

〈論 文〉

슬릿광 주사방법에 의한 자유곡면의 삼차원형상 측정

박현구* · 김승우* · 박준호**

(1992년 6월 23일 접수)

3-Dimensional Profile Measurement of Free-Formed Surfaces by Slit Beam Scanning Topography

Hyun-Goo Park, Seung-Woo Kim and Juneho Park

Key Words : 3-Dimensional Profile Measurement (삼차원형상 측정), Computer Vision (컴퓨터 비전), Slit Beam Scanning (슬릿광 주사방법), Optical Triangulation (광삼각법), Inspection Automation (검사자동화)

Abstract

An optical method of slit beam scanning topography is presented for the 3-dimensional profile measurement of free-formed surfaces. A slit beam of laser is projected in a scanning mode and its illuminated trajectory on the object is captured by using a CCD camera. The 3-dimensional coordinates of the trajectory is then computed by using the given geometry between the slit beam and the camera, so that the whole surface profile of the object can be obtained in a successive manner. Detailed optical principles are described with special emphasis to lateral are discussed to demonstrate the measuring performances of the slit beam scanning topography proposed in this study.

1. 서 론

삼차원형상 측정은 많은 공학분야에서 요구되고 있다.⁽¹⁾ 이의 대표적인 예로는 복잡한 형상을 갖는 금형의 수치제어가공을 위해 요구되는 모델(mock-up)로부터 자유곡면(free-formed surfaces)의 형상측정을 들 수 있다. 현재 공학적으로 사용 가능한 대표적인 삼차원형상 측정기술은 삼차원 좌표측정기(coordinate measuring machine)를 이용하는 방법이다. 이는 접촉식 프로브를 사용하여 물체표면상을 점들의 삼차원 좌표값을 측정한다.⁽²⁾ 그러나 이 방법은 프로브와 물체간의 접촉을 유도해야 하는 이유로 많은 점들을 대상으로 측정에 장

시간이 소요되는 단점을 갖고 있다. 이러한 이유로 삼차원형상을 고속으로 측정할 수 있는 광삼각법에 의한 비접촉 프로브의 개발⁽³⁾과 스테레오비전 기술⁽⁴⁾ 및 모아레토포그래피^(5,6)를 이용한 측정방법들이 널리 연구되고 있다.

본 논문에서는 삼차원형상 측정의 슬릿광 주사방법(slit beam scanning topography)의 형상측정에 응용에 대해 기술한다. 이는 광학적인 방법으로 레이저 평면광을 물체에 주사하여 얻어지는 변형된 광케적으로부터 광삼각법(optical triangulation)과 컴퓨터비전 기술을 응용하여 삼차원형상을 측정한다. 기존의 방법들과 비교하여 슬릿광 주사방법은 고속의 삼차원측정이 가능하여 검사자동화에 용이하게 적용될 수 있는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 슬릿광 주사방법에 대한 기본원리를 유도하며, 이를 구현할 수 있는 측정시스템의 설계와 실제 측

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 대성산업(주) 중앙연구소

정예를 통해 본 방법이 갖는 장단점에 관하여 검토한다.

2. 측정원리

슬릿광 주사방법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 컴퓨터비전을 이용한 광삼각법에 의한 삼차원 측정기술이다. 이를 구현하기 위한 측정시스템은 Fig. 1에서와 같이 하나의 평면 슬릿광원과 카메라 그리고 측정물체를 직선방향으로 이송하기 위한 구동테이블로 구성된다. 측정의 기본동작은 물체의 표면에 슬릿광을 주사하여 물체표면상에 형성된 광의 궤적을 카메라를 이용하여 포착한다. 이때의 광케이는 물체의 삼차원형상 정보를 갖게 되며 이를 주사된 슬릿광 공간상의 위치와 더불어 영상처리 기술을 이용하여 추출하게 된다. 이러한 기본동작을 측정물체를 일정 간격씩 이송하면서 전체의 표면에 대해 연속적으로 수행함으로써 물체의 삼차

원형상을 얻게 된다.

Fig. 2는 슬릿광 주사방법의 세부 측정원리를 보여준다. 수직적 유도를 위해 그림에서와 같이 두 개의 독립적인 직교좌표계가 요구된다. $x y z$ 좌표계는 물체의 삼차원형상을 기술하기 위한 물체좌표계(object coordinate)이며, $x' y' z'$ 좌표계는 카메라의 영상면상에 위치한 영상좌표계(image coordinate)이다. 이들 두 좌표계에서 z 와 z' 축은 카메라렌즈의 기준광축(principal axis)과 일치되며, s 와 s' 은 각각 기준물체거리(principal object distance)와 기준영상거리(principal image distance)를 의미한다.

Fig. 2에서와 같이 물체상의 점 $P(x, y, z)$ 가 슬릿광에 의해 조명되어 카메라에 포착될 때, 이의 영상점 $P(x', y')$ 는 다음과 같은 행렬식으로 표현될 수 있다. 즉

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = T_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 T_c 는 2×3 변환행렬로 카메라의 렌즈와 물체간의 기하학적 관계에 의해 결정된다. 핀홀(pin-hole) 형태의 카메라인 경우 T_c 는 Fig. 2에서와 같이 간단히 얻어질 수 있다.

$$T_c = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

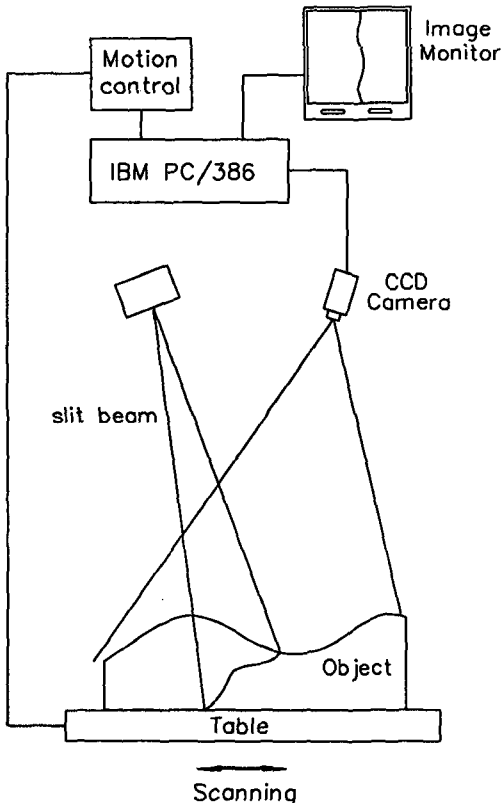


Fig. 1 General configuration of the slit beam scanning topography

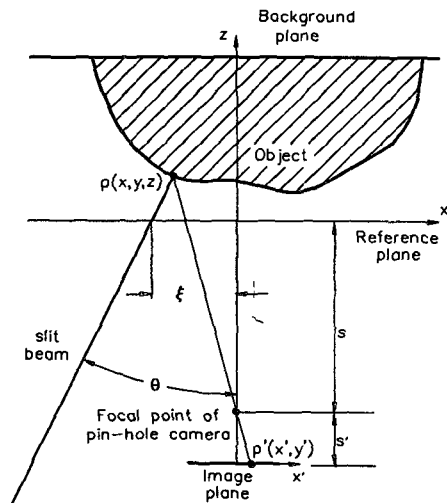


Fig. 2 Projection angle of slit beam

변수 m 은 카메라의 배율(magnification ratio)로 기준물체거리 s 와 기준영상거리 s' 그리고 물체거리 z 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$m = \frac{s'}{s+z} \quad (3)$$

식(1)로부터 영상점 정보 $P'(x', y')$ 만으로는 물체점 $P(x, y, z)$ 의 좌표가 T_c 변환행렬의 역함수가 존재하지 않으므로 직접적으로 구해지지 않는다. 이를 위해서는 추가 정보가 요구되며, 이는 평면 주사광이 갖는 공간상의 기하학적인 조건으로부터 추출할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 주사광을 y 축에 평행하게 놓인 상태에서 z 축과 θ 의 각도를 갖게 설치하면 평면 주사광은 다음의 평면 방정식으로 표현될 수 있다.

$$z = (x - \xi) \cot \theta \quad (4)$$

여기서 ξ 는 그림에서와 같이 주사광이 x 축과 교차하는 점의 좌표값을 의미한다. 식(4)의 추가적인 조건을 식(1)과 병합하면, 이의 결과는 다음의 확장된 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_c & & \\ \dots\dots\dots & & \\ 1 & 0 & -\tan \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

이에 다시 식(2)를 대입하면 영상점 P' 와 물체점 P 와의 관계는 최종적으로 다음과 같이 얻어지게 된다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 1 & 0 & -\tan \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

최종적으로 식(6)의 역을 취하고, 이에 식(3)을 대입하면 물체점 P 의 삼차원 좌표값은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$x = \frac{x'(\xi + s \tan \theta)}{x' + s' \tan \theta} \quad (7)$$

$$y = \frac{y'(\xi + s \tan \theta)}{x' + s' \tan \theta} \quad (8)$$

$$z = -\frac{s' \xi - x' s}{x' + s' \tan \theta} \quad (9)$$

위 식(7)~(9)에서와 같이 슬릿광 주사방법에서는 광학계의 기하학적 조건 θ, ξ, s, s' 이 주어지면 측정되는 영상점의 좌표값 x', y' 를 이용하여 물체의 삼차원 형상좌표값 x, y, z 를 구할 수 있게 된다.

3. 측정분해능

삼차원형상 측정을 구현함에 있어 가장 중요한 측정 성능변수중의 하나가 측정분해능(measuring resolution)이다. 슬릿광 주사방법에서의 측정분해능은 xy 의 수평방향(lateral resolution)과 z 의 수직방향(vertical resolution)으로 분리하여 정의된다. 수평방향 분해능은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 사용되는 카메라의 화소분해능(pixel resolution)에 의해 결정된다. 물체상의 광의 웨지를 추출함에 있어 영상처리의 세선화(thinning) 알고리즘을 적용할 경우,^(7,8) x 방향의 수평분해능 R_x 는 간단히 다음과 같이 얻어진다.

$$R_x = \frac{dx}{m} = \frac{dx(s+z)}{s'} \quad (10)$$

여기서 dx 는 카메라의 x 방향으로의 화소분해능을 의미한다. 이와 동일한 방법으로 y 방향의 수평분해능 R_y 도 다음과 같이 얻어진다.

$$R_y = \frac{dy}{m} = \frac{dy(s+z)}{s'} \quad (11)$$

슬릿광 주사방법이 갖는 특성중의 하나는 상기 두 식에서와 같이 수평분해능이 일정한 상수로 결정되지 않고 물체거리 z 에 의해 영향을 받게 된다. 하나의 물체상에서 카메라로부터 멀리 위치한 부분에

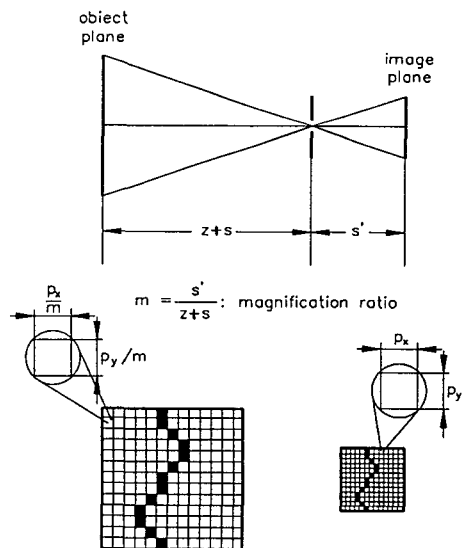


Fig. 3 Lateral resolution

서는 분해능이 저하되며, 이러한 이유로 실제 측정에 있어서 물체의 크기가 분해능의 관점에서 제한되는 문제점을 갖게 된다. 또한 상기 분해능을 유지하기 위해서는 주사광선의 이동간격 $\Delta\xi$ 는 반드시 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\Delta\xi \leq R_x \tag{12}$$

그렇지 않은 경우, 측정에 있어 불필요한 분해능의 감소를 유발하게 된다.

슬릿광 주사방법이 갖는 또 하나의 특성은 z축 방향의 수직분해능은 수평분해능에 의해 2차변수로서 결정된다는 점이다. 식(9)에 의해 z값이 결정될 때 수직분해능 R_z 는 두 인접점의 차로 다음과 같이 정의된다, 즉

$$R_z = z(x' + p_x) - z(x') \tag{13}$$

이에 식(9)를 대입하여 그 결과를 정리하면 다음과 같은 형태로 얻어진다.

$$R_z = \frac{p_x s' (\xi + s \tan \theta)}{(x' + s' \tan \theta)^2} \tag{14}$$

수평분해능과 비교할 때, 수직분해능은 많은 변수들에 의해 영향을 받게됨을 알 수 있다. 이들 변수들중 경사각 θ 가 가장 큰 영향을 미치게 되며 Fig. 4는 이의 경향을 보여준다. 수직분해능은 경사각이 0인 경우 최대값을 갖게 되면서 최저의 분해능을 갖는 반면 경사각이 증가할수록 향상됨을 알 수 있다. 그러므로 실제 측정을 수행하는 경우 가능한

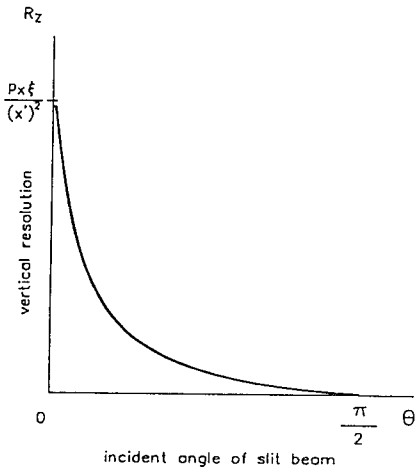
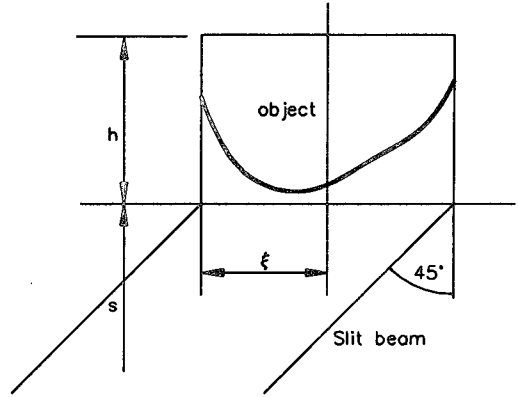


Fig. 4 Variation of vertical resolution with projection angle



unit : mm

condition of optical geometry				
	$f = 25$		$h = 100$	
	$s = 200$		$s' = 28.571$	
ξ	-50.0	0.0	50.0	mean
R_x	0.185	0.185	0.185	0.185
R_y	0.151	0.151	0.151	0.151
R_z	0.147	0.118	0.088	0.118

Fig. 5 An example of measuring resolutions

큰 경사각을 사용하는 것이 유리하게 된다.

Fig. 5에는 실제적인 측정에 있어서 슬릿광 주사방법으로 얻을 수 있는 측정분해능에 대한 실제적인 예제를 제시하고 있다. 측정대상물의 크기가 $100 \times 100 \times 100$ mm이며 초점거리가 25 mm인 카메라 렌즈를 사용하는 경우에 0.1~0.2 mm범위의 수평 및 수직 분해능을 갖게 됨을 보여준다. 또한 측정대상물의 측정범위를 축소함과 동시에 초점거리가 큰 카메라를 사용하여야 좀더 향상된 측정분해능을 얻을 수 있게 된다.

4. 실험 및 토의

이상에서 기술된 슬릿광 주사방법의 성능을 실제적으로 검토하기 위해 본 연구에서는 Fig. 6에서와 같은 측정시스템이 설계제작되었다. 전체 측정시스템은 측정물체를 이송하기 위한 직선 이송테이블, 평면 슬릿광원, 두 대의 CCD 카메라와 접속회로, 그리고 전체시스템을 제어와 연산을 수행하기 위한 마이크로 컴퓨터 (IBM PC386)으로 구성된다. 직선 이송테이블은 xy평면상에서 물체를 x방향으로 이송한다. 슬릿광원은 xz평면에 수직으로 위치하며

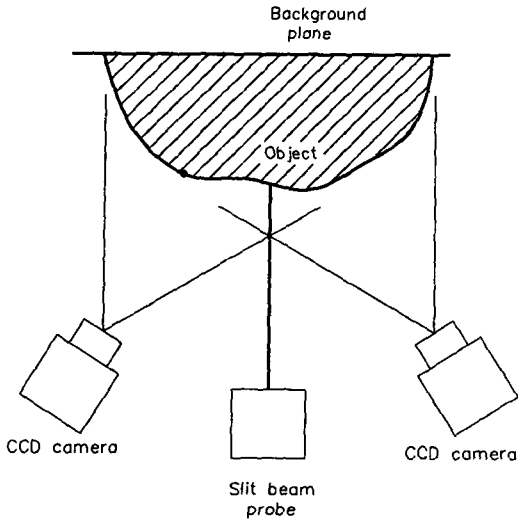
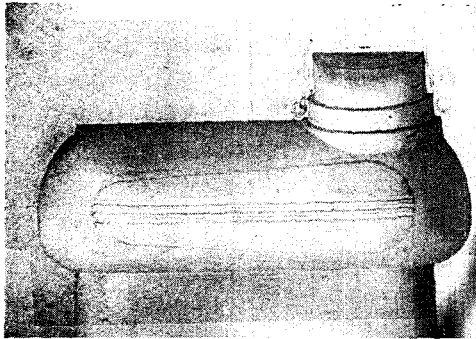


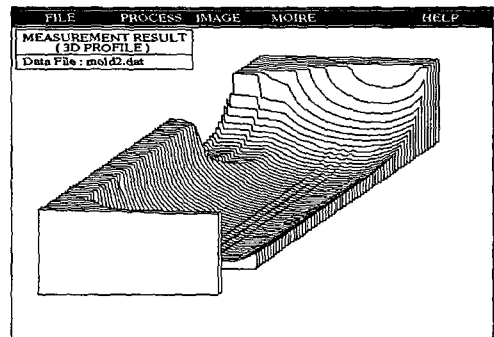
Fig. 6 Slit beam scanning topography system using two CCD cameras

x축과의 절편 ξ 는 이송테이블 상에 위치한 회전형 엔코더에 의해 검출된다. 두 대의 카메라는 슬릿광원에 대해 대칭으로 각각 45도의 각도로 위치한다. 측정에 두 대의 카메라가 동시에 사용됨으로써 측정물체상에 심한 굴곡을 갖는 부분에서 야기되는 카메라 시야에 대한 사각(死角)을 제거하기 위함이다. 슬릿광원은 튜브형의 HeNe 레이저광원에 원통렌즈를 부착하여 평면광원으로 출력된다.

Fig. 7에는 실제로 측정된 한 예제를 보여준다. Fig. 7(a)에는 측정에 사용된 공기압축기의 외관 제작을 위한 석고금형의 실물로 이의 전체적인 형상 크기는 $300 \times 120 \times 150(\text{mm}^3)$ 이다. 이의 주사식 슬릿광방법을 이용한 측정결과가 Fig. 7(b)에 도시되었다. 측정분해능은 0.1mm 이며 이에 소요된 시간은 5분이었다. 측정시간의 비교를 위해 삼차원측정기에서 동일한 측정분해능을 얻기 위한 디지털링을 할 경우 10시간 정도가 소요되었으며, 이로부터

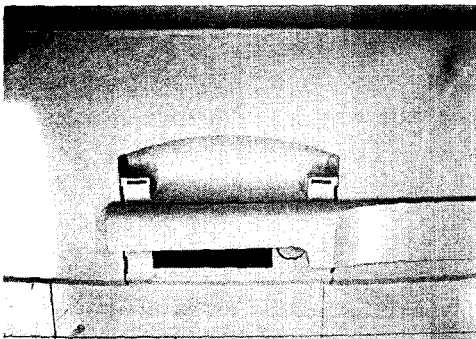


(a) Real view of mould

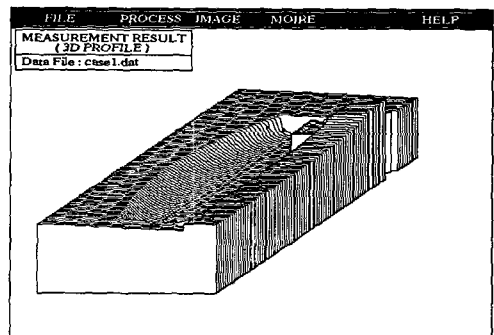


(b) Reconstructed profile

Fig. 7 A measurement of real mould



(a) Real view of washer cover



(b) Reconstructed profile

Fig. 8 A measurement of washer cover

주사식 슬릿광을 이용할 경우 120배의 측정속도의 향상을 얻을 수 있었다. Fig. 8에는 또 하나의 예제로 세탁기 뚜껑의 한 부분을 측정한 결과를 도시하고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 비접촉식 삼차원형상 측정방법으로 슬릿광 주사방법에 대해 기술하였다. 세부적인 기본 측정원리를 유도하였으며, 이를 근거로 수평가 수직방향의 측정분해능에 대해 논의하였다. 또한 실제적인 측정을 구현하기 위한 측정시스템의 설계제작과 이를 이용한 측정사례에 대해 분석검토하였다. 결론적으로 슬릿광 주사방법은 범용적인 컴퓨터 비전기술을 이용할 경우 0.1~0.2mm의 측정분해능을 갖는 고속의 삼차원 측정을 실현할 수 있는 장점을 가짐을 보였다.

참고문헌

- (1) Duncan, J.P. and Mair, S.G. 1983, "Sculptured Surfaces in Engineering and Medicine," Cambridge University Press.
- (2) 송창규, 김승우, 1992, "삼차원측정기를 이용한 삼차원곡면의 자동 형상측정 알고리즘," 대한 기계학회 춘계학술대회 초록집, pp. 660~664.
- (3) 이재윤, 1991, "추적식 3차원 형상측정을 위한 광학식 변위센서," KAIST, 석사논문.
- (4) Yakimosky, Y. and Cunningham, R. 1984, "A System for Extracting Three-Dimensional Measurement from a Stereo-Pair of TV-Camera," Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 28, pp. 121~130.
- (5) 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
- (6) Kim, S. W. and Park, H. G. 1992, "Moire Topography by Slit Beam Scanning," Appl. Opt., Vol. 31, pp. 6157~6161.
- (7) Gonzalez, R. C. and Wintz, P. 1977, "Digital Image Processing," Addison-Wesley Publishing Company.
- (8) Duda, R. O. and Hart, P. E. 1973, "Pattern Classification and Scene Analysis," Wiley and Johns.