

공작기계 상에서 마이크로드릴 공정의 머신비전 검사시스템

윤혁상[†] · 정성중^{*}

(2003년 12월 31일 접수, 2004년 3월 11일 심사완료)

Machine Vision Inspection System of Micro-Drilling Processes On the Machine Tool

Hyuk-Sang Yoon and Sung-Chong Chung

Key Words : Burr(버), CCD Camera(CCD 카메라), Edge Detection(윤곽선 검출), Hole Quality(구멍 품질), Illumination Unit(조명장치), Shape from Focus(초점결상)

Abstract

In order to inspect burr geometry and hole quality in micro-drilling processes, a cost-effective method using an image processing and shape from focus (SFF) methods on the machine tool is proposed. A CCD camera with a zoom lens and a novel illumination unit is used in this paper. Since the on-machine vision unit is incorporated with the CNC function of the machine tool, direct measurement and condition monitoring of micro-drilling processes are conducted between drilling processes on the machine tool. Stainless steel and hardened tool steel are used as specimens, as well as twist drills made of carbide are used in experiments. Validity of the developed system is confirmed through experiments.

기호설명

E_L	: 구멍 위치오차, μm
$G(x,y)$: 이차원 가우시안 함수
f	: 초점거리
H_L	: 라플라시안 마스크(Laplacian mask)
$I(x,y)$: 입력영상(input image)
$L(x,y)$: 출력영상(output image)의 결과값
N	: 카메라의 이동횟수(moving step number)
T_L	: 문턱값(threshold value)
u	: 렌즈 평면에서 물체까지의 거리
v	: 초점이 맺는 영상까지의 거리
Δd	: 측정이송간격, μm
Δd_e	: 구멍지름 확대오차, μm
σ	: 흐려짐 크기를 나타내는 공간 정수
\otimes	: 컨볼루션(convolution) 연산
∇^2	: 라플라시안(Laplacian) 연산

1. 서론

드릴은 금속 및 비금속 재료에 빠르고 편리하게 구멍을 뚫는 절삭공구로서 드릴공정은 기계가공의 25-35%를 차지하는 중요한 공정이다. 미세구멍(micro-drilling) 가공기술은 각종 전자제품, PCB, 미세노즐, 항공우주 부품, 정밀금형과 자동차 등에 널리 이용되고 있다. 특히 전자 및 컴퓨터 산업에서 구멍의 미세화와 세장비(slenderness ratio) 증가 등의 이유로 더욱 중요시 되고 있다. 미세구멍 가공공정에서 버 형성(burr formation)과 구멍의 품질(hole quality)은 조립과정 등에 직접적인 영향을 주는 요인으로 버 형성과 구멍 품질의 빠르고 정확한 측정은 미세 가공공정의 상태감시(condition monitoring)뿐만 아니라 자동화에 중요한 역할을 한다.

일반적으로 구멍의 품질과 버의 측정은 SEM(scanning electron microscope), 공초점 간섭 현미경(confocal microscope)과 레이저를 이용한 측정^(1,2) 등이 사용되어져 왔는데 이러한 측정 장비들은 가격이 비싸고 미세구멍 가공공정의 상태감시를 공작기계 상에서 직접 수행하지 못하는 단점이 있다.

[†] 한양대학교 대학원 기계설계학과

^{*} 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : schung@hanyang.ac.kr

TEL : 02-2290-0444 FAX : 02-2298-4634

본 연구에서는 윤곽선 검출을 이용한 영상처리 기술⁽³⁾과 초점결상(shape from focus, SFF)방법⁽⁴⁾을 이용한 머신비전 측정기술을 이용하여 미세구멍의 버와 구멍의 품질을 측정한다. 그리고 명확한 영상을 얻기 위해 할로겐 광원과 LED 를 이용한 조명장치⁽⁵⁾를 구성한다. 실험에는 0.3mm 의 카바이드 트위스트 드릴을 이용하며, 시편은 스테인리스강과 냉간금형강을 사용한다.

본 논문의 2 장에서는 구멍의 품질을 측정하기 위해 드릴가공 시에 발생하는 가공오차를 정의하고, 3 장에서는 구멍의 품질에 영향을 주는 버 측정을 위한 초점결상법을 기술한다. 4 장에서는 실험법과 측정 보정법, 그리고 5 장에 실험 결과를 소개하고 6 장에 결론을 서술한다.

2. 구멍의 가공오차

본 논문에서는 마이크로드릴 공정에서 발생하는 구멍의 가공오차를 위치오차와 확대오차로 정의한다. 구멍의 위치오차는 절삭조건과 드릴의 종류에 따라서 초기 절입단계 시 드릴이 시편의 표면에서 미끌어지는 워킹(walking) 현상에 의해 발생된다. 구멍의 중심좌표는 워킹이 끝난 후 절입이 시작되는 부분의 좌표이기 때문에 실제 지정된 드릴 중심좌표에서 벗어나게 된다. 그리고 구멍의 확대오차는 가공 시 발생하는 드릴의 휘(whirling)과 절삭날의 불균일성 및 드릴마멸에 의해 발생되며 가공 후 구멍의 지름은 실제 드릴의 지름보다 커지게 된다.⁽⁶⁾ 본 논문에서 확대오차는 가공 구멍의 최소자승원과 지령원과의 차의 1/2 로 정의한다. 이러한 구멍의 위치오차와 구멍지름의 확대오차를 Fig. 1 에 정의 한다.

영상으로부터 구멍의 위치 및 확대오차의 정보를 얻기 위하여 영상으로부터 윤곽선을 검출해 낼 필요가 있다. 이러한 윤곽선 검출방법에는 1 차 미분으로 정의되는 소벨(Sobel), 프르윗(Prewitt), 스토캐스틱(Stochastic)과 로버츠(Roberts) 등의 방법과 2 차 미분으로 정의되는 라플라시안, LoG (Laplacian of Gaussian)와 DoG(difference of Gaussian)등의 방법이 제안되어져 왔다.^(3,7,8) 이러한 윤곽선 검출 방법 중 본 연구에서는 수평, 수직 그리고 윤곽선에서 민감한 반응을 보완하며 잡음에 둔감한 LoG 윤곽선 검출방법^(7,9)을 사용한다. LoG 윤곽선 검출 방법은 가우시안 스무딩 필터링을 거친 후 라플라시안을 적용하는 방법으로 영상에서의 잡음에 대하여 좋은 결과를 얻을 수 있다.⁽⁷⁾

LoG 연산자의 출력 $H(x,y)$ 은 식 (1)의 컨벌루션(convolution) 연산을 통하여 얻어진다.

$$H(x,y) = \nabla^2[G(x,y) \otimes I(x,y)] \tag{1}$$

컨벌루션에 대한 미분법칙을 사용하면

$$H(x,y) = [\nabla^2 G(x,y)] \otimes I(x,y) \tag{2}$$

이 된다. 여기서 $I(x,y)$ 는 입력영상이고, $\nabla^2 G(x,y)$ 은 LoG 연산자이다.

3. 버 측정

3.1 초점과 비초점영상

광학 시스템을 이용한 물체의 측정 원리는 Fig. 2(a)와 같다. 렌즈를 중심으로 u 만큼 떨어진 위치에 물체가 위치하면 초점 맺는 영상을 얻기 위해 영상이 맺는 점은 렌즈의 반대편 v 만큼 떨어진 위치에 있어야 한다. 광학 시스템에서는 물체의 거리와 그 물체의 영상이 맺히는 거리 관계를 나타내는 다음의 렌즈 공식이 성립한다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \tag{3}$$

여기서 f 는 초점거리, u 는 렌즈 평면에서 물체까지의 거리이고 v 는 초점이 맺는 영상까지의 거리이다.

Fig. 2(a)에서 물체 위의 한 점 P 가 렌즈로부터 u 의 거리에 위치하면 P 의 초점이 맺는 영상 Q 는 렌즈에서부터 v 만큼 떨어진 위치에 놓이게 된다. 그러나 Fig. 2(b)에서 CCD 카메라 렌즈를 광축을 따라 물체의 방향으로 움직이면 $2r'$ 만큼의 흐려진 비초점영상 Q' 이 생기게 되고 물체의 반대 방향으로 움직이면 역시 $2r''$ 만큼 흐려진 비초점영상 Q'' 을 얻는다.

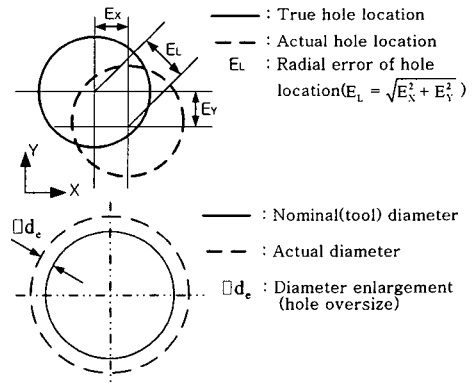


Fig. 1 Location error and diameter enlargement error

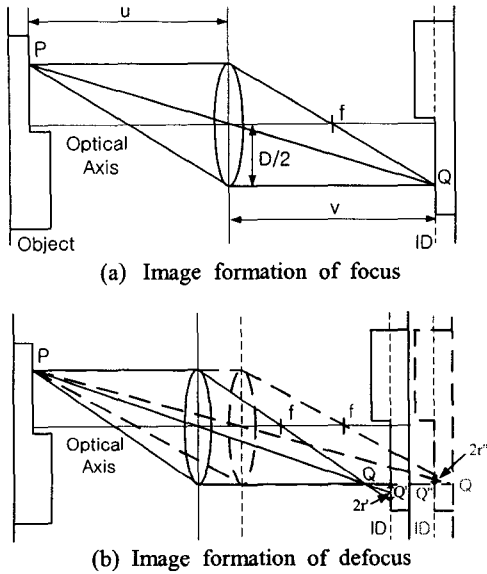


Fig. 2 Image formation of focus and defocus

물체의 비초점영상과 초점영상을 획득하는 방법은 물체를 움직이거나 렌즈를 움직여서 영상을 얻는 두 가지 방법이 있다. 본 논문에서는 일반적인 공작기계에 쉽게 적용하기 위해서 주축에 카메라를 장착하여 공작기계상에서 카메라를 움직여 초점영상과 비초점영상을 획득하는 방법을 이용한다.

3.2 초점 측정 연산자

영상 내에 포함된 각종 경계는 초점이 맺힌 정도를 가늠하는 중요한 요소가 된다. 영상 내의 경계는 고주파 성분을 가지며 3.5 절에 정의될 초점결상지수(focus measure index: FMI)는 초점이 정확히 맺힐수록 고주파 성분을 많이 포함하기 때문에 증가한다.⁽⁴⁾

라플라시안 마스크 연산자⁽¹⁰⁾는 영상 내의 임의의 점에서 입력영상의 농도 기울기를 계산하는 연산자로 영상내의 경계를 확대하는 효과를 가지며, 또한 곡선의 기울기가 커서 피크 점을 찾기가 용이하며 피크에서 먼 거리의 값들이 0 에 가까워 안정된 특성을 가진다. 본 실험에서는 이러한 라플라시안 연산자를 이용하여 초점결상지수값 변화의 민감성을 증대 시킨다. 2 차원 입력함수 $I(x, y)$ 의 라플라시안은 다음의 2 차 미분으로 정의한다.

$$\nabla^2 I(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (4)$$

위 식 (4)는 여러 가지 방법의 디지털 형태로 구현될 수 있다. 본 논문에서는 화소(x,y)를 중심

으로 수직, 수평과 대각선 방향을 고려한 초점결상지수값을 계산하기 위하여 다음 식 (5)와 같은 디지털 라플라시안 계산식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 I(x, y) = & 8I(x, y) - \{I(x-1, y+1) + I(x, y+1) \\ & + I(x+1, y+1) + I(x-1, y) + I(x+1, y) \} \\ & + I(x-1, y-1) + I(x, y-1) + I(x+1, y-1) \} \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 컨벌루션 마스크

마스크 기반 처리는 공간영역 내의 입력 화소값들과 마스크 내의 값을 곱하여 새로운 출력 화소값을 얻는 것이다.

Fig. 3에서 마스크 기반 처리과정은 입력영상의 블록윈도우와 라플라시안 마스크 내의 값을 서로 곱하는 컨벌루션과정을 거치며 이때 얻게 되는 새로운 값은 입력영상의 위치에 해당하는 출력영상의 결과값으로 나타난다. Fig. 3의 컨벌루션과정은 아래의 식으로 표현된다.

$$L(x, y) = I(x, y) \otimes H_L(x, y) \quad (6)$$

$$H_L = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

여기서 H_L 은 고역통과 필터 역할을 하는 라플라시안 마스크이다.

3.4 블록윈도우

블록윈도우(block window)^(6,9)란 영상 내의 임의의 한 점의 초점결상지수값을 계산하기 위하여 사용되는 영상 내의 임의의 면적을 의미한다. 측정점의 3 차원좌표를 측정하기 위하여 이상적인 경우에는 영상의 한 화소에서의 농도 정보만을 이용하여 초점을 맺게 해야 한다. 그러나 실제로는 한 화소에서의 정보만 가지고는 초점의 판단이 불가능하기 때문에 이웃한 화소의 농도를 함께 이용하는 유한한 화소 수를 갖는 블록윈도우가 필요하게 된다. 블록윈도우의 선택 시 블록윈도우의 크기가 너무 작을 경우 외란으로 인한 잘못된 초점결상지수값을 얻을 확률이 높아져 불안정한 초점결상지수 곡선을 얻게 되고 블록윈도우의 크기가 지나치게 크면 계산량이 많아져 영상처리 시간이 길어진다.

일반적으로 영상에서 초점결상지수값 계산을 위해 사각 블록윈도우가 사용되지만, 본 논문에서는 사각 블록윈도우와 사각 블록윈도우와 같은 면적을 가지는 십자 블록윈도우를 사용한다. 서로 다른 높이를 가지는 두 개의 블록개이지를 이용하여 높이차를 산출하는 보정 실험을 통하여 각각의 블록윈도우의 성능을 비교

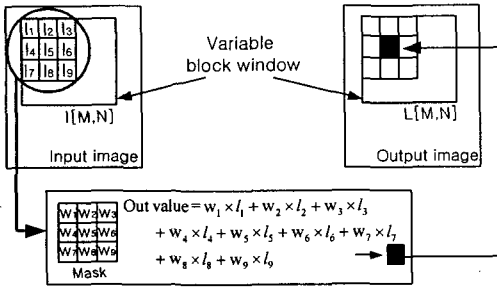


Fig. 3 Convolution mask

분석하고 본 측정 시스템의 신뢰성을 평가한다.

3.5 초점결상지수

본 논문에서는 획득된 영상의 고주파 성분의 포함 정도를 정량적으로 나타내기 위하여 초점결상지수(focus measure index: FMI)를 정의한다. 영상내의 블록윈도우 주변 (i, j) 에서 라플라시안 마스크 연산자와 컨볼루션된 (x, y) 의 합으로 이루어진 $F(i, j)$ 가 초점결상지수이고 그 과정은 다음 식으로 표현된다.

$$F(i, j) = \sum_{x=i-M/2}^{i+M/2} \sum_{y=j-N/2}^{j+N/2} L(x, y) \text{ for } L(x, y) \geq T_L \quad (7)$$

식 (7)에서 T_L 은 문턱값으로 컨볼루션을 통한 새로운 화소의 결과값 $L(x, y)$ 가 문턱값 이상일 때만 초점결상지수의 함수에 더해 지도록 하여 초점이 잘 맞을수록 초점결상지수값이 더 커지는 효과를 준다.

일반적으로 초점이 맺지 않는 비초점영상의 특성은 저역통과 필터(low-pass filter)처리의 수행과정과 같고 초점이 정확히 맺힌 영상은 고주파 성분을 많이 포함하고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 초점이 맺은 영상은 초점이 맺지 않아 흐려진 영상보다 상대적으로 고주파 성분을 많이 포함하게 되어 상대적으로 높은 초점결상지수값을 가지게 된다.

3.6 초점결상시스템

물체의 높이 측정 시 카메라로부터 얻어진 하나의 2차원 영상에는 초점을 맺기 위한 3차원의 정보가 포함되어 있지 않다. Fig. 4는 물체의 3차원 좌표값을 얻기 위한 초점결상(shape from focus: SFF)시스템이다. Fig. 4에서 시편의 바닥 높이를 기준 초점 평면(focused reference plane), 버의 임의의 한 점 z 의 높이를 d_z 라 가정하고 공작기계 상에서 작동되는 카메라를 물체 초점 평면(focused object plane) 방향으로 측정이송간격 Δd 만큼 점진적으로 이동하면 z 점 영상의 FMI 값은 Fig. 5와 같이 점진적으로

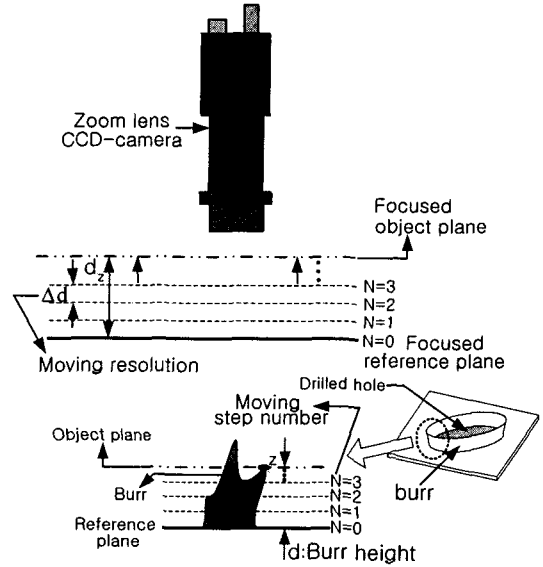


Fig. 4 Shape from focus

증가하게 되며, 버의 z 점이 물체 초점 평면과 일치될 때 초점이 맺게 된다. 이때 z 점의 버 높이 d 는 다음 식으로 표현된다.

$$d = d_z = N \times \Delta d \quad (8)$$

Fig. 5에서 측정이송간격마다 얻어진 초점결상지수값을 가우시안 보간법(Gaussian interpolation)을 적용하여 보다 더 정확한 측정점 높이를 구한다.⁽⁴⁾

3.7 조명장치

비전측정을 위한 조명은 입력영상에 직접적인 영향을 미치는 인자이기 때문에 영상을 받아들일 때 가장 중요한 변수로 작용한다.^(5,11) 따라서 비전 시스템에서는 신뢰할 수 있는 입력영상을 얻기 위해, 시스템 구성 시 적합한 조명방식을 고려해야 한다. 조명 방법에는 크게 전방조명, 후방조명, 구조조명과 스트로보(strobo)조명 등으로 분류할 수 있다.

본 연구를 위한 조명방법으로는 물체와 배경사이에 현저한 명암차를 생성시켜 구멍의 품질을 측정하기에 효율적인 방법으로 Fig. 6과 같은 백색광 LED 어레이(array)를 이용한 조명장치를 개발하여 후방조명으로 사용한다. 전방조명의 강도(intensity)는 측정하고자 하는 버 부분과 시편 바닥에 적절하게 이루어져야 입력영상으로부터 버의 정확한 측정이 이루어지기 때문에 할로겐 광원을 카메라 렌즈와 동축시켜 줌렌즈를 통하여 조명하는 전방조명을 사용한다.

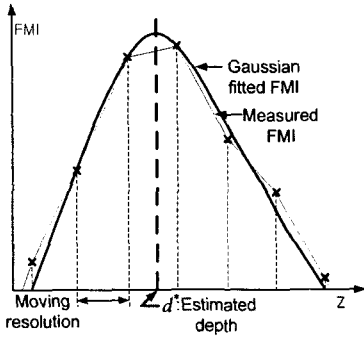


Fig. 5 Measured FMI and Gaussian fitted FMI

4. 실험장치 및 보정

4.1 실험장치

측정시스템은 Fig. 7에서와 같이 마이크로드릴 공정을 위한 에어스핀들, 줌렌즈와 CCD 카메라를 장착한 공작기계, LED와 할로겐 광원을 이용한 조명장치와 디지털 영상처리 및 분석을 위한 컴퓨터로 구성된다.

카메라의 축은 x,y 테이블에 수직을 이루고 있고 시편은 마이크로드릴 지그에 고정되어있다. 카메라로부터 얻어지는 영상은 640×480의 화소를 가지며 각 화소의 수평 및 수직 크기는 0.98 μm(H)×0.94 μm(V)이다. 구멍의 위치오차, 확대오차, 버의 폭과 높이를 측정하기 위해 각 측정이송간격마다 획득되는 영상은 마이크로드릴 공정 후 NC 프로그램에 의해 연속적으로 이루어진다. 드릴 된 구멍의 영상은 CCD 카메라와 영상처리 장치에 의해 256 밝기의 농도 등급으로 처리되어 컴퓨터에 저장되며, 영상처리 과정을 통해 분석된다.

4.2 보정실험

0.1μm의 분해능을 가지는 LVDT를 사용하여 1mm와 1.05mm의 높이를 가지는 두 개의 블록계이저를 각각 30회 측정하였다. 각 블록계이저의 높이값은 산술 평균을 이용하여 추정하고 두 값의 차인 50.1μm을 두 블록계이저의 높이차로 정의한다. Fig. 8은 블록계이저를 이용한 보정실험에서 SFF 시스템에 적용된 24(H)×24(V)의 사각 블록윈도우와 십자 블록윈도우(12(H)×30(V)와 30(H)×12(V) 크기를 가지는 두 개의 사각 블록윈도우의 합)를 보여준다.

임의의 높이를 측정하기 위한 SFF 시스템에서 측정이송간격이 좁아지면 정밀한 측정이 이루어 지지만 계산량이 많아져 측정 시간이 길어지게 되고, 측정이송간격을 크게 잡으면 측정 결과의

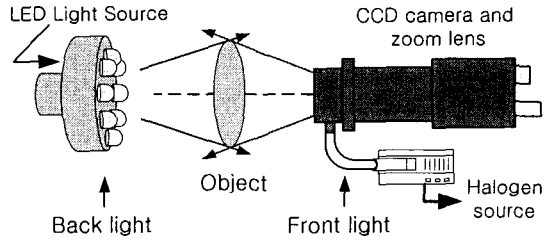


Fig. 6 Back and front light system

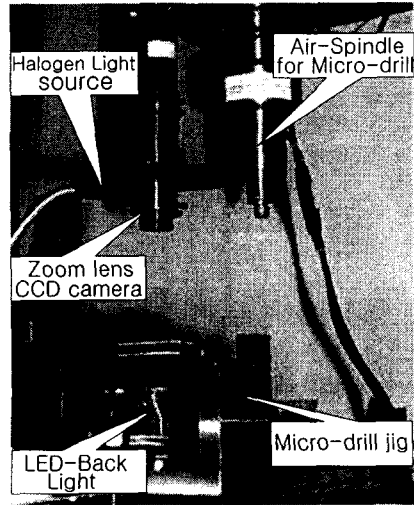


Fig. 7 Experimental setup

정확도가 떨어지게 된다. 본 실험에서는 SFF 시스템의 측정이송간격을 경험적으로 8μm로 결정하고 각각의 블록윈도우 상의 초점결상지수값을 계산한다.

Fig. 9는 SFF 시스템에 사각 블록윈도우를, Fig. 10은 십자 블록윈도우를 이용하여 얻어진 초점결상지수값들의 분포이다. 초점결상지수값은 측정이송간격에 의존되어져 얻어지는 결과이기 때문에 블록계이저의 정밀한 높이값을 구하기 위해 0.1μm의 스텝을 가지는 가우시안 보간법⁽⁴⁾을 사용한다. Fig. 11과 12는 가장 높은 초점결상지수값과 그 전 후 단계의 초점결상지수값들을 이용하여 가우시안 보간법을 적용한 결과이다.

Table 1은 LVDT와 사각 블록윈도우와 십자 블록윈도우를 적용한 SFF 시스템으로 블록계이저의 높이를 측정한 결과이다. Table 1의 보정결과로부터 SFF 시스템에 사각 블록윈도우를 사용한 측정 결과 오차가 1.4μm이고 십자 블록윈도우를 사용한 측정 결과 오차가 0.5μm으로 십자 블록윈도우를 사용한 SFF 시스템의 측정결과가 향상되었다.

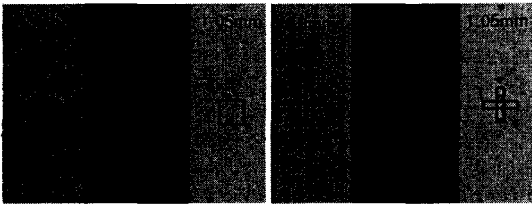


Fig. 8 Two kinds of windows for calibration

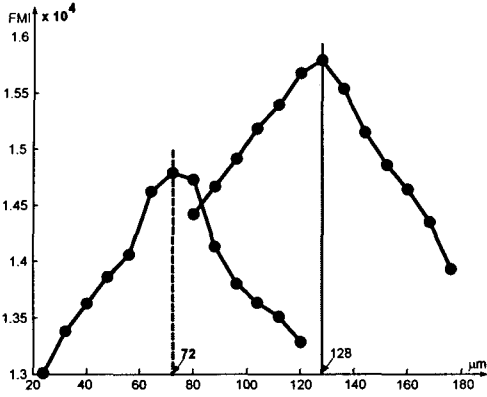


Fig. 9 Measured FMI using the square window

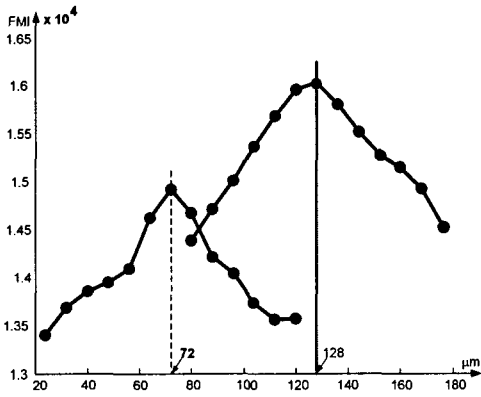


Fig. 10 Measured FMI using the cross window

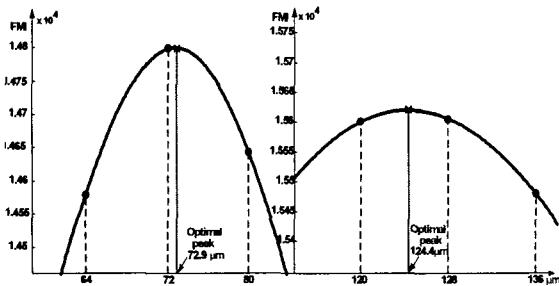


Fig. 11 Gaussian interpolation of FMI using the square window

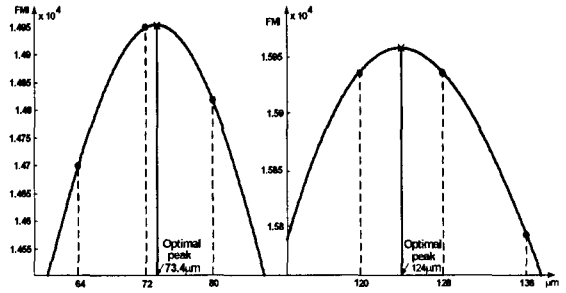


Fig. 12 Gaussian interpolation of FMI using the cross window

Table 1 Calibration results of the developed system

	Cross window	Square window
LVDT difference	50.1 μm	
Raw difference	56μm	56μm
Height of higher block gage by interpolated FMI	124 μm	124.4 μm
Height of higher block gage by interpolated FMI	73.4 μm	72.9 μm
Gaussian interpolation difference	50.6 μm	51.5 μm
Accuracy	0.5 μm	1.4 μm

5. 실험결과

5.1 구멍 품질(위치오차 및 확대오차)

본 논문에서는 0.3mm 카바이드 트위스트 드릴과 두께 1mm 을 가지는 스테인리스강 SUS304, 냉간금형강 SCM4 의 시편을 사용한다.

마이크로드릴 가공 후 시편바닥의 최적의 초점 높이에서 얻어진 원 영상으로부터 문턱값이 적용된 이진화 영상을 구한 후 LoG 윤곽선 검출방법을 사용하여 윤곽선을 검출하고 세선화를 적용한다. 윤곽선 검출 시 발생 할 수 있는 시편 상의 잡음을 낮추기 위하여 전방 조명인 할로겐 광원의 강도를 낮추고 후방 조명인 LED 조명을 이용하여 원 영상을 획득한다. 세선화가 적용된 윤곽선의 화소좌표를 통한 최소사승법을 이용하여 드릴 된 홀의 중심좌표와 지름을 계산한다.

Table 2는 절삭조건을 보인다. Fig. 13과 Fig. 14 는 각 시편에서 드릴 단계별 드릴 된 구멍의 원 영상과 LoG 윤곽선 검출이 이루어진 영상들이다.

Fig. 13 의 스테인리스강 시편의 버 구조는 드릴

의 바깥 날부가 피삭재의 출구를 통과한 후 외곽에서의 균일한 인장에 의한 변형이 진행된다. 드릴 중심부에서의 변형이 진행됨과 동시에 크랙이 발생하여 진전됨에 따라 캡이 파열되어 버가 불규칙한 형상으로 발달하였다. Fig. 14의 냉간금형강 시편의 버 구조는 드릴 선단부의 위치가 구멍의 출구부에 접근하면서 소성변형이 발생하기 시작하는 모든 부위에서 크랙이 발달하여 크랙 진전 후 버 발생이 거의 일어나지 않았다.

Fig. 15와 16은 각 시편에서 드릴 단계 별 구멍의 위치오차와 확대오차의 경향을 나타내고 각 시편의 드릴 단계 별 구멍의 위치 오차와 지름 확대 오차 값을 Table 3~6에 정리하였다.

이러한 드릴 단계마다 산출된 위치오차와 확대오차의 결과로부터 드릴 된 구멍의 위치오차와 확대오차는 드릴의 마모가 진전됨에 따라 서서히 증가함을 보인다.

5.2 버 폭과 높이

출구 버의 높이 측정을 위해 경험적으로 CCD 카메라의 측정이송간격을 8 μ m으로 결정한다.

Table 2 Cutting conditions

Workpiece	Rotation speed	Feed rate
SUS304	10,000 RPM	2 mm/min
SCM 4	15,000 RPM	10 mm/min

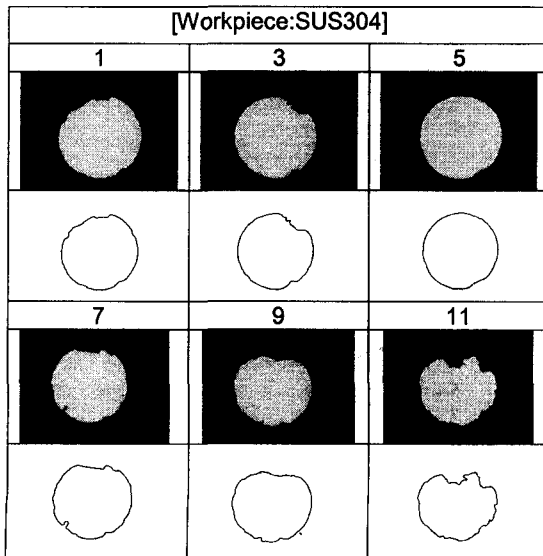


Fig. 13 Drilled hole images: SUS304

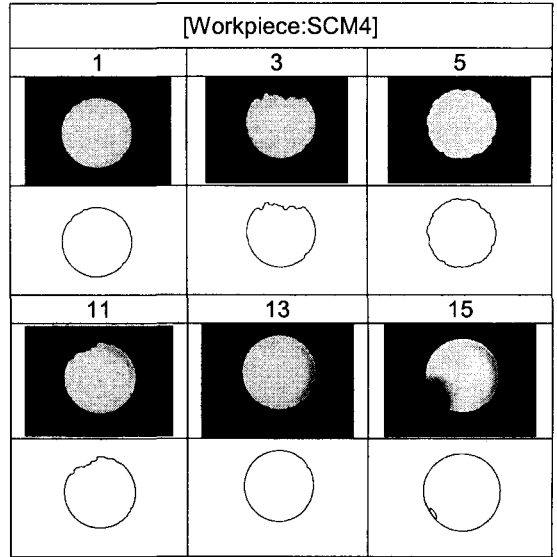


Fig. 14 Drilled hole images: SCM4

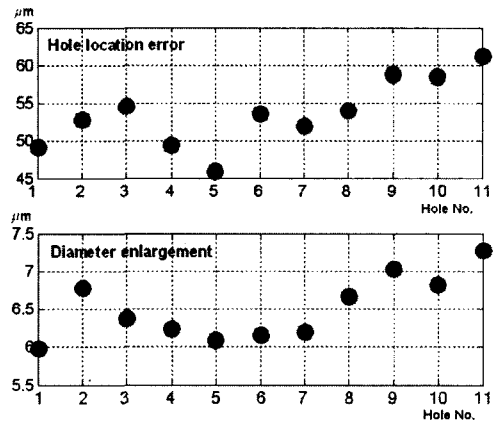


Fig. 15 Diameter enlargement and location error: SUS304

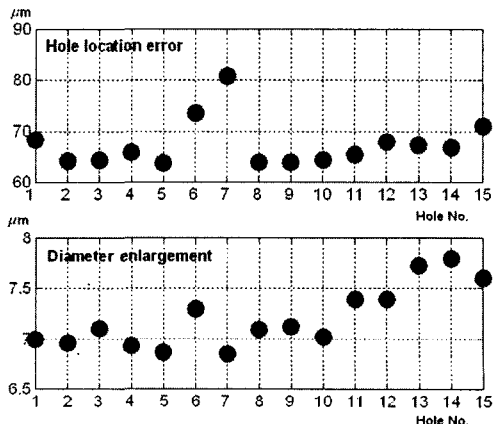


Fig. 16 Diameter enlargement and location error: SCM4

십자 블록윈도우는 버의 예리한 형상에 적용하기에 적합하지 않기 때문에 시편바닥(기준면)은 십자 블록윈도우를 사용하여 초점결상지수값을 산출하고, 버의 측정부분은 형상에 따라 경험적으로 3×3 이나 5×5의 사각 블록윈도우의 크기를 적절히 선택하여 버 높이 측정의 정확성을 기한다.

Table 3 Diameter enlargement: SUS304

Diameter enlargement (Δd_e): [μm]				
Hole No.	1	2	3	4
Δd_e	6.0	6.8	6.4	6.2
Hole No.	5	6	7	8
Δd_e	6.1	6.2	6.2	6.7
Hole No.	9	10	11	
Δd_e	7.0	6.8	7.3	

Table 4 Diameter enlargement: SCM4

Diameter enlargement (Δd_e): [μm]				
Hole No.	1	2	3	4
Δd_e	7.0	7.0	7.1	6.9
Hole No.	5	6	7	8
Δd_e	6.9	7.3	6.9	7.1
Hole No.	9	10	11	12
Δd_e	7.1	7.0	7.4	7.4
Hole No.	13	14	15	
Δd_e	7.7	7.8	7.6	

Table 5 Hole location error: SUS304

Hole location error (E_L): [μm]				
Hole No.	1	2	3	4
E_L	49.2	52.7	54.5	49.3
Hole No.	5	6	7	8
E_L	45.9	47.1	42.8	41.9
Hole No.	9	10	11	
E_L	43.3	45.6	49.2	

Table 6 Hole location error: SCM4

Hole location error (E_L): [μm]				
Hole No.	1	2	3	4
E_L	68.2	64.1	64.3	65.7
Hole No.	5	6	7	8
E_L	63.7	73.5	80.8	63.9
Hole No.	9	10	11	12
E_L	63.8	64.3	65.4	67.9
Hole No.	13	14	15	
E_L	67.3	66.8	70.9	

Fig. 17은 스테인리스강 시편에서 드릴 된 구멍의 버 높이를 구하기 위하여 SFF 시스템으로부터 FMI를 측정하기 위한 각각의 영상 중 기준평면, 200 μm , 초점이 맺혔을 때, 400 μm 으로 카메라를 물체 방향으로 옮기면서 얻어진 영상들로 초점이 맺힐 때와 흐려질 때의 버 영상의 초점 정도를 보여준다. Fig. 18은 버의 폭을 측정하기 위하여 최적의 초점 높이에서의 영상처리 단계를 보여준다. 버의 폭은 세선화 적용 후 검출된 윤곽선의 화소좌표값을 통한 최소자승법을 이용하여 반지름을 계산하고 이를 이용하여 버의 폭을 계산한다.

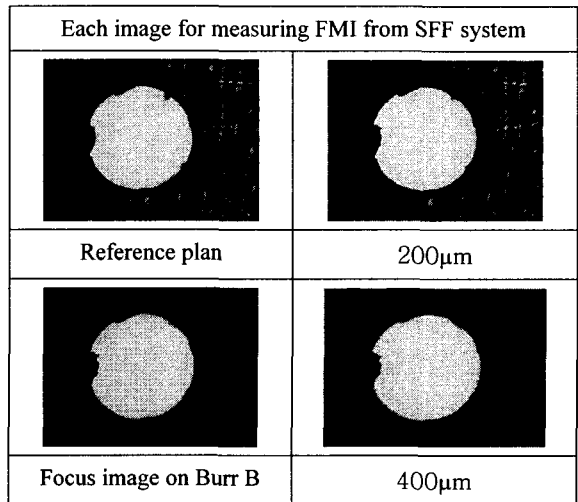


Fig. 17 Images for measuring FMI from SFF system

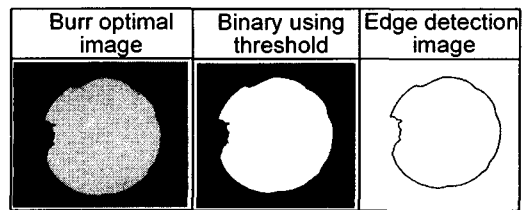


Fig. 18 Image processing sequence for measurement

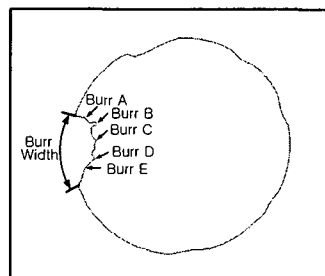


Fig. 19 Measuring points of burr: SUS304

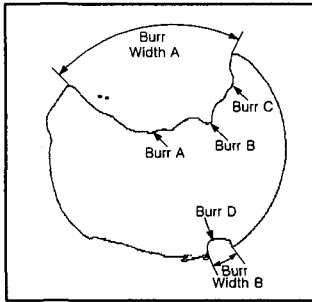


Fig. 20 Measuring points of burr: SCM4

Table 7 Burr height and width (SUS304; μm)

Burr height [SUS304] [μm]			
Reference	A	B	C
0	224.5	335.8	333.9
Reference	D	E	
0	312.6	212.6	
Burr width [SUS304] [μm]			100.5

Table 8 Burr height and width (SCM4; μm)

Burr height [SCM4] [μm]		
Reference	A	B
0	167.2	242.1
Reference	C	D
0	94.9	192.3
Burr width [SCM4] [μm]		
Burr width A		Burr width B
239.7		30.5

Fig. 19와 20은 각 시편의 10 번째 드릴 된 홀의 버의 높이와 폭의 측정점이고, 버 높이와 폭의 측정 결과를 Table 7과 8에 정리하였다.

6. 결론

(1) 마이크로드릴 공정에서 버 형상(높이, 폭)과 구멍의 품질(위치오차, 확대오차)의 상태감시를 위해 줌렌즈 CCD 카메라, 백색광 LED 어레이, 할로젠 램프 그리고 윤곽선 검출법과 SFF 법을 이용한 공작기계상의 비전 측정 시스템을 개발하였다.

(2) 구멍의 품질과 버의 폭을 측정하기 위해 LoG 윤곽선 검출방법을 응용하였고, 버의 높이를 측정하기 위하여 경험적으로 얻은 $8\mu\text{m}$ 의 측정이

공간격을 가지는 SFF 방법과 $0.1\mu\text{m}$ 의 측정분해능을 가지는 가우시안 보간법을 개발하였다.

(3) SFF 측정의 신뢰성을 확보하기 위해 게이지 블록을 이용하여 보정을 수행하고, 십자블록윈도우와 사각블록윈도우를 적용한 결과 제안된 SFF 시스템은 $0.1\mu\text{m}$ 의 측정분해능과 $0.5\sim 1.4\mu\text{m}$ 의 정확성을 가진다.

(4) 본 논문에서 제안된 측정방법이 다양한 작업환경에 적용되기 위해서는 칩과 먼지 등의 외부 환경에 민감한 조명장치의 적절한 설계가 요구되며, 측정결과에 조명강도에 민감하게 반응하기 때문에 더욱 신뢰성 있는 조명방법의 연구가 필요하다.

(5) 버의 3차원 형상의 복원을 위해서는 SFF 방법을 통한 영상 정합의 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Iwata, K. and T. Moriwaki, 1981, "Basic Study of High Speed Micro Deep Drilling," *CIRP Annals*, Vol. 30, pp. 27~30.
- (2) Stein, J. and D. Dornfeld, 1997, "Burr Formation in Drilling Miniature Holes," *CIRP Annals*, Vol. 46, pp. 63~66.
- (3) Ziou, D. and S. Tabbone, 1998, "Edge Detection Techniques-An Overview," *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 8, pp. 537~559.
- (4) Nayar, S. K. and Y. Nakagawa, (1994), "Shape from Focus," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, Vol. 16, No. 8, pp. 824~831.
- (5) Pfeifer, T. and L. Wieggers, 2000, "Reliable Tool Wear Monitoring by Optimized Image and Illumination Control in Machine Vision," *Measurement*, Vol. 28, Issue 3, pp. 209~218.
- (6) Furness. R.J, C. L. Wu, and A. G. Ulsoy, 1996, "Statistical Analysis of the Effects of Feed, Speed and Wear on Hole Quality in Drilling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 367~375.
- (7) Rafale C. Gonzalez, Richard E. Woods, 2002, *Digital Image Processing second Edition*, Prentice-Hall, Inc., Upper saddle River, New Jersey.
- (8) Jain, R., R. Kasturi, B. G. Schunck, 1995, *MACHINE VISION*, Co-published by the MIT Press and McGraw-Hill, Inc., New York.
- (9) Shapiro, L. G. and G. C. Stockman, 2001, *COMPUTER VISION*, Prentice-Hall, Inc., Upper saddle River, New Jersey.
- (10) Krotkov. E, 1987, "Focusing," *International Journal of Computer vision*, Vol. 1, pp. 223~237.
- (11) Braggins, D., 2000, "Illumination for Machine Vision," *Sensor Review*, Vol. 20, No. 1, pp. 20~23.