

자유곡면의 CAD 모델링을 위한 비접촉식 삼차원 형상측정

박 현 구*, 최 이 배*, 김 명 철**, 김 승 우*

Noncontact Type Three Dimensional Profile Measurement for CAD Modeling of Sculptured Surfaces

Hyun Goo Park*, Yi Bae Choi*, Myung Cheol Kim**, Seung Woo Kim*

ABSTRACT

An optical measurement method of three dimensional surface profiles which is named the slit beam projection is suggested and practically implemented. This method is intended especially for noncontact and fast digitization of sculptured surfaces for CAD modeling and die manufacturing. Its basic principles are based on geometric optics. Detailed optical principles and an sub-pixel image processing technique to enhance the measuring resolutions are described in this study. The measuring performances of the slit beam projection are presented and discussed to demonstrate that an actual measuring accuracy of below ± 0.2 mm can be achieved over the whole measuring range(500 mm \times 300 mm \times 200 mm)

Key Words : Slit Beam Projection, Camera Calibration, Image Processing

1. 서 론

현재, 생산공학분야에서 정형화된 수식으로 표현할 수 없는 자유곡면의 3차원 표면형상에 대한 측정기술의 수요가 날로 증대되고 있는 상황이다.⁽¹⁾ 특히 금형 제작 분야에서는 기존의 제품 또는 모형을 평가/수정을 거친 후 모방절삭(copy milling)을 이용하여 제작하는 방법이 널리 사용되어 왔다. 이 제작방법은 경제적인 측면에서 매우 비효율적이고 금형에 대한 데이터베이스의 구축이 어려워 모델을 변경할 경우에 동일한 과정을 반

복해야 하는 문제점을 가지고 있다. 근래에 들어서는 금형제작동에 CAD/CAM 기술이 도입되면서 모방절삭이 가지는 문제점은 극복되었다. 그러나 기존의 제품이나 자동차 외관과 같이 미적인 관점이 중요시 되는 제품들은 가공전에 모형을 제작하여 평가/수정과정과 삼차원형상정보를 획득하여 가공 데이터를 생성하기 위하여 측정하는 과정이 요구되므로 CAD/CAM만을 독자적으로 적용할 수 없다. 따라서 모방절삭의 비효율성을 극복하고 CAD/CAM의 장점을 최대로 활용하여 고능률의 생산체계를 갖추기 위해서는 Fig. 1에 도시된 바

* 한국과학기술원 정밀공학과

** 삼성전자

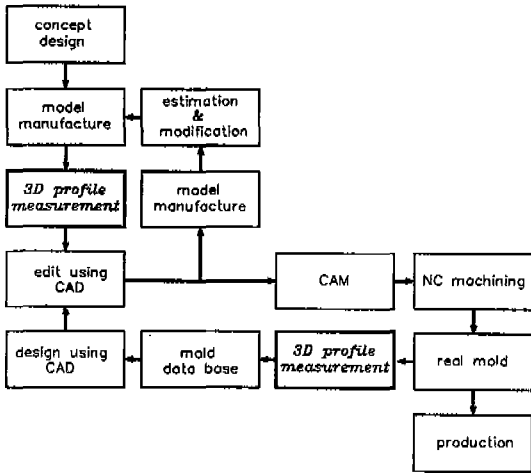


Fig. 1 High effective manufacturing system of molds

와 같이 자유곡면의 CAD 모델링을 위한 삼차원형상치수 데이터 획득, 금형의 데이터베이스 구축 그리고 가공정도를 평가할 수 있는 3차원 형상치수 측정기술이 핵심적인 역할을 담당하게 된다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 3차원 형상 치수 측정 기술은 삼차원측정기를 중심으로 접촉식 1차원 변위센서를 주사방식으로 활용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 정밀한 측정이 가능한 반면에 시간이 많이 소요된다. 따라서 본 연구에서 고속으로 3차원 자유곡면의 형상을 측정할 수 있는 슬릿광형상측정법^[2,3]에 대한 연구를 수행하였으며 분해능과 측정정확도를 향상시키기 위한 영상처리 방법을 새로이 제안하여 구현하였고, 기존의 방법과 비교/평가하였다.

2. 슬릿광형상측정법

2.1 기본원리

슬릿광형상측정법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 CCD 카메라사이의 기하광학을 이용하는 삼차원측정기술이다. 슬릿광주사법을 이용한 측정시스템은 슬릿광원과 두 대의 카메라 그리고 측정물체를 직선방향으로 이동하기 위한 구동테이블로 구성된다. 슬릿광원으로는 가우시안분포와 유사한 분포를 갖고 소형인 다이오드레이저를 사용하였으며 평면광은 원통렌즈의 조합으로 형성시켰다. 측정의 기본동작은 물체의 표면에 슬릿광을 주사하여 물체표면상에 형성된 광의 궤적을 카

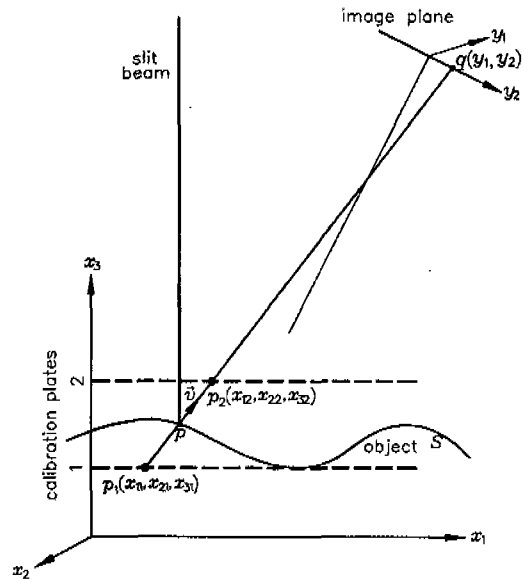


Fig. 2 Measuring principle of the slit beam projection

메라를 이용하여 획득한다. 이때의 광케적은 물체의 삼차원형상 정보를 갖게 되며 이를 주사된 슬릿광의 공간상의 위치와 더불어 영상처리 기술을 이용하여 산출하게 된다. 이러한 기본동작은 측정물체를 일정간격으로 이동하면서 전체의 표면에 대해 연속적으로 수행하므로써 물체의 삼차원형상을 재현하게 된다. 카메라를 사용하여 측정하는 방법 카메라의 시야의 한계로 인해 볼 수 없는 영역은 측정할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 따라서 측정이 불가능한 영역을 완전히 제거할 수 없지만 가능한 최소화하고 요철이 심하여 매우 복잡한 형상을 갖는 물체를 제외한 자유곡면의 형상을 측정할 수 있도록 Fig. 2에서 보는 바와 같이 두 대의 카메라를 사용하여 서로 보완토록 하였다. 또한 Fig. 2는 세부 측정원리를 보여준다. 측정물체를 기준으로 그림에서와 같이 x_1, x_2, x_3 -직교좌표계를 설정하여 측정물체상의 임의의 점 $p(x_1, x_2, x_3)$ 로 표현하면, 측정하고자 하는 물체표면 S 의 3차원형상은 물체상에 위치한 점들의 집합으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S = \{p(x_1, x_2, x_3) \mid p(x_1, x_2, x_3) \in S\} \quad (1)$$

또한, 점 $q(y_1, y_2)$ 는 점 $p(x_1, x_2, x_3)$ 에 대응되는 영상점으로 카메라 영상면에 설정된 2차원 y_1, y_2 -직교좌

표계로 정의한다. 측정점은 슬릿광 투영면과 영상선이 공간상에서 만나는 점이다. 슬릿광의 투영면은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A = \bar{a} \bar{x} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

만일 영상점 $q(y_1, y_2)$ 에 대한 영상선의 단위 벡터가 \bar{v} 이고, 영상선상의 한 점 $p_1(x_{11}, x_{21}, x_{31})$ 이라면 영상선은 다음과 같은 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} v_{x_2} & -v_{x_1} & 0 \\ v_{x_3} & 0 & -v_{x_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{x_2} x_{11} - v_{x_1} x_{21} \\ v_{x_3} x_{11} - v_{x_1} x_{31} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\bar{v} = v_{x_1} \bar{i} + v_{x_2} \bar{j} + v_{x_3} \bar{k}$ 는 영상선의 단위 방향 벡터, $p_1(x_{11}, x_{21}, x_{31})$ 은 영상선상의 한 점으로 보정면 1상의 점이다. 식 (3)과 식 (2)를 병렬하여 하나의 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{x_2} & -v_{x_1} & 0 & 0 \\ v_{x_3} & 0 & -v_{x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{x_2} x_{11} - v_{x_1} x_{21} \\ v_{x_3} x_{11} - v_{x_1} x_{31} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

또는

$$W \bar{x} = \bar{v} \quad (5)$$

여기서 $p_1(x_{11}, x_{21}, x_{31})$ 은 영상점에 대응되는 보정면 1상의 점이다. 식 (5)에서 W 는 4×4 의 정방행렬이므로 역행렬이 존재한다. 따라서 측정점의 삼차원좌표는 다음식에 의해서 산출된다.

$$\bar{x} = W^{-1} \bar{v} \quad (6)$$

2.2 카메라 보정

비전(machine vision)에서는 카메라보정(camera calibration)^[6,7]을 카메라의 내적 변수(초점길이, 그리고 화소사이의 거리 등)와 공간좌표에 대한 카메라의 좌표계사이의 관계를 추출하는 과정으로 정의한다. 이러한 카메라보정을 슬릿광형상측정법에 도입하기 위하여 시도된 기존의 연구방법에서는 카메라를 핀홀형으로

가정하고 원근변환법(perspective transformation)^[8]을 적용하여 측정점의 3차원좌표를 결정하였다. 그러나 일반적으로 카메라에 사용되는 렌즈는 각종 수차(aberration) 때문에 영상면에 얻어지는 상에는 굴곡(distortion)이 존재하게 되며, 이로 인해 영상선이 공간상에서 하나의 직선으로 간주되면 측정정확도에 오차를 유발하게 된다. 이러한 원근법 적용의 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 비전(vision)에서 사용되는 카메라보정법중에서 기존의 이면보정법^[6,7]을 확장하여 슬릿광형상측정법의 보정방법으로 개선한 유한요소보정법(finite element calibration)을 사용하였다. 먼저 Fig. 3에서와 같이 측정범위내의 전체 공간을 직육면체의 유한요소들로 분할한 후, 각 유한요소내에서 영상선은 직선을 유지하는 것으로 가정한다. 공간상의 유한요소들의 실제적인 구성은 격자점들의 2차원 좌표값(x_1, x_2)을 미리 알고 있는 사각형격자로 구성된 평면 보정면(calibration plate)을 x_3 축 방향으로 등 간격으로 Δx_3 씩 평행 이동키면서 구성한다. 이때 보정면이 $x_3 = k \Delta x_3$ 에 위치하고, (i, j) 번째 직사각형의 셀(cell)에 위치한 경우 셀평면의 격자점(\bar{x})과 이에 대응되는 영상점(\bar{y})의 좌표들간의 관계는 다음의 행렬방정식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{x} = H_{ijk} \bar{y} \quad (7)$$

만약 카메라의 굴곡이 심한 경우에는 식 (7)의 행렬 y 를 다음과 같이 y_1 과 y_2 로 구성되는 다차항들을 추가

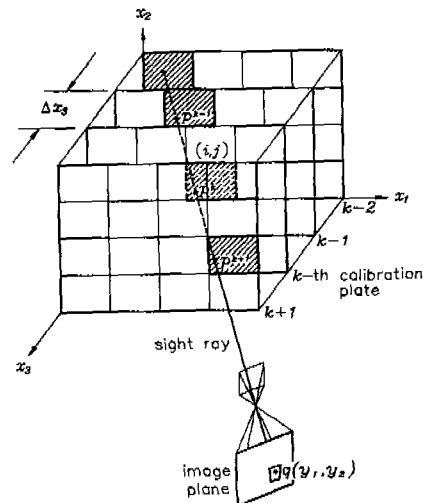


Fig. 3 Finite element calibration

하여 정의할 수 있다.^[8]

$$\bar{y} = [y_1 \ y_2 \ y_1 y_2 \ \dots \ 1] \quad (8)$$

본 연구에서는 유한요소로 보정면을 분할하고 식 (8)에서 $y_1 y_2$ 항까지 고려하였다. H_{ijk} 를 구함에 있어 식 (7)의 변환관계를 $x_3 = k \Delta x_3$ 에 위치한 보정면상의 셀(i, j)의 m 개의 격자점에 대해 적용하면 이의 결과는 다음과 같이 확장된 행렬식으로 얻어진다.

$$[\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \dots \ \bar{x}_m] = H_{ijk} [\bar{y}_1 \ \bar{y}_2 \ \dots \ \bar{y}_m] \quad (9)$$

식 (9)는 다음과 같은 행렬식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$X = H_{ijk} Y \quad (10)$$

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

$$H_{ijk} = XY^T [YY^T]^{-1} \quad (11)$$

식 (11)로부터 구해지는 변환행렬 H_{ijk} 는 $x_3 = k \Delta x_3$ 에 위치한 보정면의 셀중에서(i, j)에서만 유효하다. 그러므로 x_3 축의 전체 측정구간에서 보정면을 $k=1 \sim l$ 인 위치로 이동시키면서 그 면상의 모든 보정셀에 대해 변환행렬 $H_{ijk}(i=1 \sim p; j=1 \sim \gamma)$ 을 산출한다.

2.3 슬릿과 보정

측정을 위해 물체상에 투사되는 슬릿광들은 공간상의 측정영역내에서 평면을 형성하며 슬릿광의 투영면의 식은 다음과 같이 측정좌표계에 대해 정의될 수 있다.

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ 1] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

슬릿광의 투영면은 $x_2 x_3$ 평면과 거의 평행($a_1 \geq 0.99$)이 되도록 설치하고 a_1 을 1로 가정하면 식 (12)는 다음과 같은 선형식으로 표현이 가능하다.

$$-x_1 = [x_2 \ x_3 \ 1] \begin{bmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

슬릿광의 투영면에 존재하는 m 개의 3차원 좌표값들을 이용하여 위의 식을 확장하면 다음과 같은 행렬식으로 표기할 수 있다.

$$- \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{21} & x_{31} & 1 \\ x_{22} & x_{32} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2m} & x_{3m} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

또는,

$$X_1 = MC \quad (15)$$

식 (15)의 해는 최소자승법을 이용하면 최종적으로 다음과 같이 유도된다.

$$C = [M^T M]^{-1} M^T X_1 \quad (16)$$

실제로 슬릿광투영면의 식을 산출하기 위해서는 슬릿광투영면에 존재하는 m 개 점들의 3차원좌표 측정이 요구된다. 본 연구에서는 카메라보정에서 사용되는 보정면에 슬릿광을 투영하였을 경우 형성되는 광케적상의 점들의 3차원좌표를 측정하여 식 (15)의 해를 구하는데 사용하였다. 이들 점들을 측정하는 세부과정은 다음과 같다. $x_3 = k \Delta x_3$ 에 위치한 보정면에 슬릿광을 주사하여 광케적영상을 획득한다. 이 영상에서 일정한 농도값(gray value) 이상을 가진 화소로부터 변환행렬 H_{ijk} 를 이용하여 광케적상의 점들의 3차원좌표를 측정한다. 이와 같이 산출된 좌표들은 슬릿광과 보정면사이에 형성되는 광케적상의 좌표로 직선을 형성하기 때문에 이들 측정점만으로는 슬릿광의 평면방정식을 산출할 수 없다. 따라서 $x_3 \neq k \Delta x_3$ 인 또 다른 위치에 놓인 보정면에 슬릿광을 투영하고 앞의 과정을 반복하여 3차원좌표를 측정한다. 위의 과정을 통해 측정된 두 보정면상의 좌표들을 식 (16)에 대입하여 슬릿광의 평면방정식의 계수를 산출하였다.

3. 슬릿광영상의 처리

물체의 형상에 따라 변형된 슬릿광영상의 한 단면은 여러개의 화소로 구성되므로 대표적인 특성을 추출하기 위하여 반드시 영상처리 과정이 필요하게 된다. 기존의 영상처리 방법으로는 슬릿광영상을 2진화한 후 세선화 기술을 이용하여 중심선을 찾는 방법이 있다. 세선화기술(thinning technique)^[9]은 영상처리에서 영상의

대표적인 특성을 추출하기 위하여 영상의 굵김이 없이 중심을 찾는 방법이다. 본 연구에서 제안한 방법과 비교하기 위한 세선화방법으로 Zhay와 Sue가 제안한 방법을 사용하였다. 이 세선화방법은 두 단계로 나누어 처리한다. 세선화를 위한 3×3 마스크를 다음과 같이 정의한다.

q_9	q_2	q_5
q_8	q_1	q_4
q_7	q_6	q_3

세선화과정은 다음과 같다. 첫번째 단계로 아래와 같은 조건을 만족하는 화소 q_1 의 값을 0으로 설정한다.

- (a) $2 \leq D(q_1) \leq 6$
- (b) $S(q_1) = 1$ (17)
- (c) $q_2 \times q_4 \times q_6 = 0$
- (d) $q_4 \times q_6 \times q_8 = 0$

여기서, $D(q_1)$ 는 q_1 화소 주위의 값이 0이 아닌 화소 수이고, $S(q_1)$ 는 q_2, q_3, \dots, q_9 의 정해진 순서로 2진영상의 경우 0→1로 변화하는 수이다. 두번째 단계에서는 위의 조건중에서 (a)와 (b)는 동일하고 (c)와 (d)의 조건이 다음과 같이 변화된다.

- (c) $q_2 \times q_4 \times q_8 = 0$ (18)
- (d) $q_2 \times q_6 \times q_8 = 0$

이와 같은 두 과정을 영상의 전체에 걸쳐 수행하고 영상전체에서 농도값이 1인 화소수가 변하지 않을 때까지 위의 과정을 반복하여 수행한다. 따라서 영상처리하는 시간이 많이 소요되는 문제점을 가지고 있다.

두번째 방법으로는 슬릿광 영상의 한 단면에서 화소의 농도치(gray level)를 가중치(weighting factor)로 하여 다음과 같이 영상의 도심을 찾는 가중치법이 있다.

$$y_{2c}(y_1) = \frac{\sum y_2 I_d(y_1, y_2)}{\sum I_d(y_1, y_2)} \quad (19)$$

여기서, $I_d(y_1, y_2)$ 는 영상좌표 (y_1, y_2) 에 위치한 CCD센서에 의해 샘플링된 디지털 농도값(gray level)

이다. 그러나 이 두 방법들은 측정분해능이 영상획득장치인 카메라의 CCD소자의 한 화소의 크기에 제한을 받는다. 그리고 입사되는 슬릿광의 중심의 영상점과 변형된 슬릿광의 영상의 도심은 일정한 기울기는 가지는 측정물체를 제외하고는 일치하지 않으므로 도심(centroid)을 찾는 방법은 측정결과에 왜곡을 주게 된다. 이러한 왜곡은 슬릿광영상의 경계(edge)나 빛의 강도가 최대인 영상점을 이용하므로써 극복이 가능하다. 그러나 경계를 이용하는 방법은 동일 형상을 갖는 측정물체에 대해서 표면상태에 따라 반사도가 다르고 보정에 사용되는 물체와도 반사도가 다르므로 측정되는 형상이 왜곡되는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 슬릿광의 광궤적영상의 가장 밝은 위치를 서브픽셀(sub-pixel)로 찾는 방법을 제안하고, 실제로 영상을 처리하는 알고리즘을 개발하였다. 슬릿광영상의 획득센서인 CCD는 여러 개의 화소로 구성되어 있고, 한 화소의 출력은 공간상에 대응하는 영역의 평균강도를 양자화(quantization)한 값이다. Fig. 4는 CCD카메라에 의해 획득되는 슬릿광영상의 한 단면의 농도분포를 보여준다. 슬릿광을 미소하게 이동시킬 경우 CCD소자의 한 화소단위로 보면 가장 밝은 화소의 위치는 변하지 않더라도 인접한 화소들에 입사되는 빛의 밝기는 변하게 된다. 따라서 이러한 효과를 이용하므로써 분해능을 향상시키기 위하여 슬릿광영상의 단면의 빛의 밝기분포를 임의의 다차항함수(polynomial

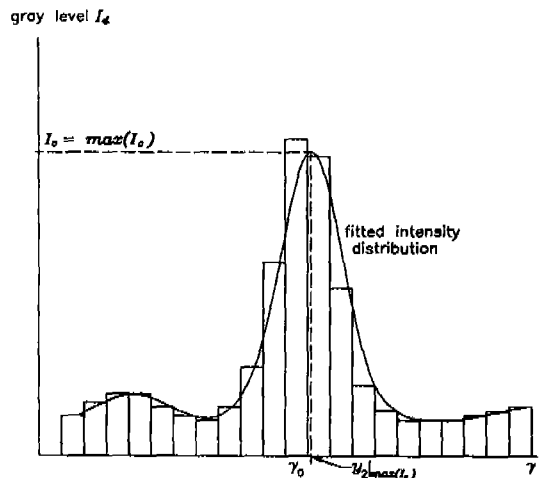


Fig. 4 Fitting a discrete intensity distribution into a polynomial function

function)로 가정하고 곡선맞춤을 한 후 가장 밝은 영상좌표를 추출한다.

$$I_c(y_2) = \sum_{i=0}^t b_i y_2^i \quad (20)$$

여기서, t 와 b_i 는 각각 강도분포곡선식의 차수와 계수이다. 그리고 Fig. 4에 도시된 바와 같이 슬릿광영상의 단면을 곡선맞춤(curve fitting)하여 가장 밝은 위치 $y_2 |_{\max(I_c)}$ 를 다음식을 만족하는 해를 서브픽셀(sub-pixel) 단위로 찾을 수 있다.

$$I'_c(y_2) = \frac{\partial I_c(y_2)}{\partial y_2} = \frac{\partial}{\partial y_2} \left[\sum_{i=0}^t b_i (y_2)^i \right] = 0 \quad (21)$$

식 (20)에서 계수 $b_i (i=0, 1, \dots, t)$ 는 최소자승법을 이용하여 구하고, $I_c(y_2)$ 가 최대가 되는 좌표는 식 (21)를 만족하며 이 식의 해는 수치해법을 이용하여 산출한다. 본 연구에서는 측정시스템의 슬릿광원으로 다이오드레이저(diode laser)가 사용되었다. 이 다이오드레이저의 출력은 단일모드 TEM₀₀인 He-Ne레이저와 달리 가장 낮은 몇개 차수의 전자파의 이동모드(transverse mode)로 구성되므로 다이오드레이저에서 출력되는 빛의 단면의 강도분포는 기체레이저(gas laser)의 TEM₀₀와 유사한 가우시안(pseudo-Gaussian)분포^[10]를 갖는다. 따라서 식 (20)과 같이 임의의 다차항함수로 가정이 가능하다. 임의의 다차항 함수로 가정한 이유는 측정물체에 입사되는 광원의 강도분포가 대칭이더라도 카메라에 의해서 획득되는 슬릿광영상의 한 단면에서의 빛의 강도분포는 대칭분포를 가지지 않는 경우가 존재하기 때문이다.

슬릿광영상의 강도분포식이 식 (20)과 같이 가정되었을 경우 계수 b_i 를 구하기 위해서는 최소한 $t+1$ 화소의 농도값이 필요하다. 이들 화소를 제외한 나머지 화소들은 배경영상이므로 슬릿광단면의 강도분포곡선을 예측하는데 고려하지 않아야 한다. 따라서 슬릿광의 영상만을 고려하기 위하여 각 열에서 강도가 가장 밝은 화소 γ_0 를 찾고, 이 화소를 중심으로 상하로 최소 $(t+1)/2$ 화소에서의 강도를 고려하여 밝기분포곡선의 계수를 구한다. 만일 고려되는 화소의 수가 $m+1$ 개일 경우에 식 (21)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = BT \quad (22)$$

여기서,

$$I = [I_d(\rho_0, \gamma_0 - m/2) \dots I_d(\rho_0, \gamma_0 + m/2)]$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \gamma_0 - m/2 & \gamma_0 - m/2 + 1 & \dots & \gamma_0 + m/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\gamma_0 - m/2)^t & (\gamma_0 - m/2 + 1)^t & \dots & (\gamma_0 + m/2)^t \end{bmatrix}$$

$$B = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_t]$$

(ρ_0, γ_0) : $y_1 = \rho_0$ 의 슬릿광의 광학적단면에서 가장 밝은 화소로 ρy 좌표계의 원점이다. 식 (22)를 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 해를 구한다.

$$B = IT^T [TT^T]^{-1} \quad (23)$$

식 (23)에 의해서 빛의 강도분포곡선의 계수들이 결정되면 식 (21)의 해는 수치해법중에서 뉴턴-랩슨법을 이용하여 구한다. 이때 해를 빠르고 정확하게 구하기 위하여 초기값은 γ_0 로 설정한다. 모든 열(column)에 대해 식 (23)의 연산과정을 거칠 경우 대번 TT^T 의 역행렬을 구해야 하므로 연산시간이 많이 소요되는 문제점을 갖고 있다. 따라서 이러한 연산소요시간을 줄이기 위하여 Fig. 5에서 ρy 좌표계에 대해 곡선맞춤을 하면 행렬 T 는 다음과 같이 상수행렬이 된다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ -m/2 & -m/2 + 1 & \dots & m/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (-m/2)^t & (-m/2 + 1)^t & \dots & (m/2)^t \end{bmatrix} \quad (24)$$

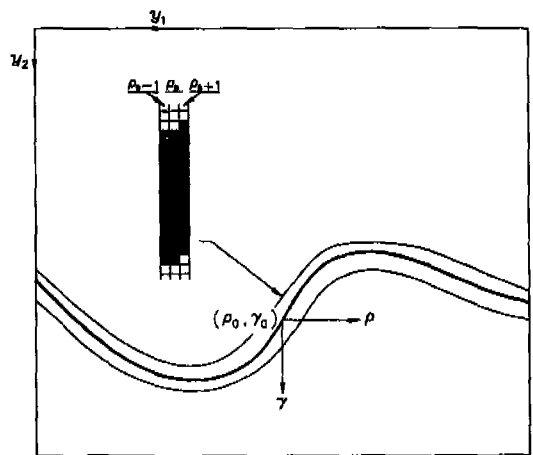


Fig. 5 Coordinate systems of image plane for processing of a slit beam image

따라서 $T^m[TT^m]^n$ 은 상수 행렬이므로 측정을 시작할 때 한번만 계산하면 되므로 연산시간을 줄일 수 있다. 이 경우 뉴턴-랩슨법을 적용하여 해를 구하기 위해 초기값은 0으로 설정하고, 가장 밝은 위치의 좌표 $y_2 |_{\max(I_0)}$ 는 다음과 같이 식을 만족하는 해이다.

$$I'_c(y_2 - \gamma_0) = \frac{\partial I_c(y_2 - \gamma_0)}{\partial (y_2 - \gamma_0)}$$

$$= \frac{\partial}{\partial (y_2 - \gamma_0)} \left[\sum_{i=0}^L b_i (y_2 - \gamma_0)^i \right] = 0 \quad (25)$$

4. 실험 및 토의

본 논문에서 제안된 영상처리방법을 실제로 구현하였고 고 실험을 통해 기존의 방법과 비교하였다. 영상처리방법을 개선하므로써 얻어지는 분해능의 향상정도를 평가

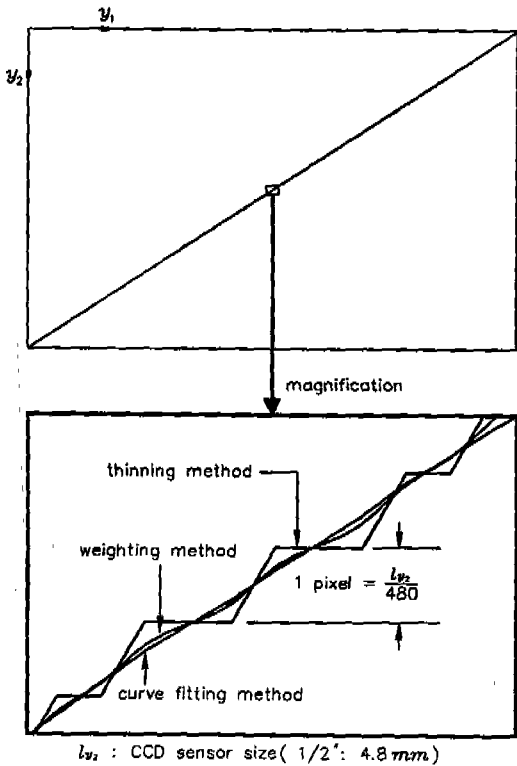


Fig. 6 Comparison of image processing results for a slanted plane

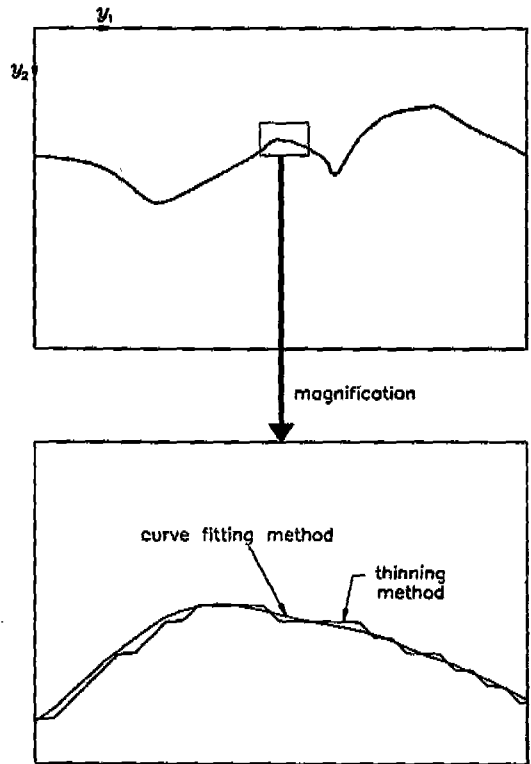


Fig. 7 Comparison of image processing results for a free-formed surface

하기 위하여 일정한 기울기를 갖는 평면에 슬릿광을 투영하여 얻은 광학적영상을 앞서 제시한 방법들을 이용하여 처리하였다. 영상처리 결과는 Fig. 6에 도시된 바와 같다. 임의의 부분을 확대하여 보면 세선화기법을 이

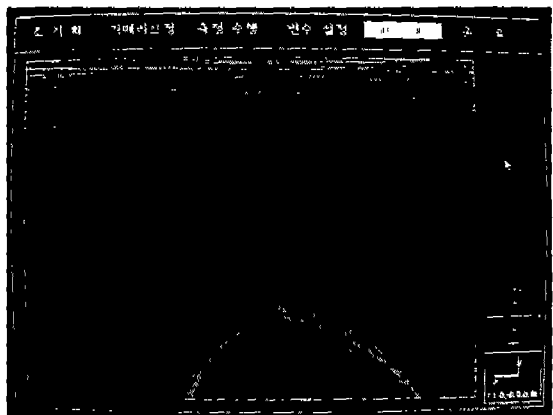


Fig. 8 Image processing result by using thinning technique

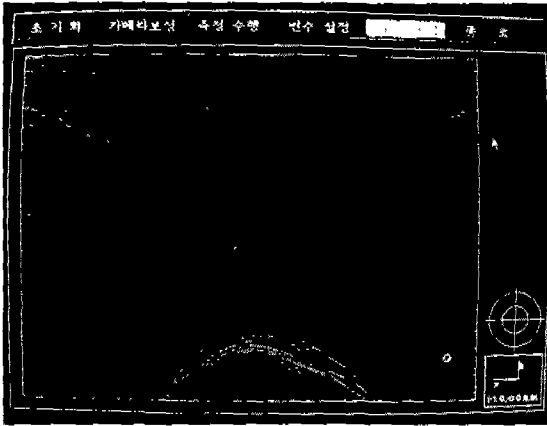
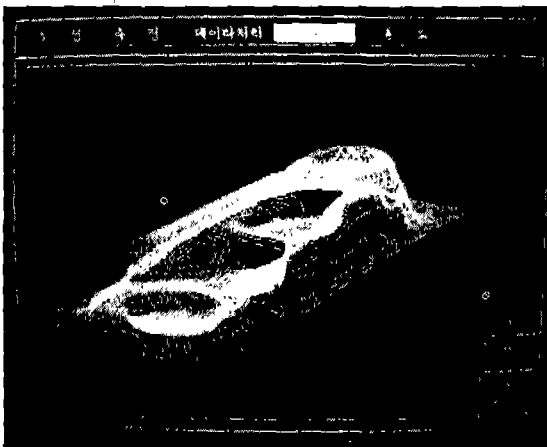


Fig. 9 Image processing result by using curve fitting method



(a) Object



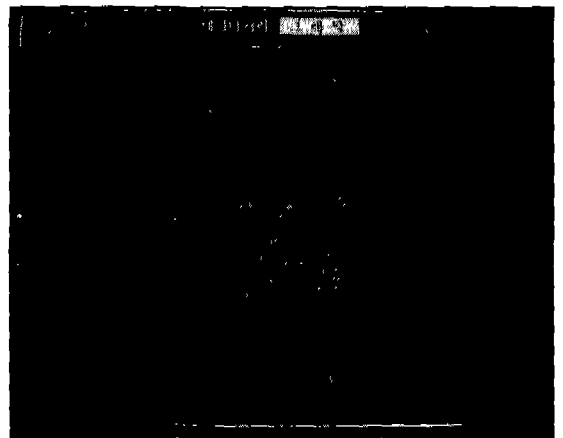
(b) Reconstructed 3-D profile

Fig. 10 An exemplary measurement result

용할 경우 일정한 기울기를 갖는 표면을 계단모양으로 측정이 된다. 반면에 가중치법을 사용할 경우는 영상처리 분해능이 세선화기법을 사용할 경우 보다 향상되지만 앞서 언급한 바와 같이 형상에 따라 측정결과에 왜곡을 주게 된다. 본 연구에서 제안한 방법을 사용할 경우에는 Fig. 6에서와 같이 분해능이 매우 향상되며 왜곡현상의 방지가 가능하다. Fig. 7은 임의의 자유곡면 형상을 갖는 물체에 투영하여 얻은 영상을 처리한 결과를 보여준다. Fig. 8과 Fig. 9는 영상처리 알고리즘을 평가하기 위하여 동일한 물체를 기존의 영상처리 방법과 곡선맞춤법을 이용하여 얻어진 3차원형상을 그래픽기법으로 구성한 것이다. Fig. 8은 영상처리기법에서



(a) Object



(b) Shaded 3-D profile

Fig. 11 A surface profile shaded by 3-D graphic technique

세션화기술을 이용하여 하회탈을 측정하여 일부분을 확대함 그림이다. Fig. 9는 곡선맞춤법을 사용하여 영상을 처리한 결과로 후자를 사용할 경우에 영상처리결과 매우 향상됨을 알 수 있다. 슬릿광 평면내에 측정높이 200 mm에 대해 화소단위로 측정할 경우 평균분해능 R_{avg} 는 다음식에 의해 계산이 가능하다.

$$R_{avg} = \frac{200}{N_{y2}} \quad (26)$$

여기서, N_{y2} 는 영상면의 y_2 축에서 CCD소자의 화소수이다. 본 연구에서 사용한 카메라의 화소수는 480개 이므로 평균분해능은 0.42 mm 이지만 카메라와 공간상의 좌표사이에는 원근효과로 인해 측정높이에 따라 분해능을 변하게 된다. 전 측정영역에 걸쳐 근사적으로 계산한 결과 분해능은 0.2 mm ~ 0.7 mm의 범위를 갖는다. 그러나 영상처리방법을 개선하므로써 Table 1에서와 같이 삼차원측정기를 사용한 측정결과를 기준값으로 하였을 경우 측정정확도가 ± 0.2 mm 이하로 향상되었다. Fig. 10은 슬릿광형상측정법에 이용하여 실제로 사용되고 있는 금형의 3차원 형상을 측정한 결과를 보여준다. Fig. 11은 포대화상의 3차원형상을 측정한 후 묘영법(shading technique)를 이용하여 그래픽으로

표현한 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 미지의 3차원 자유곡면형상을 측정할 CAD 모델링에 사용하기 위한 Z-맵 데이터(z-map data)를 고속으로 얻을 수 있는 비접촉식 3차원형상 측정법인 슬릿광형상측정법을 개발하였다. 세부적으로는 슬릿광형상측정법에서 응용이 용이한 형상재현 알고리즘과 측정분해능을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였으며 이 방법의 타당성을 이론적으로 고찰하였다. 이 영상처리 방법을 실제로 구현하여 기존방법과 비교한 결과 측정정확도가 향상됨을 알 수 있었다. 결론적으로 3차원 자유곡면의 모델링을 위한 형상측정에 슬릿광형상측정법이 매우 효율적이며 영상처리방법과 형상재현 알고리즘의 개선으로 인해 측정정확도가 매우 향상될 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. J.P. Duncan and S. G. Mair, "Sculptured surfaces in engineering and medicine", Cambridge University Press, 1983.
2. Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita, "Shape measurement of curved objects using multiple slit-ray projections", IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Inte. Vol. PAMI-4, pp.641~646, 1992.
3. K. Sato and S. Inokuchi, "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask", IEEE First International Conference on Computer Vision, pp.657~661, 1987.
4. R. Y. Tsai "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision", Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.364~378, 1986.
5. R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses", IEEE

Table 1 Estimation of Measuring Accuracy

	x_1	x_2	측정값	기준값 (CMM)	기준값 - 측정값 측정오차
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

- Journal of Robotics and Automation RA-3, pp.323~344, 1987.
6. K. D. Gremban, C. E. Thrope and T. Kanada, "Geometric camera calibration using systems of linear equations", IEEE Conference, pp.562~567, 1988.
 7. H. A. Matins, J. R. Birk and R. B. Kelley, "Camera models based on data from two calibration planes", Computer Graphic and Image Processing 17, pp.173~180, 1981.
 8. S. K. Ghosh, "Analytical Photogrametry", Pergamon, 1979.
 9. C. Gonzalez and P. Wintz, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1987.
 10. J. A. Melles, "Optics Guide 5", Melles Griot, 1990.