

풍동실험용 이미지 기반 변위계측 시스템

Image-based Displacement Measurement System for Wind Tunnel Test

©신윤봉* 박요한** 신승환*** 김영민**** 김휘*****

1. 서 론

구조물의 진동 측정 방법으로 가속도계와 같이 접촉식 센서와 레이저 변위계와 같이 비접촉식 센서가 있다. 레이저 도플러효과를 이용한 계측센서는 일반적으로 정밀한 계측을 할 수 있으나 한 지점의 한 방향으로의 변위만을 계측하며 장비가 고가이다⁽¹⁾. 또한 구조물의 하부 조건에 따라 변위계를 고정하기위한 추가적인 시설물의 설치가 필요하여 다수의 비접촉식 변위계를 사용하여 구조물의 다중 변위를 동시 계측하는 경우, 전반적으로 비경제적이다. 이러한 계측의 문제점을 해결하면서도 경제적이며 접근이 어려운 구조물의 변위를 측정할 수 있는 비접촉식 영상계측 기술이 활발히 연구 되고 있다. 본 연구에서는 스테레오 카메라 영상 촬영을 통한 비접촉식 실시간 3차원 다중 변위 계측 기술을 제안⁽²⁾하고 공타성 교량모형에 타겟을 부착하여 카메라로 촬영한 이미지의 움직임을 계측하였다. 기존 변위계와 비교실험 결과를 통해 개발된 시스템의 신뢰성을 확인하였다.

2. 이미지 기반 변위계측 시스템

이미지 기반 변위계측 시스템에서는 실시간 연속적으로 이미지를 획득하여 동기화된 두 대의 고속 카메라(150 fps)를 사용하여 교량모형에 부착된 여러 타겟을 포함한 시차 이미지들을 촬영하고 MDLT(modified direct linear transformation)⁽³⁾ 알고리즘을 사용하여 3차원 위치를 실시간으로 계측하도록 하고 있다. MDLT 계측 이론은 두 대 이상의 이미지를 통해 공간상에 위치한 특정 지점 또는 타겟의 3차원 좌표를 계측하는 방법론이다. 계측 시스템의 순서는 그림 1에서 나타낸 것과 같이 camera calibration을 수행한 후 타겟이 담긴 이미지를 획득한다. 계측 시스템 절차의 첫 번째 단계(camera calibration)에서 카메라들의 3차원 절대공간좌표의 위치 정보 및 카메라 내부 파라미터를 구한다. Calibration된 카메라로 촬영된 시차가 있는 2차원 이미지들을 분석한다. Normalized Cross Correlation(식 (1))을 이용하여 적응적 ROI내에서 타겟의 2차원 이미지 좌표를 추적하여 식 (2)에서와 같이 비선형 최소자승법(nonlinear least square method)을 수행하여 오차를 최소화하는 타겟의 3차원 좌표를 구하게 된다.

실시간 계측을 위해 multi-thread기반 병렬처리방식(그림 2(a))으로 구성하였고 이미지 해석의 효율성을 극대화하기 위한 적응적 ROI(region of Interest) 알고리즘(그림 2(b))을 구현하였다. 그림 2(a)에서는 스테레오 카메라로부터 얻은 영상이미지 버퍼에 0.01초마다 순차적으로 저장되는 과정을 나타내고 이미지 저장 및 이미지 처리과정을 통해 다중마커의 2차원 좌표를 찾는 시간이 0.01초 초과하면 분석할 이미지가 누적되면서 실시간 계측이 어려워진다. 하지만 독립적인 이미지 분석 thread(Worker#1-#4)가 각각 병렬로 이미지 분석하는데 0.04초미만으로 시간이 소요된다고 하면 이미지 버퍼에 누적되는 일 없이 실시간으로 이미지 처리 가능해진다. 본 시스템은 실시간 처리를 위해 10개의 thread를 이용하였다. 실시간 성능을 높이고 타겟의 분석 시간을 줄이기 위하여 그림

* 대우건설 기술연구원 방재연구팀 전임연구원 (yoonbong.shin@daewooenc.com)

** 고려대학교 전자 및 정보공학과 박사과정 (yhpark0@korea.ac.kr)

*** 대우건설 기술연구원 방재연구팀 대리 (seunghwan.sin@daewooenc.com)

**** 정회원, 대우건설 기술연구원 방재연구팀 책임연구원 (ymkim@daewooenc.com)

***** 고려대학교 전자 및 정보공학과 조교수 (hwikim@korea.ac.kr)

2(b)에서 나타내 것과 같이 유한한 속도로 움직이는 타겟은 이미지 샘플링 시간인 0.01초안에 움직이는 범위가 일정 범위 안에 한정되기 때문에 사용자가 초기의 관심영역을 설정해주면, 매 이미지에서의 관심영역 중심위치를 현재 이미지에서의 관심영역 위치로 삼으면 관심영역의 타겟을 항상 포함하도록 적응적으로 이동시켜줄 수 있다. 관심영역을 할당하는 이유는 두 가지 인데, 첫 째는 다수의 타겟을 관심영역별로 구역 분할하여 구분하기 위해서고, 두 번째는 타겟의 위치를 검색하는 이미지 해석 시간을 최소화하기 위함이다.

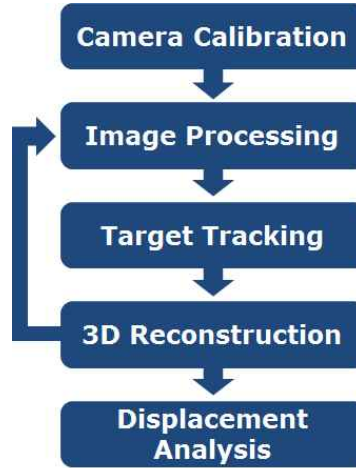


그림 1. 이미지 기반 변위계측 시스템 프로시저

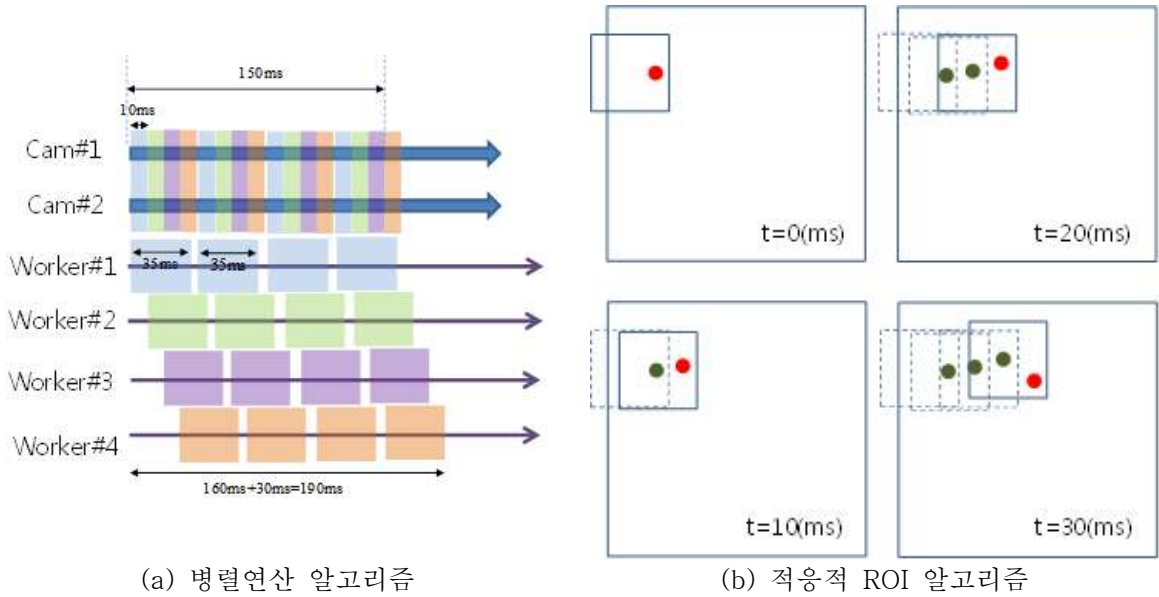


그림 2. 실시간 처리 알고리즘

$$NCC = \frac{\sum_{(i,j) \in W} (I_1(i,j) \cdot I_2(x+i, y+j))}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in W} I_1^2(i,j) \sum_{(i,j) \in W} I_2^2(x+i, y+j)}} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^{(1)}L_9^{(1)} - L_1^{(1)} & v^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_2^{(1)} & v^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_3^{(1)} \\ w^{(1)}L_9^{(1)} - L_5^{(1)} & w^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_6^{(1)} & w^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_7^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v^{(m)}L_9^{(m)} - L_1^{(m)} & v^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_2^{(m)} & v^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_3^{(m)} \\ w^{(m)}L_9^{(m)} - L_5^{(m)} & w^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_6^{(m)} & w^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_7^{(m)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - v^{(1)} \\ L_8^{(1)} - w^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - v^{(m)} \\ L_8^{(m)} - w^{(m)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 풍동실험

이미지 기반 변위계측 시스템의 정확성을 평가하기 위한 계측 실험을 진행하였다. 실험에서는 그림 3과 같이 4대의 카메라를 2개씩 묶어 2개의 스테레오 카메라세트를 구성하였고 카메라 세트는 동시에 교량 모형을 계측할 수 있도록 동기화가 이뤄져 있다. 시스템의 계측 정밀도를 비교 평가하기 위해 레이저 변위계를 장착하여 변위 측정 데이터를 비교 하였다.

교량의 공탄성모형은 풍동의 크기, 풍동의 최대속도, 진동수, 강성 등을 고려하여 축소율 1:150으로 제작하였으며 Froude 법칙에 따라 설계되었다. 실험에 사용되는 3차원 탄성모형은 주형의 수직, 수평 및 비틀림 자유도와 주탑의 교축 및 교축직각방향 자유도, 케이블의 축방향 강성을 고려하여 제작되었다. 실험에 이용된 풍동은 대우건설 기술연구원의 경계층 풍동으로, 3x2x20m(폭x높이x길이) 측정부분을 가지고 있는 회류형 풍동이다.

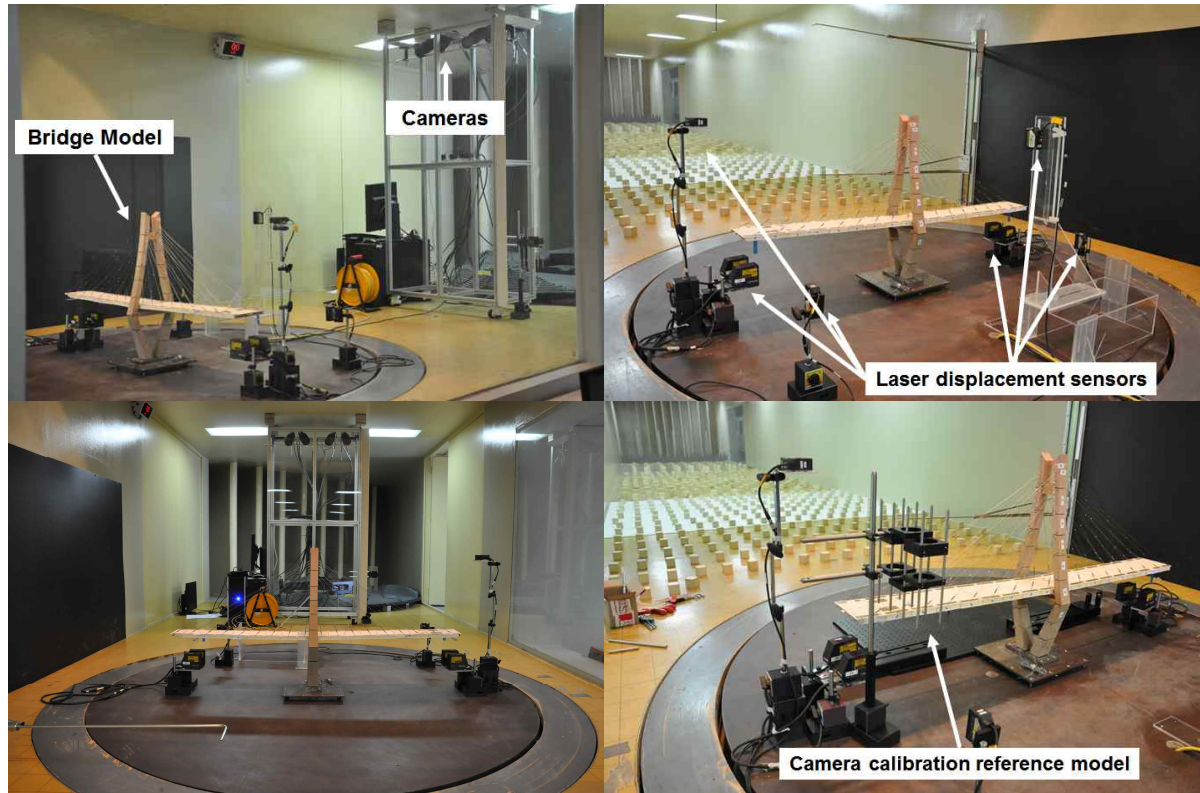


그림 3. 풍동실험 셋업

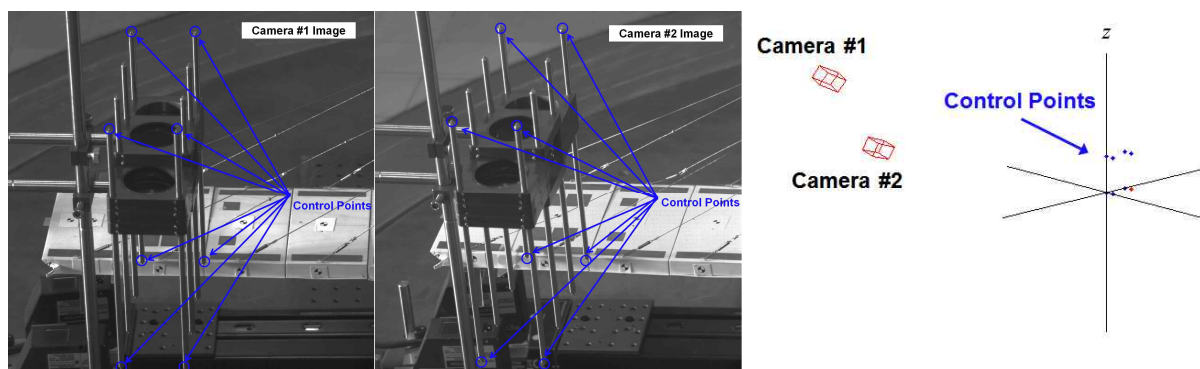


그림 4. Camera calibration

Camera calibration을 위해서는 최소 8개의 제어점이 필요하다. 스테리오 카메라 #1, 2 및 카메라 #3, 4의 calibration reference 물체 이미지를 획득하고 8개의 제어점을 사용하여 카메라 파라미터를 구하였다. 그림 4에 camera calibration 결과를 나타내며 reference 모형의 제어점과 카메라의 절대위치 및 회전위치를 절대좌표에 나타내어 표현한다. 이미지분석에 패턴인식이 잘되는 명확한 마커의

설정과 고속촬영에 적합한 조명환경이 성공적인 실시간 변위 계측을 위해 중요하다.

구조물의 자유진동을 유발한 후 스테리오 카메라 #1, 2로부터 타겟 1 및 카메라 #3, 4로부터 타겟 2에 3차원 데이터를 분석하였다. 레이저 변위계로부터 계측한 타겟 1의 z축 변위 데이터와 이미지 기반 변위 계측한 z축 변위 데이터를 그림 5에서 비교하였고 그림 6에서는 변위 데이터를 이용하여 진동수 및 감쇠비를 비교하였다.

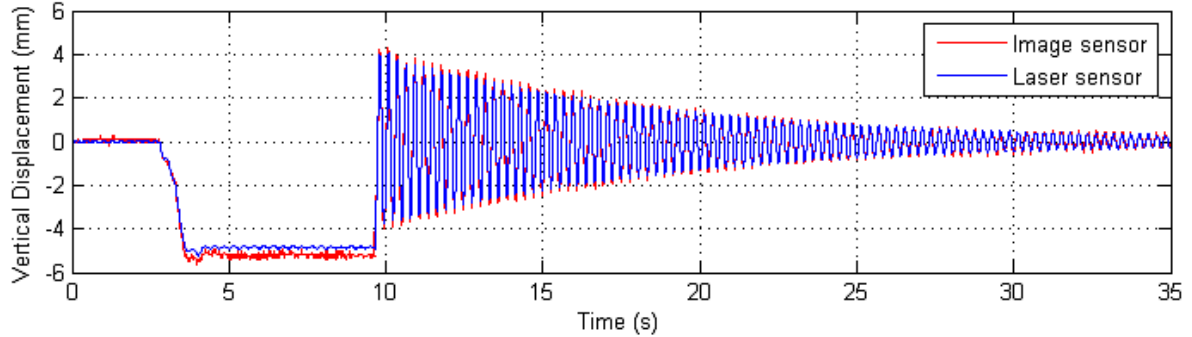
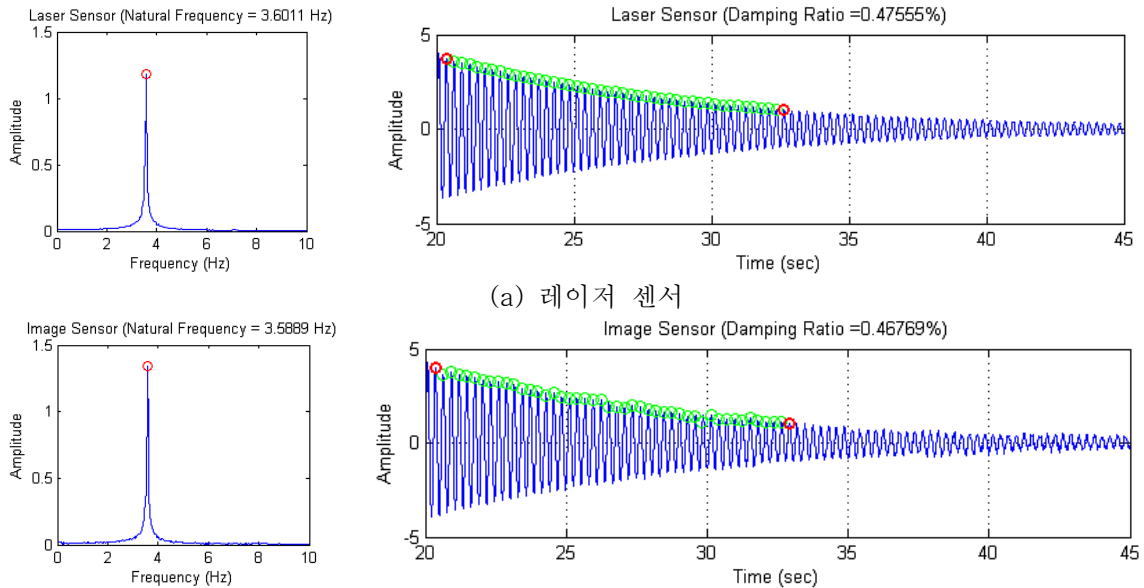


그림 5. 비교실험 결과



(a) 레이저 센서

(b) 이미지 센서

그림 6. 진동수 및 감쇠비 비교

4. 실험결과

본 연구에서는 이미지를 이용한 구조물의 실시간 3차원 다중 변위 계측 방법을 제안하였다. 비교 실험을 통하여 이미지 기반 계측 데이터의 신뢰성을 확인 할 수 있었다. 다중 변위계측이 필요한 구조물에 대하여 이미지 기반 변위계측 시스템을 적용하면 보다 경제적이고 간편하게 구조물응답을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

<참고문헌>

1. Nassif, H. H., Gindy, M., Davis, J., "Comparison of las doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration", NDT & E International, Vol. 38, pp.213-218, 2005.
2. 박요한, 신윤봉, 이덕환, 박관우, 김영민, 김휘, "MDLT(Modified Direct Linear Transformation) 알고리즘 기반 3D 다중 변위 실시간 영상 계측 시스템", 한국공간구조학회지, 제13권, 제1호, pp.8-16, 2013.
3. Hatze, H., "High-precision three-dimensional photogrammatic calibration and object space reconstruction using modified DLT-approach", J. Biomechanics, Vol. 21, pp.533-538, 1988.