

컴퓨터 비전을 이용한 연삭 솟돌의 마법 검출에 관한 연구 A Study on the Detection of Wheel Wear by Computer vision System

유은이	사승윤	김영일	유봉환
(송실태 원)	(송실태 원)	(부원전문대)	(송실태)
eun yi, Yu	seung yoon, Sa	young il, Kim	bong hwan, Ryu

Abstract

Morden industrial society pursues unmanned system and automation of manufacturing process. Abreast with this tendensy, prodution of goods which requires advaned accuracy is increasing as well. According to this, the work sensing time of dressing by monitoring and diagnosis the condition of grinding, which is the representative way in accurate manufacturing, is a important work to prevent serios damages which affect grinding process or products by wearing grinding wheel. Computer vision sytem is composed, so that grinding wheel surface was acquired by CCD camera and the change of cutting edge ratio was measured. Then we used autometric threshodling technique from histogram as a way of deviding cutting edge which is used in manufacturing from the other parts. As a result, we are trying to approach unmanned system and automation by deciding more accurate time of dressing and by visualizing behavior of grinding wheel by making use of computer vision.

key word : grinding wheel, dressing, computer vision, automatic thresholding

1. 서 론

현대 산업사회는 점차로 제조공정의 무인화, 자동화를 추구해 가고 있으며, 이러한 추세에 발맞추어 고도의 정밀도를 요구하는 제품의 생산도 늘어가고 있는 실정이다. 정밀가공 방법들은 주로 입자(grain)에 의한 가공이며 그 대표적인 가공은 연삭 가공으로 근래에 그 사용범위가 확대되고 있다.⁽¹¹⁾

연삭가공은 선반이나 밀링 등의 경우와 달리 절삭날의 확실한 모양을 알 수가 없고, 그 크기도 매우 작아서, 주로 숙련된 작업자의 경험에 의존해서 그 이상상태를 판단해 왔다.⁽¹⁰⁾ 이상 상태 중 마멸이나 눈막힘 현상은 제품의 정밀도를 저하시키고, 연삭 버어닝(burning)이나 연삭 균열(crack)까지도 초래하여 제품에 심각한 피해를 입힐 수도 있고 연삭기 자체에 무리한 부하를 주어 작업이 위험하게 될 수도 있다.⁽⁹⁾ 이러한 상황아래 솟돌의 연삭상태를 시간의 경과에 따라 감시하고 진단하여 알맞은 드레싱(dressing) 시기를 인지하는 작업은 정밀가공에 있어서 중요할 작업이라고 할 수 있다.

연삭상태를 감시하는 기술은 최근 들어 매우 활발하게 연구되고 있는데, 그 방법에는 연삭력의 변화를 이용한 방법⁽¹⁾, 가공물의 표면거칠기의 변화를 이용한 방법⁽²⁾, 침의 모양과 크기의 변화를 이용한 방법⁽³⁾, 음압의 주파수를 이용한 방법⁽⁴⁾, 연삭열을 측정하는 방법⁽⁵⁾, 광학을

이용한 방법⁽¹⁾⁽²⁾등이 있다. 그러나, 이러한 방법들은 주변환경에 민감하고 경제성 또한 떨어지므로 이에 대한 해결책을 제시하고자 컴퓨터 비전 시스템(computer vision system)을 이용한 방법들을 제안하였다.⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾ 이 방법은 주변환경을 인간의 눈과같이 인지하고 판단할 뿐만 아니라 정량적인 해석이 가능하여 물체와 접촉하지 않고도 정확하게 실시간(real time)으로 측정할 수 있으며, 알고리즘의 변화에 따라 융통성 있게 적용할 수가 있다.

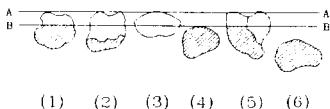
그러므로 본 연구의 목적은 컴퓨터 비전 시스템을 이용하여 연삭의 수행 과정을 자시화하고 좀 더 정확하고 정량적인 마모량을 검출할 수 있는 알고리즘을 개발하여 실제 작업 현장에서도 활용 가능케 하는 것이라고 할 수 있다. 또한 이 기법을 이용하여 앞으로의 무인화, 자동화에 좀 더 접근하고자 한다.

2. 과학이론

2-1 역삼가공에 있어서 숫돌의 거동과 수명

연삭가공에 있어서 그 입자의 거동을 살펴보면, 입자의 마멸(wear), 파괴(breakage), 탈락(dig-out), 생성(newly appeared), 부분파괴(partial breakage)의 과정이 반복되면서 일어나며, 이 과정이 진행되면서 서서히 그 수명이 다하게 된다. Fig. 2-1 은 위의 과정을 나타내

고 있다.



(1) : wear (4) : newly appeared
 (2) : breakage (5) : partial breakage
 (3) : dig-out (6) : no cutting edge

Fig. 2-1 Changing aspects of cutting edges

2-1-2 숫돌의 수명

일반적인 연삭에 있어서 연삭 숫돌이 절삭성을 잃는 테에는 마멸이나 눈막힘에 의한 두 가지로 대별할 수가 있는데 이 현상으로 인해서 베어닝, 균열, 채터등의 여러 가지 이상 상태를 유발하게 되는 것이다. 이러한 마멸과 눈막힘 현상은 연삭 숫돌의 절삭날 분포를 조사함으로써 판단할 수가 있는데 이 분포를 조사하는 방법 중 절삭날 면적율을 이용한 방법은 다음과 같다.

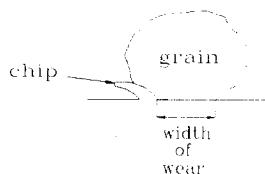


Fig. 2-2 Grinding with work grain

연삭 지석의 절삭 날끝은 연삭이 진행될수록 Fig. 2-2에서와 같이 점차 평坦하게 마모하여 이 면적이 점차 증가하게 된다.

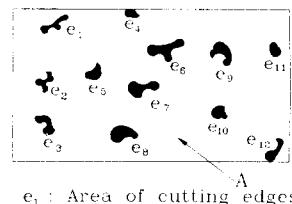


Fig. 2-3 Cutting edge area of working surface

즉, Fig. 2-3과 같은 숫돌 작업면 전개도에 있어서 일정한 면적 A에 대해서 그 면적내에 있는 절삭날 마모면적 e_1, e_2, \dots, e_n 의 총합, $\sum e_n$ 의 비로서 절삭날 면적률 α 를 정의하는데 이 값이 점차 증가하다가 감소

로 돌아서는 지점이 마멸지점이 되는 것이다. 이 지점에서는 연삭저항이 급증하여 연삭 베어닝이나 채터를 유발하게 되어 연삭을 계속 수행할 수 없게 된다.

$$\alpha = \frac{\sum e_n}{A} \quad (2.1)$$

2-2 쓰레쉬홀딩 기법(Threshold Technique)

영상으로부터 어떤 정보를 얻기 위하여 영상을 배경(background)이 되는 부분과 물체(object) 부분으로 분리해야 할 필요가 있다. 이렇게 영상을 두 영역으로 분리하는 작업을 쓰레쉬홀딩(Thresholding)이라 한다.

이상적인 경우에, 영상의 히스토그램(histogram)은 배경과 물체로 표현되는 두 부분의 피크(peak) 사이에 깊고 날카로운 골을 가지고 있다. 이러한 경우 이 골의 가장 낮은 부분을 쓰레쉬홀드 지점으로 선정한다. 그러나, 대부분의 일반적인 영상에서는 잡음(noise) 때문에 히스토그램의 골이 평평하거나 넓게 펼쳐지는 등, 불분명해지기 때문에 가장 낮은 부분을 찾기란 매우 어렵다. 그러므로, 다음과 같은 방법으로 쓰레쉬홀딩 지점을 선정한다.

L 개의 명암도(gray level)로 표현된 영상에서, 명암도 i에서의 화소(pixel)의 수를 n_i 라 하면 모든 화소의 수 N은 $N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_L$ 로 표기할 수 있다. 그러므로 명암도의 히스토그램은 다음과 같은 확률 분포로 나타내어진다.

$$p_i = n_i / N, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (2.2)$$

여기서 화소가 두 부분으로 구별된다고 가정하고 그 두 부분을 물체와 배경이라 하고, 각각을 C_0, C_1 이라 하면, C_0 은 $[1, \dots, k]$ 의 명암도로 나타내어지고, C_1 은 $[k+1, \dots, L]$ 의 명암도를 가지고 있다. 이 두 영역의 확률 분포와 평균 명암도를 각각 나타내 보면 다음과 같다.

$$\omega_0 = \Pr(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (2.3)$$

$$\omega_1 = \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (2.4)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k i \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k i p_i / \omega_0 = \mu(k) / \omega(k) \quad (2.5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L i \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^L i p_i / \omega_1 = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (2.6)$$

여기서,

$$\omega(k) = \sum_{i=1}^k i p_i, \quad \mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i, \quad \mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L i p_i$$

이때, 이것은 각각 k 명암도에서의 0차와 1차 누적 모우멘트와 원영상의 전체 평균 명암도를 나타낸다. 여기서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu_T, \quad \omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (2.7)$$

다시 각 영역의 분산을 구해보면,

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 \Pr(i | C_0) = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 p_i / \omega_0 \quad (2.8)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 p_i / \omega_1 \quad (2.9)$$

이 되고, 이것은 2차 누적 모우멘트이다.

쓰레쉬홀딩 지점을 k 로 한 영상이 좋은지를 평가하기 위해서 다음과 같은 구별 조건이 있다.

$$\lambda = \sigma_B^2 / \sigma_W^2, \quad \kappa = \sigma_T^2 / \sigma_W^2, \quad \eta = \sigma_B^2 / \sigma_T^2 \quad (2.10)$$

여기서

$$\sigma_W^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_B^2 &= \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 \\ &= \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

이 되고 (2.7)식으로 부터

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i \quad (2.13)$$

위 식은 각각 물체의 영역과 배경 영역 자신의 내부 분산, 물체의 영역과 배경 영역, 두 영역 사이의 분산, 그리고 전체 명암도의 분산을 나타낸다. 여기서 최적의 쓰레쉬홀딩 지점 k 는 (2.10)식이 최대가 되는 점이 된다. 결국 영역 내부에서의 분산은 최소가 되고 영역끼리의 분산은 최대가 되는 지점을 찾는 것이다. (2.10)식 중 가장 간단한 식은 η 를 구하는 것이다. σ_T^2 는 고정된 값이므로 결국 σ_B^2 이 최대가 되는 k 가 최적의 쓰레쉬홀딩 지점이 되는 것이다.

$$\eta(k) = \sigma_B^2(k) / \sigma_T^2 \quad (2.14)$$

$$\sigma_B^2 = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (2.15)$$

최적의 쓰레쉬홀딩 지점 k^* 는

$$\sigma_B^2(k^*) = \max_{i=k-L}^L \sigma_B^2(k) \quad (2.16)$$

으로 정의 될 수가 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1 실험장치

연삭 솟돌의 표면을 측정하기 위한 시스템을 아래의 Fig. 3-1 과 같이 구성하였다.

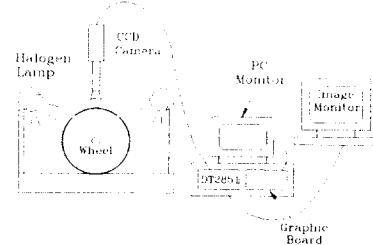


Fig. 3-1 Schematic diagram of image acquistion system

Fig. 3-1에서 보는 바와 같이 WA80KmV 솟돌을 광학 테이블 위에 고정시킨 후 솟돌의 중심축과 수직으로 CCD 카메라를 설치하여 솟돌의 표면을 획득할 수 있도록 한다. 이 때, 솟돌 표면의 법선 방향과 일치하도록 CCD 카메라를 고정시켜서, 전체 화면에서 고른 촬영분포를 갖도록 한다.

또한, 카메라와 렌즈의 사이에 총 183mm의 경통을 제작하여 설치함으로써 고배율의 영상을 낮은 배율의 렌즈로도 얻을 수 있도록 하였다. 이 때, 배율은 표준 자의 영상을 받아서 그 픽셀수와의 비례식을 이용하여 찾았으나였다.

총점거리가 매우 짧아지기 때문에 CCD 카메라 센서로의 빛의 전송량이 작아진다. 그러므로, 일반 자연광이나 형광등으로보다 조명의 강도가 강한 할로겐 램프(halogen lamp)를 채택하여 솟돌의 양쪽에서 비추도록 하였다. 조명의 각도는 두 조명을 연결한 선으로 부터 서로 반대 방향으로 약 15°씩 비틀어서 한 곳으로만 조명이 집중되는 현상을 상쇄시킬 수 있도록 하였다.

3-2 실험 방법

본 연구에서는 솟돌표면의 입자가 가공이 진행됨에 따라 어떻게 변화하는지 알아보기 위하여 WA80KmV 인 가공하지 않은 새 솟돌의 영상을 먼저 획득한 다음 가로 × 세로가 302×32.5(mm)인 SM45C 시험편을 절삭깊이 매 10μm 씩을 주면서 5회씩 가공하고 그 때마다의 영상을 획득하여 그 입자의 절삭날 면적률을 측정한다. 이 때 솟돌표면의 임의의 10군데를 측정하여 이 평균값을 구한다. 이와 동시에 5회 가공시마다 공작물의 표면거칠기를 측정식 표면거칠기 측정기(roughness tester)로 임의의 5곳을 측정하여 최대 높이 거칠기와 중심선 평균 거칠기를 구하여 그 평균값의 변화율을 구하고 그 변화율과 면적률과의 관계를 비교, 검증한다.

3-3 측정 알고리즘

Fig. 3-3은 절삭날 면적율을 측정하기 위한 알고리즘을 나타내는 흐름도이다.

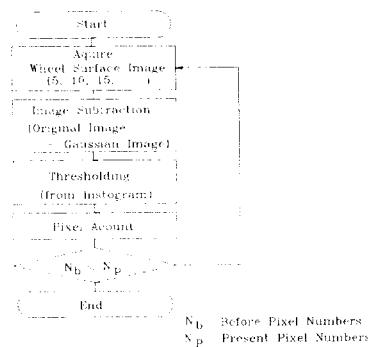


Fig. 3-3. Flowchart showing measurement process of wheel wear

앞서 언급한 영상 획득 장치는 촬영거리가 매우 짧기 때문에 할로겐 램프의 강한 조명을 가하면 비록 빛의 전송량은 충분하겠지만 고른 조명의 각도를 아무리 조정한다 하더라도 고른 조명 분포를 얻기는 힘들다. 이런 경우 보통 촬영 심도(depth of field)가 매우 짧고, 그 폭도 작아져서 영상의 중심에 조명의 집중 현상이 발생한다. 이러한 집중 현상이 발생 한 경우, 죄적의 자동 이진화 기법을 사용하면 가운데 집중된 빛과 바깥쪽의 빛이 덜 들어간 부분으로 이진화가 이루어 진다. 이러한 현상을 막기 위하여 영상의 중심에 집중된 빛의 강도를 낮춰 줄 필요가 있다. 이러한 처리를 위하여 이차원 가우시안 분포(gaussian distribution)를 이루고 있는 영상을 임의로 제작하여 원 영상에서 제작한 영상을 빼는 작업을 하면 집중 현상을 많이 완화시킬 수가 있다. 이차원 가우시안 분포를 가지는 영상을 제작하기 위해서 (3-1)식을 적용하여 명암도의 분포를 Fig. 3-4와 같이 만들었다.

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-\mu_x)^2 + (y-\mu_y)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.1)$$

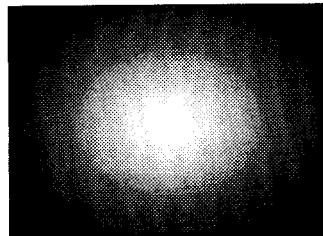


Fig. 3-4 The image of gaussian distribution

이렇게 얻은 영상을 이용하여 앞에서 언급한 영상의

히스토그램으로부터 얻은 누적 모우멘트를 이용하여 죄적의 이진화 영상을 만든다. 이 때 영상의 흰 부분(명암도가 255인 부분)이 연삭입자가 된다. 그러므로, 전체 화소수에 대한 흰 부분의 화소의 비를 계산하면 이것이 절삭날 면적률이 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1 가우시안 영상의 처리 결과

Fig. 4-1은 가공을 전혀 하지 않은 숫돌의 표면을 아무런 처리도 하지 않은 상태에서 얻은 영상이다. 이 영상에서 앞서 언급한 Fig. 3-4의 가우시안 영상을 빼주면 Fig. 4-2의 그림과 같이 가운데 부분의 빛이 많이 줄어들면서 전체적으로 하얗게 빛나던 잡음이 많이 사라지고 콘트라스트는 다소 낮아져서 영상의 평활화(smoothing) 효과를 볼 수가 있다.

Fig. 4-3과 Fig. 4-4는 각각 마모된 숫돌의 원 영상과 처리된 영상을 나타내고 있다.

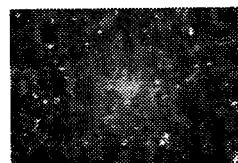


Fig. 4-1 Original image before grinding



Fig. 4-2 Gaussian processed image before grinding

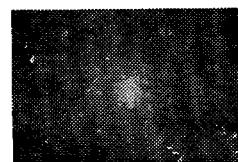


Fig. 4-3 Original image of worn wheel

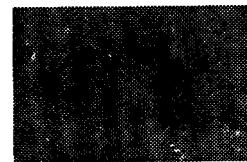


Fig. 4-4 Gaussian processed image of worn wheel

4-2 이진화 영상의 처리 결과

실제로 숫돌의 절삭날 면적율을 계산하기 위해서는 영상을 이진화 처리를 하여 연삭에 참여하는 숫돌의 입자와 그 외 부분과를 나누어야 한다. Fig. 4-5는 가공을 하기 전의 숫돌의 영상을 이진화 처리한 것이다. 또한, Fig. 4-6부터 Fig. 4-9는 각각 5회, 10회, 20회, 30회 가공 후의 숫돌 표면의 이진화 영상이다. 이 그림에서 나타나듯이 영상에서 명암도가 255를 가지는 흰색의 화소수가 점차 증가하다가 마침 현상이 보이는 20회 가공 시부터는 그 추세가 감소로 돌아서는 것을 볼 수가 있다.



Fig. 4-5 Thresholding image of wheel before grinding



Fig. 4-6 Thresholding image of wheel at 5 times grinding



Fig. 4-7 Thresholding image of wheel at 10 times grinding

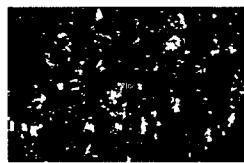


Fig. 4-8 Thresholding image of wheel at 20 times grinding

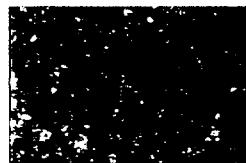


Fig. 4-9 Thresholding image of worn wheel

이러한 현상은 처음에는 절삭날의 마모가 증가하면서 절삭날의 면적이 점점 증가하나 점차 눈막힘과 함께 가공에 참가하는 절삭날이 줄어들게 되었다는 의미한다. 실제로 그 값을 알아보면, 새 숫돌의 경우에 평암도가 255인 화소의 수는 34897개이며 전체 면적에 대한 비율은 약 14.19% 를 차지하고 있는 것을 알 수가 있다. 또한, 5회 가공한 숫돌의 경우 그 화소의 수가 증가하여 37619개, 15.3% 를 보이다가 마멸 현상이 나타나는 20회 가공한 숫돌의 경우에는 평암도 255인 화소의 수가 14921, 6.07% 로 감소하였고, 30회의 가공을 마치고 거의 마모가 다 된 숫돌의 화소의 수는 11416, 4.65% 로 감소하였다. 다음의 Fig. 4-10은 위의 결과를 잘 나타내고 있다.

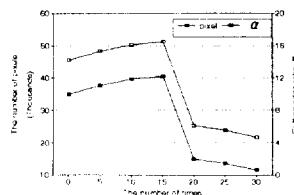


Fig. 4-10 Variation of white pixel and cutting edge ratio

4-3 표면거칠기 측정 결과

Fig. 4-11은 최대 높이 거칠기가 $3.10 \mu\text{m}$ 이고 중심선 평균거칠기가 $9.9 \mu\text{m}$ 인 표준시편의 표면거칠기의 형상을 기록계로 받은 것이다. 이와 비교하여 Fig. 4-12부터 Fig. 4-16까지는 각각 초기 가공하지 않은 상태의 새 숫돌과 5번 가공시, 10번 가공시, 20번 가공시 마지막으로 30번 가공시의 표면거칠기의 모습을 보여주고 있다.

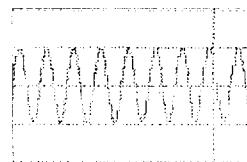


Fig. 4-11 Profile of standard specimen



Fig. 4-12 Profile of workpiece at before grinding

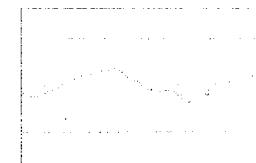


Fig. 4-13 Profile of workpiece at 5 times grinding

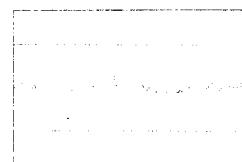


Fig. 4-14 Profile of workpiece at 10 times grinding



Fig. 4-15 Profile of workpiece at 20 times grinding



Fig. 4-16 Profile of workpiece at 30 times grinding

표면거칠기의 변화를 살펴보면 초기 공작물에서는 중심선 평균 거칠기가 $8.21 \mu\text{m}$ 에서 5회 가공시 $0.84 \mu\text{m}$, 10회 가공시 $0.30 \mu\text{m}$ 로 점차 향상되다가, 20번 가공시에는 $1.15 \mu\text{m}$ 로 점차 나빠지기 시작하여 30회에서는 $4.84 \mu\text{m}$ 로 더욱 심하게 나빠지는 것을 알 수가 있다. 이는 20회부터 연삭숫돌의 마멸로 인하여 가공에 점차 장애가 일어남을 알 수가 있다. Fig. 4-17은 위와 같이 가공이 진행됨에 따른 가공물의 표면 거칠기 변화를 나타내고 있다.

Fig. 4-18은 절삭날 면적율과 표면 거칠기 사이의 관

계를 나타내고 있다. 두 변화량 모두 20회 가공에서에서 변화의 판도가 바뀌게 되는 것을 볼 수가 있다.

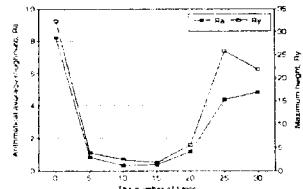


Fig. 4-17 Variation of surface roughness

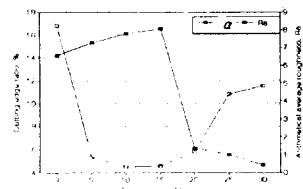


Fig. 4-18 Relation between cutting edge ratio and roughness

4-4 고찰

본 연구에서 얻고자 한 것은 저렴하고 효율적인 방법으로 공구의 마모를 측정하여 앞으로의 온-라인 검출에 적용 가능하도록 하자는데 있다. 본 논문에서는 값비싼 고배율의 렌즈 대신에 경통의 길이를 늘려서 원하는 배율을 얻을 수 있었다. 그러나 경통이 길어진 것으로 인한 빛의 집중 현상이 발생하였다. 이로 인한 빛의 집중 현상은 조명의 각도 조절과 간단한 기법인 가우시안 처리를 이용하여 제거시키면서 동시에 평활화의 효과도 얻어 산화질의 반사 등으로 인한 잡음도 어느정도 줄일 수 있도록 하였다. 또한 히스토그램을 이용한 역치 선정 방법을 사용하기 때문에 적용 변수가 0차와 1차 누적 모우멘트로 매우 적어 자동 이진화 영상을 빠르고 효율적으로 만들어 정량적인 절삭날의 비율을 얻을 수가 있었다.

또한 절삭날 분포율의 측정시 일정한 부분만을 측정하지 않고 임의로 10 군데를 선정하여 평균하여 구하였음에도 불구하고 그 경향이 잘 나타나므로 앞으로의 온-라인 측정시 정지시키지 않고도 임의로 측정하여 그 마모를 알아내는데 적용할 수 있음이 증명되었다.

5. 결 론

본 연구는 컴퓨터 비전 시스템을 이용하여 연삭의 절삭날 면적율을 측정, 그 드레싱 시기를 판정하기 위한

것이며, 온-라인 기술에의 기초가 되는 단계로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭날의 면적율을 측정할 수 있는 컴퓨터 비전 시스템을 구성하여 그 드레싱 시기를 판단할 수 있었다.
2. 히스토그램을 이용한 누적모우멘트를 구하여 최적의 역치를 자동으로 구할 수 있었다.
3. 임의의 지점을 여러군데 측정하여 그 평균을 구함으로써, 스트로브 조명 등을 이용하여 한 회전당 몇 번의 영상 획득으로 온-라인 상태에서 절삭날 면적율을 구하여 그 평균값으로 마모의 정도를 파악할 수 있는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. H.Tsuwa, "An Investigation of Grinding Wheel Cutting Edges", Transaction of ASME, pp.371~382, 1964
2. H.Nakazono, H.Yasui, M.Kurusu, and A.Hosokawa, "Studies on Dressing of the Resin-Bond CBN Grinding Wheel(1st Report)", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol.24, No.1, pp.51~56, 1990.
3. R.P.Lindsay and R.S.Hahn, "On the Surface Finish-Metal Relationship in Precision Grinding", Annals of the CIRP, 1973.
4. N.S.Eiss, "Fracture of Abrasive Grain in Grinding", Transaction of the ASME, pp.463~470, 1967.
5. B.Rajmohan and V.Radhakarishan, "On the Possibility of Process Monitoring in Grinding by Spark Intensity Measurements", Transaction of ASME, Vol.116, pp.124~129, 1994.
6. N.Otsu, "A Thresholding Selection Method from Gray-Level Histogram", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-9, No.1, pp.62~66, 1979.
7. C.Rubenstein, "The Mechanics of Grinding", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.12, pp.127~139, 1972.
8. E.Urai, T.Obikawa, and S.Hagiwara, "Study on Edge Fracture of Abrasive Grain during Grinding with Applying the Theory of Marcov Process", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol.22, No.2, pp.95~101, 1988
9. 윤문철, "연삭과정의 ARMA 모델링과 시스템 진단에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1990.
10. 강신철, "컴퓨터 비전을 이용한 다이아몬드 코어드릴의 마모 검출 기법에 관한 연구", 숭실대학교 공학석사학위 논문, 1994.