

〈논 문〉

컴퓨터 비전 및 자동초점장치를 이용한 크레이터 마멸측정

양민양* · 권오달**
(1995년 11월 27일 접수)

Crater Wear Measurement Using Computer Vision and Automatic Focusing

Min Yang Yang and Oh Dal Kwon

Key Words : Crater Wear(크레이터 마멸), Contour Detection(윤곽추출), Autofocusing(자동초점)

Abstract

In this paper a new technique to measure the crater wear using image processing and automatic focusing is presented. The contour detection algorithm, which can adapt in a noisy image, is suggested. It is suitable for eliminating high frequency noises with lower processing time and without blurring. An automatic focusing technique is applied to measure a crater wear depth with a one-dimensional search algorithm for finding the best focus. This method is implemented in the tool microscope driven by a servo motor. The results show that the contour and depth of crater wear can be measured reliably.

1. 서 론

기계가공에서 공구의 마멸은 가공오차를 발생시키고, 제품의 표면품질을 저하시키며, 공작기계 비가공시간을 증가시키는 원인이 되고 있다. 공구의 마멸은 일반적인 조건에서는 플랭크 마멸이 우세하지만 어느 절삭속도 이상에서는 크레이터 마멸이 급격히 증가하게 된다. 특히 최근 고속가공에 대한 연구가 활발하게 진행 중인데 이때에 문제가 되는 요인 중의 하나가 크레이터 마멸이다. 크레이터 마멸은 계속 진행될 경우 결국 공구가 파손되기 때문에 크레이터의 정량적인 측정이 필요하다.

공구마멸을 측정하는 연구는 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나눌 수 있다.^(1,2) 특히 크레이터 마멸을 정량적으로 측정하는 방법으로는 광학적인 방법과 비광학적인 방법으로 나눌 수 있으며, 비광학적인 측정방법은 시간이 많이 걸리거나

취급이 불편한 반면, 광학적인 측정방법은 비접촉으로 신속한 측정이 가능하므로 지금까지 이에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.⁽³⁻⁶⁾ 이 방법들은 슬릿 빔(slit beam)이나 회절격자를 사용하여 굴곡된 윤곽의 영상을 얻고 이를 분석하여 크레이터 마멸을 측정하였다. 이는 크레이터 마멸의 윤곽을 상세하게 표현할 수 있는 장점이 있는 반면 시스템이 복잡하고 영상처리시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

본 연구에서는 CCD(charge coupled device) 카메라를 통해 크레이터 마멸의 영상을 얻고, 이를 PC로 분석하는 영상처리기법과 서보시스템을 연계한 자동초점기법을 이용하여 크레이터 마멸을 측정할 수 있는 새로운 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 윤곽추출 알고리즘

예지나 윤곽을 검출하는 방법은 윤곽의 중요한 정보를 잃지 않으면서 데이터 처리속도를 현저하게 줄여주기 때문에 영상을 분석하는 과정에서 많이

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

**한국과학기술원 대학원 기계공학과

이용하는 기법이다. 크레이터 마멸의 경우에는 크레이터 면적, 넓이, 도심 등이 윤곽을 통해 구해질 수 있다. 윤곽을 검출하는 방법들은 여러가지로 제안 되어왔는데, (7,8) 그 중 영상의 1차, 2차 미분 값을 이용하는 Gradient, Laplacian 방법이 간단하게 많이 이용되고 있다.

크레이터 마멸을 검출하는데 발생하는 어려움은 공구 상면이 기름이나 먼지 등으로 오염되어 있을 뿐만 아니라 초점을 정확하게 맞추었을 때 상면의 무늬결이 선명하게 나타나게 되어 공구 영상에 고주파 노이즈가 심해지는데 있다. 고주파 노이즈를 제거하기 위해 일반적으로 LPF(low-pass filter)를 많이 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 영상을 흐리게(blurring) 하는 작용을 동시에 하게 되어 윤곽을 검출하는데 애매하게 하는 요인이 되고 있다. 따라서 블러링의 영향을 받지 않고 고주파를 제거할 수 있는 새로운 방법으로 영상병합 및 팽창을 시행하였다. (7) 본 장에서는 고주파 노이즈를 손쉽게 제거함으로써 크레이터 마멸의 윤곽을 검출하는데 유용한 알고리즘을 소개하고자 한다.

단계 1 : 영상병합 (image consolidation)

영상병합은 원래 영상을 길이 비율 1 : L로 축소하는 것이다. 이렇게함으로써 고주파에서 이 비율 이상의 성분이 제거된다. 축소된 영상의 화소값 $I_r(n, m)$ 은 처음 영상의 $I_0(i, j)$ 와 윈도우 크기 $L \times L$ 에 따라

$$I_r(m, n) = \frac{1}{L \times L} \sum_{i=n \times L}^{n \times L + L} \sum_{j=m \times L}^{m \times L + L} I_0(i, j) \quad (1)$$

로 표시할 수 있다. 여기에 LPF나 메디안(median) 필터를 실행시키면 효과가 훨씬 좋을 뿐만 아니라 빠른 시간에 컨볼루션(convolution)을 수행할 수 있다.

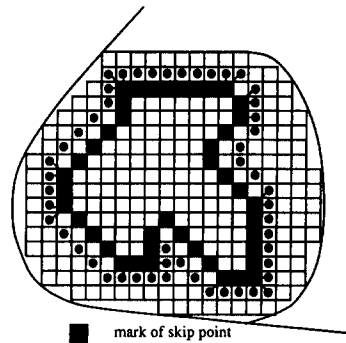
단계 2 : 특징추출

크레이터 부분을 다른 부분과 구별하여 추출하기 위해 밝기등급(gray level)의 적당한 쓰레숄드 값을 선정하는 것이 중요하다. 최적 쓰레숄딩(optimal thresholding)은 밝기등급 히스토그램(histogram)의 0차, 1차 모멘트를 이용하여 결정할 수 있다. (9) 쓰레숄딩을 시행하여 이치화(binary)된 영상에 침식(erosion) 알고리즘을 적용하여 전체적인 노이즈를 다시 한번 제거시킴으로 윤곽이 보다 선명하게 드러나게 된다. 여기에 Laplacian 필터(filter)를 이용하여 에지를 찾는다. 각 에지들

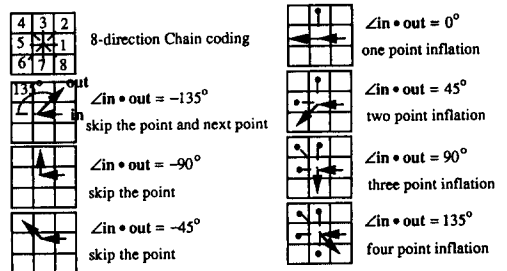
은 배열에 저장되고 노이즈에 의해 에지가 끊어져 있으면 에지연결기법을 이용하여 연결하여 원하는 윤곽을 찾을 수 있다.

단계 3 : 영상팽창 (image dilation)

이렇게 찾아진 윤곽은 축소된 형태이므로 원래 크기로 확대시키는 작업이 필요하다. 축소된 영상의 한 화소는 원래 영상의 $L \times L$ 화소에 해당하므로 각 화소를 $L \times L$ 화소 중앙의 한 화소로 사상(mapping)시킨 다음 직선으로 연결시키면 하나의 윤곽을 얻게 된다. 이 윤곽은 원래 크기의 윤곽보다 작아서 그 내부에 존재하게 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 체인코딩(chain coding)을 이용하여 윤곽을 팽창시키는 방법을 개발하였다. 체인코딩은 주변의 8개의 이웃하는 방향으로 한 화소씩 움직여 가며 임의의 윤곽을 표현하는 방법으로 코드된 어느 점에서 임, 출력벡터에 대한 정보를 알 수 있다. 이 관계를 이용하여 수직방향(normal)으로 화소를 팽창시켜 가면 된다. 그러나 화소들은 불연속 값들이므로 어떤 점들은 한점 이상으로 팽창되고 어떤 점들은 소멸되어 진다. Fig. 1(a)에 반시계



(a) An example of dilation processing



(b) Schematic description of the insufficient and redundant points of dilation

Fig. 1 Conception of dilation algorithm for CCW direction coding

방향으로 코딩되어 있는 경우 팽창하는 현상을 보여주고 있으며, (b)에 입력벡터(in), 출력벡터(out)의 관계에 따라 한 화소가 어떻게 팽창 또는 소멸되는 지를 보여주고 있다.

$$\angle \text{in} \cdot \text{out} \begin{cases} < 0^\circ, \text{ skip} \\ > 0^\circ, \text{ inplate one or more} \end{cases} \quad (2)$$

입, 출력벡터의 코사인(cosine)이 0°보다 작은 경우에는 그 점은 소멸되며 특히 -135°인 경우 주변의 3점이 소멸되어야 한다. 또한 0°보다 큰 경우에는 그림에서처럼 하나 이상 4점까지 팽창되어 점을 볼 수 있다. 만약 팽창하는 외곽에 임의의 경계를 둔다면 그 경계와 일치하는 점에서 팽창을 정지시킴으로써 외곽 형상과 같은 윤곽을 찾을 수 있다.

본 알고리즘은 영상 전체에 걸쳐 연산자(operator)를 컨볼루션하는 대신 축소된 영상에서 실행하고, 체인코딩을 이용한 팽창을 수행함으로써 연산하는 시간이 현저하게 작아져서 빠른 시간에 윤곽을 검출할 수 있다.

3. 자동초점기법

자동으로 초점을 맞추는 기법은 크게 하드웨어와 소프트웨어에 의한 방법으로 나눌 수 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 전자는 자동초점 맞추를 위하여 광학장치가 부가적으로 사용되며 초정밀 측정이 가능한 반면 장치가 복잡하고, 후자는 카메라의 인자와 초점거리 등을 이용하여 영상의 정보만으로 초점을 맞추는 방법으로 정밀한 측정이 가능하고 장치가 단순하다. 본 연구에서는 후자의 경우를 사용하였다.

3.1 기준함수

자동으로 초점을 맞추기 위해서는 최상의 초점 상태를 결정할 수 있는 기준(criterion)이 필요하게 된다. 초점의 상태는 공간 파워스펙트럼(spatial

power spectrum)에 존재하는 고주파 에너지의 양에 비례한다고 알려져 있다.^(11,12) 따라서 영상의 고주파 성분을 잘 표현할 수 있는 함수가 기준함수로서 적합하다. 이러한 목적으로 표준편차, 엔트로피, 영상의 1, 2차 미분 값 등이 사용 가능하다. Fig. 2에 이들 연산자에 대하여 시험해 본 결과를 보여주고 있다. Laplacian 연산자가 다른 것에 비해 곡선의 기울기가 커서 피크(peak) 점을 찾기가 용이하며, 피크에서 먼 거리의 값들이 거의 0에 가까워 안정된 특성을 가지고 있음을 볼 수 있다.

Laplacian 연산자의 정의는 다음과 같다.

$$\nabla^2 I(x,y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (3)$$

위 식은 공간상에서 영상의 화소 값과 3×3 마스크(mask)를 컨볼루션하여 얻을 수 있다.

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

$$H_L = \frac{b}{a} \begin{bmatrix} -2 & 1 & -2 \\ 1 & 4 & 1 \\ -2 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

기준함수값을 보다 신뢰성있게 얻기 위하여 초점을 맞추는 부위의 여러 화소(N×M)를 윈도우(window)로 선택하여 처리하는 것이 유용하며, 화소의 갯수가 증가함에 따라 정밀도가 증가하지만 처리시간이 많이 걸리게 되므로 윈도우의 크기를 적절하게 선택해야 한다. 본 연구에서는 15×15 윈도우를 주로 사용하였으며, 기준함수값은 이 작은 영역에 대한 위의 결과들의 합과 같다.

$$f(x,y) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M L(x,y), \text{ for } L(x,y) > T_L \quad (5)$$

위 식에서 T_L 은 쓰레쉬홀드(threshold) 값으로 화소 간의 차이가 이 값 이상일 때만 함수값에 더해지도록 함으로써 초점이 잘 맞을수록 함수값을 더 크게 하는 효과를 주게 된다.

Fig. 3(a)에 Laplacian 연산자의 기준함수값에 대하여 초점이 맞지 않은 상태에서부터 테이블을 Z축으로 0.002 mm 씩 움직여서 초점 부위를 지나 갔을 때까지의 특성을 여러번 반복하여 보여 주고 있다. 기준함수 값이 부분적으로 작은 피크를 이루고 있는 현상을 볼 수 있다. 이는 열팽창, 기계적 진동, 스케일오차 등에 의한 위치제어 오차가 발생된 것으로, 마치 기준함수 성분에 고주파가 실려 있는 것과 같은 영향으로 생각될 수 있다. 따라서

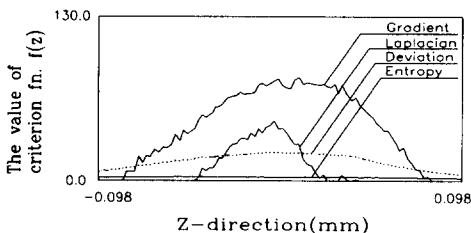
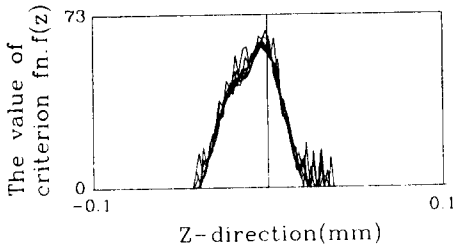
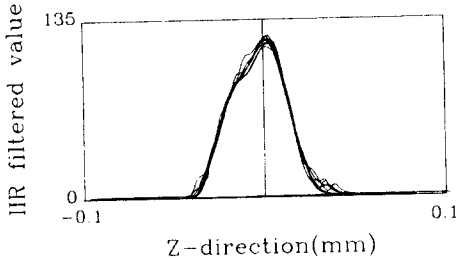


Fig. 2 Criterion evaluation on several operators



(a) Original function value using Laplacian operator



(b) IIR filtering of (a) with order 3 and coef. $a=[0.0, 0.333, 0.0]$, $b=[0.1667, 0.5, 0.5, 0.1667]$

Fig. 3 Repeatability performance of Laplacian operator and its LPF output

이런 고주파 성분을 제거하기 위한 이산저역필터(digital LPF)를 설계하였다. 이산저역필터에서 IIR(infinite impulse response)필터의 일반적인 식은 다음과 같다.

$$y_n = \sum_{j=0}^M b_j x_{n-1} - \sum_{j=1}^M a_j y_{n-1} \quad (6)$$

Fig. 3(b)에 차수(order)를 3으로 했을 때 IIR 필터의 성능을 보여주고 있다. 필터를 사용했을 때 기준함수의 고주파 성분이 거의 제거됨을 볼 수 있다.

3.2 1차원 최적 추적 알고리즘

임의의 함수가 단조 증가, 감소하고 피크가 하나 존재할 경우 1차원 최적서치 알고리즘(one dimensional optimal search algorithm)을 적용하여 이 곡선의 피크를 찾을 수 있다. 1차원 최적 서치 알고리즘은 스텝크기와 서치방향을 결정하는 것이 중요하다. 등간격서치(equal interval search), 황금비서치(golden section search), 다항식보간법(polynomial interpolation) 등은 이 문제를 해결할 수 있는 잘 알려진 방법이다.⁽¹³⁾

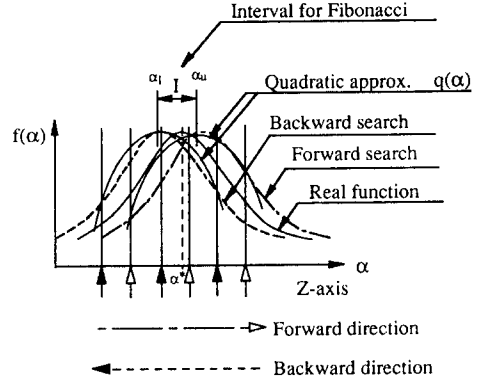


Fig. 4 The searching procedure of the Hybrid method

이 방법들을 본 시스템에 적용한 결과 등 간격서치 방법은 초기의 스텝간격 δ 를 시행착오적으로 최적효율을 갖도록 결정해야 하므로 적합하지 않고, 황금비 서치방법은 최고점을 정확하게 찾지만 부분 최고점(local maximum)에 수렴하는 경우가 있으며, 다항식보간법은 최고점을 빠르고 안정되게 찾으나 정확성이 떨어지는 단점이 있음을 알 수 있다. 따라서 안정되고, 정확한 수렴을 얻기 위해 복합형태(hybrid)의 새로운 알고리즘을 개발하였다.

복합형은 황금비서치와 다항식보간법을 혼합한 형태로 전진방향(forward direction)과 후진방향(backward direction)으로 각각 다항식보간법에 의해 근사 최고점을 찾은 후에 두 최고점 사이를 황금비서치를 이용하여 최종적인 최고점을 찾는 방법이다. Fig. 4에 복합형 방법의 순서도를 보여 주고 있다.

다항식 보간법은 2차식 형태로 단순화하여 얻을 수 있으며, $q(\alpha) = a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2$ 로 표현할 수 있다. 여기서, a_0, a_1, a_2 는 미지수인데, $f(\alpha)$ 상의 임의의 세 점은 $q(\alpha)$ 에서도 동일한 점이 되므로 $q(\alpha)$ 에 대한 3개의 수식을 얻을 수 있고 따라서 미지수를 구할 수 있다. 또한 2차 곡선 $q(\alpha)$ 의 최대점 $\bar{\alpha}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\alpha} = -\frac{1}{2a_2}a_1 \text{ if } \frac{d^2q}{d\alpha^2} = 2a_2 < 0 \quad (7)$$

황금비 서치방법으로 최종적인 최고점을 찾는 방법은 두 근사 최고점 사이를 불확정구간(the interval of uncertainty)으로 정하고 $I = \alpha_n - \alpha_1$ 이라 하면, 이 구간 내에서 임의의 두 점(α_a, α_b)을

선택하여 황금비로 분할하여 $a_0 = a_1 + 0.3821$, $a_0 = a_1 + 0.6181$ 로 나타낼 수 있다. 나누어진 구간 중에 최고점이 존재하는 구간을 판정하고 불확정구간을 줄여 나감으로써 최고점을 찾을 수 있다.

4. 실험장치

본 시스템은 광학현미경, 조명장치, CCD 카메라, 영상처리장치, 서보모터 및 컨트롤장치, 측정장치, PC 등으로 구성되어 있다. Fig. 5에 실험 장치에 관한 개략도를 보여 주고 있다.

현미경에는 여러 개의 대물렌즈와 할로겐 램프가 부착되어 있으며, 카메라는 512×480 화소를 가지고 있고, 수평 수직크기는 $17 \mu\text{m}(\text{H}) \times 13 \mu\text{m}(\text{V})$ 이다. 서보모터의 제어는 컴퓨터에서 주는 위치 명령에 따라 엔코더(encoder) 신호로서 PI 제어를 수행하고 있다. 측정장치는 프로브(probe)식 리니어 스케일을 현미경의 X-Y 테이블에 설치하고 테이블이 움직이는 양을 이산표시기(digital display)를 통해 RS232C 통신으로 컴퓨터에 입력된다. 공구는 현미경의 X-Y 테이블 위에 놓여지고, 테이블은 서보모터에 의해 Z축 방향으로 움직일 수 있다. 조명으로는 할로겐 램프를 사용하고 있으며, 하단에서 빛을 비추는 것과 같은 효과를 얻기 위하여 공구의 아래에 반사거울을 사용하였다. 조준된 빛은 공구 상면에 수직으로 조명 되며 이 빛의 밝기는 스위치로 조절이 가능하다. 공구의 영상은 CCD 카메라를 통해 프레임그라버(frame grab-

ber)에 의해 256 밝기 등급으로 컴퓨터에 저장되며 이 영상을 컴퓨터로 분석하게 된다.

시스템이 갖는 분해능은 다음과 같다.

(1) 서보 시스템에 의한 테이블의 이동 분해능
서보모터는 2000 pulse/rev의 엔코더 신호를 갖고 있다. 이는 100 : 1의 하모닉 드라이브에 연결되어 있으며, X-Y 테이블의 리드(lead)는 7.4 mm/rev이다. 따라서 테이블 이동의 분해능은 $0.037 \mu\text{m}/\text{pulse}$ 이다.

(2) 광학계의 분해능

현미경의 대물렌즈를 통하여 얻어지는 영상의 분해능은 사용하는 조명광원의 파장에 비례하고 렌즈의 집광능력을 나타내는 NA(numerical aperture) 값에 반비례하며 다음의 식과 같다.⁽¹⁴⁾

$$\text{Resolution} = 0.6 \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (8)$$

본 실험에 사용된 대물렌즈에 대한 NA 값은 0.2이고, 광원으로 할로겐 램프를 사용하였는데 백색광의 경우 평균 파장을 560 nm로 생각할 때 분해능은 $1.68 \mu\text{m}$ 이다.

5. 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 공구는 P20 초경공구로서 칩브레이커가 없으며, SM45C 재료를 이용하여 적절하게 크레이터 마멸을 발생시켰다.

Fig. 6에 일련의 윤곽 검출결과를 보여주고 있다. (a), (c)는 원 화상과 축소된 화상을 보여주고 있으며, (b), (d)는 축소된 화상의 윤곽과 이를 앞서 설명한 팽창(dilation) 알고리즘에 의해 최종적인 윤곽을 찾은 결과를 보여 주고 있다. 영상을 팽창하는 기준은 원래 영상의 외곽경계와 일치할 때 팽창을 멈추게 하였다. 영상에 많은 노이즈가 존재함에도 윤곽을 효과적으로 검출할 수 있었고, 영상을 병합함으로써 인해 영상처리속도가 빨라졌으며, 최종적으로 찾은 윤곽의 형태는 실제와 영상과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7에 일차원 최적 추적 알고리즘들의 수렴성에 대한 실험결과를 보여 주고 있다. 다항식 보간법이 7스텝 만에 수렴되어 그 중 가장 빠르게 찾으며, 본 시스템에서 제안한 복합형(hybrid) 알고리즘이 12스텝으로 중간 정도의 수렴 속도를 갖고 Fibonacci 방법이 21스텝으로 가장 늦게 수렴됨을 볼 수 있다. Table 1에는 연삭된 표면을 x, y 방향

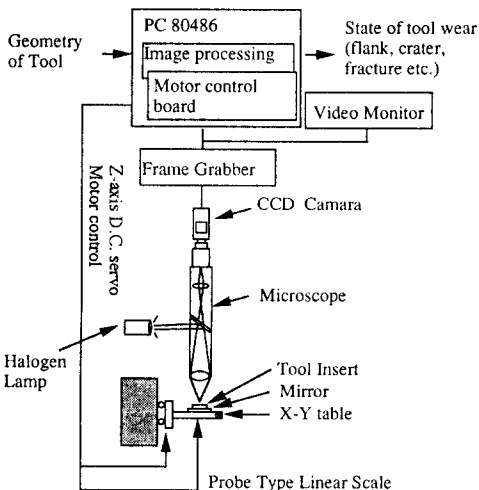


Fig. 5 Experimental equipment

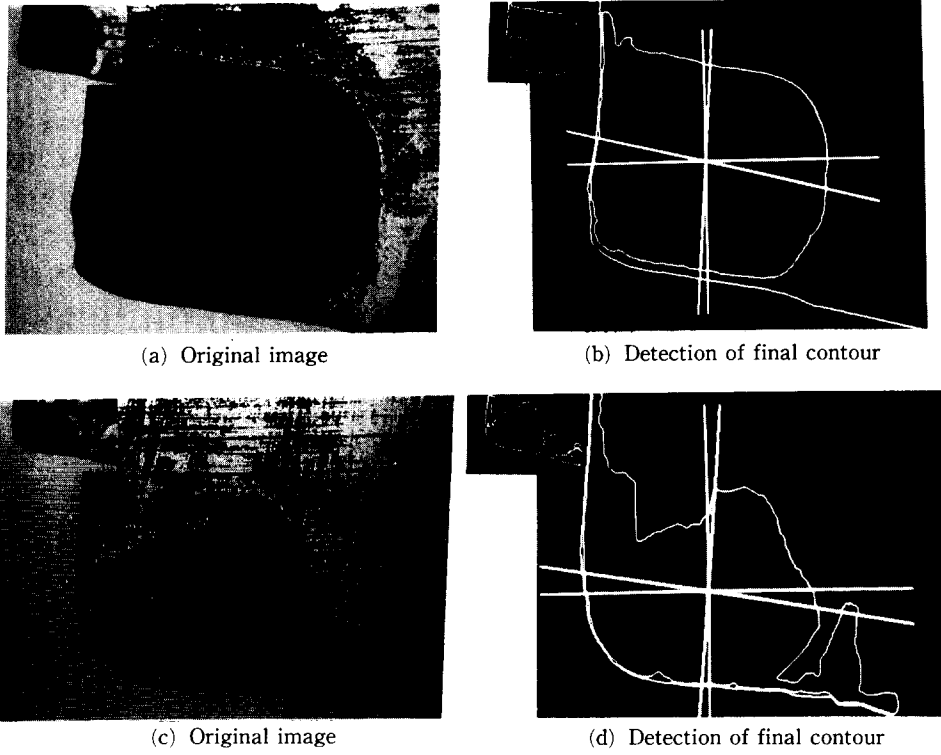


Fig. 6 Results of test for crater wear

으로 잘게 나누어 400 곳 이상 측정 한 실험결과를 보여 주고 있다. 복합형 방법이 편차 1.8, 최대차가 9.1 mm로 가장 좋은 성능을 보이고 있다.

자동초점장치를 이용한 크레이터 마멸의 깊이를 측정하기 위하여, 먼저 공구 상면에 초점을 맞추고 다시 크레이터 마멸 부위에 초점을 맞추므로써 그 때까지 테이블의 이동된 Z 값을 측정하여 마멸된 깊이를 구할 수 있다. 크레이터 마멸 부위로는 검출된 크레이터 윤곽으로부터 면적중심을 구하고, 그 점을 지나면서 주절삭날과 평행한 직선을 구하

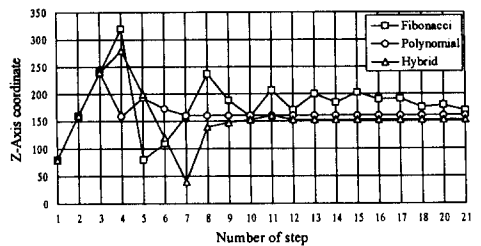


Fig. 7 The convergency performance of search methods

Table 1 The results of the accuracy test of the search methods

		Fibonacci	Polynomial	Hybrid
Convergency		21 steps	7 steps	12 steps
Accuracy	-s.d.of 418 points	3.1	4.7	1.8
	-Maximum difference	16.4 μm	57.1 μm	9.1 μm

Table 2 Measured values of the maximum

No. of test	Wear 1	Wear 2
1	209.0	44.9
2	208.2	46.3
3	209.7	51.2
4	216.9	58.7
5	209.2	52.7
6	208.8	48.4
7	207.7	57.0
8	210.7	54.8
9	210.9	50.5
10	216.4	54.5
11	212.9	60.9
12	216.9	46.2
13	211.6	45.5
14	208.2	53.7
15	207.4	47.3
16	215.3	51.7
17	209.6	49.6
18	213.8	51.9
19	216.0	58.2
20	208.8	52.4
Mean & Deviation	211.4±1.84	51.82±1.81

여 (Fig. 6의 (b), (d)), 이 직선상의 일정한 구간을 측정하였다. 실험에 소요된 시간은 486 DX-33 컴퓨터로 한번 측정하는데 약 1분이었으며, Table 2에 Fig. 6에서 보여준 공구의 크레이터 깊이를 20번 반복하여 측정된 결과를 보여 주고 있다. 반복정밀도는 표준편차로 2 μm 이내이며, 평균값은 다이얼 인디케이터(dial indicator : 1 μm)로 측정된 결과, 즉 210 μm , 49 μm 와 유사함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 크레이터 마멸을 측정하기 위해 영상

처리기법 및 자동초점기법을 이용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

노이즈가 많은 영상의 윤곽을 검출하기 위해 영상합성 및 팽창에 의한 새로운 윤곽검출 알고리즘을 사용하였으며 그 결과 노이즈가 많은 경우에도 실제 형상과 잘 일치하는 윤곽을 구할 수 있었다.

크레이터 마멸의 최대깊이를 측정하기 위해 자동초점 알고리즘을 이용하였다. 기준함수로서는 Laplacian 연산자를 사용하였고 기준함수의 특성을 향상시키기 위하여 IIR 필터를 사용하였다. 그 결과 단조증가 감소 및 단일피크 특성을 가지는 함수를 얻을 수 있었다. 또한 서보모터로 X-Y 테이블을 초점이 맞는 위치까지 움직이게 하기 위하여 1차원 최적서치 알고리즘을 적용하였는데, 기존의 방법에서 보완된 새로운 복합형 알고리즘을 개발하였으며, 이 방법 통해 빠르고 정확하게 그리고 신뢰성 있게 초점 부위를 찾는 시스템을 구축할 수 있었다. 차후 성능이 향상된 컴퓨터를 이용하거나 알고리즘의 개선이 따른다면 시간이 더 감소될 수 있으리라 예상된다.

참고문헌

- (1) Dan Li and Mathew, J., 1990, "Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning - A Review," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, No. 4, pp. 579~598.
- (2) Shiraishi, M., 1988, "Scope of In-Process Measurement, Monitoring and Control Techniques in Machining Processes Part1:in-Process Techniques for Tools," *Precision Engineering*, 10(4), 179~189.
- (3) Meyer, R. N. and Wu, S. M., 1966, "Optical Contour Mapping of Cutting Tool Crater Wear," *Int. J. Mach. Tool Des.*, Vol. 6, pp. 153~170.
- (4) Kjeld Bruno Pedersen, 1990, "Wear Measurement of Cutting Tools by Computer Vision," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, No. 1, pp. 131~139.
- (5) Giusti, F., Santochi, M. and Tantussi, G., 1987, "On-Line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tools," *Annals of CIRP*, Vol. 36, pp. 41~44.
- (6) Maeda, Y., Uchida, H. and Yamamoto, A.,

- 1989, "Measurement of the Geometric Features of a Cutting Tool Edge with the Aid of a Digital Image Processing Technique," *Precision Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 165~171.
- (7) Dana H. Ballard and Christopher M. Brown, 1982, *Computer Vision*, Prentice-Hall, Inc.
- (8) Alberto Martelli, 1976, "An Application of Heuristic Search Methods to Edge and Contour Detection," *Communications of the ACM*, Feb. Vol. 19, No. 2, pp. 73~83.
- (9) Otsu, N., 1979, "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms," *IEEE Trans. System Man Cybernet.* 9, pp 62~66.
- (10) Nobuyuki Akiyama, Hiroshi Makihira and Toshihiko Nakata, 1993, "Analysis for Practical Use of Automatic Focusing Using Stripe Pattern Projection Technique," *Int. J. of JSPE*, 27(3), 229~234.
- (11) Eric Krotkov, 1987, "Focusing," *Int. J. of Computer Vision*, 1, pp. 223~237.
- (12) Shree K. Nayar and Yasuo Nakagawa, 1990, "Shape from Focus : an Effective Approach for Rough Surfaces," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, Vol. 1, pp. 218~225.
- (13) Jasbir S. Arora, 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc.
- (14) Max Born and Emil Wolf, 1983, "Principles of optics," *Pergamon Press*, 6th Ed. pp. 370~458.