

광 강도변화를 이용한 가공면 영상의 텍스처 특징분석

사 승 윤*, 이 명 재**, 김 광 래***, 유 봉 환****

Texture Feature Analysis of Machined Surface Image Using Intensity Gradient

S. Y. Sa*, M. Y. Lee**, K. L. Kim***, B. H. Ryn****

Abstract

Super precision working technique and machine tool have been continually developed thanks to advanced electronic field. To obtain good result, it is necessary to investigate surface state in grinding with μm level. There were quite many researches to satisfy these demands by using non-contact methods through the computer vision.

In this study, the texture of working surface was analyzed, co-occurrence matrices was obtained from the surface roughness. Texture parameter was obtained using position operator composed of θ , d according to variation of angle direction and distance. As a result, it was found that surface texture was more affected by direction(θ) than distance(d).

KeyWords : Texture Information(텍스처 정보), Position Operator(위치연산자), Quantization(양자화), Intensity Gradient(광강도차).

1. 서론

최근 전자산업의 발달에 따른 공작기계의 기능 향상은 초정밀가공기술의 발달과 공작기계에 대한 관심을 증가시켰다. 특히 연삭과 같이 고정밀도가 요구되는 가공의 경우

가공기술에 대한 연구와 표면품위에 대한 연구가 병행되어야 한다. 그러나 종래에는 가공정도를 숙련된 기술자의 경험에 의한 판단에 의존하는 실정이었으며, 주로 촉침식 표면거칠기 값이 사용되어 왔다. 이러한 방법은 온라인 감시에 적용이 어렵다는 문제점을 가지고 있어 비접촉에 의

* 숭실대학교 대학원

** 성남기능대학

*** 인덕대학

**** 숭실대학교

한 방법들이 많이 연구되고 있다. 비접촉식 방법 중 컴퓨터비전을 이용한 방법은 여러 분야에서 시도되었으며 많은 성과를 가져왔다.

제품의 표면정도를 측정하는 연구는 많지 않다. 특히 비전시스템을 이용한 가공표면의 관찰은 주변환경에 대한 민감한 반응과 관찰영역이 좁아진다는 단점으로 실시간 측정에는 많은 어려움이 따른다. 컴퓨터비전을 이용한 표면측정의 연구로는 가공된 표면에 발생한 균열(crack), 흠(defect)등을 검출하는 연구가 있었으며, Ramamoorthy 등은 연삭, 밀링, 세이퍼가공에 의해 얻어진 가공표면을 영상처리 방법중에 하나인 텍스처(texture)해석 기법을 사용하여 가공표면의 특징을 분류하였다^(1,2). 그러나 이 연구에서는 동일한 가공방법으로 같은 형태의 텍스처를 가진 가공물의 경우 거칠기의 변화를 알아내기에는 미흡한 점이 있다. 본래 영상처리에서 텍스처란 물체의 구조 혹은 그들의 결합관계를 나타내는 물체표면의 조직구조를 의미하는 것으로 위성사진의 판독이나, 농업, 섬유의 질감 등을 판별하는데 이용되었던 방법으로 뚜렷한 윤곽이나 형상보다는 복잡한 구조를 가지는 영상의 특징추출(feature extraction)에 적용되었던 방법이다⁽³⁾. 그러므로 기계가공에 의한 표면은 복잡한 텍스처를 가지기 때문에 표면의 특징을 잘 나타낼 수 있는 해석방법이 필요하다.

본 연구에서는 표면거칠기 변화에 따른 텍스처 정보를 추출하기 위하여 영상처리방법의 하나인 텍스처 해석을 이용한다. 그리고 영상의 광 강도 변화를 고려한 해석방법을 이용하였으며, 영상에서의 방향성 변화에 따른 경향을 분석하여 온라인 측정에 적용할 수 있는 해석방법을 개발하고자 한다.

2. 광강도 변화를 이용한 텍스처 해석

텍스처는 상호 관련된 요소들로 구성되어 있는 물체표면의 조직구조를 의미하는 것으로 영상내의 부드러움(smoothness), 거칠기(coarseness), 규칙성(regularity) 등과 같은 특징을 나타낸다. 영상으로부터 텍스처 정보를 얻어내기 위한 방법으로는 확률적인 방법, 텍스처의 최소단위인 부텍스처(sub-texture)의 규칙성이나 배열에 관심을 가지는 구조적 방법과 스펙트럼해석이 대표적인 방법이다. 이들 중 서로 이웃한 픽셀들 사이의 광강도차(intensity gradient)의 빈도수를 이용하는 확률적방법은 다음과 같이 설명할 수 있다.

영상에서 명암대비가 큰 경우에는 광강도차가 큰 픽셀

쌍(pixel pair)의 발생빈도가 크게 나타나며, 명암대비가 작은 경우의 픽셀쌍의 발생빈도는 적게된다. 이들 위치에 따른 광 강도의 차를 나타내기 위해 위치연산자(position operator) P 는 방향 θ 와 각 방향에서 픽셀간의 거리 d 의 함수로써 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, d, 0^\circ) &= No. \{ ((k, l), (m, n)) \in (L_H \times L_V), \\
 &\quad m-k=d, n-l=0, I(k, l)=i, I(m, n)=j \} \\
 P(i, j, d, 45^\circ) &= No. \{ ((k, l), (m, n)) \in (L_H \times L_V), \\
 &\quad m-k=d, n-l=d, I(k, l)=i, I(m, n)=j \} \\
 P(i, j, d, 90^\circ) &= No. \{ ((k, l), (m, n)) \in (L_H \times L_V), \\
 &\quad m-k=0, n-l=d, I(k, l)=i, I(m, n)=j \} \\
 P(i, j, d, 135^\circ) &= No. \{ ((k, l), (m, n)) \in (L_H \times L_V), \\
 &\quad m-k=-d, n-l=d, I(k, l)=i, I(m, n)=j \}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $(L_H \times L_V)$ 는 영상의 크기이며, (k, l) , (m, n) 은 픽셀쌍의 좌표를 나타낸다. 또한 I 는 영상의 임의의 위치에서의 픽셀의 광 강도 값이며, $No.$ 는 발생빈도수를 나타낸다.

연산자에 의해 각 방향에 대한 픽셀간의 강도차에 따른 빈도수를 계산하여 다음과 같은 행렬(difference matrix) D_θ 를 구한다.

$$D_\theta = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & \dots & c_{0(n-1)} \\ c_{10} & c_{11} & \dots & c_{1(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{(n-1)0} & \dots & \dots & c_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

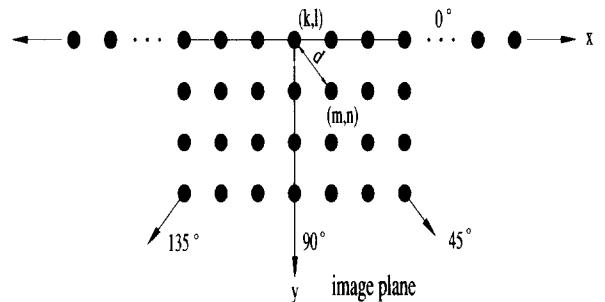


Fig. 1 Geometry for measurement of intensity gradient

여기서, c_{ij} 는 그레이레벨(gray level) i 를 가지는 픽셀에서 위치연산자에 의해 거리 d 만큼 떨어진 위치에서 그레이레벨 j 를 가지는 픽셀 쌍의 빈도수를 나타내는 $n \times n$ 행렬요소이다. n 은 영상의 그레이레벨로서 256 그레이의 경우에는 256×256 행렬이 된다. 그러나 본 연구에서는 계산의 효율성을 고려하여 64×64 행렬을 사용하였다. 64×64 행렬을 구성하기 위해서는 256그레이의 원 영상으로부터 64그레이의 영상으로 다시 양자화(quantization)하여야 한다. 양자화 된 영상으로부터 Fig. 1과 같이 위치연산자 P 를 이용하여 (2)식의 행렬요소를 확률 변수화한 다음과 같은 co-occurrence행렬(이하 G-행렬)을 구할 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} g_{00} & g_{01} & \dots & g_{0(k-1)} \\ g_{10} & g_{11} & \dots & g_{1(k-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{(k-1)0} & \dots & \dots & g_{(k-1)(k-1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)의 행렬요소 g_{ij} 는 식(2)의 행렬요소를 전체 발생빈도수의 총합으로 나눈 값이며, 다음과 같다.

$$g_{ij} = \frac{c_{ij}}{N}$$

여기서 N 은 $(n-1) \times (n-1)$ 이다.

이와 같이 구한 식(3)의 행렬로부터 최대확률(max. probability), 에너지(energy), 자기상관(auto-correlation), 역 모멘트(inverse difference moment), 엔트로피(entropy), 동질성(uniformity)등의 텍스처 정보를 구하게 된다.

3. 실험

3.1 실험장치

가공표면의 영상획득 및 텍스처해석을 위하여 비교용 표면거칠기 표준시편을 관찰 대상으로 선정하였고, 이들의 표면을 관찰하기 위해 대물렌즈($\times 25$)를 사용하여 CCD 카메라로 영상을 획득할 수 있도록 하였다.

획득된 영상은 DT3155 영상처리보드를 통하여 1프레임의 영상을 저장하여 PC에서 처리하도록 구성하였다. 영

상획득시 표준시편의 표면은 고 배율로 확대되므로 초점의 위치를 정확하게 맞추기 위하여 미소이송장치 위에 시편을 고정하여 최적의 초점을 맞출 수 있도록 하였으며, 이때 광원으로는 할로겐 램프를 사용하였다¹⁾.

3.2 실험방법

영상으로 획득하고자 하는 대상은 비교용 표면거칠기 표준시편의 연삭가공면으로써 거칠기 값이 가장 작은 0.8s와 큰 값인 25s의 표면을 측정 대상으로 선정하였다. 이러한 표준시편의 표면영상의 텍스처 해석을 위하여 획득된 영상으로부터 가장 먼저 처리해야 하는 것은 256그레이 영상에서 64그레이 영상으로 다시 양자화 하는 것이다. 64그레이 영상으로부터 계산된 G-행렬의 행렬요소 g_{ij} 는 그레이레벨 i 를 가지는 픽셀이 임의의 방향 θ 와 거리 d 에 위치한 픽셀의 그레이레벨이 j 인 경우의 확률을 나타낸다. 따라서 영상전체에 걸쳐서 조사하여 G-행렬을 구함으로써 텍스처 정보를 추출하게 된다. 그리고 텍스처 파라미터의 변수인 방향 θ 와 거리 d 의 변화에 따라 어떠한 변화를 나타내는지 알아본다. 이때의 방향 θ 는 계산의 효율성을 고려하여 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 의 네 방향에 대하여 고려하였으며, 텍스처 파라미터들이 4방향에서 d 의 증가에 따른 경향을 알아보기 위하여 픽셀간 거리를 100픽셀까지로 제한하여 계산하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행한 텍스처 해석과정을 나타내는 흐름도 이다.

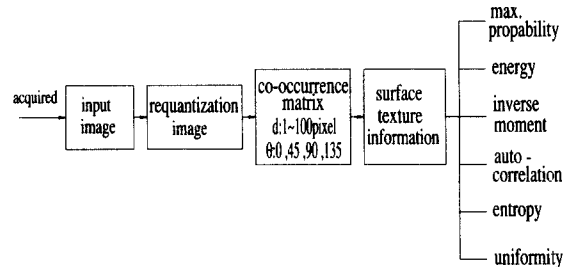


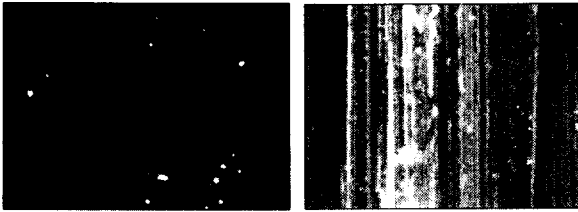
Fig. 2 Structure of the texture analysis

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

비교용 표면 거칠기 표준시편으로부터 거칠기 값이 작은 표면과 큰 표면에 대하여 영상을 획득하였으며, 표면의 텍스처 정보를 분석하였다. Fig. 3은 표준시편의 거칠기

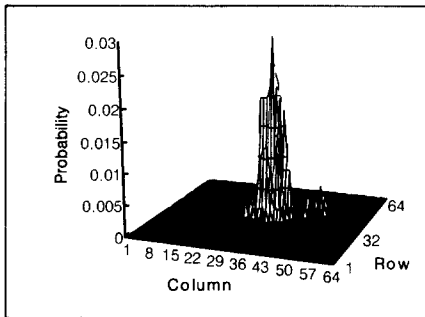
값이 작은 0.8s와 큰 값인 25s의 영상을 나타낸 것으로 거칠기 값이 작은 표면에서는 빛이 반사되는 부분이 적게 나타나며, 또한 전체적으로 광 강도의 분포가 완만함을 알 수 있다. 표면의 거친 정도가 큰 영상에서는 빛을 반사시키는 부분이 많이 관찰되며, 이러한 부분들이 텍스처 해석에서 표면의 차이를 나타내는 중요한 요인으로 작용하게 된다. Fig. 3의 영상들로부터 위치연산자 P 를 이용한 픽셀간의 확률분포를 나타내는 G-행렬을 네 방향에 대하여 거리 d 의 변화에 따라 계산하였다.



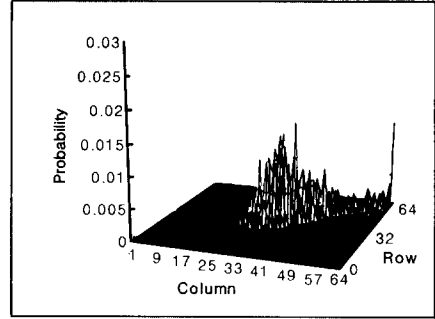
(a) 0.8s (b) 25s

Fig. 3 Standard specimen image

$\theta = 45^\circ$, $d = 1$ 인 경우의 두 영상의 G-행렬을 Fig. 4에 나타내었다. 표면거칠기 값이 0.8s인 (a)의 경우에는 각각의 관련된 그레이레벨 값의 확률밀도가 그래프의 중앙부에 밀집되어 있고 최대 확률값이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 (b)의 25s인 경우는 영상의 광 강도차가 큰 픽셀쌍이 많이 발생했음을 알 수 있다. 따라서 전체적으로 분포가 낮은 확률값들로 넓게 분포되어 있으며, 이는 광강도차가 큰 픽셀쌍이 (a)의 경우보다 많이 발생했음을 나타낸다. 각 방향에 대하여 d 의 증가에 따른 텍스처 파라미터를 계산하여 Table 1과 같은 결과를 얻었다.



(a) 0.8s



(b) 25s

Fig. 4 3D plot of co-occurrence matrices

Table 1은 각 방향에 대하여 거리 d 의 변화를 100픽셀까지 변화시켜 텍스처 파라미터를 계산하여 이들의 평균과 표준편차를 나타낸 것으로 전체적으로 적은 편차를 나타낸다. 특히 최대 확률값은 측정대상의 텍스처 정보를 대표하는 값으로 G-행렬 상에서는 변화가 적은 경우가 많은 경우에 비하여 큰 값을 나타내지만, 이 경우에는 최대 확률의 평균치를 나타낸 것으로써 편차가 크다는 것은 거리변화에 따른 광 강도의 변화가 크다는 것을 의미한다. 그러나 시편의 가공방향은 90° 방향으로 이루어져 있으므로 90° 방향보다는 0° 방향이 광 강도의 변화가 크다고 할 수 있다. 따라서 최대확률의 편차 값도 0° 방향에서 큰 값을 나타내며, 90° 방향에서 적은 값을 나타내야 한다. 그러나 반대의 현상이 관찰되는데 이는 0.8s의 표면이 거칠기가 작은 표면으로써 거칠기의 변화가 적다는 것을 나타낸다. 한편 25s의 경우에는 0° 의 편차가 90° 의 편차보다 크게 나타났으며, 이는 가공방향에 대한 수평성분의 변화가 심하다는 것을 나타낸다.

에너지는 전체적으로 큰 값을 나타내고 있으며, 이는 영상의 명암도 대비를 나타내는 척도로 표면이 고를수록 적은 값을 나타내고 거친 표면에서는 큰 값을 나타낸다. 따라서 25s인 경우에 0.8s의 표면보다 큰 값을 나타낸다. 그리고 각 방향에 대하여 0° 일 때 가장 큰 값을 나타내는데 이는 0° 의 방향이 다른방향에 비하여 명암대비가 크다는 것을 영상을 통하여 관찰할 수 있으나, 45° , 135° 의 경우는 비슷한 값을 가지는데 이는 각 대각선 방향에 대하여 명암의 차이가 거의 비슷하다는 것을 나타낸다. 또한, 가공방향과 동일방향인 90° 방향은 네 방향 중 가장 적은 값을 나타냈으며, 이는 표면의 거친 정도를 나타내는데는 그 영향이 적다고 할 수 있다.

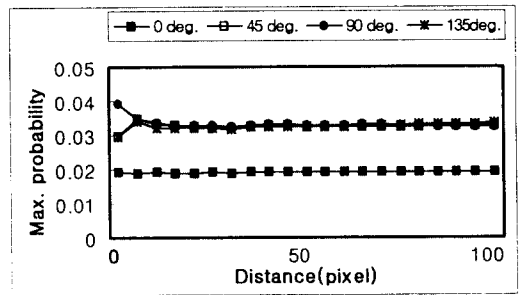
Table 1 Texture information according to variation of angle and distance

Texture parameter		0.8s		25s	
		mean	standard div.	mean	standard div.
Max. probability	0°	0.0191	0.0004	0.0068	0.0032
	45°	0.0330	0.0040	0.0150	0.0028
	90°	0.0324	0.0047	0.0191	0.0027
	135°	0.0336	0.0046	0.0155	0.0028
Energy	0°	18.773	1.6358	105.52	28.607
	45°	17.556	2.7058	97.643	21.761
	90°	15.867	2.3231	23.429	6.1879
	135°	17.685	3.1906	98.209	25.711
Inverse moment	0°	0.2761	0.0036	0.1534	0.0204
	45°	0.2758	0.0146	0.1538	0.0228
	90°	0.2827	0.0172	0.2441	0.0179
	135°	0.2737	0.0179	0.1480	0.0251
Auto-correlation	0°	0.1501	0.0828	0.2319	0.1999
	45°	0.0538	0.0737	0.1753	0.1608
	90°	0.1148	0.1097	0.6759	0.0933
	135°	0.0211	0.0752	0.1597	0.1644
Entropy	0°	5.0688	0.0101	6.4414	0.0958
	45°	4.6229	0.0430	5.5436	0.0426
	90°	4.6314	0.0391	5.3371	0.0424
	135°	4.6026	0.0555	5.5473	0.0470
Uniformity	0°	0.0090	0.0001	0.0025	0.0003
	45°	0.0128	0.0006	0.0047	0.0003
	90°	0.0127	0.0006	0.0059	0.0003
	135°	0.0131	0.0008	0.0047	0.0003

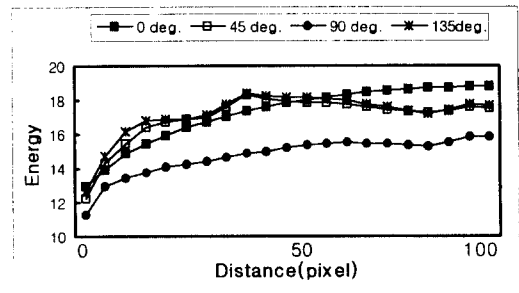
역모멘트(inverse moment)는 에너지의 반대되는 개념으로 명암도 대비가 높은 경우에는 작은 값을 나타낸다. 따라서 모든 방향에 대하여 에너지와 상반되는 결과를 보여준다. 또한 자기상관값의 경우에는 각 그레이레벨간의 종속성을 나타내주는 것으로 규칙적인 패턴을 가지는 영상에서 큰 값을 나타낸다. 따라서 0.8s 보다는 25s의 경우가 큰 값을 나타낸다. 이는 0.8s의 표면보다 25s의 표면이 주기적인 패턴을 형성하는 것으로 해석할 수 있으며, 25s의 표면이 전체적으로 강한 명암대비를 갖는다고 할 수 있다. 그러므로 실제 표면의 거칠기가 크다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

엔트로피는 표면의 그레이레벨 분포의 랜덤한 정도를 나타내는 것으로 명암대비가 큰 영상에서는 큰 값을 가지며, 명암대비가 작은 영상에서는 작은 값을 나타내므로 25s가 0.8s의 표면보다 전체적으로 크게 나타났다.

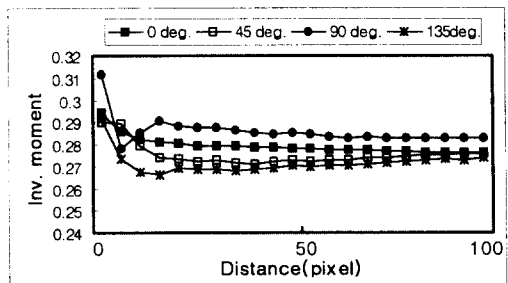
동질성은 패턴의 동질성을 나타내는 것으로 표면거칠기가 적은 0.8s가 25s보다 전체적으로 큰 값을 나타낸다. 이는 고른 표면에서는 패턴간의 그레이레벨 값이 비슷하여 크게 나타나며 거친 표면일수록 패턴간의 그레이레벨 값의 변화가 심하여 작은 값을 나타낸다.



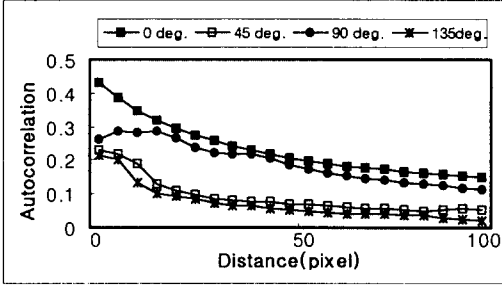
(a) maximum probability



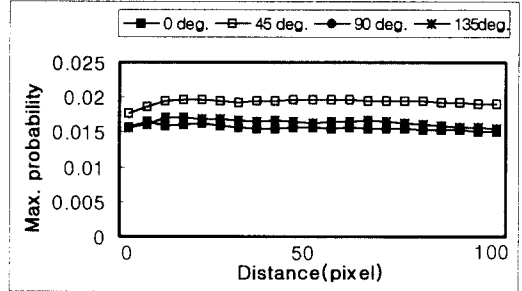
(b) energy



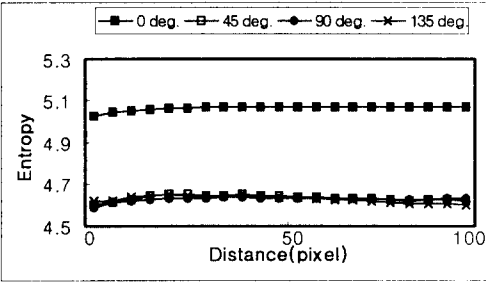
(c) inverse moment



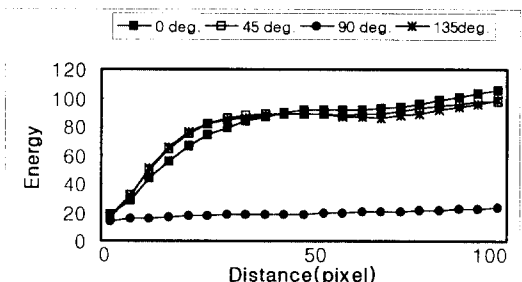
(d) auto-correlation



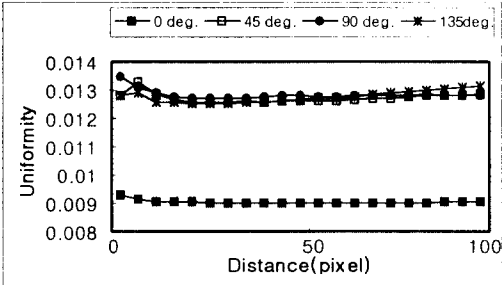
(a) maximum probability



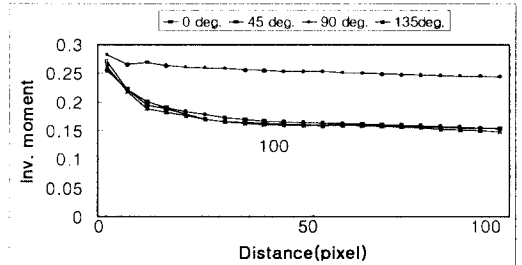
(e) entropy



energy



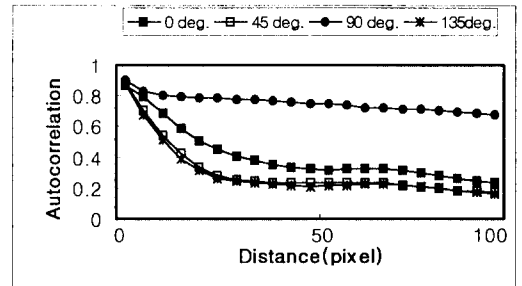
(f) uniformity



(c) inversmoment

Fig.5 Texture information according to distance variation (0.8s)

Fig. 5와 Fig. 6은 0.8s, 25s의 표면에 대하여 거리 d 의 변화에 따른 6가지의 텍스처 파라미터의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)는 거리에 따른 최대 확률 값을 나타낸 그래프로써 0° 를 제외한 나머지 3방향에 대한 값의 차이가 거의 없으며, 거리 d 가 20픽셀이후 부터는 값의 변화가 거의 없음을 나타내고 있다.



(d) auto-correlation

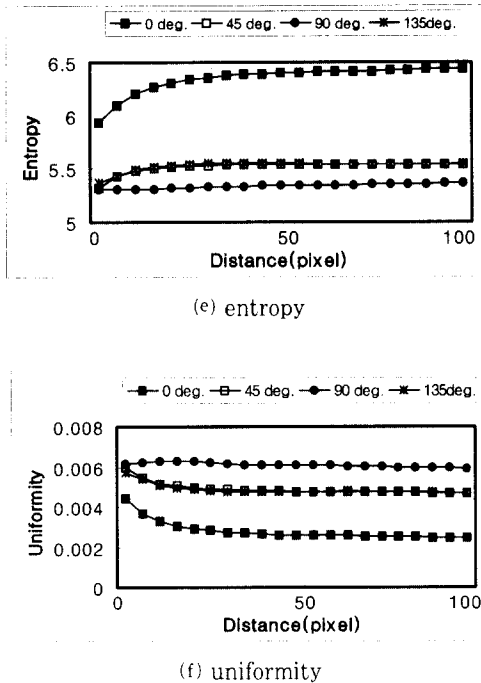


Fig. 6 Texture information according to distance variation (25s)

Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)는 전체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며 50pixel 이후부터는 큰 변화를 나타내지 못하였다. 또한 90° 인 경우 가장 작은 값으로 변화가 완만하게 나타나는데 이는 가공방향과 같은 방향으로 주기적 패턴이나 그레이레벨 값의 변화가 적은 방향이다.

Fig. 5(c)와 Fig. 6(c)는 역모우멘트의 변화를 나타낸 것으로 에너지의 경우와 비교해 서로 상반되는 경향을 나타내며, 값의 변화도 반대의 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5(d)와 Fig. 6(d)는 상관관계를 나타낸 것으로 인접 픽셀간의 상관도가 클수록 큰 값을 가지며, 픽셀간의 거리가 멀리 떨어질수록 상관도는 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 픽셀간의 거리가 멀수록 현재의 위치에서 그만큼 주변 픽셀의 영향이 적다는 것을 알 수 있으며, 따라서 거리의 변화가 텍스처해석에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 5(e)와 Fig. 6(e)는 엔트로피 값의 변화로서 거리 변화에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 표면정보의 랜덤정도가 거리에 관계없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(f)와 Fig. 6(f)는 동질성을 나타내는 것으로 엔

트로피와 같이 일정한 값을 나타내는데 이 경우에도 거리에 관계없이 일정한 값을 나타냈다.

4.2 고찰

비교용 표면거칠기 표준시편의 텍스처해석을 위해 확률적방법을 이용하였으며, 거칠기가 큰 경우의 표면과 적은 경우의 표면에 대하여 방향과 거리의 변화에 따른 G-행렬을 구하였다. 그 결과 G-행렬의 확률밀도는 작은 거칠기 값을 갖는 표면의 경우 확률밀도가 좁게 분포하며 큰 값을 가지나 거친 표면의 경우 적은 확률 값으로 넓게 분포되는 경향을 나타냈다. 이때 분포위치는 영상의 밝기정도를 나타내는 것이며, 따라서 확률밀도의 분포정도로 표면의 상태를 나타낼 수 있다고 하겠다.

또한 네 방향에 대한 거리의 변화에 따른 여섯 개의 텍스처 파라미터는 거리변화의 영향보다는 방향에 대한 영향이 더 크게 작용함을 알 수 있었으며, 방향에 따른 최대확률 값은 0.8s의 경우 거리에 관계없이 0° 방향에서 가장 적은 값을 나타냈다. 이는 가공방향에 대한 직각방향의 광강도 변화가 적다고 할 수 있으며, 실제표면의 변화정도도 적다고 할 수 있다. 따라서 나머지 세 방향의 값이 0° 보다 큰 값을 나타내는 것은 0° 의 방향으로 구성된 표면의 거칠기 변화가 적은 것으로 해석된다. 한편 25s의 경우는 0° 가 가장 작은 값으로 나타나며, 다른 세 방향과 비교하여 큰 차이를 나타낸다. 따라서 이 경우에 0° 방향이 텍스처 해석에 가장 많은 영향을 미친 방향이라 판단된다. 상관관계의 경우 거리가 증가할수록 그 값이 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 현재의 픽셀위치에서 주변픽셀의 거리가 증가함에 따라 그 만큼 영향을 적게 미친다고 해석할 수 있다. 따라서 거리의 변화보다는 방향에 더 많은 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다. 그리고 엔트로피와 동질성의 경우 거리의 변화에 따라 일정한 값을 나타내는데 이는 거리변화에 관계없이 텍스처정보를 가장 잘 반영할 수 있는 일정영역으로도 전체영상을 나타내는 것이 가능하다.

따라서 가공면의 해석을 위해서 표면영상의 텍스처 정보를 가장 잘 나타내 줄 수 있는 최적의 방향 θ 와 거리 d 를 찾을 수 있는 알고리즘을 개발한다면, 정량적 해석이 가능하리라 판단된다.

5. 결론

- (1) 가공표면의 텍스처해석을 위해 비교용 표면거칠기 표

준시편을 대상으로 선정하여 영상의 광강도차를 나타내는 확률변수 G-행렬을 구하였다.

- (2) G-행렬로부터 텍스처 정보를 나타내는 여섯개의 파라미터를 방향과 거리변화에 따라 구하였다.
- (3) G-행렬로부터 텍스처 정보를 방향 θ 와 거리 d 의 변화에 따라 구하였으며, 거리의 변화보다는 방향의 변화에 영향을 받는 것을 알 수 있었다.
- (4) 방향의 변화에 영향을 받는 것으로 나타난 텍스처 정보는 시편의 가공방향에 대하여 수직한 방향의 변화를 잘 나타내 주는 것을 알 수 있었다.

6. 참 고 문 헌

1. Beyerer, J. and Puente, L. F., 1997, " Detection of defect in groove textures of honed surface. " Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 3, pp. 371~389.
2. Ramana, K. V. and Ramamoorthy, B., 1996 , " Statistical methods to compare the textures of machined surface. " Pattern Recognition, Vol. 29, No.9, pp. 1447~1459.
3. Haralick, R. M., 1979, " Statistical and structural approach to texture. " Proc. IEEE, 67, pp. 786~804.
4. 사승윤, 유봉환, 1998, " 영상처리를 이용한 가공면의 텍스처 해석. " 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 702~707.