실시간 구조물 변위 모니터링을 위한 증분형 변위 측정 알고리즘

Incremental Displacement Estimation Algorithm for Real-Time Structural Displacement Monitoring

전 해 민, 신 재 욱, 명 완 철, 명 현*

(Haemin Jeon¹, Jae-Uk Shin¹, Wancheol Myeong¹, and Hyun Myung¹)

¹KAIST

Abstract: The purpose of this paper is to suggest IDE (Incremental Displacement Estimation) algorithm for the previously proposed visually servoed paired structured light system. The system is composed of two sides facing with each other, each with one or two lasers with a 2-DOF manipulator, a camera, and a screen. The 6-DOF displacement between two sides can be estimated by calculating the positions of the projected laser beams and rotation angles of the manipulators. In the previous study, Newton-Raphson or EKF (Extended Kalman Filter) has been used as an estimation algorithm. Although the various experimental tests have validated the performance of the system and estimation algorithms, the computation time is relatively long since aforementioned algorithms are iterative methods. Therefore, in this paper, a non-iterative incremental displacement estimation algorithm which updates the previously estimated displacement with a difference of the previous and the current observed data is introduced. To verify the performance of the algorithm, experimental tests have been performed. The results show that the proposed non-iterative algorithm estimates the displacement with the same level of accuracy compared to the EKF with multiple iterations with significantly less computation time.

Keywords: SHM (Structural Health Monitoring), displacement, visually servoed paired structured light system (ViSP), IDE (Incremental Displacement Estimation)

1. 서론

구조물 유지 관리에 대한 필요성이 부각되면서, 구조물 건전도 진단과 관련된 연구가 활발히 진행 되고 있다. 변위 측정은 구조물의 건전도를 평가하는 중요한 요소 중 하나로, 구조물의 동적 거동을 해석하고, 건전도 상태를 평가한다[1]. 구조물 변위 측정에 쓰이는 센서로는 가속도계, GPS, LDV (Laser Doppler Vibrometer) 등이 있다. 그러나 가속도계 센서의 경우 두 번 적분하여 변위를 계산하기 때문에 간접적으로 변위를 측정하고, 신호 이동(signal drift)으로 인한 오차가 존재하며, 온도와 같은 외부 환경에 영향을 받는다는 단점이 있다[2]. GPS는 정확도가 높으나 가격이 비싸다는 단점이 있으며[3], LDV의 경우 설치시 고정점이 필요하고 GPS와 마찬가지로 가격이 비싸다는 단점이 있다.

기존 센서의 단점을 극복하기 위하여 비전 센서를 이용한 구조물 변위 측정 시스템 및 방법이 활발히 연구되고

있다. 대부분의 비전 센서 기반 변위 측정 시스템의 경우, 구조물에 목표물을 설치하고 원거리 고정점에 설치한 카메라를 이용하여 목표물의 움직임을 측정하여 변위를 예측한다[4,5]. 그러나 위 방식의 경우 카메라와 목표물 사이의 거리가 멀기 때문에 조도 혹은 날씨와 같은 외부 환경에 민감하며, 가시거리(line of sight)가 확보되는 경우에만 변위를 예측할 수 있다는 한계점이 있다. 또한, 카메라와 목표물의 사이가 멀어질수록 영상 내 목표물의 크기가 작아져 검출하기 어렵고, 이를 극복하기 위해 고성능 망원경 렌즈를 사용할 경우 전체 시스템의 가격이 올라간다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 동일 저자의 이전 논문에서는 서로 마주보는 두 면이 한 쌍을 이루고, 각 면이 레이저, 비전 센서 및 스크린으로 구성된 비주얼 서보잉 기반의 양립형 구조광 시스템을 제안하였다[6-8]. 위 시스템의 경우, 카메라와 스크린 사이의 간격이 20 cm 내외로 상대적으로 짧기 때문에 날씨 또는 조도와 같은 외부 환경의 변화에 강인하며 두 면 사이의 거리에 상관없이 항상 동일한 크기의 스크린 영상을 획득할 수 있다는 장점이 있다. 각 면의 레이저는 반대 면의 스크린을 향해 투영되며, 이때 투영된 레이저 포인트의 위치가 스크린을 벗어나지 않도록 2자유도 기구부를 이용하여 레이저의 움직임을 제어하였다. 투영된 레이저 포인트의 위치와 기구부의 회전 각도를 바탕으로 두 면 사이의 6자유도 변위를 측정할 수 있으며 측정 알고리즘으로는 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 혹은 확장형

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 4. 30., 수정: 2012. 5. 17., 채택확정: 2012. 5. 22.

전해민, 명완철: KAIST 건설및환경공학과

(inhishand@kaist.ac.kr/wcmyeong@kaist.ac.kr)

신재욱: KAIST 로봇학제전공(jacksju@kaist.ac.kr)

명현: KAIST 건설및환경공학과, 로봇학제전공(hmyung@kaist.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부 일반연구지원사업(과제번호: 2009-0075397)과 국토해양부의 U-City 석박사과정 지원사업에 의하여 연구하였음.

※ 본 논문은 2012년 27회 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었음.

칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter)를 사용할 수 있다.

하지만 위 알고리즘의 경우 여러 번의 반복을 통해 6자유도 변위 값을 추정하기 때문에 계산 시간이 상대적으로 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이전의 계산된 6자유도 변위 값과 투영된 레이저 포인터의 위치차를 이용하여 비반복적으로 변위를 측정하는 증분형 알고리즘을 소개한다. 본 논문의 제 II 장에서는 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 시스템의 구조 및 기구학 방정식을 소개하고, 제 III 장에서는 증분형 변위 측정 알고리즘을 소개하며, 제 IV 장에서는 실험을 통해 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로 제 V 장에서는 결론으로 본 논문을 마무리 짓는다.

II. 구조물 변위 모니터링 시스템

그림 1에서 보는 바와 같이 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 시스템은 마주보는 두 면으로 구성되어 있으며, 각 면의 레이저는 반대편 면의 스크린을 향해 투영되고, 투영된 레이저 빔이 항상 스크린 내에 있도록 2자유도 기구부를 제어한다. 두 면 사이의 6자유도 선형 및 회전 변위는 투영된 레이저의 위치 및 기구부의 회전 각도를 바탕으로 예측할 수 있다.

본 시스템의 기구학 방정식은 관측된 레이저 포인터의 위치 정보 $m = [{}^A O, {}^B O, {}^B Y]^T$ 와 6 자유도 변위 $p = [x, y, z, \theta, \phi, \psi]^T$ 사이의 지형적인 관계를 바탕으로 나타낼 수 있다. 여기에서, ${}^A O$ 는 스크린 A 에 투영된 레이저 포인터의 위치이고, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 는 스크린 B 에 투영된 레이저 포인터 위치 정보이다. x, y , 그리고 z 는 두 면 사이의 3축 선형 변위이며, θ, ϕ , 그리고 ψ 는 두 면 사이의 3축 회전 변위이다. 6 자유도 변위를 계산하기 위하여 최소 3개 이상의 레이저가 사용되어야 하며, 이는 각 레이저 포인터가 2D 스크린에 투영되므로 각 투영된 레이저 좌표는 x 와 y , 2개의 정보를 갖기 때문이다.

본 기구학 방정식은 좌표 변환 행렬 ${}^A T_B$ 와 ${}^B T_A$ 를 사용하여 나타낼 수 있다. ${}^A T_B$ 는 B 좌표계를 A 좌표계로 변환하는 좌표 변환 행렬이며 식 (1)과 같이 3축 선형 변환 행렬과 회전 변환 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다.

$${}^A T_B = T(x, y, z)R(X, \theta)R(Y, \phi)R(Z, \psi). \quad (1)$$

그림 1. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 시스템 [7,8].

Fig. 1. Visually servoed paired structured light system [7,8].

식 (1)의 변환 행렬을 바탕으로 스크린 A 에 투영된 레이저 포인터 ${}^A O$ 를 계산하면 식 (2)와 같다.

$${}^A O = {}^A T_B \cdot {}^B T_B [0 \ L \ Z_{AB} \ 1]^T \quad (2)$$

여기에서 ${}^B T_B$ 는 B면의 2 자유도 레이저 기구부의 회전 행렬이며 모터의 엔코더 정보를 바탕으로 ${}^B T_B = R(X, -\theta_{Benc}) \cdot R(Z, -\psi_{Benc})$ 와 같이 계산된다. 이때 θ_{Benc} 와 ψ_{Benc} 는 기구부 B가 X 와 Z 축을 중심으로 회전된 각도이며, L 은 레이저의 Y 축 설치 위치, Z_{AB} 는 A 면과 B 면 사이의 거리이다. ${}^A O$ 와 마찬가지로, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 를 계산하면 아래의 식과 같다.

$${}^B O = {}^B T_A \cdot {}^A T_A [0 \ L \ Z_{AB} \ 1]^T \quad (3)$$

$${}^B Y = {}^B T_A \cdot {}^A T_A [0 \ -L \ Z_{AB} \ 1]^T. \quad (4)$$

식 (2)-(4)를 바탕으로 두 면 사이의 6 자유도 변위를 포함한 기구학 방정식 M 을 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$M = [{}^A O_x \ {}^A O_y \ {}^B O_x \ {}^B O_y \ {}^B Y_x \ {}^B Y_y]^T \quad (5)$$

6 자유도 변위 p 는 식 (6)과 같이 뉴턴-랩슨 방법을 이용하여 예측할 수 있다.

$$\hat{p}(k+1) = \hat{p}(k) + J_p^+(m(k) - \hat{m}(k)). \quad (6)$$

여기에서 $J_p = \partial M / \partial p$ 는 식 (5)의 자코비안 행렬이며, J_p^+ 는 자코비안 행렬의 의사 역행렬이다. 그리고 $\hat{m}(k)$ 는 방정식 M 을 통해 예측한 레이저 포인터의 위치 값이다. 기존의 논문에서는 뉴턴-랩슨 혹은 EKF와 같은 반복기법 알고리즘을 이용하여 6자유도 변위를 측정하였으며, 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 알고리즘 및 시스템의 성능을 증명하였다[7,8]. 하지만, 위 반복기법 알고리즘의 경우 여러 번의 반복을 통해 수렴되는 값을 찾기 때문에 계산 시간이 상대적으로 오래 걸린다는 단점이 있다.

III. 증분형 변위 측정 알고리즘

증분형 변위 측정(IDE: Incremental Displacement Estimation) 알고리즘을 이용한 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 로봇의 6자유도 변위 측정 과정은 그림 2와 같다. 양 면의 카메라를 통해 영상을 획득한 뒤 렌즈 왜곡 보정, 코너 검출, 호모그래피(Homography) 계산 등 다양한 영상 처리 알고리즘을 거쳐 레이저 빔의 위치를 계산한다. 그 후, 그림의 음영 처리된 부분에서 보는바와 같이 현재와 이전의 투영된 레이저의 위치 차, 기구부의 회전 각도를 바탕으로 IDE 알고리즘을 사용하여 두 면 사이의 6 자유도 변위를 예측한다[9,10]. IDE 알고리즘은 계산된 변위 값과, 이전과 현재의 레이저 포인터의 위치 차를 이용하여 6자유도 변위를 예측하는 비반복 기법으로 계산 속도가 향상된다는 장점이 있다.

IDE 알고리즘은 EKF와 마찬가지로 예측(prediction), 관측(observation), 그리고 업데이트(update)의 세 단계로 구성되어 있다[11]. 예측 식에서는 6자유도 변위 (p), 레이저 포인

그림 2. 주얼 서보잉 기반 양립형 구조광 로봇의 6자유도 변위 측정 과정. IDE: 증분형 변위 측정 [9,10].

Fig. 2. A block diagram of visual servoing-based displacement estimation process. IDE: Incremental Displacement Estimation [9,10].

터의 위치 (m), 오차 분산 행렬 (P)를 예측하며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{p}(t+1|t) &= \hat{p}(t+1|t) + J_p^T(t) \cdot \Delta m(t+1|t) \\ \hat{m}(t+1|t) &= M(\hat{p}(t+1|t)) \\ P(t+1|t) &= P(t|t) + Q\end{aligned}\quad (7)$$

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. 이때, $\tilde{m}(t)$ 는 이전시간의 2자유도 기구부의 회전각도로 계산된 현재 레이저 포인트의 위치이다. 다시 말해서 이전에 계산된 6자유도 변위 값과 이전과 현재의 데이터 차이를 고려하여 현재 6자유도 변위 값을 예측하며, 예측된 6자유도 변위 값과 식 (5)를 이용하여 레이저 포인트의 위치를 예측한다.

관측 식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 이노베이션 (innovation), $\nu(t+1)$ 을 식 (7)을 통해 예측된 레이저 포인트의 위치와 영상처리를 통해 획득한 현재 레이저 포인트의 위치 차로 설정한다.

$$\begin{aligned}\nu(t+1) &= m(t+1) - \hat{m}(t+1|t) \\ S(t+1) &= J_p(t+1)P(t+1|t)J_p^T(t+1|t) + R\end{aligned}\quad (8)$$

이전에 관측된 데이터에 이노베이션 부분을 고려하여 칼만 이득을 계산하고 이를 바탕으로 6자유도 변위를 업데이트 하는 부분이 식 (9)이다.

$$\begin{aligned}K(t+1) &= P(t+1|t)J_p^T(t+1)S^{-1}(t+1) \\ \hat{p}(t+1|t+1) &= \hat{p}(t+1|t) + K(t+1)\nu(t+1) \\ P(t+1|t+1) &= P(t+1|t) - K(t+1)S(t+1)K^T(t+1)\end{aligned}\quad (9)$$

식 (7)~(9)를 수행하면서 두 면 사이의 6자유도 변위를 예측할 수 있다. 본 논문에서 제안한 IDE 알고리즘의 경우 기존의 뉴턴-랩슨 혹은 확장형 칼만 필터와 달리 비반복적 방식으로 계산하기 때문에, 계산시간이 상대적으로 적게 걸린다. 위 알고리즘의 경우 이전에서 계산된 6자유도 변위 값을 바탕으로 계산되기 때문에 이전 데이터가 없는 초기에는 6자유도 변위는 기존의 반복 기법을 사용하고, 그 이후 제안한 증분형 알고리즘을 사용할 수 있다.

IV. 실험

제안한 IDE 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 다양한 실내 실험을 수행하였다. 본 실험의 구성은 그림 3과 같다.

그림 3. 실험의 구성 [9,10].

Fig. 3. Experimental setup [9,10].

시스템의 한 면은 2층 모형 구조물 위에, 다른 한 면은 고정 점에 설치하였다. 두 면 사이의 거리는 2 m이며, 진동대를 이용하여 두 면 사이의 X 축, Y 축 방향 선형 변위를 인위적으로 발생시켰다. 또한, 제안한 알고리즘의 성능 검증을 위하여 레이저 거리 센서를 사용하였다.

반복횟수가 각각 1번, 50번인 EKF(EKF(1), EKF(50))와 IDE 알고리즘을 이용하여 변위를 예측하였으며, 레이저 거리 센서의 변위 값과 비교하여 각 알고리즘의 성능을 확인하였다. 성능 확인 시, RMSE (Root Mean Square Error)와 CORR (Cross-Correlation Coefficient)를 이용하였으며 그 결과는 표 1과 그림 4, 5 같다. 그림 4의 경우 X 축 선

표 1. EKF(1), EKF(50), IDE 알고리즘을 이용한 X , Y 축 선형 변위 예측 결과 [9,10].

Table 1. The estimation results of translational displacement along X and Y axis using EKF(1), EKF(50), IDE algorithm [9, 10].

Case	알고리즘	RMSE (mm)	RMSE (°)	CORR	계산 시간 (msec / 1 iter.)
X axis	IDE	0.10	0.18	0.9999	0.09
	EKF(50)	0.10	0.18	0.9999	4.23
	EKF(1)	0.13	0.18	0.9995	0.08
Y axis	IDE	0.15	0.18	0.9999	0.09
	EKF(50)	0.15	0.18	0.9999	4.23
	EKF(1)	0.24	0.21	0.9984	0.09

(a) Estimated displacement of the dynamic translational displacement along X -axis. Solid line: result from the laser displacement sensor. Dashed line: estimated displacement by using the EKF with EKF(50). Dashed dot line: estimated displacement by using the proposed IDE algorithm. Dotted line: estimated displacement by using EKF(1).

(b) The error of the EKF(50) (Dashed line), IDE (Solid line), EKF(1) (Dotted line) in comparison with the laser displacement sensor, respectively [9,10].

그림 4. 실험 결과.

Fig. 4. Experimental results.

형 변위 결과이며, 그림 5는 Y 축 선형 변위 결과이다. 그림 4(a), 5(a)의 확대된 그림에서 보는 바와 같이 IDE와 EKF(50)의 예측 결과는 레퍼런스 값과 거의 동일하며, 그림 4(b), 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 IDE와 EKF(50)의 오차

(a) Estimated displacement of the dynamic translational displacement along Y -axis. Solid line: result from the laser displacement sensor. Dashed line: estimated displacement by using the EKF with EKF(50). Dashed dot line: estimated displacement by using the proposed IDE algorithm. Dotted line: estimated displacement by using EKF(1).

(b) The error of the EKF(50) (Dashed line), IDE (Solid line), EKF(1) (Dotted line) in comparison with the laser displacement sensor, respectively [9,10].

그림 5. 실험 결과.

Fig. 5. Experimental results.

가 EKF(1)에 비해 매우 작다. 자세히는, 표 1에서 보는 바와 같이 IDE는 EKF(50)의 경우 동일하게 0.15 mm , 0.18° 이내의 오차 결과를 보인다. 하지만, 수행 시간은 98 % 감소하는 것을 볼 수 있다.

V. 결론

논문에서는 증분형 변위 측정 알고리즘 및 비주얼 서보잉 기반 변위 측정 시스템을 이용한 6 자유도 변위 측정 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 경우, 이전에 계산된 변위 값을 이전과 현재의 관측 값의 차이를 고려하여 6 자유도 변위를 예측하는 방법으로, 기존의 뉴턴-랩슨 혹은 확장형 칼만 필터와 같은 반복 기법과 비교할 때 상대적으로 짧은 시간 내 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 다양한 실내 실험을 통하여 제안한 알고리즘이 EKF(1) 비슷한 수행시간 내 EKF(50) 수준의 정확도로 변위를 예측하는 것을 확인 할 수 있었다. 향후에는 다수의 시스템을 개발 및 제작하여 현장 실험을 수행할 계획이다.

참고문헌

- [1] D. Balageas, C. P. Fritzen, and A. Guemes, *Structural Health Monitoring*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [2] K. T. Park, S. H. Kim, H. S. Park, and K. W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 371-378, Feb. 2005.
- [3] F. Casciati and C. Fuggini, "Monitoring a steel building using GPS sensors," *Smart Structures and Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 349-363, May 2011.
- [4] J. J. Lee and M. Shinozuka, "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques," *Experimental Mechanics*, vol. 46, no. 1, pp. 105-114, Feb. 2006.
- [5] 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 International*, vol. 43, no. 7, pp. 642-647, Oct. 2010.
- [6] H. Myung, S. M. Lee, and B. J. Lee, "Paired structured light for structural health monitoring robot system," *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 49-64, Jan. 2011.
- [7] H. Jeon, Y. Bang, and H. Myung, "A paired visual servoing system for 6-DOF displacement measurement of structures," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 4, p. 45019, Apr. 2011.
- [8] H. Jeon, Y. Bang, H. Kim, and H. Myung, "Visual servoing-based paired structured light system for estimation of 6-DOF structural displacement," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 989-904, Oct. 2011.
- [9] H. Jeon, J. U. Shin, and H. Myung, "Incremental

displacement estimation of structures using paired structured light," *Smart Structures and Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 273-286, Mar. 2012.

- [10] H. Jeon, J. U. Shin, and H. Myung, "Structural displacement monitoring system using an incremental displacement estimation algorithm," *Proc. of the 27th ICROS Annual Conference (in Korean)*, Seoul, Korea, Apr. 2012.
- [11] G. Welch and G. Bishop, *An introduction to the Kalman filter*, TR95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, 2006.

전 해 민

2008년 한동대학교 공간 환경 시스템 공학부 졸업. 2010년 KAIST 건설 및 환경공학과 석사. 2010년~현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 관심 분야는 구조물 건전도 진단, 컴퓨터 비전.

신 재 욱

2010년 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부 졸업. 2011년~현재 KAIST 로봇학계공학 전공 석사과정 재학중. 관심 분야는 로봇 설계 및 제어.

명 완 철

2012년 중앙대학교 건축공학과 졸업. 2012년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정 재학중. 관심 분야는 건설자동화, 컴퓨터 비전.

명 현

1992년 KAIST 전기 및 전자 공학과 학부 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~2002년 ETRI 선임연구원. 2002년~2003년 (주)이머시스 CTO, 연구소장 겸임. 2003년~2008년 삼성종합기술원 전문연구원. 2008년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 교수, 로봇학계공학 전공 겸임. 관심분야는 로봇 네비게이션, 위치인식, 구조물 건전도 진단, 수상 로봇, 군집 로봇.