

푸리에 변환을 이용한 시각적 결함검사 알고리즘에 관한 연구 A Study on Visual Defect Detection Algorithm using Fourier Transform

이 준 석*, 김 수 현, 곽 윤 근
한국과학기술원 기계공학과

개요(Abstract)

결함검사에 영상처리기술을 적용할때, 데이터량때문에 많은 처리시간과 판정의 오류들이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 검사를 해야할 화상을 푸리에 변환과 특징값 추출을 통해서 판정의 오류를 줄이고 처리해야할 데이터량을 줄일 수 있음을 보여준다. 검사 알고리즘은 두단계의 비교과정을 거쳐면서 설정된 기준치를 넘는 경우가 생기면 결함으로 판단을 하는 단순한 특징값의 비교에 의해서 수행이 될수 있음을 보여준다.

1. 서론

산업화가 진행됨에 따라 생산기술과 관련하여 원재료나 가공품의 검사기술이 중요하게 되었다. 특히 대량생산의 경우에는 영상처리를 이용한 자동검사기술이 더욱 중요하게 되었다. 이러한 기술은 기존의 검사기술에 비해 인건비 절감과 검사자의 피로에 의한 실수를 줄일 수 있으며, 표본검사에 의해 표본화가 가능하며, 열악한 환경에서도 검사가 가능하다는 장점이 있다.

이러한 시각적 자동검사기술은 전자기술과 소프트웨어기술의 발달에 의해 대량생산라인이나 빠른 처리가 요구되는 곳, 그리고 지능적처리(Shopisticated processing)가 필요한곳에서 점점 더 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 기술은 처리속도와 가격, 지능적처리 사이에서 균형을 잘 이루어야 한다.

본 연구에서는 이러한 영상처리기술을 결함검사에 적용하기 위한 알고리즘 개발에 관한 것으로, 푸리에 변환과 특징값 추출에 적합한 특징 추출방법 그리고 판단을 위한 알고리즘에 대해 연구하는데 그 목적이 있다.

2. 푸리에 변환

1차원 신호는 아무리 복잡한 신호일지라도 크기와 위상을 가지는 정현파의 수학적 합이나 나열로서 표현이 가능하다. 이러한 사실은 평면 화상신호에 대해서도 적용이 가능하다. 이차원의 화상신호를 푸리에 변환을 하면 아래의 식처럼 나타

날 것이다.

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} f(m,n) \exp\left\{-2\pi i \left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)\right\}$$

결국, 평면 화상신호에 대해 푸리에 변환을 하면, 그 결과는 입력화상신호 $f(m,n)$ 에 포함되어 있는 이차원 주파수 성분의 양을 나타내게 된다. 이러한 이차원 주파수 성분은 범위가 제한되어 있지 않다. 다시말하면 물체의 일부분을 푸리에 변환을 한다고 하여도 변환된 결과는 전체 주파수영역에서 나타난다. 또, $|F(u,v)|^2$ 은 파워스펙트럼이라고 하는데, $f(m,n)$ 이 실수화상이면 원점에 대해 대칭이 된다. 이러한 파워스펙트럼은 입력화상 $f(m,n)$ 이 (a,b)만큼 평행이동을 하면, $\exp\left\{-2\pi i \left(\frac{au}{M} + \frac{bv}{N}\right)\right\}$ 만큼의 위상의 변화만 있으므로, 크기의 제곱을 나타내는 파워스펙트럼은 평행이동에 대해서 일정한 결과를 나타내어, 화상을 입력받을때 물체의 위치나 경계선 검출등의 과정이 불필요하게 된다. 때문에 물체의 셋팅에 상당한 이득이 있다. 하지만 파워스펙트럼만 있을 경우에는 위상에 대한 정보가 없어서 역푸리에변환(Inverse Fourier Transform)을 할 경우 정확한 화상에 나타나지 않는다. 또, 푸리에 변환을 한 결과는 항상 원점을 중심으로 한 결과가 나타나기 때문에 특징값을 추출을 할때, 기준이 되는 점이 존재하게 된다. 이러한 성질 때문에 같은 입력화상에 대해서는 같은 특징값을 추출할수가 있게 된다.

원래 푸리에 변환은 계산시간이 상당히 많이 걸리지만, 광학적인 방법으로 푸리에 변환을 하면 실시간내에 푸리에 변환을 할 수 있다. 결국, 공장 자동화 라인에서 제품의 결함검사에 적용이 가능하게 된다.

3. 푸리에 특징값 추출

이제부터는 푸리에 변환된 결과가 파워스펙트럼으로 나타나 있다고 가정을 한다. 이 결과는 원래 입력화상 $f(m,n)$ 의 위

상을 제외한 모든 정보를 포함하고 있다. 결국, 푸리에 변환된 결과에서의 적절한 특징값을 추출하면 원래 화상의 정보를 알 수가 있게 된다.

화상신호는 기본적으로 데이터량이 많다. 그래서 특징값 추출이라는 과정을 통해 특징값 추출과 동시에 데이터도 압축을 할 수 있다. 특징값 추출의 방법은 푸리에 변환된 화상에서 미리 정의된 영역에서 감지되는 빛의 양을 더하는 것으로, 요구하는 특징값에 따라 여러가지 추출방법이 있다. 여기에서는 원래 화상에서 방향의 특징을 나타내는 Wedge Sampling Geometry와 주파수의 특징을 나타내는 Ring Sampling Geometry를 이용을 한다. 특징값의 수는 계산시간이나 정보의 손실정도, 그리고 검사에서 적절한 특징을 보여줄 수 있을 정도로 선택을 한다. Wedge와 Ring Sampling Geometry에 대한 특징값을 계산하는 방법과 실제 모양은 다음과 같다. 푸리에 변환된 결과가 파워스펙트럼이라고 가정 했으므로, 출력되는 결과는 원점 주위가 저주파성분, 가장자리가 고주파 성분이된다. 결과가 원점 대칭이므로 특징값 추출은 절반에 대해서만 한다. 또 원점주위는 변별력이 낮으므로 특징값 추출에서 제외하고, 가장자리부분의 원밖의 성분에 대해서도 제외를 한다.

먼저, Wedge Sampling Geometry를 보면, 반원을 16개의 같은 넓이로 나뉘서 특징값을 추출한다.

$$m_j = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \int_{\phi_i}^{\phi_i + \Delta\phi} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi$$

이런 방법에 의한 특징값은 모든 주파수의 특정한 방향에 대한 특징값을 의미한다. 결국, 크기의 변화에 대해서 불변한 특징이 있다(Scale Invariant).

앞의 Wedge Sampling Geometry와 같이 사용한 특징값 추출의 방법이 Ring Sampling Geometry이다. 이방법은 모든 방향의 특정한 주파수의 특징값을 나타내는 것으로, 방향의 변화에 대해 불변의 특징을 갖는다(Rotation Invariant).

$$m_j = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_i}^{\rho_i + \Delta\rho} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi$$

위의 두가지 특징값추출 방법에서 알 수 있듯이 각각은 특징값은 하나의 특정한 방향이나, 하나의 특정한 주파수가 아니다. 방향에서도 약간의 폭이 있고, 주파수에서도 약간의 주파수 영역이 있다. 이렇게 함으로서 미세한 방향이나 주파수의

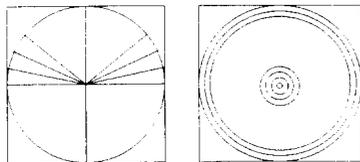


fig.1 Wedge and Ring Sampling Geometry

변화에 대해서 민감하게 반응을 하는 것을 막아준다.

4. 검사 알고리즘

위에서 언급한 방법으로 특징값을 추출을 한후, 이 값들을 가지고 결함을 검사를 하게 된다. 여기에서는 두 종류의 특징값의 수를 16개로 각각 정하였다.

먼저, 정품에 대해서 오프라인으로 전처리과정을 거친다. 이 과정에서는 여러개의 정품에서 16개 특징값 각각에 대해 평균과 표준편차를 구한다. 이 두값을 이용하여 각각의 특징에 대한 ED(Euclidean Distance)의 제곱을 구하고, 이 값들을 쓰레쉬홀드(threshold)의 설정에 이용을 한다. ED는 아래와 같이 구하며,

$$ED_{i,j} = (Y_i - m_j) / \sigma_j$$

여기에서 $ED_{i,j}$ 는 j번째 제품의 i번째 특징값의 ED를 의미하고, Y_i 는 i번째 특징값을, m_j 는 i번째 특징값의 평균, σ_j 는 i번째 특징값의 표준편차를 말한다.

쓰레쉬홀드는 전처리과정에서 이용된 제품을 정품으로 판정을 할 수 있도록 설정을 한다. 여기에서는 Wedge 특징에 대해서는 쓰레쉬홀드의 구간(High Threshold와 Low Threshold)을, Ring 특징에 대해서는 단일 쓰레쉬홀드를 설정하였다.

그다음 과정은 온라인 검사과정이다. 앞에서 오프라인으로 구한 각각의 특징에 대한 평균과 표준편차를 이용하여 검사하는 제품의 ED를 구하고, 이를 검사에 이용한다. 먼저, Wedge 특징에 대한 각각의 ED를 구하고 이를 쓰레쉬홀드 구간에 비교를 해서 정품과 결함이 있는 제품, 그리고 애매한 제품으로 구분을 한다. 쓰레쉬홀드 구간을 Wedge 특징값의 쓰레쉬홀드의 0.5배에서 1.5배 사이로 정하고, ED가 쓰레쉬홀드의 1.5배 이상이면 결함이 있는 제품, 쓰레쉬홀드의 0.5배에서 1.5배 사이이면 판단하기가 애매한 제품, 그리고 쓰레쉬홀드의 0.5배 이하이면 결함이 없는 제품으로 판단을 한다. Wedge 특징에 의해 애매한 제품이라 판단이 되면 그 제품은 다시 Ring 특징에 대한 Ring의 쓰레쉬홀드와 비교하여 쓰레쉬홀드 이상이면 결함이 있는 제품, 쓰레쉬홀드 이하이면 정품으로 최종 판단을 한다.

5. 실험결과 및 고찰

실험에서 사용한 제품은 제작 공정이 공장 자동화 라인에서 쉽게 적용이 가능한 제품으로 하였다. 결함은 상표를 붙이는 과정에서 상표에서 발생할 수 있는 여러가지 결함으로서 임의로 선정을 하여서 실험을 했다. 먼저 약 30개의 정품에 대해서 전처리과정을 거쳤다. 이 전처리과정에서 구한 평균과 표

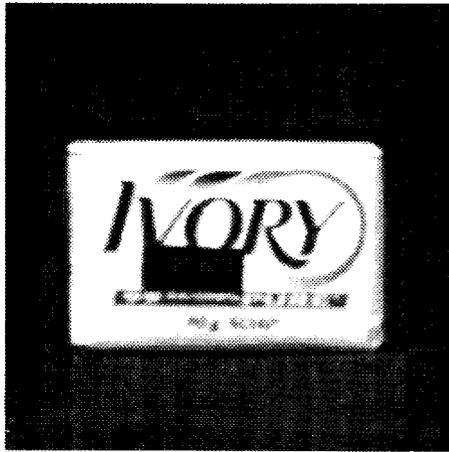


fig.2 Good object used test procedure

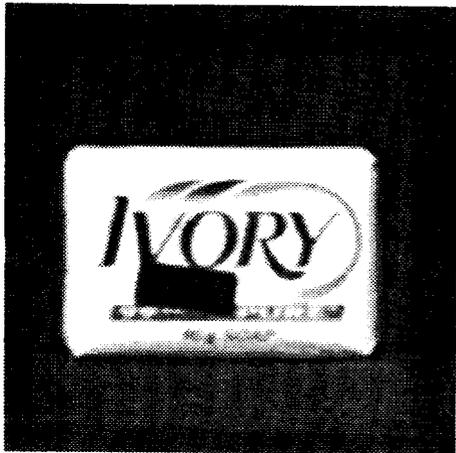


fig.3 Bad object used test procedure

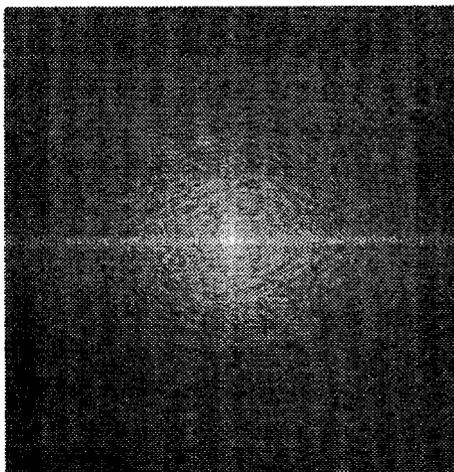


fig.4 Result of Fourier Transform

준편차는 fig.5, fig.6 에서 각각 가로와 세로의 막대로 표시가 되어있다. 그리고, 전처리과정에서 구한 각 특징값의 쓰레쉬홀드는 Table 1 에 있다.

Feature number	Low Threshold of Wedge	High Threshold of Wedge	Threshold of Ring
1	1.2967	3.8900	4.8277
2	2.5531	7.6592	4.5240
3	2.6097	7.8290	5.6938
4	3.6037	10.8110	4.3794
5	2.3623	7.0869	3.7764
6	3.0937	9.2812	3.5488
7	2.0298	6.0893	3.5483
8	2.7706	8.3117	3.8265
9	1.3148	3.9445	3.0761
10	3.0220	6.0659	4.8585
11	2.7140	8.1421	3.5869
12	2.2155	6.6464	3.0805
13	2.7864	8.3592	3.0095
14	1.6546	4.9639	4.0907
15	2.4956	7.4869	3.5172
16	2.1705	6.5115	4.6055

Table 1. High and Low Threshold of Wedge and Threshold of Ring

Figure 5 과 6 에서 쉽게 알 수 있듯이, 결함이 있는 제품은 평균을 기준으로 하여 각각의 특징값들이 표준편차를 벗어나는 것이 많이 있다. 물론 이것이 결함의 판단 기준이 되는 것은 아니지만 표준편차를 벗어나는 경우가 많을 수록 ED 값이 커지게 되고 이로 인해 쓰레쉬 홀드를 벗어나는 경우가 발생하게 된다. 표준편차의 범위를 벗어나는 것이 있으면 그 특징에 해당하는 부분에서 결함이 존재할 가능성이 큼을 의미한다. Figure 5 과 6 는 결함이 있는 제품의 Wedge 특징값과 Ring

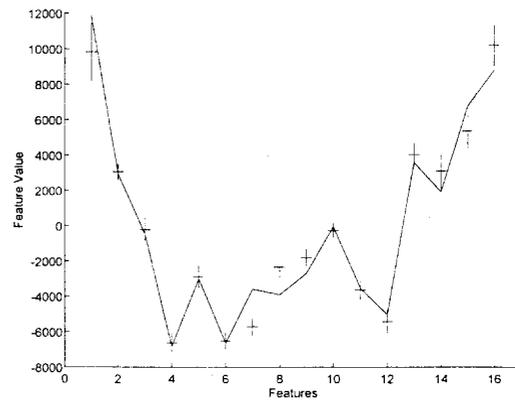


fig.5 Wedge feature of Large Rotation (# 2)

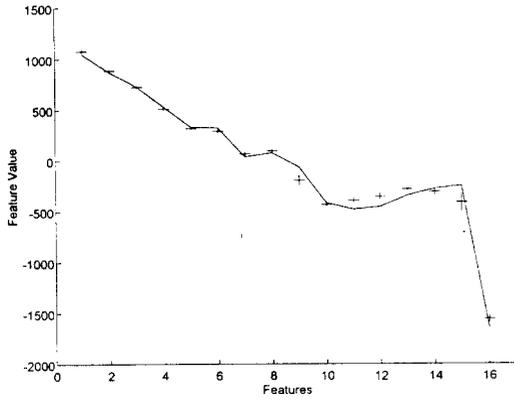


fig.6 Ring feature of Small tearing (# 4)

특징값으로 평균과 표준편차에 대한 상대적인 값을 나타낸다.

Table 2 에는 검사한 결과를 나타낸다. 결함이 없는 경우 (Good)를 5 개, 상표가 약간의 회전이 있는 경우(Small Rot.)가 6 개, 많은 회전이 있는 경우(Large Rot.)가 5 개 그리고 상표가 약간 찢어진 경우(Small Tear)가 7 개, 많이 찢어진 경우(Large Tear)가 7 가지로서, 모두 30 개의 샘플에 대해서 검사를 실시 하였다. Table 2 가 나타내는 결과는 먼저 Wedge 특징에 의해 큰값의 쓰레쉬홀드보다 큰 경우와 두개의 쓰레쉬홀드 구간내에 있는 경우의 각각의 횟수를 나타내고, Ring 특징에 관해서도 쓰레쉬홀드보다 큰 경우의 횟수를 나타낸다. 결국, 테스트 하는 제품의 ED 가 Wedge 특징의 큰 값의 쓰레쉬홀드보다 크면 Ring 특징값의 비교 없이 그대로 결함으로 판단을 하고, Wedge 특징의 두 쓰레쉬홀드 사이에 있으면 결함으로 판단하기에 애매하기 때문에 Ring 특징에 대해 다시 테스트를 해서 Ring 특징의 쓰레쉬홀드보다 크면 결함으로 판단을 한다. 또, ED 가 Wedge 특징의 작은 쓰레쉬홀드보다 작으면 Ring 특징에 대해 비교없이 정품으로 판단을 한다.

같은 모양의 제품들을 일정한 갯수를 용기에 담을 경우 제대로 제품들의 정확한 배치 여부를 판단하는 일도 상당히 사람들이 하기에는 피곤한 작업이다. 이러한 경우에 대해서도 실험을 행하였다. 이것의 결과도 만족할만한 결과가 나왔다 (fig.7 and fig.8).

6. 결론

위의 결과에서도 알수 있듯이 푸리에 변환을 이용한 결함의 검사가 상당히 좋은 결과를 보이고 있음을 알수 있다. 형판 매칭방법이나 몇개의 점을 추출하여 결함을 검사하는 방법에 비해 좋은 점은 형판매칭과 같이 시간이 많이 걸리지 않는다는 점과, 푸리에 변환을 해서 전체 화상의 정보를 이용해서

Object	# of higher objects than high threshold of Wedge	# of between high & low threshold of Wedge	# of higher than threshold of Ring	
Good # 1	0	4	0	
Good # 2	0	2	0	
Good # 3	0	0		
Good # 4	1	0		bad reject
Good # 5	0	1	0	
Small Rot. # 1	1	3		
Small Rot. # 2	0	3	6	
Small Rot. # 3	0	5	8	
Small Rot. # 4	0	3	8	
Small Rot. # 5	1	1		
Small Rot. # 6	1	4		
Large Rot. # 1	1	9		
Large Rot. # 2	3	2		
Large Rot. # 3	4	4		
Large Rot. # 4	2	2		
Large Rot. # 5	1	3		
Small Tear # 1	1	4		
Small Tear # 2	0	5	7	
Small Tear # 3	2	4		
Small Tear # 4	0	6	15	
Small Tear # 5	1	3		
Small Tear # 6	0	3	0	bad accept
Small Tear # 7	1	4		
Large Tear # 1	2	1		
Large Tear # 2	0	2	13	
Large Tear # 3	3	1		
Large Tear # 4	1	3		
Large Tear # 5	1	2		
Large Tear # 6	0	3	9	
Large Tear # 7	4	1		

Table 2 . Results of Test

오판을 줄일 수 있다는 점이다. 실제로 렌즈, 슬릿, 레이저등을 이용하여 푸리에 변환을 실시간내에 할 수가 있기 때문에 자동화라인에서 결함검사에 이용이 가능하다.

또, 전처리과정에서 평균과 표준편차를 구해서 단순히 통계적인 방법으로만 검사를 수행을 하였는데, 이부분에서 학습을 통하여 변화가 많은 시스템이나 상당히 복잡한 시스템에 대해서도 적용이 가능할 것으로 본다.

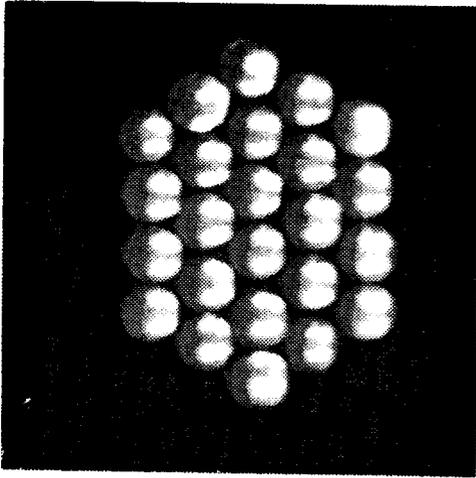


Fig.7 Other sample which was tested

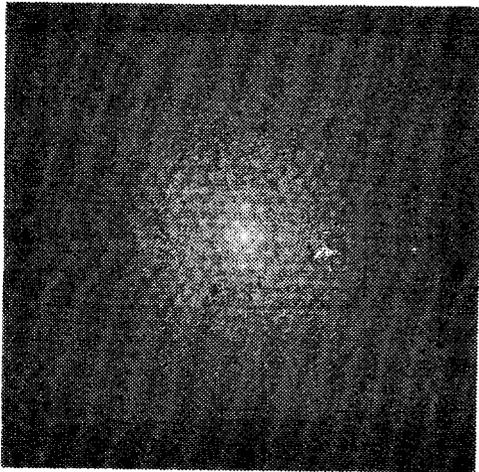


Fig.8 Fourier Transform of fig.7

1995

[7] N.Geogre, J.T.Thomasson and A.Spindel, "Photodetector light pattern detector", U.S.Patent 3,689,772 (5 September 1972)

[8] David Clark and David Casasent, "Optical feature extraction for high-speed inspection", SPIE 1987

[9] J.P.Chan, B.G. Batchelor, I.P.Harris and S.J.Perry, "Intelligent Visual Inspection Of Food Products", SPIE Vol.1386 Machine Vision Systems Integraion in Industry (1990)

[10] Amir R.Novini, "The Lighting and Optics Expert System for Machine Vision", SPIE Vol.1386 Machine Vision Systems Integraion in Industry (1990)

[11] Donald J.Bone, H.A.Bachor and R.John Sandeman, "Fringe-pattern Analysis using a 2-D Fourier transform", Applied Optics Vol.25 No.10 1653-1660 15 May 1986

7. 참고문헌

[1] George G.Lendaris and Gordon L.Stanley, "Diffraction-pattern sampling for automatic pattern recognition", Proceedings of the IEEE, vol.58, no. 2, 198-216, February, 1992

[2] C.Gorecki, "Optical classification of machined metal surfaces by Fourier spectrum sampling", Wear, 137, 297-298, 1990

[3] B.K.Miller and M.J.Delwiche, "Peach defect detection with machine vision", Transaction of the ASAE, vol.34, no.6, November-December, 1991

[4] Jay L.Devore, "Probability and statistics for engineering and the science" 3rd. Brooks/Cole

[5] David Clark, "An optical feature extractor for machine vision inspection", Proceedings of the Vision '87 conference, Society of Manufacturing Engineer(SME) June 1987

[6] 이 양범, 강 경일, 이 용중, "화상처리 응용기술", 기문사.