카메라 영상을 이용한 진동변위 측정

A Technique for Measuring Vibration Displacement Using Camera Image

손 기 성†·전 형 섭*.박 진 호**.박 중 원***

Ki-Sung Son, Hyeong-Seop Jeon, Jin-Ho Park and Jong Won Park

(Received May 22, 2013 ; Revised September 3, 2013 ; Accepted September 3, 2013)

Key Words : Displacement Measurement(변위측정), Image Processing(영상처리), Vibration(진동), Camera(카메라)

ABSTRACT

Vibration measurements using image processing have been studied by many researchers as it can remotely measure vibration displacements at multiple points simultaneously. It is difficult, however, to obtain accurate displacement from the measured image signals because the resolution of image data is dependent on camera performance and normally lower than that of vibration transducer directly measured. This paper suggests the enhanced technique for vibration displacement measurement by applying the expected value of edge probability distribution to the varying pixel points in the image. The method can both increase the resolution limit of camera image and decrease the measurement errors. The working performance of the proposed technique is verified applying to the vibration measurement of a rotating machine.

Nomenclature

ΔS_{ij} : 이웃 픽셀과의 차이 값
 $S(i,j)$: 그레이 영상
 $F(S_1)$: 관심영역 A의 픽셀단위 측정 값
 $F(S_2)$: 관심영역 B의 픽셀단위 측정 값
 P_1 : 관심영역 A의 기준좌표
 P_2 : 관심영역 B의 기준좌표
 D_{pixel} : 픽셀 단위 지름
 D_{real} : 대상체 설계 지름
 P_{size} : 단위 픽셀당 실제 사이즈(mm)

1. 서 론

건물이나 교량과 같은 구조물의 진동 변위를 측정하기 위한 방법으로 가속도센서나 변위센서를 이용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 이 방법들은 센서 설치 단계에서부터 측정에 이르기까지 많은 시간과 비용이 따른다. 또한, 측정 포인트의 증가에 따라 그 비용도 함께 증가하게 된다. 최근 기존 센서를 이용한 방법들의 단점을 보완하고자 카메라를 이용한 진동 변위 측정기술에 관한 연구가 제시되기도 하였다⁽¹⁻⁴⁾. 카메라를 이용하면 원거리에서 측정이 가능하며 한 번의 촬영으로 다중포인트 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 대부분의

† Corresponding Author ; Member, SAE-AN ENGINEERING CO.
E-mail : infoson@sae-an.co.kr

Tel : +82-42-868-4868, Fax : +82-42-868-8313

* SAE-AN ENGINEERING CO.

** Korea Atomic Energy Research Institute

*** Chugnam National University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

연구들은 건물이나 교량과 같은 대형 구조물의 진동 변위 측정에 국한되어 있으며 영상처리단계에서 카메라 해상도의 한계로 인한 많은 오차를 보이고 있다. 영상을 이용한 진동변위 측정을 위해 가장 중요한 요소 중 하나가 측정분해능이라 할 수 있는데 기존의 카메라를 이용한 방법들이 카메라 해상도의 한계를 벗어나지 못하고 있는 것이 사실이다. 따라서 측정 해상도를 높이기 위해서는 높은 해상도를 갖는 고가의 카메라를 사용해야만 하며 고해상도 영상으로부터 진동변위 신호를 산출하기 위해서는 많은 연산 시간을 필요로 한다. 또한, 구조물에 타켓을 설치하거나 마킹을 통하여 측정하는 방법을 주로 사용하고 있어 Fig. 1과 같은 회전체의 경우에는 이러한 방법을 적용하기가 어렵다.

마킹 또는 타켓을 설치할 수 없는 조건에서 진동변위를 측정할 수 있는 기존의 방법으로 커브피팅을 이용한 방법이 있다⁽⁵⁾. 이 방법은 영상처리 방법의 하나인 에지(edge) 검출 방법을 이용하여 대상체의 에지를 추출하고 에지의 변화를 추출하는 방법이다. 커브피팅 방법은 관심영역으로부터 추출된 에지 픽셀들을 커브피팅한 후 구해진 직선의 방정식으로부터 대표값을 산출하는 방법이다. 이 방법은 영상의 해상도보다 작은 변위까지 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 기존의 에지 검출 방법을 이용하고 있어서 효과적인 에지 검출을 위해서는 노이즈 제거를 위한 전처리 과정이 필요하며 에지 검출을 위한 컨볼루션(convolution) 연산 수행 및 구해진 에지로부터 노이즈를 제거하기 위한 추가적인 연산이 필요하다. 따라서, 영상으로부터 측정값을 산출하기 위해 많은 연산 시간을 필요로 하고 있다.

이 연구에서는 회전체 또는 높은 곳에 위치한 구조물과 같이 사람의 접근이 어렵고 위험한 구조물의 진동변위 측정을 위한 방법으로 비교적 저가인 저해상도 카메라를 사용하여 카메라 해상도 이하의 진동변위를 빠르고 정확하게 측정이 가능한 EEPD(expected value of edge probability distribution)방법을 제안한다.

카메라 영상의 이웃하는 픽셀 정보를 이용하여 구조물의 에지 성분을 검출하고 에지의 확률분포 기대값을 이용하여 진동변위를 측정한다.

제안된 방법을 검증하기 위해 진동변위가 작고 타켓 설치가 어려운 회전체장비를 측정 대상으로 선

Fig. 1 Rotating axis of hydraulic turbine

정하여 변위센서와 측정오차 비교 및 기존의 영상을 이용한 진동측정 방법인 커브피팅을 이용한 방법과 비교 실험을 통해 살펴본다.

2. 카메라를 이용한 진동변위 측정

그레이 영상의 단일 픽셀값은 0~255 사이의 밝기 값을 가지며 이미지 센서가 받아들이는 빛의 양에 의해 결정된다. 이 값은 측정 대상체의 일정 영역이 광학렌즈를 통해 이미지센서까지 전달된 2차원 면적의 밝기 값이라고 정의할 수 있다. 측정 대상체의 변위를 측정하기 위해서는 측정 대상체의 측정 포인트의 움직임을 검출하는 것에서 출발한다. 이러한 움직임 검출을 위해 기존의 영상처리 방법들은 에지를 검출하고 에지의 위치 변화를 검출한다. 기존 에지 검출 방법의 결과물은 에지 성분을 갖는 픽셀들의 영상 좌표값으로 표현된다. 하지만 측정 대상체의 물리적인 실제 에지는 정수형 픽셀 좌표값만으로는 표현할 수 없다. 따라서 기존의 영상처리 에지 검출 방법을 이용할 경우 에지 검출 과정에서 영상의 해상도에 따른 측정 분해능의 한계로 인해 많은 오차를 내포하게 된다. 이 연구에서는 기존의 영상처리 에지 검출 방법이 아닌 에지 성분의 확률분포 기대값 산출을 통한 실수형 에지를 검출하는 방법과 픽셀 단위 데이터를 mm단위의 실제 단위로 환산하기 위한 단위환산방법을 제안한다.

2.1 기본 이론

영상에서 대상체와 배경과의 경계는 실제처럼 완전히 분류되지 않는다. Fig. 2를 보면 일반적인 영상

Fig. 2 First derivative for edge detection

Fig. 3 Gray-level profile at i column

에서 경계영역을 확대해 보면 빛의 반사 및 그림자 등에 의해 밝기 값이 서서히 변하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 에지 결정 알고리즘에 따라 결과 값이 다르게 나타나게 된다.

이 연구에서는 경계영역의 그레이 레벨값에 대한 1차 미분값들의 확률분포 기대값을 이용하여 실수형 에지를 검출한다.

Fig. 3은 진동변위 측정을 위해 관심영역 S 영상 데이터에서 가로축 i 번째 위치에서의 세로축 각 픽셀의 밝기 값을 표현한 것이다.

i 번째 열의 세로축 데이터를 1차 미분한 값을 ΔS_{ij} 라고 했을 때 이 값은 Fig. 4와 같이 n 개의 픽셀이 에지일 확률로 나타나게 된다.

Fig. 4의 확률분포에서 기대값 $F(S_i)$ 는 관심영역

Fig. 4 Expected value $[F(S_i)]$ of ΔS_{ij} at 1 column

S 의 i 번째 열에서 에지일 확률이 가장 높은 좌표라고 할 수 있다. 관심영역 영상 $S(m, n)$ 에서 m 사이즈 가로축 각각의 좌표 값을 평균 연산하여 대표값을 산출한다. $F(S_i)$ 의 값을 정수형 픽셀 좌표값이 아닌 실수형 좌표값으로 산출함으로써 영상의 해상도에 국한되지 않는 측정 분해능을 갖게 한다.

2.2 진동 변위 측정

카메라를 이용하여 진동 변위를 측정하기 위한 방법의 순서는 Fig. 5와 같다.

먼저, 카메라로 측정 대상체의 영상 데이터를 취득하고 측정하고자 하는 영역을 설정한다. 이때 Fig. 6과 같이 상부 영역 A와 하부 영역 B를 설정한다. Fig. 6에서와 같이 상부 A와 하부 B 각각의 대표값을 산출하여 진동변위를 측정한다. 또한, A와 B사이의 픽셀단위 거리를 산출하고 대상체의 실제 설계 값을 이용하여 실제 단위픽셀당 크기인 mm/pixel로 환산하게 된다. 환봉으로 이루어진 회전축의 단면을 진원이라 가정하면 상대좌표에서 A와 B영역의 진동 변위는 같게 나타나게 된다. 따라서 절대좌표로부터 A와 B영역의 평균 거리 차는 회전축 단면의 지름이라고 할 수 있다. 픽셀당 실제 사이즈를 결정함에 있어서 사용자가 직접 입력하면 그에 따른 오차가 발생하게 된다. 따라서 단위 환산 방법을 사용함으로써 진동변위 측정 시 픽셀사이즈의 절대값을 정확히 설정해 줌으로써 그에 따른 오차를 최소화할 수 있다.

2.3 진동변위 검출 방법 및 단위 환산 방법

진동변위 검출 방법 및 단위 환산 방법은 다음과 같다(Fig. 7 참조).

$$\Delta S_{ij} = S(i, j) - S(i, j - 1) \quad (1)$$

Fig. 5 Diagram of the proposed method

Fig. 6 Measurement areas in image

Fig. 7 measurement point A and B of object

$$F(S_1) = \frac{1}{m_1} \sum_{i=0}^{m_1} \left\{ \sum_{j=p_1}^{p_1+n_1} (\Delta S_{ij} \times j) / \sum_{j=p_1}^{p_1+n_1} \Delta S_{ij} \right\} \quad (2)$$

$$F(S_2) = \frac{1}{m_2} \sum_{i=0}^{m_2} \left\{ \sum_{j=p_2}^{p_2+n_2} (\Delta S_{ij} \times j) / \sum_{j=p_2}^{p_2+n_2} \Delta S_{ij} \right\} \quad (3)$$

$$D_{pixel} = F(S_2) - F(S_1) \quad (4)$$

$$p_{size} = \frac{D_{real}}{D_{pixel}} \quad (5)$$

식 (2)와 식 (3)은 관심영역 A, B의 대표값을 산출하는 방법을 나타낸 것이다. 제안된 방법은 기준좌표의 픽셀값과 이웃하는 픽셀값과의 차이 값인 식 (1)의 ΔS_{ij} 를 이용하는 것을 볼 수 있다. 영상의 절대좌표 $S(0,0)$ 를 기준으로 볼 때 P_1 만큼 떨어져 있는 $m_1 \times n_1$ 크기의 관심영역 A의 대표값 $F(S_1)$ 과 P_2 만큼 떨어져 있는 $m_2 \times n_2$ 크기의 관심영역 B의 대표값 $F(S_2)$ 를 구한다. $F(S_2) - F(S_1)$ 값은 픽셀단위의 대상체 지름 값이며 대상체의 실제 설계 값을 $F(S_2) - F(S_1)$ 값으로 나누어 주면 단위픽셀당 실제 사이즈(mm)를 구할 수 있다. 제안 방법을 통하여 구한 관심영역 A 또는 B의 픽셀단위 진동변위 값에 P_{size} 값을 곱하면 실제 mm단위의 진동변위 값을 산출할 수 있다. 측정대상체인 회전축은 환봉이므로 환봉의 형상가공오차를 0라고 하면, 진동변위 측정은 A 또는 B 어느 영역을 선택해도 동일한 결과값을 구할 수 있다. 이러한 방법을 연속 영상에 적용하면 측정 대상체에 대한 진동변위 데이터를 취득할 수 있다.

3. 진동변위 측정 실험

제안된 방법을 검증하기 위하여 비교적 미세한 진동변위를 갖는 회전체 실험장비의 회전축을 200 rpm으로 회전시키고 일반적으로 많이 사용하고 있는 저가의 산업용 저해상도 CCD 카메라를 이용하여 회전축의 진동을 측정하였다.

Fig. 8과 같이 카메라는 200프레임에 640×480 해상도로 영상데이터를 취득하였다. 제안된 영상처리 방법은 Visual Studio C++을 사용하여 개발되었다. S/W를 구동하고 분석하기 위한 노트북 컴퓨터를 사용하여 실험함으로써 제안된 방법의 성능을 평가하였다.

Fig. 8 Experimental setup for measuring vibration displacement

Fig. 9 Picture of experimental setup

Fig. 9와 같이 회전체 실험장비로부터 0.75 m ~ 1.2 m 떨어진 위치에 카메라를 설치하고 75 mm 광학렌즈로 촬영하였다. 제안된 방법의 측정 오차를 평가하기 위하여 변위센서 데이터를 동시에 취득하였으며 변위센서가 설치된 같은 위치의 영상을 취득하여 실험에 사용하였다.

카메라 설정 시 비교적 낮은 해상도로 설정함으로서 제안된 방법이 기존의 영상처리 방법에서의 카메라 해상도에 따른 측정 오차를 보완해 줄 수 있음을 보이고자 했다.

Fig. 10과 같이 실험용 회전체장비의 회전축 영상을 연속 취득하였다. 취득한 연속 영상 분석 시 Fig. 10과 같이 표시된 두 개의 관심영역 A와 B를 설정하였으며 관심영역의 크기는 변위센서의 크기 이하로 설정하여 실험하였다. S(2,6)의 관심영역을 대상으로 기존의 방법과 제안된 방법을 적용하여 결과를

Fig. 10 An image on object taken by camera

Fig. 11 Comparison of vibration displacements measured by between gap sensor and conventional image processing method(using 2×6 pixels)

Fig. 12 Comparison of vibration displacements measured by between gap sensor and proposed image processing method(using 2×6 pixels)

비교하였다. 기존의 방법 적용 시 픽셀사이즈는 이 연구에서 제안하는 단위환산방법을 적용하였다. 이때, 단위픽셀당 실제사이즈는 0.071 mm로 나타났다.

Fig. 11은 기존의 영상을 이용한 진동측정 방법인 커브피팅을 이용한 방법을 적용한 결과로 가로 2개의 픽셀정보를 이용할 경우 커브피팅 방법은 에지 정보의 부족으로 인해 정확한 데이터 측정이 불가능한 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 제안된 방법을 적용하여 측정한 진동변위 신호이다. Gap 센서로부터 취득한 변위 신호를 분석한 결과 평균 P-P(peak-to-peak)가 0.0305 mm로 나타났으며 제안된 방법에 의해 측정된 결과는 평균 P-P 0.0299 mm로 0.0007 mm의 측정 오차를 보였다. 제안된 방법의 경우 기존의 커브피팅 방법에 비해

Fig. 13 Comparison of vibration displacements measured by between gap sensor and conventional image processing method(using 80×6 pixels)

Fig. 15 Comparison of vibration displacements measured by between gap sensor and proposed image processing method(using 80×6 pixels)

Fig. 14 Auto power spectrum of conventional image processing method(using 80×6 pixels)

Fig. 16 Auto power spectrum of proposed method (using 80×6 pixels)

작은 관심영역에서도 진동변위 측정이 가능함을 보인다. 작은 관심영역 설정으로도 측정이 가능하므로 커브피팅방법에 비해 연산시간을 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 $S(80,6)$ 의 관심영역을 대상으로 기존의 방법과 제안된 방법의 결과를 비교하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 기존의 커브피팅 방법을 적용한 진동변위 신호 측정 및 주파수 분석 결과이다. 가로 80개의 픽셀정보를 이용할 경우 Gap센서와 비교 시 0.0026 mm의 측정 오차로 Fig. 13을 보면 Fig. 11에 비해서 정확한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 노이즈로 인한 신호 왜곡현상이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 11에서 나타난 결과와 같이 에지 정보의 부족으로 인한 측정 분해능의 한계 및 에지 검출과정에서의 노이즈 성분 에지로 인해 발생된 에러 때문이다.

Fig. 15는 제안된 방법을 적용한 결과로 Gap센서와 비교하여 평균 P-P 0.0013 mm의 측정 오차를 보이며, 주파수 분석 결과 Fig. 16과 같이 나타났다.

회전체의 회전주기는 매 분당 발생하는 사이클의 수(rpm)로 표시되며 정상 운전중인 회전체의 경우 1차 모드 진동 주파수로 나타나게 된다. 주파수(Hertz)=분당 회전수(rpm)/60으로 나타낼 수 있다. 주파수 분석 결과 회전체 실험 시 설정한 회전속도 200 rpm/60에 해당하는 1차 모드 3.3 Hz 부근에서 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 1은 조명, 측정거리 및 관심영역 크기를 달리하여 총 11개의 실험 결과로 변위센서 신호와 비교하여 오차 값을 산출하였다. 실험 1~2는 최적의 촬영 조건으로 노이즈 발생을 최소화하여 전처리 과정을 거치지 않은 영상을 사용하였다. 실험 1은 관심영역의 크기를 $S(5,6)$ 로 설정하였으며 실험 2는 관심영역 크기를 $S(80,6)$ 로 설정하여 측정한 결과이다. 실험 3~6은 초당 60프레임 속도로 촬영한 데이터로 실험 3, 4는 회전축의 X축을 촬영하였으며 실험 5, 6은 회전축의 Y축을 촬영한 영상을 사용하였다. 실험 3, 5는 관심영역 크기를 $S(10,6)$ 로 설정한 실험이며 실험 4, 6은 관심영역

Table 1 Comparison of proposed method and conventional method

no.	Proposed method (EPPD)		Conventional method (Curve-fitting)	
	Measurement error(mm)	Run time (μs/frame)	Measurement error(mm)	Run time (μs/frame)
1	0.0007	4.259	-	-
2	0.0013	29.129	0.0026	330.695
3	0.0012	6.413	-	-
4	0.0016	28.732	0.0033	256.121
5	0.0013	6.413	-	-
6	0.0013	27.380	0.0027	255.710
7	0.0023	52.092	0.0035	408.820
8	0.0022	52.092	0.0009	418.187
9	0.0020	27.122	-	-
10	0.0013	20.0090	-	-
11	0.0002	37.129	-	-
Valid mean	0.0017	37.885	0.0026	333.9066

- Inable to measure

사이즈를 $S(70,6)$ 로 설정한 실험 결과이다. 실험 7은 1.2 m 거리에서 조명이 있는 경우이고 실험 8은 1.2 m 거리에서 조명이 없는 경우에 실험한 데이터이다. P-P 측정오차를 보면 커브피팅 방법도 좋은 결과를 보이지만 Fig. 13과 같이 불규칙한 임펄스 파형이 포함되어 있어서 주파수 분석이 어려운 결과를 보였다. 실험 9~11은 조명을 사용하지 않은 노이즈가 많은 조건에서 촬영된 영상을 사용하였다. 제안된 방법 및 커브피팅 방법 모두 노이즈 제거를 위한 전처리 과정을 거쳤으며 그 결과 커브피팅 방법에서는 측정이 불가능한 것으로 나타났다.

기존의 커브피팅 방법의 경우 5개의 실험에서 유효한 데이터를 얻을 수 있었다. 커브피팅 방법에서의 무효 데이터는 Fig. 11과 같이 측정이 불가능한 경우로 작은 관심영역 사이즈로 인한 에지 성분 정보의 부족으로 생기는 해상도 문제 및 노이즈성 에지 검출로 인한 큰 오차 때문인 것으로 나타났다. 제안 방법은 11개 실험에서 모두 측정이 가능했으며, 동일한 유효 데이터 평균을 비교해보면 제안 방

법을 적용할 경우 0.0017 mm 평균오차를 보였으며, 기존의 방법을 적용할 경우 0.0026 mm의 평균오차를 보였다. 제안된 방법은 프레임당 37.9 sec의 평균 연산시간을 보였으며, 기존 커브피팅 방법은 프레임당 333.9 sec의 평균 연산 시간을 보였다.

4. 결 론

이 연구에서는 센서 설치가 어려운 환경에서의 진동변위 측정을 위해 카메라 영상을 이용한 진동변위 측정 방법을 제안하였다. 영상의 1차 미분값을 에지 구간의 확률로 사용하였으며 그 기대값을 샘플의 대표값으로 취하는 EPPD방법 및 단위픽셀의 크기를 결정하기 위한 단위환산방법을 제안하였다. 기존의 영상처리방법에서 단위픽셀의 크기를 사용자가 결정하는 과정에서 사용자 판단에 따라 오차가 더해지는 단점을 보완할 수 있었다.

실험을 통하여 픽셀 해상도 이하의 진동변위 측정이 가능함을 보였으며 측정오차를 0.002 mm 이하로 줄일 수 있었다. 같은 관심영역 사이즈에서 기존의 방법에 비해 8배 향상되었다. 또한, 제안된 방법을 적용할 경우 관심영역을 기존에 비해 1/40 이하로 설정하여 측정이 가능하며 이때 연산 속도를 80 배 이상 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

영상을 이용한 진동변위 측정을 위해서는 다양한 환경조건에서 대용량의 영상데이터를 효과적으로 빨리 처리하고 측정 분해능을 높여 측정 오차를 최소화하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 제안된 방법을 통하여 센서 설치가 어려운 다양한 환경 조건에서도 신속하고 신뢰성 있는 데이터 취득이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2013년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP; No.20111510100050)의 지원으로 수행된 연구내용입니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, S. B. and Kwak, M. K., 2000, Development of Vibration Measurement Technique Using the Image

Processing, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 327~329.

(2) Wahbeh, A. M., Caffrey, J. P. and Masri, S. F., 2003, A Vision-based Approach for the Direct Measurement of Displacements in Vibrating Systems, Smart Structures and Materials, Vol. 12, No. 5, pp. 785~794.

(3) Kim, K. Y. and Kwak, M. K., 2005, Measurement of Large-amplitude and Low-frequency Vibrations of Structures Using the Image Processing Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 329~333.

(4) Jeon, H. S., Choi, Y. C. and Park, J. W., 2008, Displacement Measurement of Multi-point Using a Pattern Recognition from Video Signal, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering,

Vol. 18, No. 12, pp. 1256~1261.

(5) Jeon, H. S., Choi, Y. C. and Park, J. W., 2009, Measurement Structural Vibration from Video Signal Using Curve Fitting, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 943~949.

Ki-Sung Son is a doctoral candidate of Department of Information Communications Engineering at Chungnam national university. He is also a senior researcher at the R&D institute of SAE-AN ENGINEERING CO.