韓國精密工學會 2000年度 秋季學術大會論文集 pp.81~84 KSPE 00F019

회전기계 고장 진단을 위한 최근접 이웃 분류기의 기각 전략

최영일, 박광호(전남대 대학원 기계공학과), 기창두(전남대 기계공학과)

Rejection Scheme of Nearest Neighbor Classifier for Diagnosis of Rotating Machine Fault

Y. I. Choi, K. H. Park, C. D. Kee(Mechanical Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

Rotating machine is used extensively and plays important roles in the industrial field. Therefore when rotating machine get out of order, it is necessary to know reasons then deal with the troubles immediately. So many studies for diagnosis of rotating machine are being done. However by this time most of study has an interest in gaining a high recognition But without considering error rate[1][2][3], it is not desirable enough to apply to the actual application system. If the manager of system receives the result misjudging the condition of rotating machine and takes measures, we would lose heavily. So in order to play the creditable diagnosis, we must consider error rate. That is, it must be able to reject the result of misjudgment.

This study uses nearest neighbor classifier for diagnosis of rotating machine[4][8] And the Smith's rejection method[1] used to recognize handwritten charter is done. Consequently creditable diagnosis of rotating machine is proposed

Key Words : Pattern Recognition(통계적 패턴 인식), Nearest Neighbor Classifier(최근접 이웃 분류기) Rejection Scheme(기각전략), Recognition Rate(인식율), Error Rate(오차율), Reject Rate(기각율), Rotating Machine(회전기계)

1. 서론

최근 발전 플랜트 및 화학 플랜트의 대형화와 자동화에 따른 설비의 안정적 운전이 요구되고 있다. 대부분 사고는 주로 회전기계에서 발생하고 있으며 많은 연구자들이 관심을 갖고 플랜트 시스템의 신뢰성 및 가동률 향상을 위해 연구하고 있다. 이 중에서도 설비의 안전 운전과 예방 보존기술의 향상을 위해 노력하고 있다. 그 중에서 진동 신호 모니터링은 회전 기계의 상태를 해석하는 가장 유용한 수단이다. 기계에 심각한 결함이 발생되어 교체를 해야 되기 전에 결함을 발견할 수 있도록 도와주며 효율적인 운전 계획이 가능하도록 해준다[5][6][7][8][9][10].

패턴 인식 기법에 의한 회전기계 결함 분류는 진동 신호로부터 정량적인 특징 값을 얻어 내는 "특징 추출 과정"과 이미 회전기계의 상태를 알고 있는 상태에서 취득한 패턴들을 이용하여 학습 지식 자료를 구성하는 "학습 과정", 그리고 얻어진 학습 정보를 바탕으로 결함을 분류하는 "판단 과정"으로 나눌 수 있다.

패턴 인식 기법을 이용한 회전기계 고장 진단은 연구가 많이 이루어져 왔고 활발히 진행중이다[4][8]. 그러나 진동 신호는 같은 고장 상태에서도 잡음과 같은 외부 환경에 의하여 그 형태가 많이 변하기 때문에 인식하는 데 어려움이 많다. 따라서 실제 시스템에 적용할 수 없는 형편이다. 그러나 진단에 대한 효과적인 기각을 할 수 있다면 실제 시스템에 적용할 수 있는 인식 성능을 얻을 수 있을 것이다.

패턴 인식 기법에서 인식 성능은 인식률과 오차율에 의하여 평가되어진다. 그러나 대부분의 연구는 인식률에 기반하고 있다. 이때 인식률은 입력 패턴에 대한 정인식된 패턴의 비율을 말한다. 그러나 고장 진단과 같은 시스템에서는 오인식에 따른 손실을 감안한다면 인식률 향상과 더불어 오차율을 줄이는 연구가 뒤따라야 할 것이다[1][2][3][11]. 즉 고장 진단을 수행하는 과정에서 발

생할 수 있는 잘못된 판정을 줄일 수 있어야 한다. 따라서 오인식된 패턴을 효과적으로 기각할 수 있는 전략이 필요하다.

본 연구에서는 고장 상태를 알고 있는 회전기계의 진동 신호를 취득하고 최근접 이웃 분류기를 이용하여 패턴 분류를 한다. 최근접 이웃 분류기에서 나온 거리 정보와 분류 결과를 이용하여 기각을 수행한다. 기각에 따른 오차의 추이를 통하여 신뢰성 있는 기각 모듈을 제안한다.

2. 기각의 개념 및 기각 방법

2.1 기각의 개념

패턴 분류 문제에 대한 결정 이론 접근은 각 클래스의 수준에서 최적의 인식 시스템을 설계하는 것이다. 즉 인식 시스템은 패턴 공간상에서 최적의 클래스를 결정하는 것이다. 일반적으로 인식 과정은 전처리 단계와 분류 단계로 나뉘어진다. 그러나 본 절에서는 분류 단계의 기각에 관해 살펴보고자 한다. 패턴 벡터를 υ, 판별 함수를 $d(\upsilon)$라 할 때, 패턴 인식 시스템의 처리 단계는 다음과 같다.

판별함수 $d(\upsilon)$을 계산한다.
$d(\upsilon)$의 최대 값을 탐색한다.
기각을 조사한다.

모든 패턴 인식 시스템은 일정한 비율로 오인식한다. 이는 패턴이 발생하는 과정에서 다양한 왜곡 현상이나 잡음에 의해 인식의 판정이 모호해지기 때문이다. 이런 구분하기 어려운 패턴을 인식하지 않는 것으로 처리하기 위해서 기각의 개념을 도입하는 것이다.

패턴 인식 시스템에서 뛰어난 분류 능력을 갖는 판별 함수를 개발하여 인식 성능을 높일 수도 있지만 효과적인 기각 함수를 개발하여 효율적인 인식 성능을 높일 수도 있다. 궁극적으로 인식기의 신뢰도를 향상하는 것을 목표로 한다. 기각이란 인식기가 패턴을 클래스 중 하나로 분류하는데 충분한 확신이 없으면 결정을 잠정적으로 거절한다는 것이다. 즉 이것은 입력 패턴이 어떤 클래스에도 속하지 않는다고 결정하는 것이다.

입력 패턴을 기각하는 경우는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 분류하고자 하는 클래스들 중 하나에 속하는 입력 패턴을 임의의 클래스로 분류하기 위한 신뢰수준이 낮은 경우에 그 패턴을 기각할 수 있고, 두 번째로 입력 패턴이 분류하고자 하는 클래스 중 어디에도 속하지 않는 경우로 이 또한 입력 패턴의 신뢰수준이 낮아 기각할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 첫 번째 경우로 한정한다.

2.2 기각 방법

Smith[1]는 최근접 이웃 분류기를 이용해 필기체 숫자를 인식하였다. 그리고 최근접 이웃 분류기로부터 얻은 거리 정보와 분류 결과를 이용하여 기각을 수행하였다.

임의의 입력 패턴에 대하여 훈련 패턴과 가장 가까운 거리를 고려하였는데, 이를 k-NN 신뢰 척도라 하고 식(1) 같다.

$$1-\frac{D_1}{K} \tag{1}$$

이때 D_1은 입력 패턴과 가장 가까운 거리이고, K는 상수로 최대 거리보다 더 큰 값으로 한다. 이 신뢰척도가 좋은 기준이라면 정인식된 패턴들의 분포는 오인식된 패턴들의 분포보다 높은 신뢰 값 주변에 분포한다.

입력 패턴에 대하여 가장 가까운 거리와 더불어 그 다음으로 가까운 거리도 큰 영향을 끼친다. Smith 는 이 두 거리의 비를 고려하였는데, 이를 비의 신뢰 척도라 하고 식(2)와 같다.

$$1-\frac{D_1}{D_2} \tag{2}$$

이때 D_1은 입력 패턴과 가장 가까운 거리이고, D_2는 D 이 속한 클래스와는 다르면서 그 다음으로 가까운 거리이다. 비의 신뢰 척도를 이용한 정인식된 패턴들과 오인식된 패턴들과의 분포는 k-NN 신뢰척도를 이용한 분포보다 잘 분리된다. 이는 거리의 비의 신뢰척도를 이용한 기각 방법이 더 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

이와 같은 사실을 근거로 하여 입력 패턴과의 다른 클래스와의 이웃 하는 패턴들과의 가까운 거리 정도를 이용하는 정보가 신뢰 척도를 계산하는데 더 좋은 영향을 준다는 것을 전제로 할 수 있다. 식(3)은 이를 고려하여 개선된 최적 신뢰 척도이다.

$$1-\omega\frac{D_1}{K}-\sum_{i=1}^{5}x_i\frac{D_1}{D_i}+\sum_{i=2}^{6}y_i\left(\frac{D_1}{D_i}\right) \tag{3}$$

이때 ω, x_1, $x_i(i=2,\cdots,5)$, $y_i(i=2,\cdots,6)$는 가중치로 gradient decent 방법을 이용하여 최적화 하였다. 위 신뢰척도의 각 항을 설명하면

① $\frac{D_1}{K}$: k-NN 신뢰 척도

② $\sum_{i=1}^{5} x_i \frac{D_1}{D_i}$: 입력 패턴과의 가장 가까운 패턴의 거리와 다른 클래스에서 그 다음으로 가까운 패턴 다섯 개의 거리의 비의 합

③ $\sum_{i=2}^{6} y_i (\frac{D_1}{D_i})$: 입력 패턴과의 가장 가까운 패턴의 거리와 같은 클래스(즉 가장 가까운 패턴이 속한)에서 그 다음으로 가까운 패턴 다섯 개의 거리의 비의 합

임의의 입력 패턴에 대하여 Smith 의 세 가지 방법의 신뢰 척도를 계산하였을 때, 이 값이 미리 정해 놓은 기준치 θ 보다 크면 일등 후보를 입력 영상에 대한 인식 결과로 받아들이고, 작으면 기각한다. 일반적으로 기준치 θ 는 Bayes 정리에 의하여 전체 훈련 집합으로부터 추정된다.

3. 특징 추출

본 연구의 실험장치 구성은 Fig.1 과 같으며 정상 상태, 정열불량 상태, 불평형 상태, 러빙 상태를 조합하여 8 가지 상태를 만들었다.

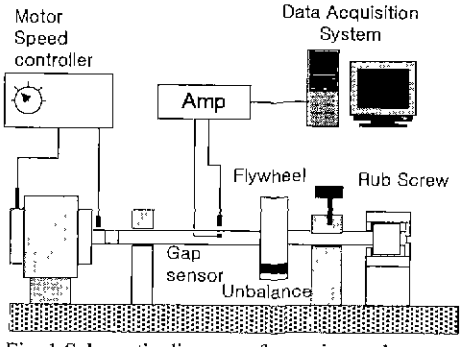

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

각 상태별 실험 방법을 살펴보면 다음과 같다. 정상 상태는 회전체에 결함 조건을 적용하지 않고 진동 신호를 살펴보았다. 정열불량 상태는 Shaft 에 횡 방향의 인위적인 힘을 가함으로써 Shaft 중심선이 일치하지 않는 경우를 살펴보았다. 불평형 상태는 축에 부착된 디스크의 구멍 하나에 1g 의 질량을 추가하고 진동신호를 살펴보았다. 러빙 상태는 러빙 나사(Rub Screw)를 이용하여 하우징에 있는 구멍에 러빙 나사를 돌려 진동 신호를 살펴보았다.

① 정상 상태
② 정열불량 상태
③ 불평형 상태
④ 러빙 상태
⑤ 정열불량과 불평형이 작용하는 상태
⑥ 정열불량과 러빙이 작용하는 상태
⑦ 불평형과 러빙이 작용하는 상태
⑧ 정열불량, 불평형, 러빙이 작용하는 상태

진동 신호를 곧바로 패턴 분류기의 입력으로 사용할 수 없으므로 특징 벡터를 추출하여 분류기의 입력으로 사용한다. 본 연구에서는 회전 기계 고장 진단에 일반적으로 사용되는 시간 영역 특징을 이용하여 고장 진단을 시도하였다[4].

Mean value

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} x\, p(x)\, dx \tag{4}$$

Variance value

$$v = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2\, p(x)\, dx \tag{5}$$

Skewness value

$$s = \left[\int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^3\, p(x)\, dx \right] / \sigma^3 \tag{6}$$

Kurtosis value

$$k = \left[\int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^4\, p(x)\, dx \right] / \sigma^4 \tag{7}$$

여기서 x 는 진동 신호, m 은 평균, σ 는 표준 편차, $p(x)$ 는 확률 밀도 함수이다.

수평 수직 방향의 진동을 4096Hz 로 각각의 상태에 대해 600 개의 데이터를 샘플링하였다. 300 개는 분류기의 훈련을 위하여 나머지 300 개는 테스트를 위하여 사용하였다. 수평 수직 방향의 진동 신호에서 특징을 각각 4 개씩 추출하였다.

4. 회전기계 고장 진단 및 기각

최근접 이웃 분류기에 2400 개(각각 300 개)의 고장 패턴을 가지고 훈련을 시켰고 다시 2400 개(각각 300 개)의 패턴을 이용하여 고장 진단을 수행하였다. 진단 결과 90.08%의 인식률을 얻었고 9.92%의 오차률을 얻었다.

최근접 이웃 분류기에서 얻은 거리정보와 인식결과를 이용하여 Smith 가 제안한 세 가지의 기각 방법을 이용하여 기각을 수행하였다 기각에 대한 오차의 추이는 Fig. 2 ~ Fig. 4 와 같다.

Smith 가 제안한 첫 번째 방법은 26.25%의 기

각을 두 번째 방법은 19.17%의 기각을 수행하였고 세 번째 방법은 18.75%의 기각을 수행하여 0%의 오차률을 얻었다. 세 번째 방법이 가장 효과적인 기각을 수행하였다.

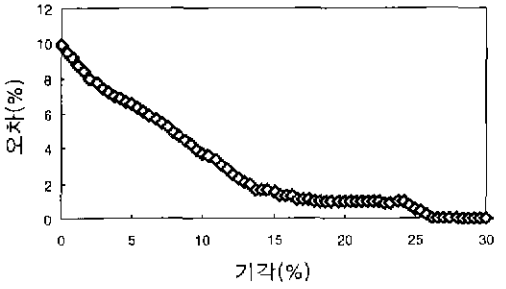

Fig. 2 Reject-Error curve(k-NN confidence measure)

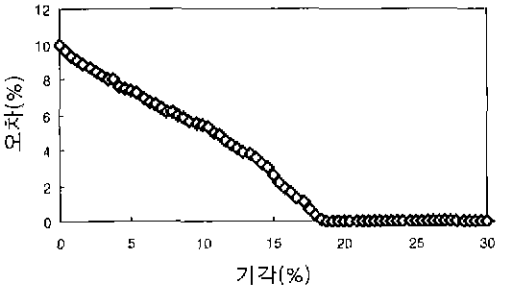

Fig. 3 Reject-Error curve(Ratio confidence measure)

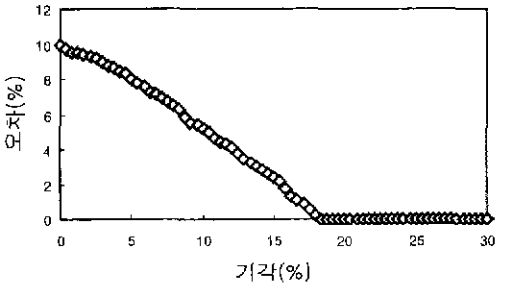

Fig. 4 Reject-Error curve(Optimal confidence measure)

5. 결론

본 논문은 회전기계 고장 진단에서 신뢰성을 확보하기 위하여 기각의 개념을 도입하였다.

회전기계의 진동 신호를 측정하여 데이터베이스를 만들고 최근접 이웃 분류기를 이용하여 고장 진단을 수행하였다. 최근접 이웃 분류기에서 얻은 거리정보와 분류 결과를 이용하여 Smith 가 제안한 기각 방법을 수행하였다. 기각에 따른 오차의 추이를 통하여 적정 기각률을 선정하였다.

이를 토대로 실제 시스템에 적용할 수 있는 신뢰성 있는 회전기계 고장 진단 방법을 제안한다.

참고문헌

1. S. J. Smith, M. o. Bourgoing, "Handwritten character classification using nearest neighbor in large database", IEEE, 1994.
2. H. Mizutani, "Discriminative learning for minimum error and minimum reject classification", proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition, Kawasaki, Japan, 1998
3. M. Golfarelli and D. Mario, "On the error-reject *trade-off in biometric verification systems*," IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, No 7, pp. 786-796, 1997.
4. W. Gersch, T. Brotherton, S.Braun, "Nearest Neighbor-Time Series Analysis Classification of Faults in Rotating Machinery" Transactions of the ASME, Vol. 105, April, pp. 178~184, 1983.
5. J. T. Renwick "Vibration analysis - a proven technique as a predictive maintenance tool" IEEE Transations on Industry Applications, Vol. 21, pp. 324-332, March 1985.
6. Mathew, J. Alfredson, R. J., "The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration Analysis" Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 106, pp. 447-453
7. C. K. Mechefske AND J. Mathew "Fault Detection and Diagnosis in Low Speed Rolling Element Bearings Part II: The Use of Neatest Neighbour Classification" Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 6 No. 4 pp 309~316, 1992.
8. 김창구, 박광호, 기창두, "회전기계 고장 진단에 적용한 인공신경망과 통계적 패턴인식 기법의 비교 연구" 한국정밀공학회지 제 16 권 제 12 호.
9. 이정철, "고정도 스펙트럼 해석법에 의한 회전기계의 이상진단에 관한 연구" 한양 대학교 대학원 박사학위논문, 1995.
10. 배용채, "터빈이상 진동의 자동 진단 시스템에 관한 연구" 전남 대학교 대학원 박사학위논문, 1995.
11. 송성진, "용접 결함 분류를 위한 초음파 형상 인식 기법" 한국 비파괴검사학회지, 제 15 권, 제 2 호. pp. 395-405. 1995.