

원거리 대형 구조물의 비전 기반 6자유도 변위 측정 기법

Vision-based 6-DOF Displacement Measurement
Technique for Massive Structures



명 현^{1)*}

Myung, Hyun



전 해 민²⁾

Jeon, Hae Min



명 완 철³⁾

Myeong, Wan Cheol



김 영 재⁴⁾

Kim, Young Jae

1. 서론

지난 수십 년 동안 구조물 건전도 진단(SHM: Structural Health Monitoring)에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 건전도 진단을 위한 요소들이 많이 있지만, 그중에서도 구조물의 변위는 가장 중요한 인자들 중의 하나로서 주로 가속도계, GPS, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), LDV (Laser Doppler Vibrometer)와 같은 기기들을 사용하여 측정하여 왔다. 그러나, 가속도계의 경우 변위를 간접적으로 측정하고, LVDT의 경우 설치 및 유지가 어려우며, GPS나 LDV의 경우 가격이 비싸다는 단점이 있다. 그 예로 가장 활발히 연구되고 있는 가속도계 센서의 경우 가속도 신호를 두 번 적분하여

변위를 측정하고 드리프트(signal drift)가 발생하기 때문에 계산된 변위 값이 정확하지 않으며 안정적이지 않다. GPS 역시 최근에 관련 기술이 발전하면서 수 cm 이내의 정확도를 보장한다는 장점이 있지만, 가격이 매우 비싸다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 최근 비전 기반의 구조물 변위 측정 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대부분의 비전 기반 시스템 방식은 측정하고자 하는 지점에 마커를 설치하고, 원거리의 고정된 지표면에 설치한 카메라를 이용해 마커의 움직임을 관찰한다. 이러한 비전 기반의 변위 측정 시스템의 경우 직접적으로 변위를 측정하기 때문에 비교적 정확하고, 시스템의 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 하지만, 마커와 카메라 사이의 시야가 확보되지 않은 경우, 예를 들어 안개 등으로 인해 시야가 좋지 않거나 조도가 어두운 경우 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Myung et al.은 카메라와 스크린 사이가 매

1) KAIST 건설 및 환경공학과 부교수

2) KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

3) KAIST 건설 및 환경공학과 석박통합과정

4) KAIST 로봇공학학제전공 석사과정

* E-mail : hmyung@kaist.ac.kr

우 가까운 양립형 구조 광 시스템을 제안하였다. 시스템의 한 면은 스크린, 레이저 그리고 카메라로 구성되어 있으며 두 면이 서로 마주보도록 설계되었다. 이 시스템의 경우 카메라와 스크린 사이의 거리가 짧기 때문에 날씨 혹은 조도와 같은 외부 환경에 거의 영향을 받지 않고, 따라서 기존 비전 기반의 구조물 변위 측정 시스템의 한계점을 극복할 수 있다. 하지만, 스크린의 크기가 한정되어 있기 때문에 측정할 수 있는 변위의 크기 역시 한정적이라는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Jeon et al.은 비주얼 서보잉 기법을 이용하여 투영된 레이저의 위치가 항상 스크린 내에 존재하도록 하는 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 시스템을 제안하였다.

본고의 2절에서는 일반적인 변위 측정 시스템에 대해서 소개하고, 3절에서는 비전 기반의 6자유도 변위 측정 시스템에 대해서 소개한다. 4절에서는 이 시스템을 실제 구조물에 적용한 실험 사례에 대해서 소개하고, 5절에서 결론을 맺는다.

2. 변위 측정 시스템

2.1 구조물 변위 측정 시스템

구조물 변위 측정은 구조물의 건전도 상태를 파악할 수 있는 중요한 인자들 중 하나로 간주되고 있으며, 접촉식 또는 비접촉식 변위 측정 센서를 이용하여 측정할 수 있다.

접촉식 변위 측정 센서로는 LVDT, GPS, 그리고 가속도계 및 스트레인 게이지(Strain gauge) 등을 이용한 간접 변위 측정 방식 등이 있다. LVDT는 구조물과 고정점 사이를 연결하여 설치하며, 두 지점 사이의 1축 선형 변위를 측정한다. 위 센서의 경우 설치시 고정점 및 연결선이 필요하기 때문에 장대교량 또는 고층 건물과 같

은 대형 구조물에 적용이 어렵다는 단점이 있다. RTK (Real-Time Kinematic)-GPS와 같은 고정밀 GPS의 경우 정밀도가 높은 편이지만, 가격이 매우 높으며 샘플링 주파수가 상대적으로 낮다는 단점이 있다. 가속도계 또는 스트레인 게이지 등을 이용한 간접적인 변위 측정 방식의 경우 상대적으로 가격이 저렴하며 설치가 쉽다는 장점이 있으나, 온도와 같은 외부환경의 변화에 민감하며 각 신호를 변위로 변환하는 과정에서 오차가 누적될 수 있다는 단점이 있다.

비접촉식 변위 측정 센서로는 LDV, 토탈 스테이션(total-station), 비전 센서 기반 변위 측정 시스템 등이 있다. LDV 또는 토탈 스테이션은 정밀도가 매우 높은 반면, 가격이 매우 비싸다. 비전 기반 변위 측정 방식은 근래 비전 센서 및 영상처리 기술의 발전에 따라 활발히 연구되고 있으며, 가격이 저렴하고 구조물의 변위를 직접적으로 측정할 수 있는 방식으로 기존 변위 측정 시스템 및 센서의 대안으로 간주되고 있다.

2.2 비전 기반 변위 측정 시스템

앞서 언급한 기존 변위 측정 센서들의 단점을 극복하기 위하여 비전 센서(인공표식 및 카메라, 구조광 등)를 이용한 구조물 변위 측정 방법 및 시스템 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 1960년대 이후 적외선 램프 추적, 레이저 빔 추적, 또는 트랜스퓨터(transputer) 기반의 특징점 추적 방식 등을 이용한 비전 기반 구조물 변위 측정 방식에 관한 연구가 진행되었다.

근래 들어서는 인공표식을 구조물에 설치하고 원거리 고정점에 설치된 고배율·고성능 카메라를 이용하여 인공표식의 움직임을 관측하는 기법에 관한 연구가 진행되고 있다. 위 방식은 구조물의 변위를 직접적으로 측정하고 가격이 상대적으로 낮다는 장점이 있다. 하지만, 카메라의

설치를 위한 고정점이 필요하고, 카메라와 인공 표식사이의 거리가 멀기 때문에 외부환경의 변화에 민감하며, 조도가 확보되지 않거나 안개가 낀 경우 가지거리가 확보되지 않아 변위 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 또한 대부분의 시스템이 1~2 자유도 선형 변위만을 측정한다는 한계점이 있다. 또한 칼만 필터링을 이용하여 비전 및 가속도계 센서를 융합하고, 3자유도 선형 및 회전 변위를 측정하는 연구 사례도 있다. 하지만 이 방법 역시 앞에서 언급한 비전 및 가속도계 센서의 단점을 갖고 있다.

3. 비전 기반 6자유도 변위 측정 시스템

3.1 양립형 구조광 시스템

본 연구팀은 기존 변위 측정 센서들의 단점을 극복하기 위하여, 외부환경의 변화에 강인하고, 가격이 저렴하며, 높은 정밀도를 보장하는 6자유도 변위 측정 시스템을 개발하였다. 개발한 양립형 구조광 시스템(Paired structured light system)은 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 각 모듈은 서로 마주보는 두 면으로 구성되어 있으며, 각 면은 한 개 혹은 두 개의 레이저, 카메라, 그리고 스크린으로 구성되어 있다. 각 면의 레이저는 반대편 스크린을 향하여 조사하고, 스크린 내 투영된 레이저 빔의 위치는 인접한 카메라를 이

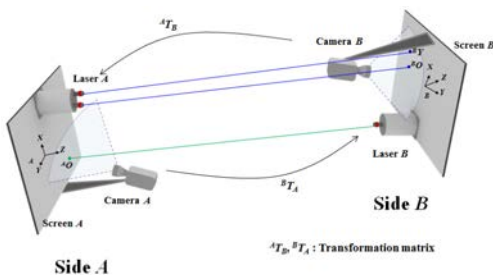


Fig. 1 양립형 구조광 시스템 (Paired structured light system)의 개요도

용하여 계산한다. 이 때, 카메라와 스크린 사이의 거리가 20cm 정도로 가깝기 때문에 본 변위 측정 시스템의 경우 안개 상황이나 조도 변화 등 외부환경의 변화에 강인하다.

두 지점 사이의 6자유도 상대 변위는 스크린 양 면에 투영된 총 3개의 레이저 포인트의 위치를 바탕으로 계산할 수 있다. 각 레이저 포인트는 2D 스크린에 투영되므로 X 및 Y축 위치 정보를 갖는다. 따라서 총 3개의 레이저 포인트의 위치 정보를 바탕으로 6개의 식을 도출할 수 있으며, 이는 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 기법 또는 확장형 칼만 필터(Extended Kalman filter, 이하 EKF) 기법 등을 이용하여 6 자유도 변위를 계산할 수 있다.

3.2 ViSP

제안한 양립형 구조광 시스템은 외부 환경의 변화에 강인하며, 가격이 저렴하고, 6자유도 변위를 모두 측정할 수 있는 시스템으로 다양한 실험을 통하여 시스템의 성능을 검증하였다. 하지만, 스크린의 크기가 한정적이기 때문에 측정 가능한 변위의 범위 역시 한정적이라는 단점이 있다. 예를 들어 두 점 사이의 거리가 100m 이고, 스크린의 크기가 30cm × 30cm 인 경우 측정 가능한 선형 및 회전 변위는 각각 $\pm 15\text{cm}$, $\pm 0.086^\circ$ 에 불과하다.

이를 극복하기 위하여 본 연구팀에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 시스템(Visually servoed paired structured light system, 이하 ViSP)을 개발하였다. ViSP는 기존의 양립형 구조광 시스템에 레이저의 자세를 제어할 수 있는 2자유도 매니퓰레이터(manipulator)를 추가하여 투영된 레이저 빔이 항상 스크린 안에 위치하도록 제어한다. 이는 투영된 레이저 빔이 스크린 내 일정 범위를 벗어날

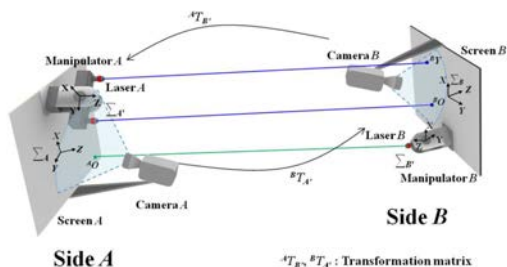


Fig. 2 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 시스템 (ViSP: Visually servoed paired structured light system)의 개요도

경우, 스크린 중앙에 위치하도록 매니플레이터의 회전각을 계산 및 제어한다.

최종적으로 두 지점 사이의 6자유도 변위는 양 면의 스크린에 투영된 레이저 빔의 위치 및 매니플레이터의 회전 각도를 바탕으로 계산한다.

3.2.1 6자유도 변위 측정 기구학 방정식

ViSP의 기구학 방정식은 검출된 레이저 포인터의 위치 $m = [{}^A O, {}^B O, {}^B Y]^T$ 와 6 자유도 변위 $p = [x, y, z, \theta, \varphi, \psi]^T$ 사이의 기하학적인 관계를 바탕으로 나타낼 수 있다. 여기에서, ${}^A O$ 는 스크린 A에 투영된 레이저 포인터의 위치이고, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 는 스크린 B에 투영된 레이저 포인터의 위치 정보이다. x, y, z 는 두 면 사이의 3축 선형 변위이며, θ, φ, ψ 는 두 면 사이의 3축 회전 변위이다. 좌표 변환 행렬을 바탕으로 스크린 A에 투영된 레이저 포인터 ${}^A O$ 를 계산하면 식 (1)과 같다.

$${}^A O = {}^A T_B \cdot {}^B T_B [0 \ 0 \ Z_{AB} \ 1]^T \quad (1)$$

여기에서 ${}^A T_B$ 는 B좌표계에서 A좌표계로 변환하는 좌표변환 행렬이며 6자유도 변위로 구성되어 있고, ${}^B T_B$ 는 B면의 2 자유도 매니플레이터의 회전 행렬이며 모터 엔코더 정보를 바탕으로 ${}^B T_B = R(X, -\theta_{Benc}) \cdot R(Y, -\phi_{Benc})$ 와 같

이 계산된다. 이때 θ_{Benc} 와 ϕ_{Benc} 는 매니플레이터 B가 X와 Y축을 중심으로 회전된 각도이며, Z_{AB} 는 A면과 B면 사이의 거리이다. ${}^A O$ 와 마찬가지로, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 를 계산하면 다음의 식 (2), (3)과 같다.

$${}^B O = {}^B T_A \cdot {}^A T_A' [-L \ 0 \ Z_{AB} \ 1]^T \quad (2)$$

$${}^B Y = {}^B T_A \cdot {}^A T_A' [L \ 0 \ Z_{AB} \ 1]^T \quad (3)$$

이때, L 은 레이저의 X축 설치 위치이다. 식 (1)~(3)을 바탕으로 두 면 사이의 6자유도 변위를 포함한 기구학 방정식 M 을 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$M = [{}^A O_x \ {}^A O_y \ {}^B O_x \ {}^B O_y \ {}^B Y_x \ {}^B Y_y]^T \quad (4)$$

위 식에서 ${}^A O_x, {}^A O_y$ 는 ${}^A O$ 의 X, Y축 성분의 위치 정보이다.

3.2.2 IDE(증분형 변위 추정) 알고리즘

ViSP의 6자유도 변위 측정을 위해 증분형 변위 추정(Incremental Displacement Estimation, 이하 IDE) 알고리즘을 개발하였으며, 이는 EKF와 마찬가지로 예측(prediction), 관측(observation), 그리고 업데이트(update)의 세 단계로 구성되어 있다. 예측 식에서는 6자유도 변위(p), 레이저 포인터의 위치(m), 오차 분산 행렬(P)를 예측하며, 이는 식 (5)와 같다.

$$\hat{p}(t+1|t) = \hat{p}(t|t) + J_p^+(t) \Delta m(t+1|t) \quad (5)$$

$$\hat{m}(t+1|t) = M(\hat{p}(t+1|t))$$

$$P(t+1|t) = P(t|t) + Q$$

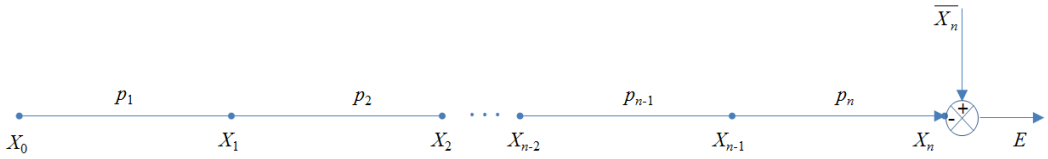


Fig. 3 ViSP를 다수개로 확장한 경우 전파 오차 (E_N)는 ViSP를 통해 측정된 마지막 모듈의 위치 (X_n)과 GPS 또는 측량기기로 측정된 절대 위치(\overline{X}_n)의 차이로 정의한다.

이때, $\Delta m(t+1|t)$ 은 이전과 현재에 관측된 데이터의 차이이며, 계산식은 $\Delta m(t+1|t) = m(t+1) - \tilde{m}(t)$ 이다. 이 때, $\tilde{m}(t)$ 는 이전 시간의 2자유도 매니플레이터의 회전각도로 계산된 현재 레이저 포인터의 위치이다. 다시 말해서 이전에 계산된 6자유도 변위 값과 이전과 현재의 데이터 차이를 고려하여 현재 6자유도 변위 값을 예측한다.

관측 식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때, 식 (5)를 통해 예측한 레이저 포인터의 위치와 관측한 데이터의 차이인 $\nu(t+1)$ 를 계산한다.

$$\nu(t+1) = m(t+1) - \hat{m}(t+1|t) \quad (6)$$

$$S(t+1) = J_p(t+1)P(t+1|t)J_p^T(t+1|t) + R$$

식 (6)을 이용하여 칼만 이득인 $K(t+1)$ 를 계산하고 이를 바탕으로 6자유도 변위를 업데이트 하는 부분이 식 (7)이다.

$$K(t+1) = P(t+1|t)J_p^T(t+1)S^{-1}(t+1) \quad (7)$$

$$\hat{p}(t+1|t+1) = \hat{p}(t+1|t) + K(t+1)\nu(t+1)$$

$$P(t+1|t+1) = P(t+1|t) - K(t+1)S(t+1)K^T(t+1)$$

식 (5)~(7)를 수행하면서 두 면 사이의 6자유도 변위를 예측할 수 있다. IDE 알고리즘은 뉴턴-랩슨 혹은 EKF와 같은 반복기법 알고리즘과는 달리 비반복적 방식으로 계산하기 때문에, 계산시간이 상대적으로 적게 걸리며 변위에

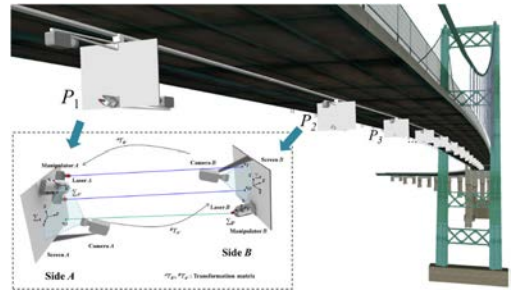


Fig. 4 다수개의 ViSP를 이용한 대형구조물의 변위 측정 개요도

측 정밀도는 반복기법 알고리즘과 비슷한 수준이다.

3.2.3 DEEP 알고리즘

Fig. 3과 같이 ViSP를 다수 개로 확장할 경우 장대교량 또는 고층건물과 같은 대형 구조물의 변위를 측정할 수 있다. 다수 개의 ViSP를 릴레이 방식으로 확장할 경우 구조물 전체의 움직임을 각 모듈로부터 계산된 6자유도 변위의 곱으로 나타낼 수 있다. 하지만, 곱하는 과정에서 각 모듈의 변위 측정값에 포함된 오차가 전파될 수 있다는 단점이 있다. 따라서 본 연구팀에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 다중모듈을 위한 변위 추정 오차 역전파 (Displacement Estimation Error Back-propagation, 이하 DEEP) 알고리즘을 개발하였다.

전파 오차는 Fig. 4와 같이 ViSP 및 GPS 또는 기타 측량기기를 통해 측정된 마지막 모듈의 위치의 차이, $E_N = \overline{X}_n - X_n$ 로 정의한다. 그림

에서 p_i ($i=1, \dots, m$)는 i -번째 ViSP 모듈로 측정된 X_{i-1} 과 X_i 위치 사이의 6자유도 상대 변위 측정값이고, X_i 는 X_0 를 기준으로 한 상대 위치로 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$X_i = f(g(p_1)) \cdot g(p_2) \cdot \dots \cdot g(p_i) \quad (8)$$

이 때, f 는 행렬을 벡터로 변환하는 함수이며, g 는 벡터를 행렬로 변환하는 함수이다.

위 전파 오차를 줄이기 위하여, 본 연구팀에서는 인공 신경망(Neural Network)에서 사용하는 오차 역전파 알고리즘과 유사한 구조의 DEEP 알고리즘을 개발하였다. DEEP 알고리즘은 전파 오차를 줄이면서 각 p_i 를 마지막 모듈에서부터 역순으로 업데이트 한다. 업데이트 과정에서는 뉴턴-랍슨 또는 급경사도법 (gradient descent method)을 사용할 수 있다(각 식 (9), 식 (10) 참조).

$$p_i(k+1) = p_i(k) - \alpha J_{p_i}^+ E_N \quad (9)$$

$$p_i(k+1) = p_i(k) - \alpha J_{p_i} + \gamma \Delta p_i(k) \quad (10)$$

위 식에서 α 는 학습율(learning rate)이며, γ 는 모멘텀 계수(momentum parameter)이고, J_{p_i} 는 p_i 의 자코비안(Jacobian)이며, $J_{p_i}^+$ 는 J_{p_i} 의 의사 역행렬(pseudo inverse matrix)이다.

4. 적용 실험

4.1 ViSP 실험

ViSP의 성능 및 토목 구조물로의 적용 가능성을 확인하기 위하여 강구조 모형 구조물 및 철도 교량에 ViSP 모듈을 설치하고 구조물의 변위를

측정하였다. ViSP의 변위 값을 가속도계 센서(imote2) 값으로부터 재구성한 변위 값과 비교하였다. 가속도 값을 이용한 변위 재구성은 FIR 필터 기반의 변위 재구성 알고리즘을 이용하였다.

4.1.1 강구조 모형 구조물 적용 실험

ViSP를 이용한 강구조 모형 구조물의 변위 측정 실험은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 구조물의 위·아래에 ViSP의 모듈을 설치하고 시스템의 성능 검증을 위하여 3축 가속도계 센서(imote2)를 설치하였다. 이 때 두 모듈 사이의 거리는 18m이다. 구조물의 인위적 변위는 최상 층에 설치된 질량 드라이버를 이용하여 발생시켰다. 구조물의 6자유도 변위 측정 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 ViSP의 변위 값이 imote2의 변위 재구성 값과 높은 정밀도로 일치한다. imote2는 선형 변위만을 측정하는 반면 ViSP는 선형 및 회전 변위 모두 측정 가능하다.

4.1.2 철도 교량 적용 실험

철도 교량을 이용한 ViSP의 현장 실험 사진은 Fig. 7과 같다. 각 모듈은 교량의 주경간의 중간 및 교각 위에 설치하였으며, 이 때 두 지점 사이의 거리는 22.5m이다. 철도가 교량 위를 움직일 경우 발생하는 구조물의 변위를 ViSP 및 imote2 센서를 이용하여 측정하였다.

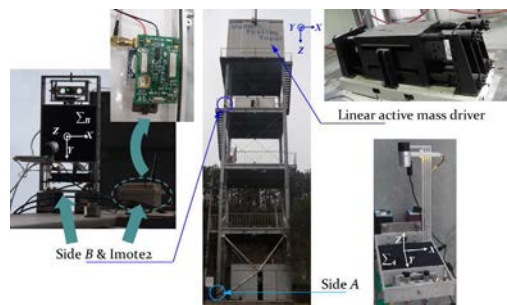
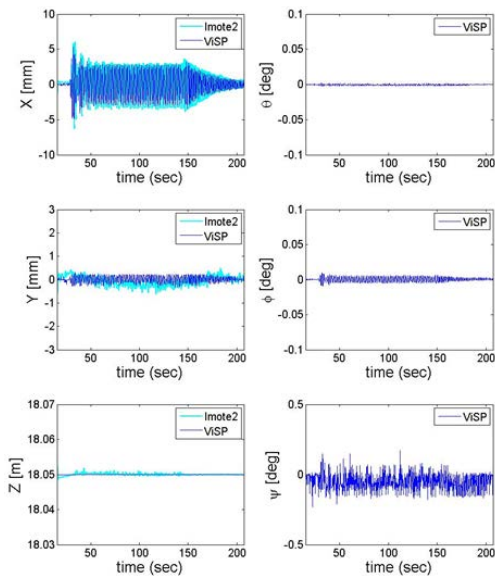
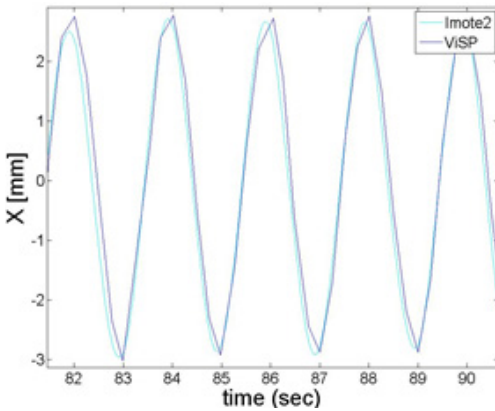


Fig. 5 강구조 모형 구조물 실험



(a) 6자유도 변위 측정 결과



(b) X축 선형 변위 측정 결과 (81<math>\leq t < 91</math>)

Fig. 6 강구조 모형 구조물 실험 결과

6자유도 변위 측정 결과는 Fig. 8과 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 imote2의 경우 동적 변위만을 측정하는 반면 ViSP는 동적 및 정적 변위 모두 측정 가능하다는 장점이 있다. 하지만, ViSP의 샘플링 주파수가 3-4Hz로 한정적이어서 측정 가능한 구조물의 주파수 역시 1.5-2Hz로 한정적이다. 이는 ViSP의 양 모듈간 데이터 통신시 발생하는 통신지연(약 100 msec)으로 인

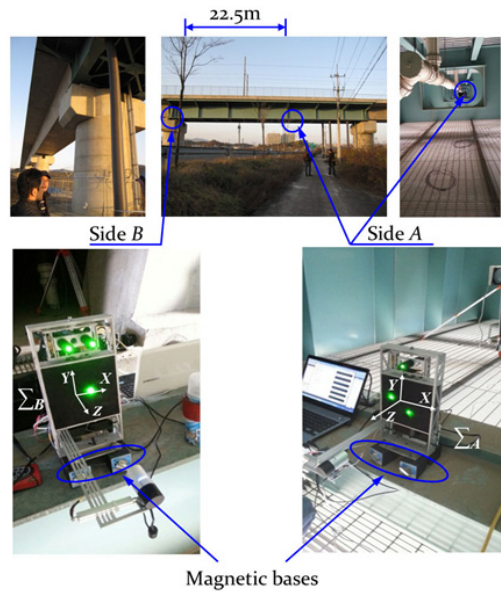


Fig. 7 철도 교량 실험

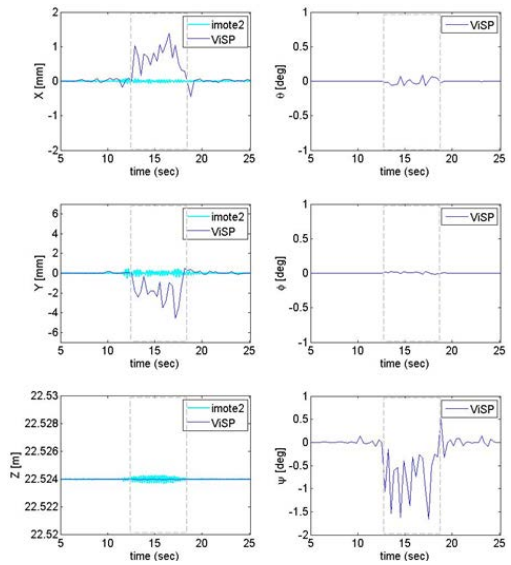


Fig. 8 철도 교량 6자유도 변위 측정 실험 결과

한 것으로 향후 알고리즘의 개선 및 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서와의 융합을 통해 극복하고자 한다.

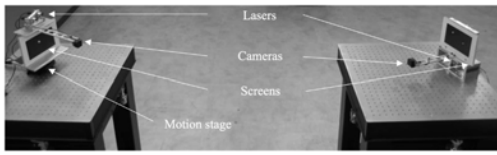
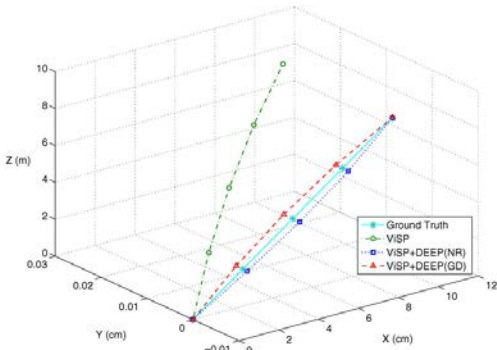
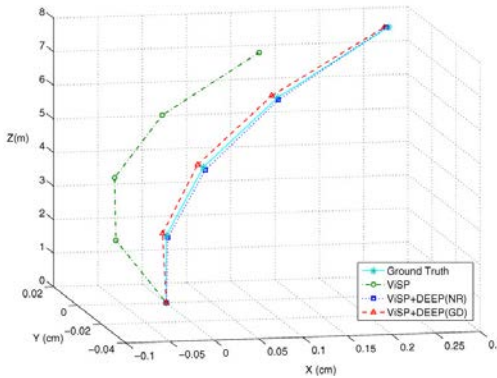


Fig. 9 ViSP의 실내 실험



(a) X축 선형 변위 측정 결과



(b) Y축 회전 변위 측정 결과

Fig. 10 DEEP 알고리즘의 성능확인을 위한 실내 실험 결과

4.2 다중 모듈 실험

DEEP 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 9와 같이 ViSP의 양면을 서로 마주보도록 설치하고 모션 스테이지(Motion stage)를 사용하여 두 지점 사이의 인위적 변위를 발생시키며, 6자유도 변위를 측정하였다. ViSP를 이용하여 측정된 변위 값을 4개의 모듈로 확장하여 시뮬

레이션 하였으며, 뉴턴-랩슨 및 급경사도법을 이용한 DEEP 알고리즘의 변위 측정 결과(각각 DEEP(NR), DEEP(GD)로 표기) Fig. 10과 같다. 그림에서 보는바와 같이 DEEP 알고리즘을 수행한 경우 ViSP 변위의 곱으로 발생하는 전과 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본고에서는 구조물의 변위를 측정하는 방법들에 대해서 전반적으로 살펴보고, 특히 6자유도 변위 즉, 선형 및 회전 변위 측정이 가능한 비전 기반의 양립형 구조 광 시스템인 ViSP에 대해서 소개하였다. 이 시스템은 레이저, 카메라, 스크린, 그리고 레이저의 움직임을 제어하는 2 자유도 레이저 기구부가 한 면을 구성하고 마주보는 두 면이 쌍을 이루어 한 모듈을 이룬다. 이 시스템은 비주얼 서보잉 기술을 도입함으로써 한정된 스크린 크기로 인한 한정된 변위 측정 범위의 문제점을 극복하였다.

실험을 통하여 ViSP 변위 측정 시스템의 성능을 확인하였으며, 환경 변화에도 강인하게 6 자유도 변위를 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 다중 모듈 사용으로 인해 오차가 누적될 수 있는 단점을 극복하기 위해서 다중 모듈에 대한 오차 전과 최소화 알고리즘(DEEP)을 설계하여 적용하였다. 현재 4Hz 정도인 시스템의 샘플링 주파수를 IMU 센서와의 융합을 통해 더 빠르게 변위를 측정할 수 있도록 향상시킨다면, 향후 다양한 6자유도 변위 측정 시스템에 활발히 응용되리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술

A01) 및 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. C. Chang and X. H. Xiao, "Accurate displacement measurement from fusion of vision-based displacement and acceleration with Kalman filter", in 20th Int. Conf. on Adaptive Structures and Technologies, Hong Kong, 2009.
2. G. A. Stephen, J. M. W. Brownjohn and C. A. Taylor, "Visual monitoring of the Humber bridge", Eng. Struct., Vol. 15, No. 3, 1993, pp.197-208.
3. H. Jeon, J. U. Shin and H. Myung, "Incremental displacement estimation of structures using paired structured light", Smart Struct. Syst., Vol. 9, No. 3, 2012, pp.273-286.
4. H. Jeon, J. U. Shin and H. Myung, "The displacement estimation error back-propagation (DEEP) method for a multiple structural displacement monitoring system", Meas. Sci. Technol., Vol. 24, No. 4, 2013, p.045104.
5. H. Jeon, W. Myeong, J. U. Shin and H. Myung, "Experiments on structural displacement monitoring using ViSP (Visually servoed paired structured light system)", in 9th Int. Workshop on Struct. Health Monit., 2013.
6. H. Jeon, Y. Bang and H. Myung, "A paired visual servoing system for 6-DOF displacement measurement of structures", Smart Mater. Struct., Vol. 20, No. 4, 2011, p.045019.
7. H. Myung, J. D. Jung and H. Jeon, "Robotic SHM and model based positioning system for monitoring and construction automation", Adv. Struct. Eng., Vol. 15, No. 6, 2012, pp.943-954.
8. H. Myung, S. M. Lee and B. J. Lee, "Paired structured light for structural health monitoring robot system", Struct. Health Monitor., Vol. 10, No. 1, 2011, pp.49-64.
9. H. S. Lee, Y. H. Hong and H. W. Park, "Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low frequency dominant structures", Int. J. Numer. Meth. Engg., Vol. 82, No. 4, 2010, pp.403-434.
10. J. Isyumov, A. G. Davenport and J. Monbaliu, "CN tower: model and full-scale response to wind", in IABSE 12th Congress, Vancouver BC, 1984.
11. J. J. Lee and M. Shinozuka, "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques", Exp. Mech., Vol. 46, No. 1, 2006, pp.105-114.
12. J. Marecos, M. Castanheta and J. T. Trigo, "Field observation of Tagus river suspension bridge", J. Struct. Div-ASCE., Vol. 95, No. 4, 1969, pp.555-583.
13. J. W. Park, J. J. Lee, H. J. Jung and H. Myung, "Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach", NDT & E Int., Vol. 43, No. 7, 2010, pp.642-647.
14. J. W. Park, S. H. Sim, H. J. Jung and B. F. Spencer, "Development of a Wireless Displacement Measurement System Using Acceleration Responses", Sensors, Vol. 13, No. 7, 2013, pp.8377-8392.
15. K. T. Park, S. H. Kim, H. S. Park and K. W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration", J. Eng. Struct., Vol. 27, No. 3, 2005, pp.371-378.
16. X. Meng, G. W. Roberts, A. H. Dodson, E. Cosser, J. Barnes and C. Rizos, "Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural displacement monitoring: analytical and empirical studies", J. Geodesy, Vol. 77, No. 12, 2004, pp.809-822.
17. Y. F. Ji and C. C. Chang, "Nontarget stereo vision technique for spatiotemporal response measurement of line-like structures", Int. J. Eng. Mech., Vol. 134, No. 6, 2008, pp.466-474.
18. Y. Q. Ni and K. Y. Wong, "Health checks through landmark bridges to sky-high structures", in 5th Int. Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Boston, 2009, pp.9-22.

담당 편집위원: 박정용
(에스큐 엔지니어링 이사)
pjy6810@pusan.ac.kr