

가상 시각 센서의 구조물 건전성 모니터링 응용

Virtual Visual Sensors and Their Application in Structural Health Monitoring



김희승¹⁾

Kim, Hee Seung



최경규^{2)*}

Choi, Kyoung Kyu



김태진³⁾

Kim, Tae Jin

이번 해외번역기사에서 소개하는 논문은 Structural Health Monitoring 2014년 5월호에 게재된 것으로 영국 맨체스터에 위치한 바스대학교(University of Bath)의 Yi-Zhe Song, Chris Bowen, H. Alicia Kim, Aydin Nassehi, Julian Padget, Nick Gathercole에 의해 작성되었다. 최근 구조물에 센서를 설치하여 실시간으로 측정하는 구조물 건전성 모니터링 시스템이 증가되고 있다. 하지만 기존의 모니터링 시스템의 경우 측정 센서의 관리나 측정된 데이터의 효율적인 접근이 어려워 이를 극복하기 위한 방법으로 QR코드, RFID, 증강현실 등 다양한 기술이 개발되고 있다. 이 논문은 구조물 건전성 모니터링 시스템에 시각 센서를 이용한 증강현실 기술을 적용하는 자료로 본 기사에서는 논문 전문 중 가상 시각 센서를 이용하여 구조물의 동적 특성치를 추출하는 부분을 중심으로 내용을 구성하였다.

요약문

구조물에 최적화된 센서 배열(Sensor Array)을 수행하는 것은 센서 네트워크 설계에서 중요한 요소이다. 그러나 센서의 설치와 관리는 구조물이 처해 있는 환경이나, 경제

성 그리고 센서의 주파수대역의 제한과 같은 다양한 원인으로 인해 매우 어려울 수 있다. 이 논문에서는 일반적인 문제와 환경에서 현재 사용되고 있는 물리적 센서 대응으로 가상 시각 센서(VVS: Virtual Visual Sensor)를 제안하였다.

가상 시각 센서는 설치가 간편하고 경제적이며 관리가 편하다는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 가상 시각 센서의 기본적인 아이디어는 최첨단 컴퓨터 시각 알고리즘과 마커 추출 기법의 적용으로 이루어진다. 이 연구에서는 가상 시각 센서를 이용하여 모드 형태와 주파수를 추출하는데 용이하다는 점을 보여주며 이를 구조물 건전성 모니터링에 적용할 경우 효율적이라는 점을 입증하였다.

1. 서론

지난 수년간 센서 네트워크와 적용 가능한 응용프로그램은 많은 관심과 연구의 대상이었다. 이러한 기술들의 활용은 군사 산업 및 민간에서 다양한 형태로 이루어지며, 센서를 이용하여 주변 환경 및 물리적 변화를 모니터링 하고 취득한 데이터에 기초하여 다양한 결정을 내리게 된다.

원래 센서 네트워크는 서로 물리적으로 연결되어 있는 비교적 큰 센싱노드를 사용하며 신호의 계측을 담당하는 관측기와 연결되어 있다. 현대에 이르러서는 미세 전자 기계 시스템(MEMS)의 진보로 인해 무선 통신 센서 및 소형

1) 숭실대학교 건축학부 석사과정

2) 숭실대학교 건축학부 조교수, 공학박사

3) 창민우구조건설센터 본부장, 공학박사

* E-mail : kkchoi@ssu.ac.kr

화된 센서의 대량 생산을 촉진하게 되었다. 이에 따라 기존의 센서 네트워크에서 발생했던 유연성 및 확장성의 문제는 대부분 해결되어 이를 바탕으로 한 무선 센서 네트워크의 실용화가 급증하였으며, 실시간으로 구조물의 상태를 파악하는 구조물 건전성 모니터링 시스템이 이용되게 되었다.

그러나 센서 네트워크 및 응용분야의 발전에도 불구하고 센서를 사용함에 있어서 센서 설치 및 관리가 어렵고 막대한 비용이 소모되게 된다. 특히 최근에는 구조물이 대형화됨에 따라 네트워크 또한 그에 맞게 커지며 설치 및 관리가 더욱 복잡해지고 있다.

이 논문에서는 센서의 다른 형태인 가상 시각 센서(VVS)의 개념을 소개하고 부화소 정밀도(Sub-pixel accuracy)를 이용한 호프 변환(HT: Hough Transform) 기법을 살펴본 후, 센서에서 취득된 비디오 프레임에서 시간영역에서의 변위, 속도, 가속도의 산정과정을 제시하였다. 마지막으로 VVS를 이용하여 탄소섬유로 보강된 플라스틱 빔에 대하여 동적 실험을 수행하고 주요 모드별 모드 형상, 모드 진동수를 산정하였다.

2. 가상 시각 센서

일반적인 센서와 달리, 가상 시각 센서는 무선 비디오 센서 네트워크(WVSN: Wireless Video Sensor Networks)를 통해 편리하게 저장할 수 있는 이미지/비디오에서 추출된 형태로 구현되며, 단순히 위치시키거나 페인팅(마커)을 함으로서 가상 시각 센서의 설치가 수행된다. 이러한 과정으로 인해 일반적인 센서와 비교했을 때 센서의 설치 및 네트워크의 효율적 관리가 가능하다.

2.1 시스템 개요

VVS 네트워크의 프로세스는 두 단계로 이뤄진다. 첫 번째로는 입력영상의 모든 프레임에서 마커를 추출하여 공간 위치를 추정하는 단계이며 두 번째는 시간 영역에서 이전에 추출한 마커를 연결하는 단계이다. 두 공간 및 시간 정보를 임시 저장된 motion으로부터 취득하면, 각 마커의 동적 특성을 얻을 수 있다. 이 논문에서는 부화소 정밀도를 이용한 호프 변환기법을 이용하였는데 이 기법을 이용했을 때, 정확성과 효율성 측면에서 우수하며 이는 고주파수 영역의 진동수를 효과적으로 산정할 수 있기 때문에 구조물의 작은 변화에 대처할 수 있다고 설명하고 있다.

2.2 호프변환을 이용한 마커 추출

VVS 네트워크의 첫 번째 단계인 마커를 추출하는 단계에서는 정확성과 효율성이라는 두 가지의 주요 설계 고려 사항이 있다. 이러한 설계 주안점은 호프변환기법을 변형 적용하여 고려할 수 있다. 호프변환 기법은 일반적으로 선, 원, 사각형과 같은 순수 기하학적 형태를 갖는 이미지를 추출한다. 여기서 기존의 호프변환 기법을 그대로 마커 추출에 적용할 경우 매우 큰 시각적 노이즈가 발생하며 추출결과가 불연속적이게 되므로 일반적으로 후처리 과정이 필요하게 된다. 따라서 원형 형태의 마커를 추출하기 위해서는 호프 변환의 개선된 형태인 원형 호프 변환(CHAT: Circular Hough Transform)을 사용하게 된다. CHAT는 임의의 점의 위치를 이용하여 원형 형태의 반지름 R을 결정하게 되며 결정된 R값을 바탕으로 마커를 추출하게 된다. Fig. 1(a)는 보 구조물에서 CHAT를 이용하여 마커를 추출한 결과를 보여주고 있다.

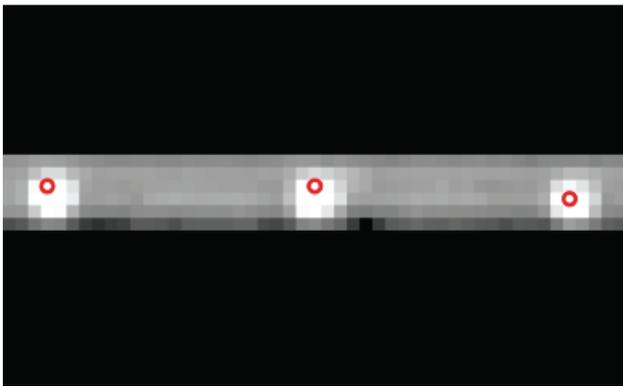
한편, CHAT 방법을 이용할 경우 Fig. 1(a)과 같이 각각의 원형 마커의 중심이 조금씩 어긋나는 것을 알 수 있는데 이는 디지털화 된 이미지의 해상도 한계로 인한 것이다. 따라서 구조물의 고주파수 영역의 진동에 대처하기 위해서 이미지의 정확도 보정이 필수적이며, 이 연구에서는 부화소 정밀도(Sub-pixel accuracy)를 이용하여 최종적으로 원형 마커를 추출 하였으며 그 결과를 Fig. 1(b), (c)에 제시하였다.

2.3 추출된 마커의 연결

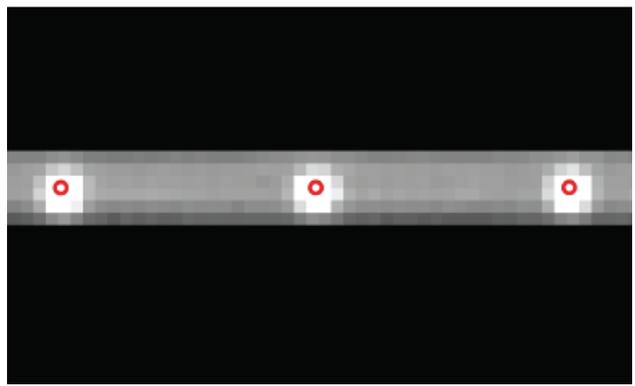
각 프레임마다 마커의 추출이 이뤄지면, 시간영역에서 마커들을 연결하게 되며 이를 바탕으로 구조물의 동적특성을 얻을 수 있다. 이와 같이 각 이미지의 마커들을 찾아 연결하는 과정을 트래킹(Tracking)이라고 하며 Fig. 2는 트래킹 알고리즘을 이용하여 캔틸레버 보의 변형형상을 찾는 예를 나타낸 것이다. 이러한 트래킹 알고리즘은 구조물의 변형형상을 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 하게 되며 구조물의 주변 환경과 영상처리의 효율성을 고려하여 결정해야 한다.

3. 실험결과

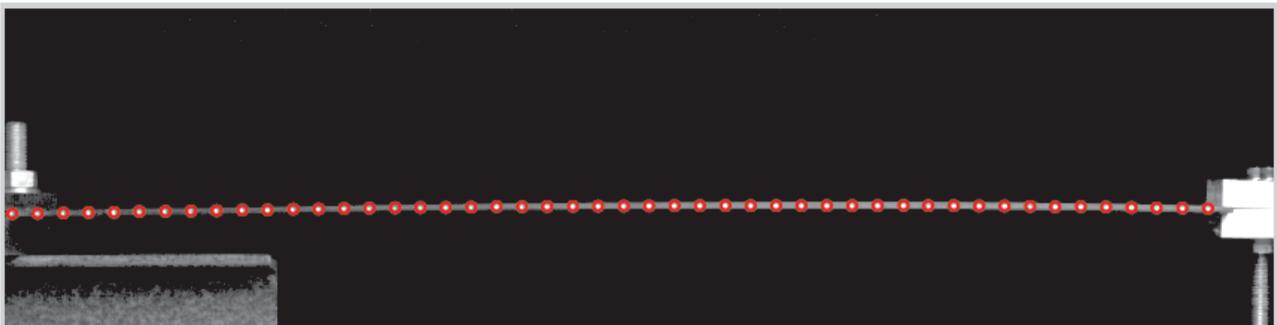
구조물 건전성 모니터링 시스템에 VVS의 적용성을 검



(a) traditional result



(b) sub-pixel accuracy



(c) overall result

Fig. 1 Marker Extraction Result

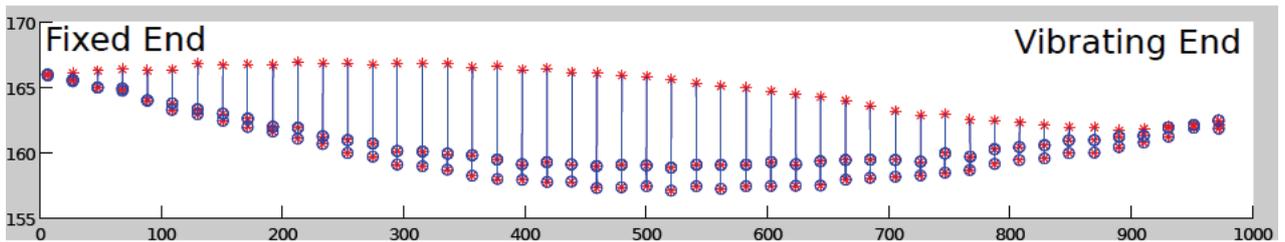


Fig. 2 Marker Tracking Result

증하기 위하여 동적 실험을 수행하였다. 이 실험의 주안점은 VVS를 이용하여 구조물의 중요한 동적특성인 모드형상 및 모드 진동수 산정이다. 따라서 일반적인 기법으로 수행된 모드특성과 비교를 통해 VVS의 적용성을 검토하고자 하였다.

3.1 실험체 설치

실험에 사용된 구조체는 캔틸레버 보로 실험체 좌측 단부를 고정하였으며, 우측에는 진동 컨트롤러를 설치하였다. 고속촬영 카메라를 이용하여 보의 거동을 촬영하였으며, 실험체 셋업은 Fig. 1(c)와 같다. 보는 탄소섬유로 보

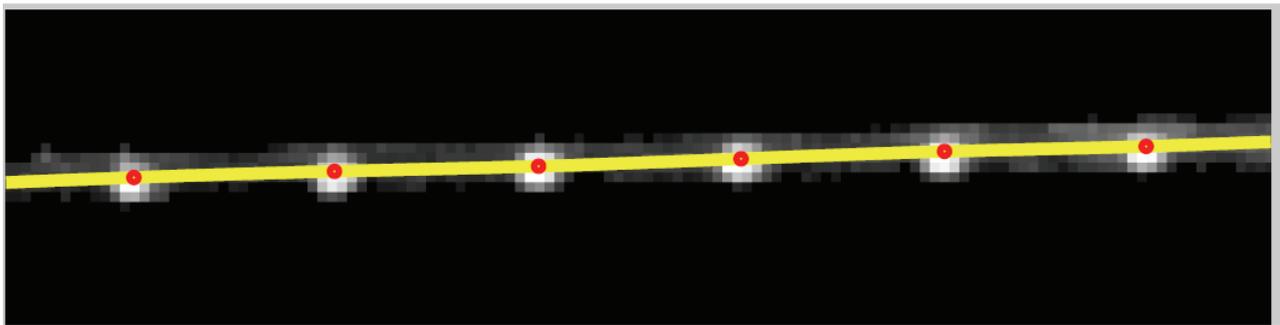
강된 플라스틱 재료를 사용하였고 48개의 백색 원형 마커를 위치시켰으며 1~3모드에 해당하는 진동수의 해당하는 이미지의 3초 motion clip을 저장하여 총 14개의 motion clip을 얻었다.

3.2 모드형상의 결정

모드형상은 동적실험결과로 얻어지는 구조물의 고유한 특성으로 손상 탐지 알고리즘에 다양하게 이용되고 있다. 그러나 실제 구조물에서는 모드형상을 알기 위해서는 매우 많은 양의 센서가 설치되어야 하므로 센서 네트워크가 복잡해지고, 계측된 결과를 통해 결정된 모드형상이 실제 구



(a) modal shape of 1st mode



(b) a zoomed-in section of the modal shape in (a)

Fig. 3 Modal Shape Reconstruction Result

조물과 다를 수 있는 잠재적인 문제점을 가지고 있다. 다량의 센서를 설치하는 대신에 도플러 진동 측정기(LDV: Laser Doppler Vibrometers)를 사용하여 모드형상을 측정하는 방법도 있지만 매우 고가이며 해상도 제한으로 인해 사용에 제한이 있다.

LDV와 유사한 방식으로, 영상촬영은 모드형상을 직접 확인할 수 있으며, VVS를 통해 구조물의 모드 형상을 정확하게 재구성 할 수 있다. VVS에서는 프레임에서 추출된 마커를 이용하여 모드형상을 fitting을 통해 구현하게 되는데 Fig. 3(a)는 실험체의 모드형상을 재구성한 결과를 이며 동일 모드의 형상을 확대한 것이 Fig. 3(b)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 매끄러운 곡선 형태를 취하고 있다.

이론적인 모드형상은 알려진 바와 같이 완벽하게 매끄러운 곡선의 형태를 취한다. 기존의 호프 기법만을 이용하여 마커를 추출 할 경우 Fig. 4의 녹색 곡선의 형태와 같이 국부적으로 불연속적인 형상을 나타내게 된다. 이러한 모드형상을 손상 탐지 알고리즘에 적용할 경우 손상영역을 잘못 판단하는 경우가 발생하게 된다. Fig. 4의 노란색의 곡선은 부화소 정밀도를 이용하여 fitting을 수행한 것으로 기존 기법의 fitting 결과와 비교했을 때, 상대적으로 곡선이 매끄러운 형태를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 논문에

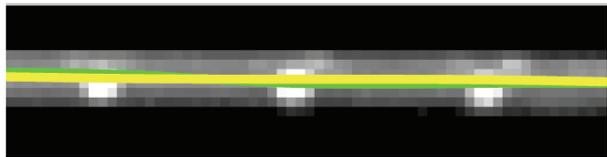


Fig. 4 Modal Shapes: sub-pixel VVS(yellow) vs. standard HT(green)

서는 곡선의 매끄러움의 정도를 수치로 비교하기 위해 실험으로 얻어진 14개의 motion clip에 대하여 전체 곡률 평균(Overall mean curvature)을 계산하였고 비교 결과 평균 44.45%의 향상된 모드 형상 얻는 것으로 나타났다 (Table 1).

3.3 모드 진동수의 결정

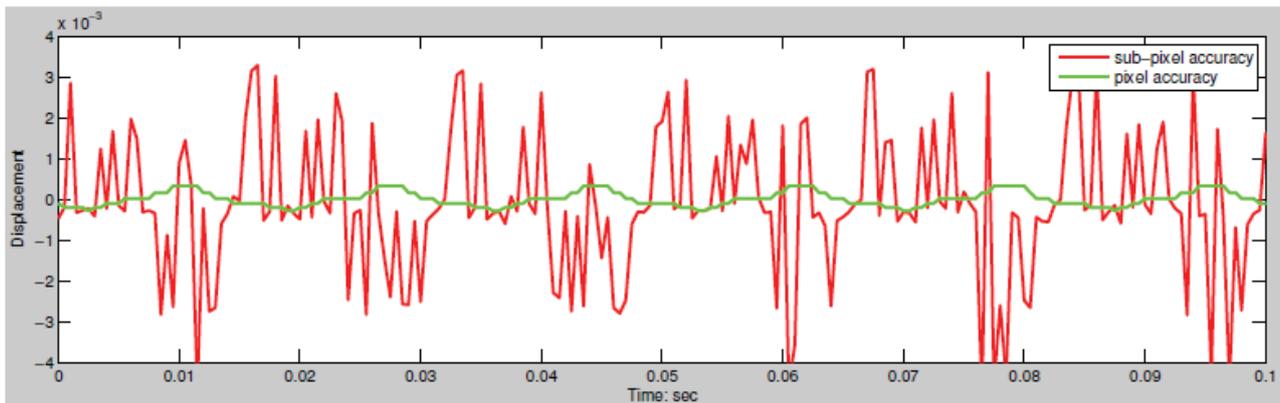
동적실험의 모드해석에서 모드 진동수는 일반적으로 주파수응답함수(FRF: Frequency Response Function)를 이용하여 산정되며 FRF는 구조물의 설치된 센서에서 취득된 신호의 푸리에 변환을 적용하여 얻을 수 있다. 그러나 구조물에서 설치할 수 있는 물리적 센서는 공간의 제약 및 구조적 손상으로 인해 그 수량과 위치가 제한된다. 따라서

Table 1 Overall Mean Curvatures of All 14 motion Clips

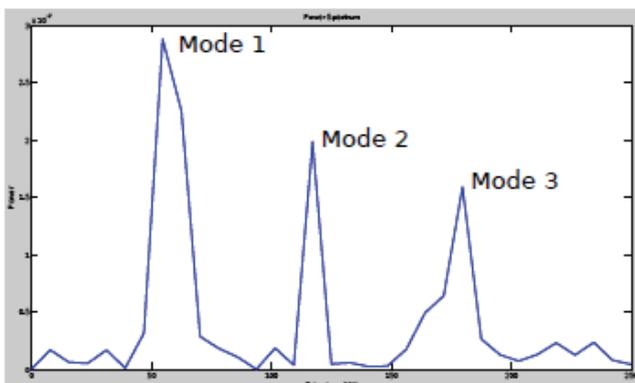
Clip ID	Overall mean curvature of HT with sub-pixel accuracy	Overall mean curvature of standard HT	Improvement standard HT (%)
1	35.6662	68.8039	48.16
2	29.4660	69.4223	57.56
3	39.0362	35.3930	40.31
4	36.3630	67.0090	45.73
5	37.3109	65.7133	43.22
6	38.0005	57.4644	33.87
7	36.4490	71.2310	48.83
8	24.4967	68.6575	64.32
9	43.9936	64.2660	31.54
10	40.5168	63.2633	35.96
11	24.2285	68.8276	64.80
12	42.5493	62.5073	31.93
13	49.6801	58.7272	15.41
14	31.0335	64.5894	51.95
Average	36.3422	65.4197	44.45

마커와 같은 표식을 이용한 VVS는 이러한 제한사항을 극복할 수 있다.

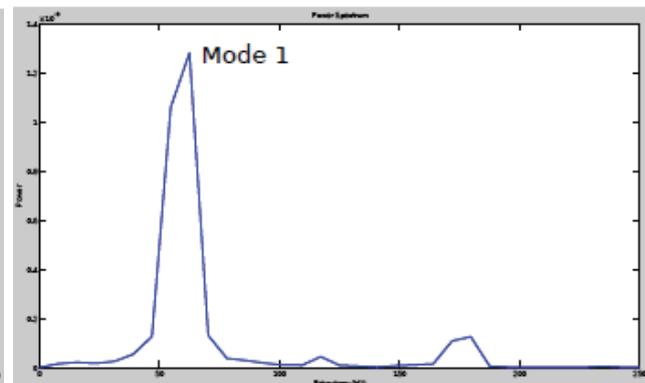
이 논문에서는 기존의 화소(pixel)와 부화소 정밀도(sub-pixel accuracy)를 각각 이용하여 계측신호를 구성하였으며, 이를 위해 동적 실험에서 저장된 motion clip을 이용하였다. Motion clip의 저장된 프레임들을 트래킹하기 위하여 CPD 알고리즘을 사용하여 각각의 계측신호를 구성하였다. Fig. 5(a)는 각각의 계측치를 시간영역에서 보여주는 그래프인데 녹색이 화소, 적색이 부화소 정밀도를 이용해서 구성된 계측신호를 나타내고 있다. 이러한 계측신호에 FRF를 이용하여 주파수 영역으로 신호를 분석한 그래프를 Fig. 5(b), (c)에 각각 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 부화소 정밀도를 이용한 신호는 3가지 모드 진동수를 매우 정확하게 보여주는 반면 일반 화소를 이용한 신호는 1차 모드의 진동수만을 정확하게 확인할 수 있다. VVS에서 추출된 화소 및 부화소 정밀도를 이용한 구조물의 모드 진동수와 실제 동적실험에 센서를 설치하여



(a) Original signal: sub-pixel accuracy(red) vs. pixel(green)



(b) FRF with sub-pixel accuracy



(c) FRF without sub-pixel accuracy

Fig. 5 Modal Frequency Identification Results

Table 2 Modal Frequency Comparisons

Mode ID	Frequency with pixel (Hz)	Frequency with sub-pixel accuracy (Hz)	Actual frequency (Hz)
1	35.6662	68.8039	48.16
3	36.3422	65.4197	44.45

얻은 모드 진동수를 비교한 결과를 Table 2에 제시하였다. 일반 화소를 이용한 신호의 경우 FRF 결과 중 Mode 2에 해당하는 신호가 정확하지 않아 비교적 정확한 모드로 판단되어지는 Mode 1과 Mode 2의 진동수를 비교하였다. 표에서 알 수 있듯이 부화소 정밀도를 이용한 모드 진동수가 센서를 통해 계측된 진동수와 매우 유사한 것을 확인할 수 있으며, 부화소 정밀도를 이용한 VVS 시스템이 구조물의 동적 특성치를 추출하는데 유용하고 정확하다는 점을 보여주고 있다.

4. 토 의

구조 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring: SHM) 시스템에서 실시간 신호를 계측하는 센서 네트워크는 매우 중요한 부분을 차지한다. 최근 구조물이 대형화되면서 시공 및 유지관리 과정에서 구조물을 이루는 부재의 강도, 온·습도, 바람, 진동 등 다양한 물성치에 대해 관리가 필요하며 각 물성치를 계측·감시하기 위해 센서 네트워크 또한 필연적으로 커지게 되어 센서의 설치 및 관리가 어려워진다. 이 논문에서 소개한 가상 시각 센서(Virtual Visual Sensor)는 구조물의 주변 환경 및 물리적 현상에 대해서 영상촬영을 통해 그 신호를 구성하기 때문에 기존의 물리적 센서에 비해 설치나 관리가 편리하다는 장점을 가지고 있다. 특히 최근 IT기술의 비약적인 발전으로 다양한 모바일 디바이스가 보급되고 영상처리기술의 발전으로 인해 무선 비디오 센서 네트워크에 대한 관심

이 증대되고 있어 향후 구조 건전성 모니터링 시스템에 적용이 확대될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Song, Yi-Zhe, et al., "Virtual visual sensors and their application in structural health monitoring", Structural Health Monitoring, 2014
2. Akyildiz, Ian F., et al., "Wireless sensor networks: a survey", Computer networks 38.4, 2002, pp.393-422.
3. Duda, Richard O., and Peter E. Hart., "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures", Communications of the ACM 15.1, 1972, pp.11-15.
4. Fernandes, Leandro AF, and Manuel M. Oliveira., "Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme", Pattern Recognition 41.1, 2008, pp.299-314.
5. Cameron, Alec, and Hugh Durrant-Whyte, "A Bayesian approach to optimal sensor placement", The International Journal of Robotics Research 9.5, 1990, pp.70-88.
6. Ingelrest, François, et al., "SensorScope: Application-specific sensor network for environmental monitoring", ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN) 6.2, 2010, p.17.
7. Kho, Johnsen, et al., "An agent-based distributed coordination mechanism for wireless visual sensor nodes using dynamic programming", The Computer Journal 53.8, 2010, pp.1277-1290.
8. Weng, Juyang, Paul Cohen, and Marc Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence 14.10, 1992, pp.965-980.
9. Radziński, Maciej, and Marek Krawczuk, "Experimental verification and comparison of mode shape-based damage detection methods", Journal of Physics: Conference Series. vol. 181, No. 1. IOP Publishing, 2009.

담당 편집위원: 김도환
(RIST 강구조연구소 책임연구원)
dohwan.kim@rist.re.kr