라이다를 이용한 구조물 변위의 정밀계측
Precision Determination of Structure Displacement using LIDAR

이홍민[1] · 박효선[2] · 이임평[3] · 이상준[4]
Lee, Hong Min · Park, Hyo Seon · Lee, Impyeong · Lee, Sang Joon

[1] 연세대학교 대학원 건축공학과 박사과정(E-mail:idislee@yonsei.ac.kr)
[2] 연세대학교 건축도시공학부 교수(E-mail:hspark@yonsei.ac.kr)
[3] 서울시립대학교 지적정보학과 교수(E-mail:iplee@uos.ac.kr)
[4] 서울시립대학교 대학원 지적정보학과 석사과정(E-mail:maximax@uos.ac.kr)

Abstract

Monitoring structures is important to maintain the safety and serviceability of the structures. The maximum displacement in the structure should be precisely and frequently monitored because it is a direct assessment index indicating its stiffness. However, no practical method has been developed to monitor such displacement precisely, particularly for high-rise buildings and long span bridges because they cannot be easily accessible. To overcome such difficult accessibility, we propose to use a LIDAR system that remotely samples the surface of an object using laser pulses and generates the coordinates of numerous points on the surface. By analyzing the LIDAR points sampled from the surfaces of a deformed structure, we can precisely determine the displacement of the structure. In this study, we thus develop a novel method based the LIDAR system and perform an indoor experiment to prove its performance. This experimental results strongly supports that the displacement measurement using the LIDAR system are enough accurate to be used for structural analyses.

1. 서 론

구조물의 구조 반응은 안전성과 사용성의 두 가지 그룹으로 나누어 질 수 있다. 구조물의 안전성에 관련된 구조 반응들은 하중지지 능력 평가에 이용되는 것으로 대표적으로 부재들의 응력 수준을 들 수 있다. 그리고 사용성에 관련된 구조 반응들은 구조물의 변형에 대한 저항 성능 평가에 이용되는 것으로 대표적으로 최대변위, 층간변위, 수평진동 수준 등을 들 수 있다. 구조해석 시 모델링에 이용된 가정, 설계 도면과 시공의 차이, 작용 하중의 변화 등의 다양한 이유에 의하여 시공된 구조물의 이러한 구조 반응들은 설계 시 평가된 수준과는 현실적으로 다르다. 또한 시공 후 시간이 경과하면서 피로가 누적되거나 예상치 못한 하중 및 기타 여러 가지 원인들에 의하여 구조 부재 또는 접합부의 역학적 성능이 변화하게 된다. 그러므로 시공된 구조물의 안전성과 사용성을 합리적으로 확보하고 유지관리하기 위해서는 구조 반응들을 주기적으로 평가할 필요가 있다. 이러한 이유로 최근 건축 및 토목 등의 분야에서 구조물의 안전성과 사용성을 객관적으로 평가하기 위한 모니터링 기법들이 활발하게 연구되고 있으며 부분적으로 개발되어 실 구조물에 적용되고 있다.

구조물 또는 부재의 변위와 변형 형상을 계측할 수 있는 기법에 관한 최근의 연구로는 사진 측량학 분야의 기술을 응용한 영상기반 모니터링 기법이 있다. 디지털 사진기를 이용한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법은 렌즈를 통해 사진기에 투영된 광학상의 세기에 비례하여 발생하는 전하의 영상소자 디지털 신호를 이용하여 물체의 위치를 결정하는 기법으로 일반적으로 하나의 탐측요소가 10 ㎛보다 작으며 제조과정에서의 정확도는 약 1/10 ㎛이다. Olaszek(1999)은 망원렌즈가 장착된 디지털 CCD(Charge

Coupled Device) 사진기를 사용하여 특정위치의 변위를 계측하였다. 변위 계측의 정밀도에 영향을 주는 다양한 요인(측정 장치, 영상 처리 과정, 대기 난류, 참조 포인트 유무 등)을 정리하였고, 5 Hz의 주파수 범위 이내에서 정적, 동적으로 0.1-1.0 mm의 정밀도를 갖는 변위를 계측하였다. Fraser 등(2000)은 3대의 디지털 CCD 사진기를 사용하여 사진측량법으로 온도에 따른 강재 보의 변위를 계측하였다. 1200-0 ℃의 온도변화에서 0.7-1.3 mm의 정밀도를 갖는 변위를 계측하였다. Wahbeh 등(2003)은 디지털 사진기와 2개의 LEDs(light emitting diodes) 표적을 사용하여 장 스팬 교량의 특정 부분의 변위를 계측하였다. 디지털 사진기로 획득한 영상으로부터 필요한 정보를 추출하기 위해 대형 구조물에서 중요한 작은 주파수를 추출할 수 있는 적분 알고리즘을 사용하였고 다른 연구 결과와 비슷한 결과(변위 1.5-2.2 inch, 1차모드 0.23 Hz, 2차모드 0.36 Hz)를 도출해 내었다. 이러한 영상 기반 구조 거동 모니터링 기법의 경우 다수의 사진기가 필요하며 정밀도 향상을 위하여 구조물 이외의 고정된 지점과 사진기와의 정밀한 거리 측량이 필요하며 또한 구조물에 고정된 반사 표적점을 설치해야하는 단점을 가지고 있다.

최근 GIS 분야에서 사용되는 LIDAR(LIght Detection And Ranging, 라이다)는 상대적으로 환경의 영향을 크게 받지 않으며 특정 위치가 아닌 건물 또는 대상물의 전체의 형상에 대한 3차원 위치 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다(Ackermann, 1999). 이러한 라이다 시스템을 구조물의 안전성 및 사용성 모니터링에 적용하게 되면 구조물의 특정한 부분의 3차원 변위를 계측할 수 있다. 그러나 아직까지 토목 또는 건축 구조 분야에서 라이다를 이용하여 구조물의 변위 계측에 대한 적용성을 시도한 적이 없다.

본 연구에서는 라이다를 이용하여 구조물의 변위 계측 기법을 제시하고 기법의 적용성을 실험을 통하여 검증하고자 한다. 제시된 기법의 적용성을 검증하기 위하여 1점 집중하중을 받는 단순 지지된 철골 보의 휨 실험을 하였다. 라이다 시스템으로부터 철골 보의 처짐 값을 구하였으며 이를 LVDT로 직접 계측한 처짐 값과, 전기저항식센서와 광변형센서를 이용하여 계측한 변형률로부터 계산된 처짐 값을 비교하였다.

2. 라이다의 구성과 특징

라이다 시스템은 레이저를 이용하여 대상물의 3차원 좌표정보를 관측하는 것으로서 데이터 취득 및 처리가 디지털 방식으로 이루어진다. 라이다를 이용한 물체의 3차원 좌표 추출 원리는 그림 1과 같이 일정한 거리로부터 물체에 레이저 펄스를 발산시켜 되돌아오는데 걸리는 시간을 측정하고 레이저펄스의 속도를 이용하여 거리를 계산한다. 계측 대상 물체에 수개의 레이저 펄스를 발산시켜서 물체와의 떨어진 거리와 레이저 펄스의 발산하는 각의 측정으로 라이다를 기준한 물체의 상대 3차원 좌표를 획득 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 지상 라이다의 규격은 표 1과 같이 350 m 이내에서 물체의 반사율이 4 % 이상이면 3차원 좌표 정보 획득이 가능하며 레이저 스폿의 간격 및 크기는 거리에 비례한다. 획득되는 3차원 좌표는 측정 방향의 수평 및 수직 방향 그리고 거리 방향으로 오차가 발생한다. 라이다의 시야는 측정방향의 수평, 수직 방향으로 40°(±20°)이다. 그리고 1초당 2000포인트의 좌표 데이터 획득이 가능하다. 그림 2는 라이다를 이용하여 구조물의 3차원 좌표정보를 획득한 영상이다.

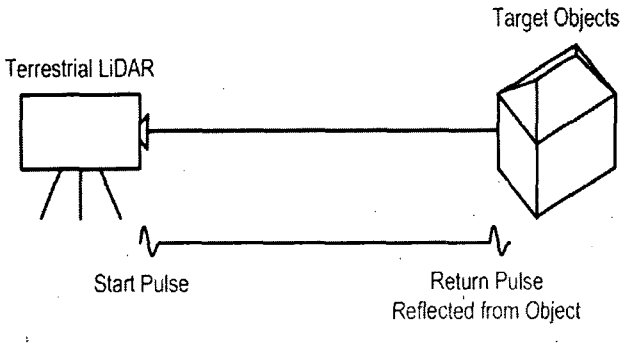

그림 1. 라이다를 이용한 3차원 좌표 추출 원리

그림 2. 라이다로 획득한 3차원 좌표영상

표 1. 지상 라이다 규격

Maximum range	≤350 *m* (4 % Target Reflectivity)
Spot spacing	0.026R - 2.6R *mm*
Spot size	15 *mm*@50 *m*, 20 *mm*@100 *m*
Distance accuracy	± 10 *mm*@50 *m*, ± 10 *mm*@100 *m*
Position accuracy	± 7 *mm*@50 *m*, ± 10 *mm*@100 *m*
Field of view	40° × 40° (± 20°)
Data sample rate	2,000 point/sec

3. 라이다를 이용한 구조물의 변위 계측 기법

라이다를 이용하여 획득된 대상 구조물의 3차원 좌표는 측정 방향에 대해서 표 1과 같이 수평 및 수직 오차 그리고 거리 오차를 가질 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 획득된 형상 좌표에 대한 적절한 데이터 처리 기법이 필요하고 계측하고자 하는 구조 반응을 얻기 위해서는 3차원 상의 구조물 좌표계와 라이다의 좌표계의 관계 정의가 필요하다. 본 연구에서는 최소 제곱 근사 이론을 이용하여 3차원 좌표 값을 근사화 하고 3차원 공간상의 기하학적인 관계를 이용하여 변위 계측 기법을 연구하였다. 변위 계측 기법은 i) 라이다를 이용한 형상 정보 획득, ii) 최소 제곱 근사 이론을 적용한 기준 벡터 생성, iii) 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의, 그리고 iv) 구조물 좌표계에서의 변위 계산의 4 가지 부분으로 구성되며 각각의 내용은 다음과 같다.

3.1 라이다를 이용한 형상 정보 획득

구조물을 구성하는 구조재는 선, 면, 입체 등의 기하학적 형상으로 정의 될 수 있고 이러한 형상을 이용하여 3차원 공간상에서 필요한 구조 반응을 계측할 수 있다. 라이다를 이용하여 구조물의 형상 정보를 획득할 경우에 구조 반응의 계측이 가능하도록 구조물의 기하학적인 형태, 구조적인 거동 등의 특성을 고려하여 측정거리, 측정 방향, 좌표 획득 및 레이저 스폿 간격 등을 사전에 계획할 필요가 있다.

3.2 최소 제곱 근사 이론을 적용한 기준 벡터 생성

구조물의 변위을 계측하기 위해서는 라이다를 기준으로 획득한 3차원 좌표계($x'y'z'$)를 변위 계측을 위한 3차원 좌표계(xyz)로 변환을 해야 한다(그림 3). 좌표 변환을 위해서는 변위 계측을 위한 좌표계와 라이다를 기준으로 하는 좌표계의 관계를 정의할 수 있는 기준 벡터가 필요하고 이것은 라이다 좌표계에서 구조물의 형상을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 기준 벡터 형성을 위한 면의 방정식을 구성하기 위해서 최소 제곱 근사 이론을 적용한다. 최소 제곱 근사 이론은 실험 등을 통하여 계측된 데이터 간의 상관관계를 정의할 수 있는 함수를 결정하는 근사화기법이다(Anton, 2000). 일반적으로 근사화 과정은 우선 데이터의 특성이 반영된 n차 다항식 등의 함수를 가정하게 되며 가정된 함수의 값과 직접 계측된 데이터 값과의 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 함수의 계수를 결정하게 된다.

3.3 기준 벡터를 이용한 라이다 좌표계와 구조물 좌표계의 관계 정의

기준 벡터는 라이다로부터 획득된 영상 내 각 점까지의 3차원 거리를 나타내는 좌표값 x',y',z'에 의하여 생성되므로 라이다와 구조물과의 거리 그리고 각도의 변화 따라 변하게 된다(그림3). 그러므로 라이다 영상에 나타난 구조물 내부 두 점의 상대적인 좌표값의 차이 또는 이동량은 라이다를 기준으로 한 상대 이동량이므로 구조물의 변형에 직접 이용될 수 없다.

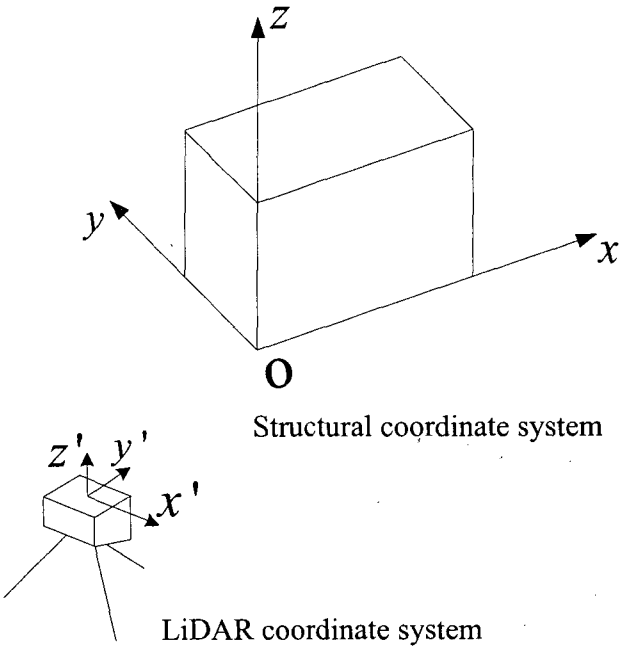

그림 3. 라이다 좌표계와 구조물 좌표계

라이다 영상에서의 상대 이동량을 변형 계측을 위한 구조물 기준 상대 이동량으로 변환하기 위해서는 그림 3과 같이 구조물의 변형 특성을 고려한 구조물 좌표계가 정의 되어야 한다. 이러한 두 좌표계 간의 관계는 앞에서 생성된 기준벡터를 이용하여 구하게 된다. 그리고 주기적으로 구조물의 변형은 라이다에 의하여 획득된 구조물의 변형된 영상을 두 좌표계간의 관계를 이용하여 구조물 좌표계에의 변형된 영상으로 변환하여 계측하게 된다.

3.4 변위 계산

구조물의 변위 계산은 변형된 형상 정보의 획득, 좌표 변환 그리고 좌표변환 된 형상 정보의 오차를 최소화 하기위한 최소 제곱 근사 이론의 적용의 세 가지 단계로 계산되어 진다. 우선 임의의 시점에서 변형된 구조물에 대한 3차원 형상정보를 라이다를 통하여 획득하고, 라이다 좌표계와 구조물의 좌표계의 관계를 이용하여 구조물의 3차원 형상 정보를 변환한다. 이렇게 변환된 변형 형상을 이용하여 구조물의 변위를 계측할 수 있으나 오차를 포함하고 있으므로 본 논문에서는 구조물 좌표계로 변환된 구조물의 형상에 최소 제곱 근사 이론을 적용하여 변형 형상을 계산한다. 구조물의 실제 변형 형상을 계산하기 위해서는 구조물의 형상, 하중 양상, 재료의 물성 또는 단면의 특성 등을 적절하게 고려하여 최소 제곱 근사 이론을 적용한다.

4. 변위 계측 기법의 적용성 검증

제시된 계측 기법의 적용성을 검증하기 위하여 1점 집중하중을 받는 단순 지지된 철골 보의 휨 실험을 하였다. 실험체는 그림 4와 같이 단순 지지된 철골 보(H-200×200×8/12, SM490)이며 횡 좌굴 없이 강축 방향으로 순수 휨이 작용하도록 설치하였고 전기저항식센서와 광변형센서, 그리고 LVDT를 그림 5와 같이 설치하였다. 철골 보의 L/2 지점에 크기가 다른 두 정적하중을 가력하고 전기저항식센서, LVDT를 이용하여 철골 보의 L/4, L/2, 3L/4 지점에서 각각 변형률, 변위를 측정하였고, 광변형센서를 이용하여 평균 변형률을 측정하였다. 그리고 라이다를 이용하여 3차원 형상 정보를 획득하였고 변위 계측 기법을 적용하여 계산한 처짐과 비교하였다.

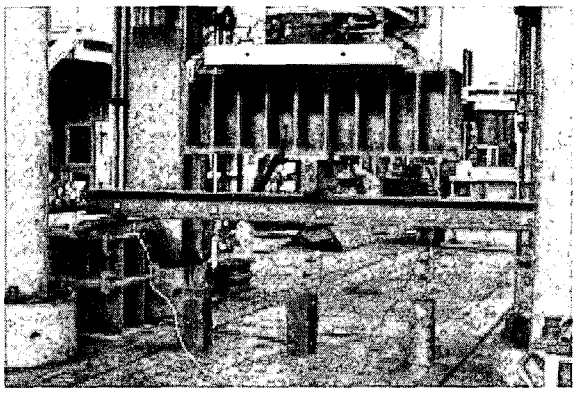

그림 4. 실험체

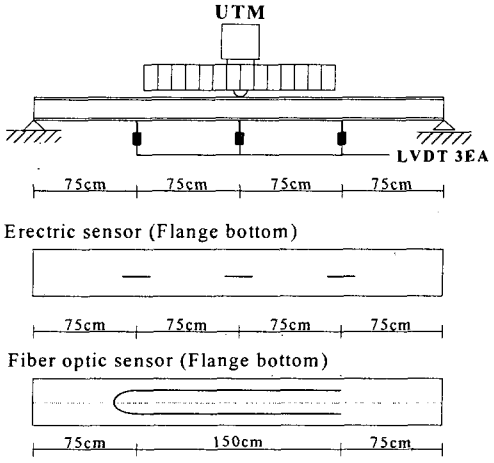

그림 5. LVDT 및 변형률 계측 센서 설치

표 2와 같이 L/4, L/2, 3L/4 지점에서 다른 4가지 방법을 이용하여 보의 처짐을 계산하였다. LVDT 측정 처짐 값을 기준으로 제시된 기법의 처짐 값을 비교해 보면 각 하중에 대해서 2 mm 이내의 오차를 나타내었고, LVDT 측정 처짐 값을 기준으로 전기저항식센서, 광변형센서로 계측한 변형률을 이용하여 계산한 처짐 값은 제시된 기법보다 상대적으로 큰 오차를 나타내었다. 그림 6은 보의 길이 방향에 따른 처짐 분포를 나타낸다.

표 2. 여러 가지 측정 방법을 이용한 보의 처짐

Load step	Measuring techniques	Deflection (mm)		
		L/4	L/2	3L/4
Step 1	LVDT	5.75	7.94	6.20
	LiDAR	5.27	7.09	5.38
	Erectric sensor	3.96	6.05	3.81
	Fiber optic sensor	4.43	6.45	4.43
Step 2	LVDT	8.43	11.84	8.93
	LiDAR	7.72	10.32	7.79
	Erectric sensor	6.21	9.75	6.18
	Fiber optic sensor	6.97	10.14	6.97

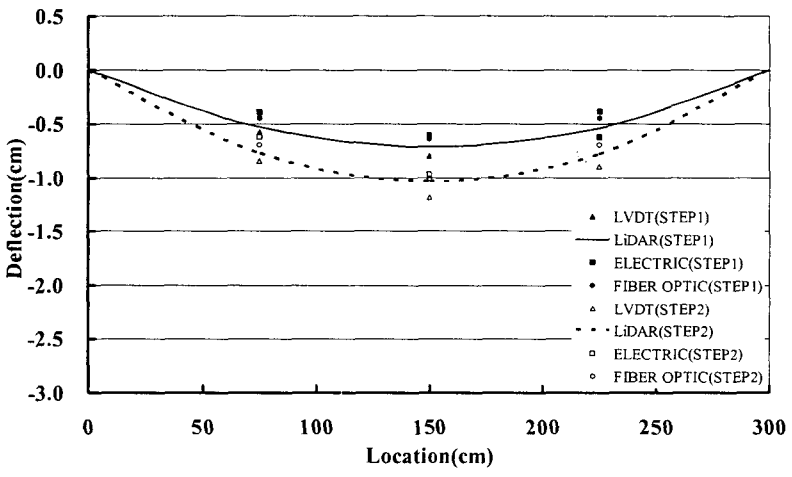

그림 6. 보의 길이 방향 위치에 따른 처짐 분포

5. 결 론

본 연구에서는 라이다를 이용하여 구조물의 변위를 계측 할 수 있는 새로운 기법을 제시하였다. 제시된 기법을 LVDT, 전기저항식센서, 광변형센서를 이용한 다른 계측 방법들과 비교하고 그 적용성을 검증해보았다. LVDT 측정 처짐 값을 기준으로 제시된 기법의 처짐 값을 비교해 보면 각 하중에 대해서 2 mm 이내의 오차를 나타내었다. LVDT로 계측한 변위 값은 구조물의 거동을 직접적으로 반영하기 때문에 사용성, 안전성을 평가하는데 정확한 지표가 될 수 있지만 고층건물이나, 장스팬 구조물의 경우 직접적인 설치 및 계측이 어렵다는 단점이 있다. 고층건물이나, 장스팬 구조물에 적용할 수 있는 전기저항식센서, 광변형센서, 그리고 라이다 변위 계측 기법을 이용하여 구조물의 변위를 계측하고 이에 대한 결과값을 비교, 분석 한 결과 제시된 기법이 전기저항식센서, 광변형센서와 유사한 성능의 신뢰적인 값을 갖고 있음을 확인 할 수 있었다. 전기저항식센서, 광변형센서, 라이다 변위 계측 기법의 실험 결과 값을 비교해 볼 때 제시된 기법의 안정성, 실험환경에서의 오차 등의 여러 가지 실험 변수가 작용 되었을 것으로 판단되며 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

Ackermann, F. (1999), Airborne laser scanning-present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 64-67.

Anton, H. (2000), Elementary Linear Algebra, John Wiley & Sons, Inc.

Fraser, C. S., Riedel, B. (2000), Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing 55, pp. 268-276.

Olaszek, P. (1999), Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method, Measurement 25, pp. 227-236.

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 Mater. Struct. 12, pp. 785-794.