 수 있다.

$$\vec{v}=v_{x1}\vec{i}+v_{x2}\vec{j}+v_{x3}\vec{k}=\frac{\vec{p}_2-\vec{p}_1}{|\vec{p}_2-\vec{p}_1|} \qquad (3)$$

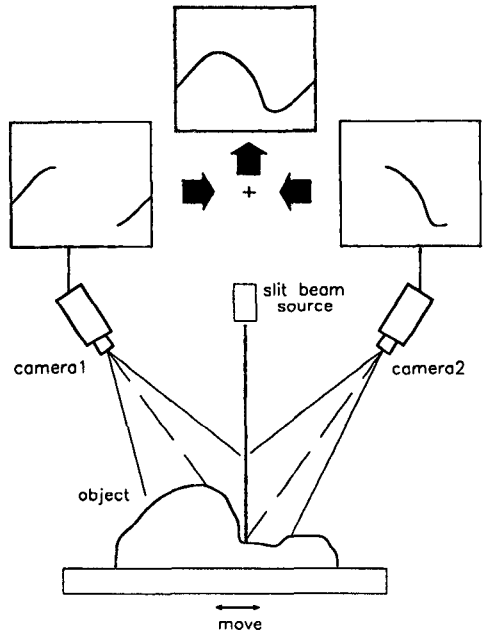


Fig. 1 Configuration of the measurement system

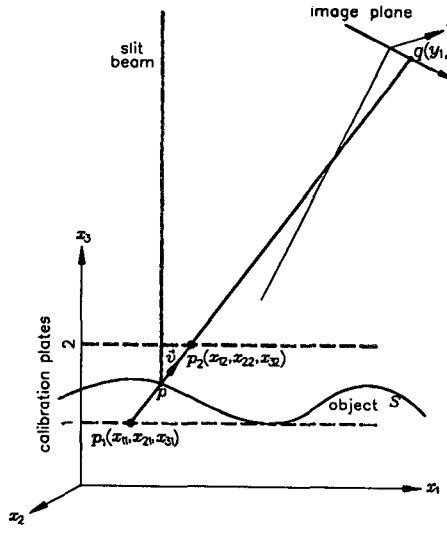


Fig. 2 Measuring principle

여기서, $\vec{p}_1$과 $\vec{p}_2$는 측정좌표계의 원점으로부터 각각 영상점 q의 대응점 p_1과 p_2까지의 벡터이다. 두 점 p_1과 p_2는 각각 보정면 1과 2상에 있으며 이 점들의 3차원 좌표는 카메라보정에 의해서 산출되는 변환행렬로부터 얻을 수 있다. 식(2)에 의해 표현되는 영상선의 식은 영상점 $q(y_1, y_2)$와 측정점 $p(x_1, x_2, x_3)$뿐만 아니라 이들 두점을 연결하는 직선상의 모든 점에 대응되고 있다. 따라서 측정점의 3차원 좌표를 유일하게 결정하기 위해서는 추가정보가 요구되며, 슬릿광 형상측정법에서는 슬릿광으로부터 얻게 된다. 슬릿광은 공간상에서 평면을 형성하므로 다음과 같은 평면방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[a_1\ a_2\ a_3]\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}+a_4=0 \tag{4}$$

식(2)와 식(4)를 병렬하여 하나의 행렬로 표현하면 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$\begin{bmatrix}v_{x2} & -v_{x1} & 0\\ v_{x3} & 0 & -v_{x1}\\ a_1 & a_2 & a_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v_{x2}x_{11}-v_{x1}x_{21}\\ v_{x3}x_{11}-v_{x1}x_{31}\\ -a_4\end{bmatrix} \tag{5}$$

또는,

$$W\bar{x}=\bar{v} \tag{6}$$

식(5)에서 W는 3×3의 정방행렬이므로 역행렬이 존재한다. 따라서 측정점의 3차원 좌표는 다음식으로부터 계산할 수 있다.

$$\bar{x}=W^{-1}\bar{v} \tag{7}$$

3. 유한요소보정법

3.1 카메라보정

식(2)의 영상선은 일반적으로 사용되고 있는 원근변환법에 의해 결정될 수 있다. 원근변환법에서는 카메라를 핀홀형으로 단순화하여 영상선이 모든 공간상에서 직선을 유지하는 것으로 가정한다. 그러나 일반적으로 카메라에 사용되는 렌즈는 각종 수차와 가공의 불완전으로 인하여 영상면에 얻어지는 상에는 왜곡(distortion)이 존재하게 되며, 이로 인해 영상선을 공간상에서 하나의 직선으로 간주하여 측정하면 오차를 유발하게 된다. 이러한 원근법을 적용할 경우 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 비전(vision)에서 사용되는 카메라보정법 중에서 이면보정법(2-plane calibration)[8,9]을 응용한 유한요소보정법(finite element cali-bration)을 제안하여 사용하였다. 이 보정법은 먼저 Fig. 3에서와 같이 측정범위내의 전체 공간을 직육면체의 유한요소들로 분할한 후, 각 유한요소내에서 영상선이 직선을 유지하는 것으로 가정한다. 공간상의 유한요소들은 격자점들의 2차원 좌표값을 미리 알고 있는 Fig. 5와 같은 보정판을 x_3축 방향으로 Δx_3씩 평행하게 이동시키면서 구성한다. Fig. 3에서와 같이 보정면이 $x_3=k\Delta x_3$에 위치하고 (i, j)번

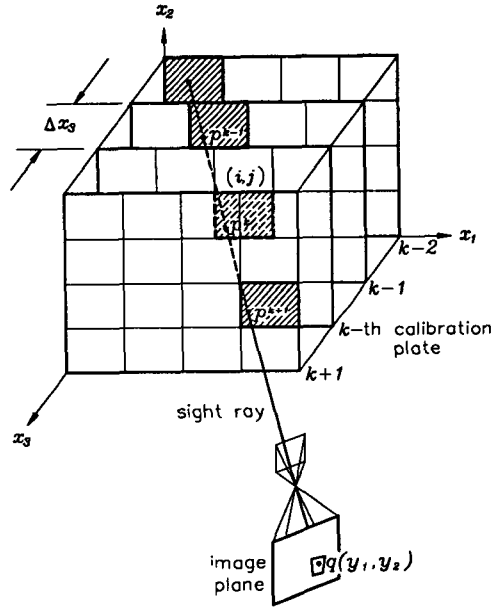


Fig. 3 Concept of the finite element calibration

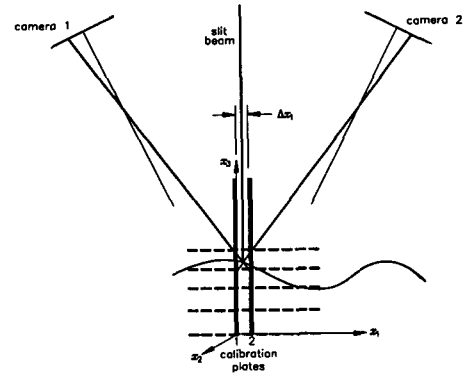


Fig. 4 Finite element calibration in single slit beam projection system

째 직사각형의 셀(cell)에 위치한 경우 격자점과 이에 대응되는 영상점의 좌표들 간의 관계는 다음의 행렬방정식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{x}=H_{ijk}\bar{y} \tag{8}$$

여기에서, 행렬 $\bar{x}$와 $\bar{y}$는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{x}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\1\end{bmatrix},\quad \bar{y}=\begin{bmatrix}y_1\\y_2\\1\end{bmatrix}$$

만약 카메라렌즈의 수차 등으로 인한 왜곡이 심한 경우에는 행렬 $\bar{y}$를 다음과 같이 y_1과 y_2로 구성되는 다차항들을 고려하여 비선형관계로 정의한다.[10]

$$\bar{y}=[y_1\ y_2\ y_1y_2\ \cdots\ 1]^T \tag{9}$$

$x_3=k\Delta y_3$에 위치한 보정면에서 (i, j)번째 셀의 격자점 m개에 식(8)의 변환관계를 적용하여 표현하면 다음과 같다.

$$[\bar{x}_1\ \bar{x}_2\ \cdots\ \bar{x}_m]=H_{ijk}[\bar{y}_1\ \bar{y}_2\ \cdots\ \bar{y}_m] \tag{10}$$

또는,

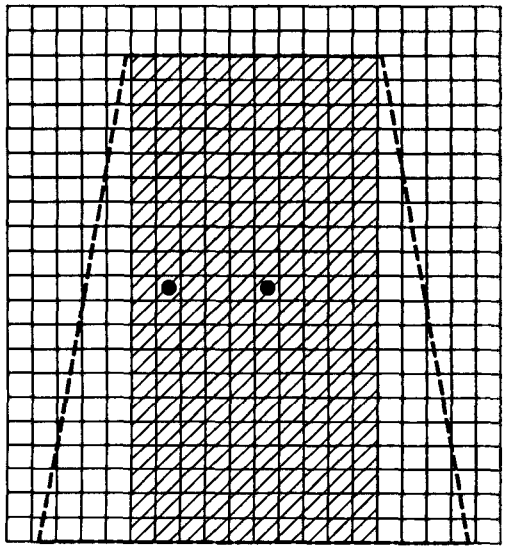
$$X=H_{ijk}Y \tag{11}$$

이때 격자점의 수 m이 충분히 크게 선정이 되면 위의 식으로부터 행렬 H_{ijk}의 해는 일반적인 최소자승법에서의 해를 구하는 방법과 동일하게 다음과 같이 구해진다.

$$H_{ijk}=XY^T[YY^T]^{-1} \tag{12}$$

식(12)로부터 구해지는 변환행렬 H_{ijk}는 $x_3=k\Delta x_3$에 위치한 보정면의 셀중에서 (i, j)에서만 유효하다. 그러므로 x_3축의 전체 측정구간에서 보정면을 $k=1\sim l$인 위치로 이동시키면서 그 면을 $p\times r$개의 셀로 나누고, 모든 셀에 대해 변환행렬 $H_{ijk}(i=1\sim p, j=1\sim r)$을 산출한다.

Fig. 2에 도시된 바와 같이 보정면을 설치할 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 x_3축에서 전 측정영역에 걸쳐 여러개의 보정면을 사용하여야 하므로 보정면을 정확한 위치에 놓을 수 있는 정밀한 기계구동시스템이 요구된다. 그러나 단일 슬릿광원을 사용하는 측정시스템에서는 Fig. 4에서와 같이 보정면을 설치하게 되면 단지 2개의 보정면만을 사용하여도 전 측정영역에 걸쳐 정확한 측정이 가능하고 보정위치는 물체를 주사하기 위해 사용되는 테이블을 이송하여 조정할 수 있다. 따라서 보정판을 $x_1=0$, $x_1=\Delta x_1$인 평면에 위치시키고 보정을 수행하게 된다. 이때 보정과정에 의해 산출되는 변환행렬 H_{ijk}에서 첨자는 $i=1\sim2$, $j=1\sim p$ 그리고 $k=1\sim r$이다. 본 연구에서 실험을 위해 사용한 보정면사이의 간격 Δx_1은 10 mm, 격자선의 두께는 1.5 mm 그리고 격자선사이의 간격은 10 mm이며, 가공공차는 ±0.01 mm이다. 그리고 보정면을 움직이지 않고 동시에 양쪽 카메라를 보정하기 위하여 두께가 10 mm인 보정판의 양면에 동일한 모양의 격자무늬를 새기고, Fig. 5에서 보는 바와 같이 기준점을 이용하여 두 무늬상의 격자점의 좌표를 일치시킨다. Fig. 5에 표시된 사다리꼴모양은 카메라의 원근효과로 인한 카메라시야를 보여주고 빗금친 부분은 실제 보정을 위해 사용된 부분으로 면적은 $100\times200(mm^2)$이다. 보정에는 격자점을 사용하며 이들 점에 상응하는 영상점은 Fig. 6(a)에서와 같은 영상에서 수평과 수직선의 교점을 산출하여 사용한다. 이 교점을 산출하기 위해 우선 Fig. 6(b)에서와 같이 수평격자선을 분리하고 이들 선에 최소자승법을 적용하여 모든 수평선의 식을 산출한다. 동일한 방식으로 수직선의 식을 산출한 후 이들로부터 교점을 얻는다.



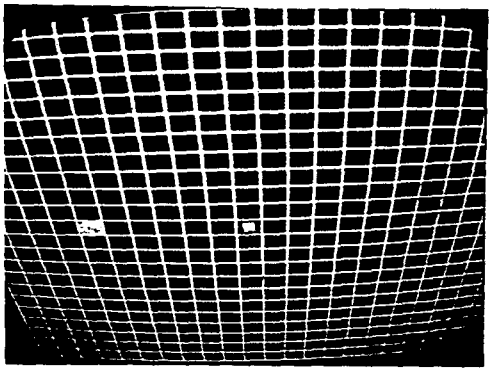
● : *Reference mark*

Fig. 5 Shape of the calibration target

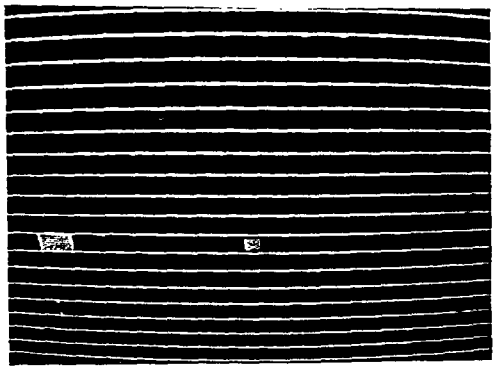
3.2 슬릿광보정

슬릿광보정을 위해 Fig. 7에서와 같이 평행하지

않은 임의의 두 평면으로 구성된 물체에 슬릿광을 투영하면 직선 L_1, L_2와 같이 광궤적이 형성된다. 이 두 직선은 슬릿광의 투영면상에 있으므로 이 두 직선의 식을 알면 슬릿광의 투영면식을 알 수 있다. 자세한 슬릿광보정방법을 기술하기 위하여



(a) Captured image



(b) Extraction of the horizontal line images

Fig. 6 Processing of a captured image of the calibration plate

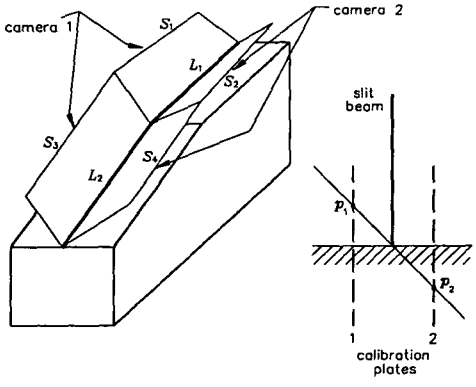


Fig. 7 Concept of the slit beam calibration

Fig. 7에서 평면 S_1, S_2, S_3 그리고 S_4의 식을 다음과 같이 정의한다.

$$A_{Si}=\bar{a}_{Si}\bar{x}=\begin{bmatrix} a_{1Si} & a_{2Si} & a_{3Si} & a_{4Si}\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1\\ x_2\\ x_3\\ 1\end{bmatrix}=0 \quad (13)$$

여기에서, $i=1\sim4$ 이다. 평면 S_1의 식을 산출하기 위해서는 최소한 이 면상에 존재하는 3점 이상이 필요하다. 이러한 점들을 얻기 위하여 Fig. 7에서 카메라1에 의해 획득되는 광궤적 L_1의 모든 영상점 q_{L1}에 대한 두 보정면상의 대응점 p_1과 p_2를 산출한다. 이들 점을 식(13)에 대입하여 최소자승법을 이용하여 S_1평면의 식을 구한다. 동일한 방식으로 평면 S_2, S_3, S_4의 식을 구한다. 그리고 평면 S_1과 S_2의 교선 L_1, 평면 S_3와 S_4의 교선 L_2의 식을 구한다. 이와 같은 과정을 통해서 산출된 교선 L_1과 L_2의 단위방향벡터를 각각

$$\tilde{u}_{L_1}=u_{x11}\vec{i}+u_{x21}\vec{j}+u_{x31}\vec{k}, \quad (14)$$

$$\tilde{u}_{L_2}=u_{x12}\vec{i}+u_{x22}\vec{j}+u_{x32}\vec{k} \quad (15)$$

라고 하고, 이 두 직선상의 한점을 각각 $P_{L_1}(x_{11}, x_{21}, x_{31})$ 그리고 $P_{L_2}(x_{12}, x_{22}, x_{32})$라고 정의하면 슬릿광투영면의 단위법선벡터는 다음과 같은 식에 의해 얻을 수 있다.

$$a_1\vec{i}+a_2\vec{j}+a_3\vec{k}=\frac{\tilde{u}_{L_1}\times\tilde{u}_{L_2}}{|\tilde{u}_{L_1}\times\tilde{u}_{L_2}|} \quad (16)$$

그리고 투영면상의 한 점 $P_{L_1}(x_{11}, x_{21}, x_{31})$을 식(4)에 대입하면 a_4는 다음식으로부터 얻을 수 있다.

$$a_4=-(a_1x_{11}+a_2x_{21}+a_3x_{31}) \quad (17)$$

4. 측정시스템 설계

슬릿광 형상측정법에서 측정시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 두 대의 카메라와 슬릿광원 그리고 이송테이블로 구성된다. 카메라를 이용하여 형상을 측정하는 방법의 문제점은 CCD소자의 화소수에 의해 측정시스템의 분해능이 제한된다는 것이다. 높이방향(x_3축)에서 분해능 R_{x3}와 측정범위 M_{x3}와의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{x3}=\frac{M_{x3}}{N_{y2}}F(x_3) \quad (18)$$

여기서,

N_{y2} : y_2축에서 CCD소자의 화소수
$F(x_3)$: 원근효과에 따른 영향

이다. 측정시스템에서 카메라와 슬릿광원사이의 기하학적 관계변수들은 측정범위와 분해능에 의해 결정된다. 측정범위가 정해졌을 때 Fig. 8에서 보는 바와 같은 기하학적 관계변수들은 유일하게 결정되지 않으므로 카메라의 시야 등으로 인한 측정한계를 최소화하는 범위내에서 측정시스템의 크기 등을 고려하는 적절한 절충을 통해 결정해야 한다. 측정범위와 기하광학변수사이의 관계는 다음과 같다.

$$M_{x3}=M_{x31}+M_{x32} \tag{19}$$

$$M_{x31}=l-d\tan(90-\theta-\alpha) \tag{20}$$

$$M_{x32}=d\tan(90-\theta+\alpha)-l \tag{21}$$

여기서, M_{x3}는 x_3축에서 측정범위, θ는 슬릿광원과 CCD 카메라의 광축사이의 각도이고 l_{y2}는 CCD 소자의 y_2축에서의 크기이다. 그리고 2α는 카메라 시야각도(field angle of the camera view)로 $2\alpha=2\tan^{-1}[l_{y2}/(2a_m)]$와 같다. a_m은 핀홀형 카메라의 초점길이로 얇은 렌즈(thin lens)이론에 의해 다음과 같이 근사적으로 구해진다.

$$a_m=\frac{sf}{s-f} \tag{22}$$

여기서, s는 카메라를 핀홀형으로 가정하였을 경우 초점과 슬릿광 투영면상에 슬릿광의 투영면과 카메라광축이 만나는 점사이의 거리로 기하학적관계에 따라 $\sqrt{(l-M_{x32})^2+d^2}$와 같이 유도되고 f는 카메라렌즈의 초점길이이다. $x_3=0$와 $x_3=M_{x3}$인 위치에서 x_2축의 측정범위를 각각 M_{x21}, M_{x22}라고 하면 전 측정영역에 걸쳐 수평방향(x_2축)의 측정범위는 다음과 같이 정의할 수 있다.

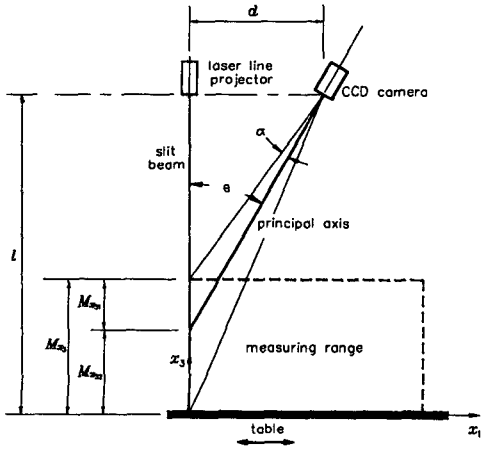


Fig. 8 Relation between the measuring ranges and the geometrical parameters of the measurement system

$$M_{x2}=\min[M_{x21}, M_{x22}] \tag{23}$$

이러한 수평방향의 측정범위는 높이방향에서의 측정범위와 카메라와 슬릿광사이의 기하광학변수가 결정되면 기하학적 관계로부터 다음과 같이 결정된다.

$$M_{x21}=\frac{l_{y1}\sqrt{l^2+d^2}}{\sqrt{a_m^2+(l_{y2}/2)^2}} \tag{24}$$

$$M_{x22}=\frac{l_{y1}\sqrt{l^2+(d-M_{x3})^2}}{\sqrt{a_m^2+(l_{y2}/2)^2}} \tag{25}$$

여기서, l_{y1}는 CCD소자의 y_1축에서의 크기이다.

본 연구에서는 다음과 같은 세부과정을 통해 측정시스템을 설계제작하였다. 측정범위와 분해능이 결정되면 측정시스템의 기하학적 조건과 광학변수들은 식(19)~(25)로부터 결정될 수 있다. 이 시스템에서는 측정범위를 $x_1\times x_2\times x_3=500\times300\times200(\text{mm}^3)$로 설정하고, 한번에 측정이 가능한 단면의 크기는 수평방향의 측정분해능을 고려하여 $x_2\times x_3=100\times200(\text{mm}^2)$으로 하였으며 x_2축에서의 측정범위 300 mm를 충족하도록 하기 위하여 측정물체의 크기에 따라 구동테이블을 x_2방향으로 100 mm씩 이동하면서 3단계까지 분할하여 측정할 수 있도록 하였다. 이와 같은 조건을 만족하는 설계변수를 결정하기 위하여 θ를 30°, 카메라렌즈의 초점길이 f는 16 mm를 선정하였다. 상용화되어 있는 카메라렌즈의 초점길이는 일반적으로 8 mm, 16 mm 그리고 25 mm등으로 규격화되어 있다. 초점길이가 길수록 원근효과에 의한 화상의 왜곡과 카메라의 사각이 작아지고 또한 초점심도가 깊어지는 장점을 갖지만 측정물체와 카메라사이의 거리가 멀어져야 하므로 측정시스템이 커지게 된다. 그러므로 초점길이는 위의 조건들을 충족하는 범위내에서 적당한 절충을 통해 결정되어야 한다. 본 연구에서는 초점길이가 16 mm인 렌즈를 사용하였다. 앞서 언급된 조건하에서 설계변수 l과 d는 Fig. 9과 같은 과정을 거쳐서 계산한다. 식(19)과 식(23)로부터 직접 l과 d를 구할 수 없으므로 l과 d를 임의의 값으로 가정하고 이를 식(19)과 (23)에 대입해서 M_{x3}와 M_{x2}가 만족될 때까지 반복수행하는 역계

산(reverse calculation)방법을 사용하여 구한다.

광원은 파장이 670 nm인 다이오드레이저(diode laser)를 사용하였고 원통렌즈(cylinderical lens)를 사용하여 평면광을 만들었으며 슬릿광의 투영사각을 줄이기 위하여 두개의 슬릿광원을 사용하였다.

5. 실험 및 고찰

앞서 기술한 방법을 이용하여 Fig. 10(a)와 같은

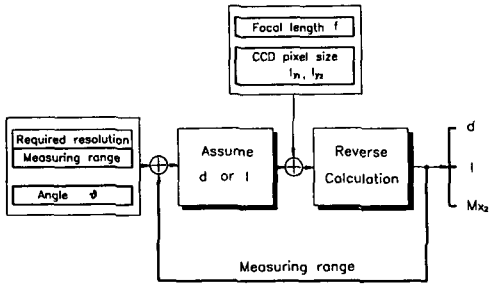
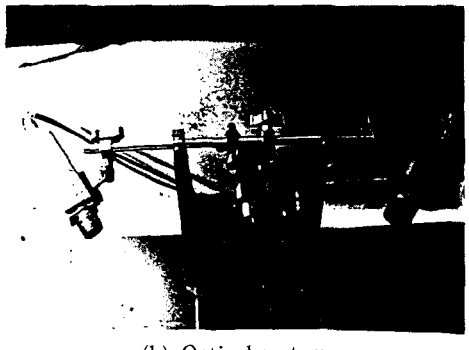


Fig. 9 Calculation process of the gemetrical parameters of the measurement system

(a) Measurement system



(b) Optical system

Fig. 10 Real view of the slit beam projection system

측정시스템을 제작하여 실험하였다. Fig. 10(b)는 측정시스템의 광학계로써 카메라와 슬릿광원을 보여준다. 여기에 사용된 부품 및 전체 시스템의 사양은 Table 1과 같고 설계데이터는 Table 2와 같다.

측정의 전 단계로써 카메라보정과 슬릿광보정이 완료되면 임의의 영상좌표에 대응하는 3차원좌표의 계산이 가능하다. 본 연구에서 측정을 위해 산출된 변환행렬은 한 카메라에 대해 2(보정면) 200개씩 총 800개이고, 슬릿광보정을 통해 얻어진 슬릿광투영면의 식은 다음과 같다.

$$0.99994x_1+0.00377x_2-0.00991x_3=447.67890 \quad (26)$$

Table 1 Measurement system specification

Operating system	IBM PC/486
Frame grabber	US512B(Union System)
CCD camera	512×512(Kuk-jae)
Slit beam source	Diode laser(670 nm)
XY Table	X : 500 mm Y : 200 mm Resolution : 0.01 mm
Measuring Range	500 mm × 300 mm × 200 mm
Accuracy in the x_1, x_2, x_3	Below ±0.2 mm

Table 2 *Designed parameters* (*unit : mm*)

Parameters	Designed value
Focal length (f)	16
CCD size($l_{y1}\times l_{y2}$)	6.4×4.8
M_{x31}	78
M_{x32}	130
M_{x3}	208
M_{x21}	104
M_{x22}	174
l	420
d	167

슬릿광 형상측정법을 이용한 세부 측정과정은 다음과 같다. 슬릿광을 측정대상에 투영한다. 이때 카메라에 의해 획득되는 슬릿광의 영상은 Fig. 11에서와 같이 한 화소가 아닌 여러 화소의 두께로 되어 있기 때문에 광궤적을 추출하는 영상처리과정이 요구된다. 기존에 사용되던 영상처리방법으로는 세선화법[11]과 가중평균법[4]이 있다. 세선화법은 영상의 개략적인 특징을 추출하기 위해 사용되는 방법으로써 선의 끊김이 없이 한 화소두께의 영상으로 만드는 영상처리기법이다. 이를 이용한 슬릿광의 궤적추출은 화소단위로 이루어지므로 분해능이 낮고, 전 화상에 대해 반복적인 영상처리를 수행해야 하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 주로 사용되어온 방법으로는 빛의 세기를 가중치로 하여 슬릿광의 중심을 찾는

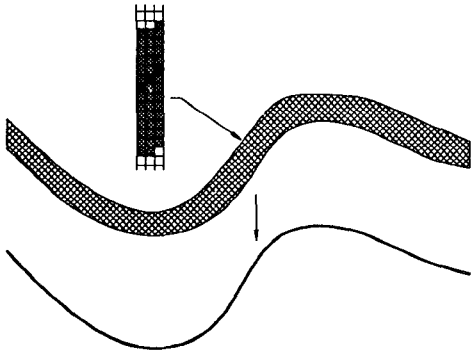


Fig. 11 A captured slit beam image with several pixels in thickness

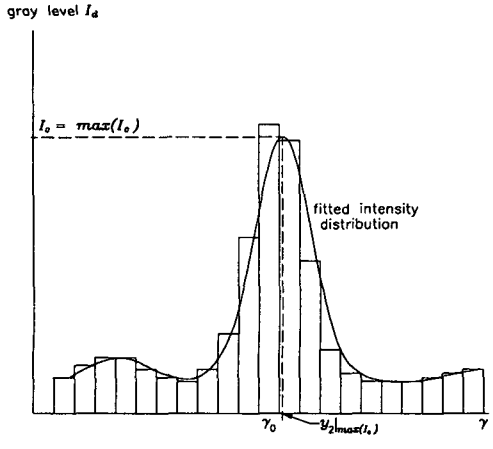
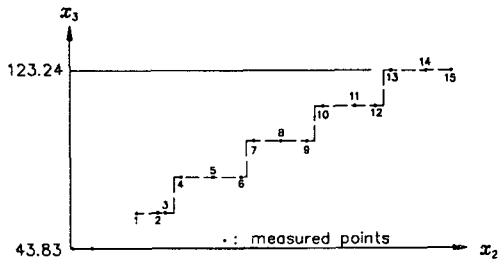
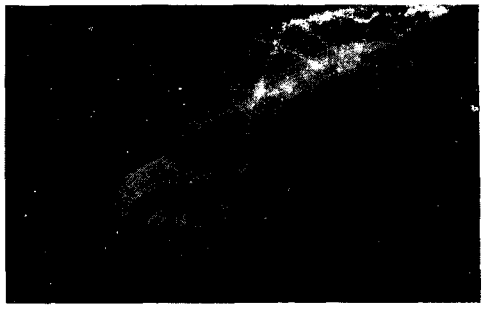


Fig. 12 Intensity distribution of a section of a slit beam image

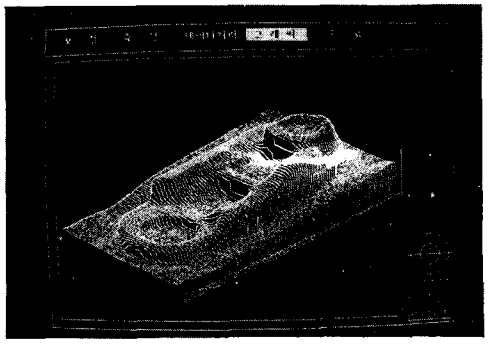


	x_2	x_3	Measured values	Reference values (CMM)	|Measured values- Reference values| Measurment errors
1	141.25	59.46	15.64	15.88	0.24
2	149.73	59.59	15.77	15.88	0.11
3	153.05	59.55	15.73	15.88	0.15
4	160.15	75.46	31.64	31.75	0.12
5	174.44	75.45	31.63	31.75	0.13
6	186.96	75.51	31.69	31.75	0.07
7	193.04	91.57	47.75	47.63	0.12
8	205.13	91.61	47.79	47.63	0.16
9	216.82	91.60	47.78	47.63	0.15
10	224.02	107.40	63.58	63.51	0.07
11	238.40	107.38	63.56	63.51	0.05
12	247.65	107.39	63.57	63.51	0.06
13	254.46	123.27	79.45	79.39	0.06
14	270.18	123.26	79.44	79.39	0.05
15	281.57	123.20	79.38	79.39	0.01

Fig. 13 Estimation of the measuring accuracy in the x_3 axis



(a) Real view of a mould



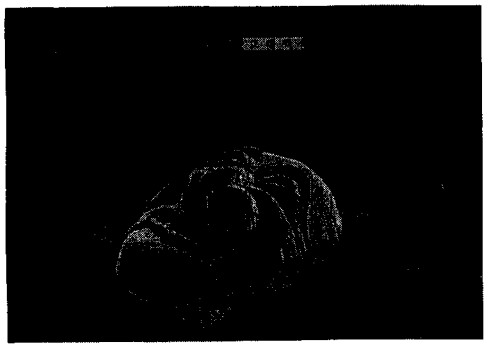
(b) Measured 3-D profile

Fig. 14 A measurement result of a real mould

가중평균법이 있다. 이 방법은 슬릿광 단면의 빛의 세기분포가 중심에 대해 대칭적인 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 가진다는 가정하에서 슬릿광 단면의 도심(centroid)을 찾는 방법이다. 이 방법은 세선화기법에 비해 분해능이 높고 영상처리 시간이 적게 소요된다. 그러나 CCD소자에 맺히는 슬릿광영상의 단면에서 빛의 세기분포는 일정한 기울기를 갖는 물체를 제외하고는 항상 비대칭이므로 가중평균법은 측정결과에 오차를 야기시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 강도곡선맞춤법을 사용하였다. 이는 Fig. 12와 같은 슬릿광 단면의 빛의 세기분포를 비대칭을 고려할 수 있는 다차항함수(polynomial function)로 가정하여 곡선맞춤(curve fitting)하고 이 곡선에서 최대값의 위치를 찾는 방법이다.

본 연구에서 설계제작된 측정시스템의 측정정확도를 평가하기 위하여 Fig. 13에서와 같이 일정한 차를 갖는 계단모양의 물체를 측정하고 삼차원 좌표측정기를 이용하여 측정한 결과와 비교하였다. 여기서 측정값은 측정된 좌표에서 바닥면의 높이 43.83 mm를 뺀 것이다. 원근효과로 인해 높이에 따라 측정정도가 다름을 알 수 있다. Fig. 14는 크기가 300×170×80(mm³)인 금형을 3 mm간격으로 측정한 결과이고, Fig. 15는 크기가 250×200×140(mm³)인 하회탈을 2 mm간격으로 측정한 결과를 보여준다. 이 물체들을 측정하는데는 약 10분 정도가 소요되었다.

(a) Real view of a mask



(b) Measured 3-D profile

Fig. 15 A measurement result of a mask

6. 결 론

본 논문에서는 전체 측정영역을 정육면체의 작은 유한요소들로 분할하여 각각의 변환관계를 구하는 유한요소보정법을 이용한 측정알고리즘을 개발하였고, 단일 슬릿광을 사용할 경우에 효율적인 카메라 보정방법과 슬릿광보정방법을 제시하였다. 또한 측정분해능 최적화를 위한 시스템의 설계방법을 제시하였으며, 실제로 측정시스템을 제작하여 측정을 수행한 결과 약 ±0.2 mm이하의 정확도를 가지고 빠른 속도의 삼차원 형상측정이 가능함을 보였다.

참고문헌

(1) Duncan J. P. and Mair., S. G. 1983, *Sculptured Surfaces in Engineering and Medicine,* Cambridge University Press.

(2) Idesawa, M. Yatagai T. and Soma, T. 1977, "Scanning Moire Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes," *Appl. Opt.,* Vol. 16, pp. 2152~2162.

(3) Yakimosky Y. and Cunningham, R. 1984, "A System for Extracting Three-Dimensional Measurement From a Stero-Pair of TV-Camera," *Computer Vision, Graphics and Image Processing,* Vol. 7, pp. 195~210.

(4) Sato, Y. Kitagawa H. and Fujita, H. 1992, "Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-ray Projections," *IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Intel.* Vol PAMI-4, pp. 641~646.

(5) Sato K. and Inokuchi, S. 1987, "Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask," *IEEE First International Conference on Computer Vision,* pp. 657~661.

(6) Tsai, R. Y. 1986, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* pp. 364~378.

(7) R. Y. Tsai, 1987, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-The Shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Jounal of Robotics and Automation* RA-3, pp. 323~344.

(8) Gremban, K. D. Thrope C. E. and Kanada, T. 1988, "Geometric Camera Calibration Using Systems of Linear Equations," *IEEE Conference,* pp. 562~567.

(9) Matins, H. A. Birk J. R. and Kelley, R. B. 1981, " Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes," *Computer Graphic and Image Processing* 17, pp. 173~180.

(10) Ghosh, S. K. 1979, *Analytical Photogrametry,* Pergamon.

(11) Gonzalez, R. C. and Wintz, P. 1987, Digital *Image Processing,* Addison Wesley.