

정면밀링 가공시 실시간 공구파손검출에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Real-Time Tool Breakage Detection in the Face Milling

김 영 일
(두원전문대)

young il, Kim

사 승 윤
(승실대 원)

seung yoon, Sa

최 영 규
(승실대 원)

young kyu, Choi, bong hwan, Ryu

Abstract

The modern CNC machine require increasingly an exact monitoring and control of cutting process. They are to make final target which construct full automation factories as unmanned system. In this study, we decided that we develop new technique to monitor and detect tool breakage on the machining operation using face milling machine with multi-point throwaway tips. The technology in which the tool is illuminated by an beam of Laser is used by image of tool fracture through CCD camera.

key word : SNR(신호대 잡음비), MSE(평균차승오차),
Real-time monitoring(실시간 감시), Non-contact
method(비접촉방식)

1. 서 론

최근의 무인화공장을 향한 유연생산시스템(FMS)과 컴퓨터응용 기술의 확대발전에 따른 컴퓨터통합생산(CIM: computer integrated manufacturing)의 추구는 반도체기술의 진보와 컴퓨터기술의 전천과 함께 급성장하여 생산시스템에 지능을 부여한 이른바 지적생산시스템(intelligence manufacturing system)의 도래를 예고하고 있다. 그리고 이들의 고도로 자동화된 생산시스템에서 기본적으로 추구하고 있는 방향은 고품질의 확보와 생산에 관련된 모든 정보를 네트워크로 상호연결하여 시스템전체를 하나로 통합(system integration)화 하려는데 목표를 두고 있다. 특히 생산가공시스템 분야에서는 가공정보를 통합하여 절삭 및 가공프로세스의 상태를 종합적으로 인식하고 감시할 목적으로 신경회로망(neural network)등과 같은 지식베이스에 바탕을 둔 센서통합(sensor fusion)기술을 이용하여 실시간 프로세스 감시(real-time process monitoring)방법을 개발하기 위한 연구가 미국을 비롯한 선진공업국에서 활발히 진행되고 있다. 공구파손은 공작물의 손상(damage)과 직접

적인 관계가 있으며, 공작기계에서 발생되는 다른 문제들과 전체 제조시스템에서 예측을 할 수 없는 다른 문제들의 발생으로 인하여 공구파손문제를 무인화 제조공정에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 최근 공구파손검출 문제는 많은 관심의 대상이 되고 있으며, 꾸준한 연구가 진행되고 있으나, 공구파손 검출은 종래의 공구마모의 검출기술과 비교하여 볼 때 이 분야의 연구가 다소 미진하다고 볼 수 있다. 공구파손 검출 및 예측기술이 어려운 근본적인 이유는 공구마모는 다소 판단할 수 있는 상황에서 점진적으로 일어나는데 비해, 공구파손은 갑작스럽게 발생하기 때문이다.

그래서 최근 이 분야에 대한 최첨단의 공구파손검출 및 예측기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^[1]. 절삭작업을 중단시키지 않고 공구의 마모 및 파손을 감시하는 기존의 방법으로는 광학을 이용한 방법^[2], 전기저항 등의 직접적인 측정방법과 절삭력, 주축모터의 전류^[3], 음향센서^[4], 진동 등을 이용하여 공구의 상태를 감시하는 간접적인 방법이 있다^[5]. 그리고 이들의 연구를 살펴보면 대부분이 선반과 같이 하나의 공구로 가공을 행하는 경우 공구는 정지되고 공작물이 회전하는 상태에서만 측정이 가능하다. 그리므로 밀링가공과같이 다인공구(multi-point-tool)를 가진 커터가 회전함에 따라 발생할 수 있는 문제는 선삭의 단인공구(single-point-tool)를 사용하는 경우와 비교해 볼 때 보다 복잡하고 또한 많은 동적인 문제를 가지고 있다.

이러한 필요성에 의하여 본 연구는 선삭가공시 공구마모 측정^[6] 및 밀링가공 공구 파손 검출에 관한 연구^[7]를 바탕으로하여 밀링 가공중 공구절삭날 파손 검출을 위한 적절한 계측시스템을 구성하고 이를 이용하여 공구절삭날파손으로 발생하는 여러 특징적인 변화에 대한 정보를 센서를 통하여 추출한다. 이를 기반으로하여 신뢰성있는 공구파손상태 검출알고리즘을 개발하고 나아가서 신용적인 밀링공구 파손 검출시스템을 구축하고자 한다.

2. 밀링 메카니즘(milling mechanism)

밀링공정의 해석은 비단 공구파손 검출 분야에서 뿐만이

컴퓨터 내의 리프레쉬 메모리에 일시 저장된 후 이미지 프로세싱을 처리하는 처리부로 구성되어 있다.

고안된 시스템의 핵심이 되는 부분만을 표시하면 Fig. 3.1에서와 같이 반사조명에 의한 회전하는 공구를 정지된 영상으로 계측할 수 있도록 설계·제작한 부분이다. 이는 비직주·광학적기법을 단속선식에 적용한 경우이다.

3.2 조명광학계(illumination optics)

비전시스템에 있어서 조명장치는 중요한 역할을 한다. 기본적으로 특별한 조명이 없고 주변환경이 열악한 경우 연속적인 영상입력시 전체적인 광강도 분포가 급격한 변화를 나타내게 되므로 실시간 측정시 측정오류를 발생하게 된다. 필요하여 광원으로는 상대적으로 높은 강도분포를 가지는 레이저가 적당하다. 본 실험에서는 출력정격 15mW의 He-Ne laser(Model No. 05-LHR-151)를 광원으로 사용하여 조명장치를 구성하였다. 광원에 의한 잡음은 영상의 화질에 규칙적인 패턴을 형성할 수 있으므로 이를 제거하기 위하여 광원을 공간필터링 하여야 한다. 공간필터링은 적당한 크기의 핀홀(pin hole)로 처리할 수 있는데 핀홀의 직경이 클 경우 필터링 효과가 감소하고 작을 경우 광강도가 감소함으로 조명효과가 떨어지게 된다.

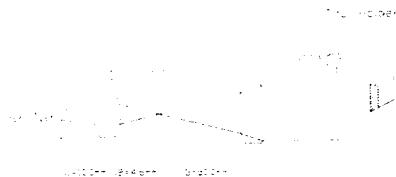


Fig. 3.3 Illumination optics

(L1 : Focusing lens L2 : Collimating lens)

S1 : Spatial filter($\phi 50 \mu m$)

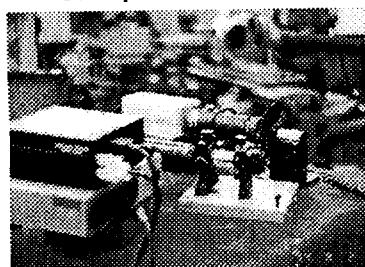


Fig. 3.4 Photo of illuminating and imaging optics

또한 공간필터링을 위한 집광렌즈는 촛점거리가 큰 경우 광학계의 정렬(alignment)이 쉽고 외부영향에 민감하지 않은 안정된 장치를 구성할 수 있으나 전체 조명부 광학계의 크기가 커지므로 실시간 파손 검출장치에서는 오히려 주변 장치와의 간섭으로 다루기가 어려운 단점이 있다. 집광렌

즈는 레이저 선단부로부터 약 10mm의 거리를 두고 설치할 경우 핀홀은 집광렌즈의 후단부 4.60mm에 위치하게 된다. 균일한 조명을 위한 평행광(collimated beam)은 감시 대상체의 크기가 약 20mm×20mm정도이므로 촛점거리 50mm, 렌즈직경 27mm의 단렌즈를 핀홀로부터 촛점거리만큼의 후단부에 설치하면 광원의 빔직경이 2.0mm일 경우 직경 21.7mm의 평행광을 얻을 수 있다. 조명광학계의 설계를 Fig. 3.3에 나타내었고, 집광렌즈, 핀홀, 평행광학계의 조립 형태를 Fig. 3.4에 보였다.

3.3 결상광학계 (Imaging optics)

레이저에 의해 조명된 인서트팁은 빛의 반사에 의해 CCD카메라가 장착된 결상광학계로 입사된다. 결상광학계의 설계시 고려사항은 물체의 크기와 CCD소자의 크기에 따른 배율을 결정하고 이에 따라 결상광학계의 렌즈를 선정한 후 정렬위치를 결정하도록 하면된다. 이때의 결상은 조명광학계와는 달리 인서트팁의 면이 거의 완전하게 연마되어 거울면과 같이 반사되지 않는 기하광학의 결상원리를 적용하게 된다. 본 연구에 사용된 CCD소자의 크기가 횡축으로 4.87mm이므로 인서트팁의 크기가 20mm일 경우 배율 약 0.24정도의 렌즈를 선정하도록 한다. 결상광학계의 촛점거리가 짧을 경우 배율의 변화폭을 넓게 사용할 수 있으나 분해능이 저하되는 현상이 발생하며, 촛점거리가 클 경우 반대로 배율을 조정하기가 어려우며 광학계의 크기가 커지는 결점이 있으며, 또한 외부 빛의 영향을 쉽게 받게 된다. 본 실험에서는 $f = 50 mm$ 의 상용화된 렌즈를 선정하고, Fig. 3.5에서와 같이 CCD소자의 표면으로부터 렌즈까지의 거리가 50mm되도록 경통부를 제작하여 설치하였다.

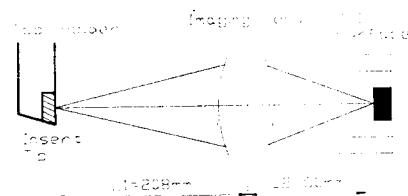


Fig. 3.5 Imaging optics

인서트팁의 측정부위는 분해능의 손상없이 충분히 CCD소자면에 결상시킬수 있도록 하였다. Fig. 3.4의 뒷부분이 CCD카메라에 설치된 결상광학계이며 이때 렌즈와의 거리는 배율이 0.24이므로

$$l = \frac{f}{m} = \frac{50mm}{0.24} \approx 208 mm$$

이다. 회전하는 밀링커터의 정지상을 연기위한 초퍼는 밀링커터의 회전속도와 동기시켜 CCD소자에 입력되는 빛을 단속하면 되므로 조명부나 결상광학계 어느쪽에 설치하여도 관계없다.

아니라 최적 절삭조건이거나 기계의 구조설계등의 용용을 위해 많은 공학자들에 의해 연구되어져 왔다. 본 연구에서는 정면 밀링가공중 공구파손을 비접촉식·실시간 계측을 위한 공구파손 검출 알고리즘 개발의 이론적 배경을 수립하는 것을 목표로 본 연구를 행하였다.

정면 밀링커터(face milling cutter)는 Fig. 2.1에서 보여 준 바와 같이 절삭기구(cutting mechanism)를 결정해 주는 축방향 경사각(axial rake angle), 접선방향 경사각(lead angle), 반경방향 경사각(radial rake angle)등의 기하학적인 각(angle)이 존재한다.

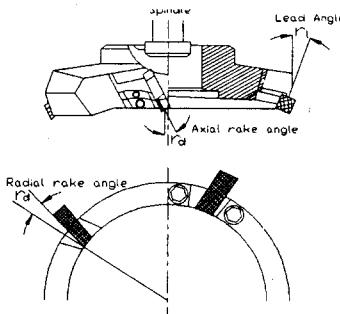


Fig. 2.1 Face milling cutter

일반적인 밀링공정의 절삭기구는 Fig. 2.2에 나타난 바와 같다. 밀링공정에서 절삭날의 절삭궤적은 엄밀히 말하면 트로코이드 곡선(trochoid curve)의 형태이지만 Martellotti에 의하면 원호로 근사화하여 해석해도 별 차이가 없다고 보고된 바 있다⁽⁸⁾.

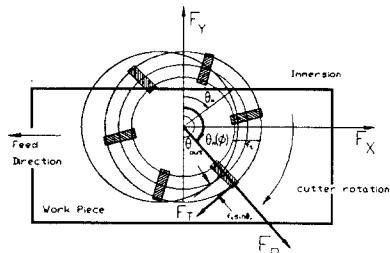


Fig. 2.2 Cutting mechanism of face milling process

절삭가공중 절삭칩의 두께변화 및 윗면 경사각에서의 공구 텁 접촉면의 변화, 단속적인 절삭에 의한 충격동으로 인하여 열 및 기계적 하중이 반복하여 작용하게 된다. 또한 갑작스러운 충격력 또는 공구마모의 접진적인 증가에 따른 과다한 충격력 또는 공구마모의 접진적인 증가에 따른 과다한 절삭력 등의 원인으로 인하여 절삭날이 파손되는 경우가 생기는데 이러한 파손은 크랙, 치평, 파괴등으로 나눌 수 있다. 작은 규모의 크랙 또는 치평이 발생할 때는 절삭을 계속할 수 있으나 결국은 절삭날이 무디어져 절삭온도가 상승하기 때문에 마모의 속도가 증가된다. 파괴

의 경우에는 절삭날의 대부분이 떨어져 버리므로 계속적인 절삭이 거의 불가능하며 단속절삭, 강인한 재료의 중절삭 시 많이 나타나게 된다. 이러한 공구손상의 주요 원인으로는 공구재료 자체의 취성, 절삭력, 인증기 및 피로, 과다한 공구마모의 진행, 채터링, 칩의 유출방향, 공구의 형상 및 기타 취급 불량등을 들 수 있다.

3 실시간 공구파손 계측방법 개발

3.1 장치설계 및 제작

단속절삭하에서 공구상태의 실시간 측정기술 개발이란 비절삭시간을 이용하여 주축회전부에서 1회전마다 동기신호를 보내어 초퍼(light beam chopper)와 동기시켜 이때의 동기신호를 회전하는 물체에서 정지상과 같이 보이게 만들어 CCD카메라가 한 프레임(one frame)의 동기영상을 획득하는 측정원리를 고안하였으며, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 3.1과 같이 실험장치를 구성할 수 있다.

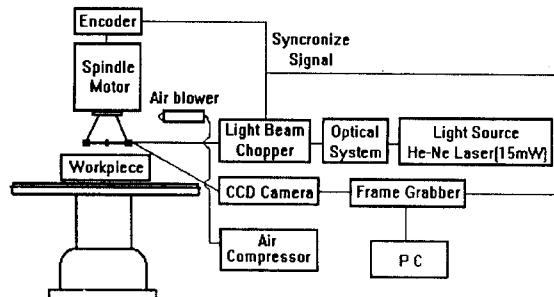


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental equipment



Fig. 3.2 Detailed photo of experimental equipment system

본 연구의 구성은 적용할 밀링절삭의 공구선단(cutting edge)이 회전하기 때문에 고정된 광학계에서 정지 영상으로 관측할 수 있도록 밀링머신의 주축으로부터 보내진 신호와 초퍼의 신호를 동기시키는 신호동기부와 동기된 신호가 프레임 그래버로 보내져 CCD카메라가 영상을 잡을 수 있도록 하는 광학부와 설계된 광학계로부터 얻어진 영상을

3.4 실시간 검출 알고리즘 개발(S/W)

1. 공구파손의 특징

비전시스템을 이용한 공구파손의 실시간 검출은 기본적으로 정상상태의 공구영상을 비교평가하여 빠른 시간내에 판정하는것으로 귀결된다. 일반적으로 영상분석에 있어서는 그 계산량의 과다로 영상의 직접적인 비교는 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 실시간 검출을 위하여 영상에서 추출할 수 있는 특정자료로 판정기준을 설정하는것이 바람직하다. 두 영상간의 MSE는 기존 프레임 그래버의 H/W적 특성을 이용하여 그 차이를 빠른 시간내에 계산해 낼 수 있는 양이다. 연속적인 영상의 입력에서 공구파손이 발생하지 않았다면 두 영상간의 차이는 심하지 않을것이고 MSE는 적은 양이 될 것이다. 그러나 공구파손이 발생한 영상과 그렇지 않은 영상사이에는 광강도의 급격한 변화로 큰 MSE를 발생시킬것이다. 연속적인 영상의 변화량을 검출하기위하여 검출시점의 영상과 시초의 원영상과의 차이보다는 검출시점의 영상과 직전의 영상과의 차이가 실시간 측정시 발생하는 외부영향을 일괄적으로 포함한다는 점에서 훨씬 우수하다.

따라서 시간 $t - \frac{\Delta t}{2}$ 에서 공구영상 $f(x, y, t - \frac{\Delta t}{2})$ 와 $t + \frac{\Delta t}{2}$ 에서의 영상 $f(x, y, t + \frac{\Delta t}{2})$ 의 차이에 의한 MSE를

$$MSE(t) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y, t + \frac{\Delta t}{2}) - f(x, y, t - \frac{\Delta t}{2})]^2 \quad (3.1)$$

로 정의하고 이를 공구파손검출의 기초자료로 삼는다.

2. MSE의 변화와 판정기준

반복실험에의한 임의의 자료는 이 실험이 무한히 계속될 때 그 자료의 분포가 정규분포(normal distribution)를 따른다는 것은 잘 알려진 사실이다. 공구상태가 파손되지 않은 상태로 계측 가공을 하고 있을때 일정한 시간간격으로 측정한 MSE는 동가치를 가지지는 않지만 시간이 경과함에 따라 그 분포는 정규분포에 접근하게 될것이다.

공구영상의 MSE를 N번 반복측정하였을때의 평균을

$$\mu(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} MSE [t - (N-k)\Delta t] \quad (3.2)$$

라 하고 그 표준편차를

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (MSE(k) - \mu(t))^2} \quad (3.3)$$

이라 할때, 정규확률 분포론에 의하면 시각 t 에서의 $MSE(t)$ 는

$$\mu(t) \pm 3\sigma(t) \quad (3.4)$$

의 범위에 99.8% 이상 분포하게 된다. 따라서 가공중의 공구가 파손되는순간의 $MSE(t)$ 는 급격한 영상의 변화로 인하여 식(3.4)의 범위를 벗어나는 결과를 초래하게 된다.

본 연구의 실시간 공구파손검출장치에서는 연속적인 $MSE(t)$ 와 직전 측정시까지의 $\mu(t) + \alpha\sigma(t)$ 와의 차이

$$D(t) = MSE(t) - (\mu(t) + \alpha\sigma(t)) \quad (3.5)$$

가 정(+)의 값을 가질경우 공구가 파손된 시점으로 판정토록 기준을 설정하였다. 이때 분산과 관련된 계수 α 는 정규화를분포론에 의하여 신뢰도를 결정하는 척도로써 각각 $\alpha = 1.0$ 일때 68%, $\alpha = 2.0$ 일때 95%, $\alpha = 3.0$ 일때 99%의 신뢰도를 나타낸다.

3.5 실시간 공구파손 검출 소프트웨어 개발

1. 공구 영상입력

가공중의 공구영상을 고정된 광학계에서는 그 표면사진을 획득하기 쉽지 않지만 밀링 머신과 광학계의 초퍼를 통과시킨 상태로 입력회로를 구성하였으므로 소프트웨어에서의 비디오 전송속도는 1초당 30프레임의 영상처리로 1000msec/30 = 33.3msec가 된다. 그러므로 소요시간인 33.3msec 이상의 간격으로 거의 무리없이 공구영상을 획득 할 수 있다.

2. MSE의 계산

개인용 컴퓨터를 이용하여 두 영상 각각의 개별화소별로그 차이를 계산하여 MSE를 구하는데는 많은시간을 요하므로 프레임 그래버에 내장된 메모리와 그 하드웨어적 특성을 이용하여 짧은 시간내에 계산한다. Fig3.6에 보인바와 같이 프레임 그래버에서는 한 프레임 처리시간이 33.3msec이므로 영상입력으로부터 MSE를 계산하는데 약 166msec($33.3 \times 5 = 166$ msec)가 소요된다.

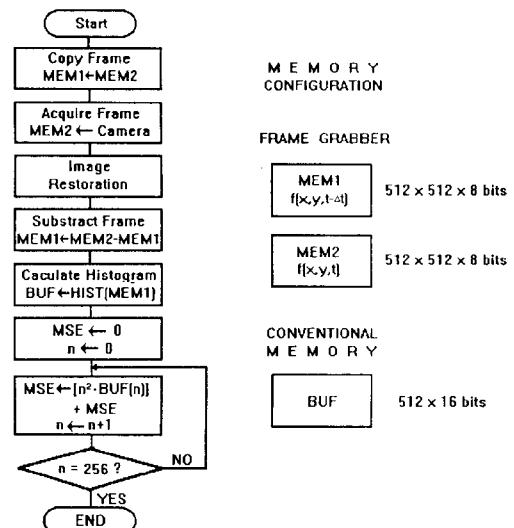


Fig.3.6 Flow chart of MSE calculation from image input

3. 평균과 표준편차

연속적인 영상입력에 의한 시각t에서의 누적된 평균과 표준편차는 누적횟수가 계속될수록 많은 계산시간을 요구하게 된다. 시각 $t=0$ 로부터 시각 $t=N \cdot \Delta t$ 까지의 MSE의 누적을

$$S(N) = \sum_{k=0}^{N-1} MSE(k)$$

MSE의 제곱의 누적을

$$SS(N) = \sum_{k=0}^{N-1} [MSE(k)]^2$$

라 할때

$$N\mu(N) = \sum_{k=0}^{N-1} MSE(k) = S(N-1) + MSE(N)$$

$$N\sigma^2(N) = \sum_{k=0}^{N-1} [MSE(k) - \mu(N)]^2 \\ = SS(N-1) - N[\mu(N)]^2$$

이 되므로 실제로는 동일한 시간내에 평균과 표준편차를 구할 수 있다.

4. 측정실험 및 분석결과

구성된 시스템의 실시간 계측기술의 가능성을 타진하기 위해서 단속절삭을 대표하는 밀링절삭 작업을 대상으로 본 연구를 수행하였다. 그 결과 Fig. 4.2처럼 절삭중의 공구선단부의 시간 변화에 따른 상태 관측이 가능하였다. 따라서 비전센서를 단속절삭에서의 공구감시기술로 발전시키기 위해서는 구성기간의 상관관계, 절삭중 칩옹착에 따른 문제등이 거론되며, 충분한 광량의 조명 사용 및 결상광학계의 초점심도(depth of focus)를 적절히 조절함으로써 가능해진다. 또한 공구의 크레이터면에 침이 유착되는 경우에는 상태관측이 불가능하나 이러한 문제는 커터와 피사재의 위치관계의 조정에 의해 해결할 수 있다.

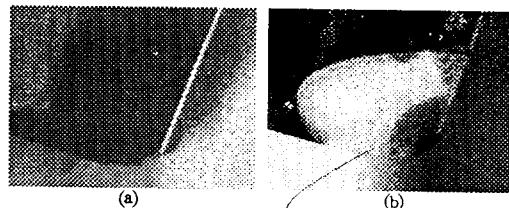


Fig. 4.1 Static image of sharpened tool tip and broken tool tip

본 연구에서 획득한 이미지 Fig. 4.1(a)와 Fig. 4.1(b)는 각각 파손되지 않은 인서트팁과 파손된 인서트팁의 정지상태에서의 영상과 연속적으로 약 600sec동안 MSE의 변화값을 감시한 것이다. Fig. 4.2에서 보듯이 정지된 영상은 선명한 영상상을 유지하며 MSE의 변화 또한 심하지 않고 안정한 상태라는 것을 알 수 있다. 특히 인서트팁이 파손

된 상태이든 아니든 MSE의 변화는 심하지 않다는 것을 알 수 있고 이 사실로 공구의 파손시점은 연속된 영상이 순간적으로 큰 MSE의 변화가 발생 할 때만 감지된다는 것을 짐작할 수 있다. Fig. 4.2 및 Fig. 4.3에서 보듯이 실시간 공구파손 검사장치에서 파손되지 않은 공구를 파손으로 감지할 오판정의 확률은 신뢰계수 α 의 값이 1.0~10.0까지의 변화시 1% 이하로서 $\alpha=10.0$ 이상일 경우 100% 신뢰를 갖는다. MSE의 시간의 경과에 따른 진동은 입력영상자체가 일정한 것이아니라 순간 순간의 광 강도의 미소한 변화 및 잡음에의한 것으로서 큰 MSE의 변화를 유발하지는 않지만 통계적방법에의한 공구파손 판정변수 D를 선정한 직접적인 이유가 된다.

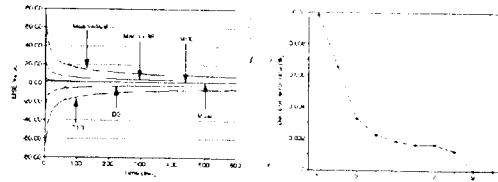


Fig. 4.2 MSE variation and decision rate of sharpened tool tip (static)

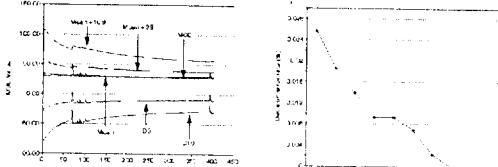


Fig. 4.3 MSE variation and decision error rate of broken tool tip (static)

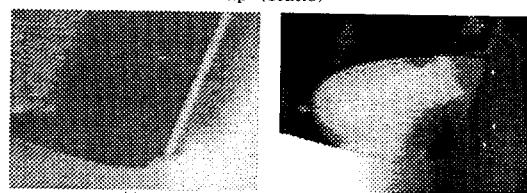


Fig. 4.4 Dynamic image of sharpened tool tip and broken tool tip (170 rpm)

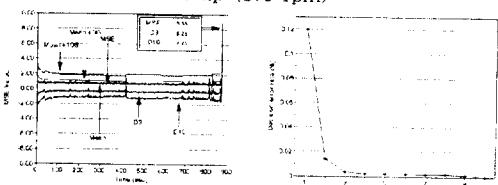


Fig. 4.5 MSE variation and Decision error rate of tool breakage detection (170 rpm)

절삭가공중의 회전하는 밀링커터의 경우 초퍼와 주축모터를 동기시켜 영상을 입력받을 시 정지영상의 경우와 같이 선명한 영상상을 유지하여야하나 실제의 경우 미소한

회전속도의 차이로 Fig. 4.4와 같이 영상의 수평이동현상이 발생한다. 이는 프레임 그레버에서의 영상입력시간 33.3 msec이내에 발생한 공구의 이동 및 조명시간(exposure time)동안의 영상을 모두합한 것이다. Fig. 4.5는 밀링의 스피드를 회전수를 170rpm으로 회전시켰을 경우의, MSE의 변화와 각 신뢰계수에 대한 오판정의 확률을 보여준다. Fig. 4.5 ~ Fig. 4.8까지는 각각 170, 210, 250, 740rpm으로 밀링커터를 회전시켰을 시의 MSE의 변화와 오판정율을 보았다. 통계적으로 10배의 분산값은 거의 100%의 신뢰도를 가지고 있다. 그러나 단 몇 %의 좌우한 오차영역에서 발생할 수 있는 오판정은 있을 수 있으며 좀더 신뢰성을 높일 필요가 있다. Fig. 4.5 ~ Fig. 4.8까지에서 보는 바와 같이 속도에 상관없이 10배의 표준편차값에서 모든 파손을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 공구의 파손시 10배의 표준편차 값의 수십배로 MSE값이 증가함으로 파손을 검출할 수 있었다.

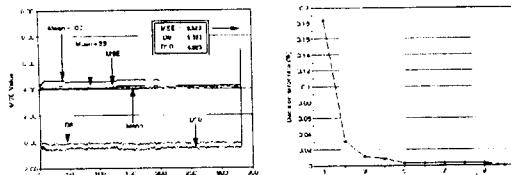


Fig. 4.6 MSE variation and decision error rate of tool breakage detection (210 rpm)

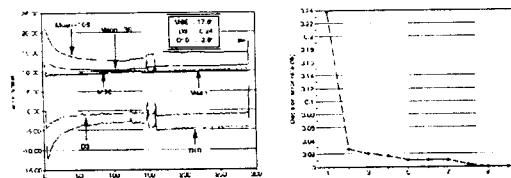


Fig. 4.7 MSE variation and decision error rate of tool breakage detection (250 rpm)

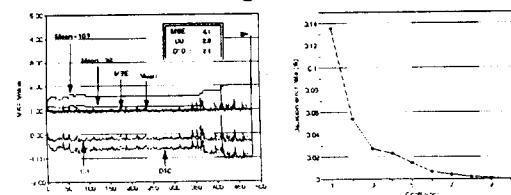


Fig. 4.8 MSE variation and decision error rate of tool breakage detection (340 rpm)

5. 결 론

밀링공정시 공구의 파손이 발생하였을때 실제 실험을 통해 영상을 획득하는 방법으로 파손진단을 실시하였으며, 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

이상의 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 광학 테이블상의 예비실험을 토대로 실제현장에서의 적용실험을 행하였다.
- 공구파손을 검출하기위한 알고리즘을 정립하고 타당성을 입증하였다.
- 가공중인 인서어트 텁의 실시간검출을 하기위해 영상의 MSE값이 평균과 10배의 표준편차값으로 정합으로써 공구의 파손으로 인한 이상을 검출할 수 있었다.
- 공구파손검출의 신뢰성을 입증하기 위해 오판정확률을 계산하였으며 계산결과 10배의 표준편차일경우에는 오판정확률이 0이됨을 알 수 있었다.
- 10배의 표준편차를 적용함으로써 공구의 파손을 검출할 수 있었다. 따라서 검출시간도 약 1.5sec로서 실시간 감시가 가능하다.

참고문헌

- J. Tlusty and G. Andrews, "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining", Annals of the CIRP, Vol.32, pp.563~572, 1983
- F. Giusti and H. Santoch, "Development of a Fiber Optic Sensor for In- Process Measurement of Tool Wear", Proc. of 20th M.T.D.R conf. pp. 351~360, 1979
- K. Matsushina and P. Bertok and T. Sata, "In-Process Detection of Tool Breakage of Monitoring the Spindle Motor Current of a Machine Tool", Measurement and control for Batch Manufacturing Phoenix, Arizona, pp.14~19, 1982
- K.Iwata and T.Horiwaki, "An Application of Acoustic Emission Measure ment to In-process Sensing of Tool Wear", Annals of the CIRP Vol. 25 /1, pp.21 ~ 26, 1977
- N. Cook, "Tool Wear Sensor", Wear, Vol.62, pp.49~57, 1980
- 김영일, "선삭가공에서 이미지프로세싱을 이용한 자동공구파손 검출 시스템 개발", 숭실대학교 공학박사학위논문, 1993
- 사승윤, "영상복원을 이용한 정면밀링의 공구파손 검출", 숭실대학교 공학 석사 학위논문, 1993
- Martellotti,M., "Analysis of the Milling Process", Transactions of ASME,vol.63, 1941, pp.667 and vol 67, 1945, pp.233
- Gonzalez,R.C, and Safabakhsh,R., " Computer Vision Techniques for Introduct- ustral Application.", Computer, Vol15, No.12, 1982
- Gonzalez,R.C,Wood,R.E.,and Swain,W.T."Digital Image Processing; An Introduction ", Digital Design, Vol.16, No.4, 1986