

MDLT(Modified Direct Linear Transform) 알고리즘 기반 3D 다중 변위 실시간 영상 계측 시스템

Real-time non-contact camera monitoring system of
three-dimensional structural deformation based on the
modified direct linear transform algorithm



박요한*

Park, Yo-Han



신윤봉**

Shin, Yoon-Bong



이덕환***

Lee, Deok-Hwan



박관우****

Park, Gwan-Woo



김영민*****

Kim, Young-Min



김휘*****

Kim, Hwi

1. 서론

일반 건축물을 비롯한 교량, 터널 등의 토목구조물은 여러 외부 요인에 의해 변형을 겪거나 진동할 수 있다. 특히, 교량의 경우, 비를 동반한 초속 5m-20m/s 정도의 비바람에 의해 상당한 수준의 풍우진동(rain-wind induced vibration)이 발생할 수 있는데, 바람의 주기가 교량의 고유진동수와 일치하여 공진하여 진동 진폭이 수 미터에 달하여 결국 교

량이 붕괴된 예도 있었다[1]. 교량의 변형을 미리 감지하지 못하는 경우, 1994년 성수대교 붕괴사고와 같은 대형참사가 재발할 수도 있다. 교량의 진동 및 변형을 보다 정밀하게 감지하는 안전 진단 기술이 계속적으로 개발되어야 하고 교량 안전진단이 실시간으로 수행되어야 한다[2].

교량을 점검하는 데는 교량의 특정 부위의 변위, 속도, 가속도, 변형율, 힘 등의 계측 지표들이 일반적으로 사용되는데, 이들 중 변위가 교량의 상태를 가장 직관적으로 나타내는 기본 지표이다. 많은 경우, 교량의 다양한 부분의 부분들을 정하여, 그 부분들의 변위를 동시에 계측하는 다중 변위 모니터링을 실시하고 있다. 그러나 대부분의 교량은 도로횡단, 하천이나 바다 등의 환경 조건하에 설치되어 있어

* 고려대학교 전자및정보공학과 박사과정
** 대우건설 기술연구원 전임연구원
*** Lily S&C CEO
**** 고려대학교 전자및정보공학과 연구원
***** 대우건설 기술연구원 책임연구원
***** 고려대학교 전자및정보공학과 조교수

교량의 다중 변위를 동시 계측하는 데는 상당한 기술적 어려움이 뒤따른다. 일반적으로 구조물의 변위를 계측하기 위하여 접촉식 변위계인 Global Positioning System(GPS), Laser Doppler Vibrometer[3], 가속도계를 이용하는데, 접촉식 변위계는 기본적으로 한 지점의 한 방향으로의 예를 들어 수직방향으로의 변위만을 계측하게 된다. 또한 구조물의 하부 조건에 따라 변위계를 고정하기 위한 추가적인 시설물의 설치가 필요하여 다수의 접촉식 변위계를 사용하여 구조물의 다중 변위를 동시 계측하는 경우, 전반적으로 비경제적이고, 계측 값의 신뢰성이 떨어지는 문제점을 가지게 된다.

최근 이러한 접촉식 계측의 문제점을 해결하면서도 경제적이며 접근이 어려운 구조물의 변위를 측정할 수 있는 비접촉식 영상 계측 기술이 활발히 연구되고 있다 [4-6]. 본 고에서는 스테레오 카메라 영상 촬영을 통한 비접촉식 실시간 삼차원(3D) 다중 변위 계측 기술을 소개한다. 영상 계측 시스템에서는 실시간 교량의 구조물의 일부에 있는 다중 변위 계측 지점들을 하나의 화면에 담을 수 있어, 비접촉인 동시에 자연스럽게 구조물의 동시 3D 다중 변위를 계측할 수 있는 장점이 있다.

본 고에서는 비접촉식 3D 영상 계측의 기본 알고리즘인 modified direct linear transformation (MDLT) 알고리즘 [7]을 기술하고, 이를 기반으로 대우건설 기술연구원에서 개발하고 있는 실시간 3D 다중 변위 계측 시스템의 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소를 소개하고 기존의 접촉식 레이저 변위계와의 비교 실험 결과를 통해 영상 계측 시스템의 신뢰성과 현장 적용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

2. 3D 다중 변위 영상 계측 시스템

2.1 시스템 개요

본 시스템에서는 실시간으로 연속적으로 촬영이

가능하며 동기화된 두 대의 고속 카메라(~150FPS)를 사용하여 교량모형에 부착된 여러 개의 마커들을 포함한 시차 이미지들을 촬영하고 이를 MDLT 알고리즘을 사용하여 해석하여 3D 위치 또는 3D 변위를 실시간으로 계측하도록 하고 있다.

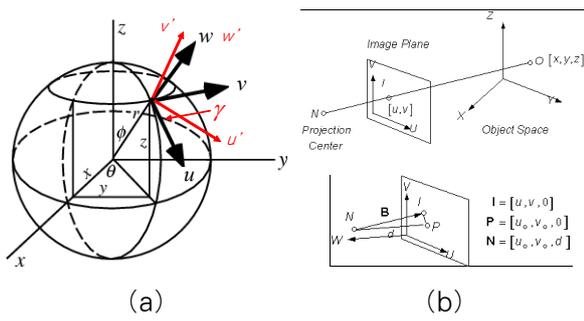
본래의 목적은 풍동실험동에서 일반적으로 사용되는 접촉식 레이저 변위계를 비접촉 방법으로 대체하기 위함인데 기존 레이저 변위계 대비 측정 정밀도 등을 비교 연구해가면서 시스템을 개선해 나가고 있다. 실시간성의 확보를 위해 계측 기본 알고리즘인 MDLT 이외에 2D 이미지 해석의 고속화를 위한 멀티스레드(multi-thread)기반 병렬처리방식으로 내부 프로시저를 구성하였고, 이미지 해석의 효율성을 극대화하기 위한 적응적 ROI(region of interest) 알고리즘을 구현하였다.

본 시스템 개발의 목표는 접촉식 레이저 변위계에 비견되는 계측 정밀도를 가지면서 변위 계측을 요하는 피사체의 부분들에 부착된 여러 개의 마커(marker)를 두 대의 카메라로 고속 촬영하여 마커들의 3D 변위를 실시간으로 계측하는 기술을 확립하는 것이다.

2.2 MDLT 계측 이론

MDLT 계측 이론은 두 대 이상의 카메라를 통해 공간상에 위치한 특정 지점 또는 마커의 3차원 좌표를 계측하는 방법론이다. 두 단계로 구성이 되는데, 첫번째 단계는 다수 카메라의 절대 위치를 정하는 카메라 캘리브레이션(camera calibration)이고, 두번째 단계는 캘리브레이션된 카메라로 촬영한 시차(parallax)가 있는 이차원(2D) 이미지들을 분석하여 3D 위치 정보를 추출하는 과정이다.

<그림 1(a)>에서는 물체가 놓이는 공간의 절대 좌표계인 물체 공간 좌표계와 카메라 공간 좌표계 간의 관계를 나타내었다. 여기서 (x, y, z) 는 물체 공간의 좌표, (y, v, w) 는 카메라 공간 좌표, (u', v', w') 는 tilted 카메라 공간 좌표이다. γ 는 카메라 공간의 회



〈그림 1.(a)〉 물체 공간 좌표계 (x, y, z) 와 카메라 (u', v', w') 공간좌표계 간의 관계, (b) 핀홀(pinhole) camera의 구조

전각, 즉 카메라의 회전각을 의미한다. 각 좌표계 벡터들의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (1a)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} \quad (1b)$$

식 (1a)와 식(1b)를 결합한다.

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} \quad (1c)$$

행렬 $[r_{ij}]$ 는 공간 좌표계와 이미지 좌표계 사이의 변환 행렬이다. 〈그림1(b)〉는 MDLT 계측에서 사용되는 핀홀 카메라의 기하학적 구조를 나타낸다. 편의적으로 tilted 카메라 공간 좌표계 (u', v', w') 를 (u, v, w) 로 표시하기로 한다. 물체 공간의 한 점 $O(x, y, z)$ 가 핀홀 카메라의 이미지 평면(필름)에는 $I(u, v, 0)$ 으로 결상된다. 핀홀 카메라를 통한 결상에서 프로젝션 중심(projection center) $N(u_0, v_0, d)$ 이다. d 는 카메라의 유효 초점거리를 의미한다. 프로젝션 중심 N의 이미지 평면 상으로의 수선의 발

$P(u_0, v_0, 0)$ 를 principle point라고 한다. 위에서 정의한 기준점들의 고려하면, 카메라에 의해 기록되는 2D 이미지 상의 한 점의 좌표 (u, v) 와 그 점에 대응되는 3D 절대 좌표 상의 점 (x, y, z) 의 관계는 식 (2)의 행렬 변환 관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u - u_o \\ v - v_o \\ -d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ z - z_o \end{pmatrix} \quad (2)$$

카메라 캘리브레이션은 카메라의 절대공간좌표 위치 정보를 알아내는 선형 계측 보정이다. 절대 좌표 공간상에 좌표를 이미 알고 있는 8개 이상 다수의 조절점 (control point) (x, y, z) 을 분포시키고 카메라로 촬영한 2D 이미지에서 각각의 조절점에 대응되는 위치 (u, v) 를 기록한 후 이를 가지고 방정식 (2)의 시스템 행렬 $[r_{ij}]$ 및 추가적인 카메라의 위치 정보를 해석해 낼 수 있다. 좀 더 구체적으로, 카메라 캘리브레이션을 통해 알아내는 정보는 변환 행렬 $[r_{ij}]$ 를 규정하는 3개의 각도 파라미터 θ, ϕ, γ 카메라의 principle point의 절대 좌표 위치 x_o, y_o, z_o 유효 초점거리 d_u, d_v 이미지 평면 상에서의 principle point의 위치 u_o, v_o 등 10개의 물리적 파라미터이다. MDLT 알고리즘에서는 이 10개의 파라미터를 직접 구하기 전에 10개의 파라미터와 등가적이면서 도 해석이 보다 용이한 11개의 표준 DLT 파라미터 L_1, \dots, L_{11} 를 설정하여 실험적으로 추출하는데, 11개의 표준 DLT파라미터로부터 10개의 물리적 파라미터를 구하기 위해, 11번째의 추가적 조건으로 변환 행렬 $[r_{ij}]$ 의 직교성 조건을 사용하게 된다. 결국 10개의 물리적 파라미터에 등가적인 11개의 DLT 파라미터와 하나의 직교성 조건식을 통해 카메라를 규정하는 10개의 물리적 파라미터를 도출하게 되는 것이다. 이와 같이 직교성 조건을 추가적으로 부여한 알고리즘을 modified-DLT(MDLT)라고 하고, 직교성 조건을 고려하지 않은 구식 알고리즘을 일반적인 DLT라고

한다.

추가적으로 MDLT알고리즘에서는 카메라 광학계의 수차(aberration) 오차 $\Delta u, \Delta v$, 를 고려하기 위하여 5개의 추가적인 파라미터 L_{12}, \dots, L_{16} 를 사용한다. 카메라 이미지 평면의 좌표(u, v)와 물체 공간의 좌표(x, y, z)의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$u - \Delta u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (3a)$$

$$v - \Delta v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (3b)$$

여기서, 11개의 표준 MDLT 파라미터들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D}, & L_2 &= \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \\ L_3 &= \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \\ L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \\ L_5 &= \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D}, & L_6 &= \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \\ L_7 &= \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\ L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \\ L_9 &= \frac{r_{31}}{D}, & L_{10} &= \frac{r_{32}}{D}, & L_{11} &= \frac{r_{33}}{D} \end{aligned}$$

여기서 $[d_u, d_v] = [d/\lambda_u, d/\lambda_v]$

$D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33})$ 이다.

수차 오차 $\Delta u, \Delta v$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta u = \zeta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}(r^2 + 2\zeta^2) + L_{16}\zeta\eta$$

$$\Delta v = \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\eta\zeta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2)$$

여기서, $(\zeta, \eta) = (u - u_0, v - v_0)$, $r^2 = \zeta^2 + \eta^2$ 이다.

$L_{12} \sim L_{14}$ 를 3차, 5차, 및 7차 광학왜곡항, L_{15}, L_{16} 을 de-centering 왜곡항이라고 한다.

이와 같이, 카메라의 이미징 광학계가 갖는 수차의 효과까지 고려하게 되면, 조절점의 절대 좌표와 촬영된 이미상에서의 대응 좌표와의 관계는 비선형 대수 방정식으로 기술된다. 일반적으로 principle point는 카메라 필름의 중심에 위치하기 때문에 $P(u_0, v_0, 0) = (0, 0, 0)$ 으로 놓을 수 있다. 이를 식(3)과 결합하여 재정리하면, 식(4)과 같은 형태의 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} &(L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7)(L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2) \\ &= (L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11})(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}) \end{aligned} \quad (4b)$$

8개 이상의 다수 조절점들에 대하여 식(4a)와식(4b)의 대수 방정식을 구성하고 최소자승법(least square method)를 사용하여 16개의 MDLT 파라미터를 추출해 내어 광학보정항을 포함하는 비선형 카메라 캘리브레이션을 완료한다.

한편, 다수의 캘리브레이션된 카메라의 구조물 촬영 영상으로부터 특정 위치(marker position)를 영상 좌표(u, v) 데이터를 얻게 되면, 이로부터 그 특정 위치의 3D 절대 좌표(x, y, z)를 분석할 수 있다. 식(3a)와 식(3b)를 (x, y, z)에 관하여 다시 정리하면, 아래와 같다.

$$\frac{1}{R} \begin{bmatrix} vL_9 - L_1 & vL_{10} - L_2 & vL_{11} - L_3 \\ \omega L_9 - L_5 & \omega L_{10} - L_6 & \omega L_{11} - L_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} L_4 - v \\ L_8 - \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $(v, w) = (u - \Delta u, v - \Delta v)$ 이다.

카메라의 개수가 m ($m \geq 2$)인 경우에 대해서, 식

(5)는 아래의 식(6)과 같이 확장된다.

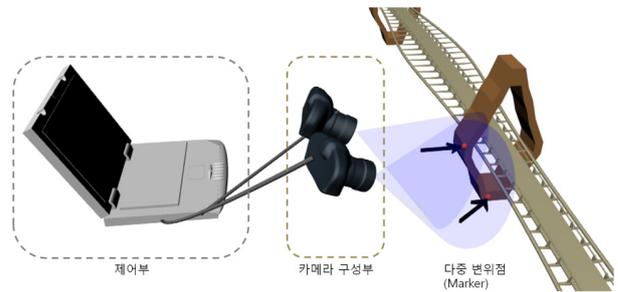
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^{(1)}L_9^{(1)} - L_1^{(1)} & v^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_2^{(1)} & v^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_3^{(1)} \\ w^{(1)}L_9^{(1)} - L_5^{(1)} & w^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_6^{(1)} & w^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_7^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v^{(m)}L_9^{(m)} - L_1^{(m)} & v^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_2^{(m)} & v^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_3^{(m)} \\ w^{(m)}L_9^{(m)} - L_5^{(m)} & w^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_6^{(m)} & w^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_7^{(m)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - v^{(1)} \\ L_8^{(1)} - w^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - v^{(m)} \\ L_8^{(m)} - w^{(m)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

최소좌승법 관점에서 오차를 최소로 하는 3D 좌표(x,y,z)를 구하게 된다.

2.3 시스템 하드웨어 구성

시스템 하드웨어 구성은 <그림2>에서와 같이 다수의 카메라 구성부와 MDLT 알고리즘을 이용하여 3차원 변위를 실시간으로 계측하는 제어부로 구성된다. 3D 계측을 위해서는 2대 이상의 카메라가 필요한데, 본 연구에서는 최소 조건인 카메라 2대로 시스템을 구성하였다. 영상을 촬영하는 카메라의 수를 많이 배치하는 시스템일수록 계측되는 3차원 변위의 위치정보의 범위와 정확성도 높아진다. 카메라 구성부에서 획득한 영상이 제어부로 넘겨지면 제어부는 다수의 마커의 영상좌표를 추적함과 동시에 MDLT 알고리즘을 이용하여 마커의 3D 변위 좌표를 해석한다. 피사체에 대한 3차원 다중 변위를 계측하기 위해서, 마커들을 개별적인 관심 영역(Region Of Interest; ROI)으로 할당하여, 마커들을 구별하도록 하였고(labeling), 실시간성의 확보를 위해 병렬 스레드기반으로 소프트웨어를 구성하여 초당 100프레임의 스테레오 영상을 다수의 독립적인 이미지 해석 루틴이 협업하여 병렬처리를 하도록 제어부의 소프트웨어를 구현하였다. <그림 2>에서 보듯이 피사체의 외부에 영상계측 시스템이 설치되어 있어, 구조물에 부착된 다수의 마커를 동시에 촬영하도록 되어 있다. 카메라는 지면에 부착되어 있기 때문에 한번 최적화된 카메라 캘리브레이션을 수정할 필요 없이 안정적으로 물체의 국소 다중 변위를 계측할 수 있다. 그리고 카메라는 줌과 회전이 가능하기 때문에 하부조건이나 크기의 제한 없이 구조물의 넓은 구간

을 촬영할 수 있다. <그림 2>에서는 시스템 구성 요소의 사양을 표시하였다.

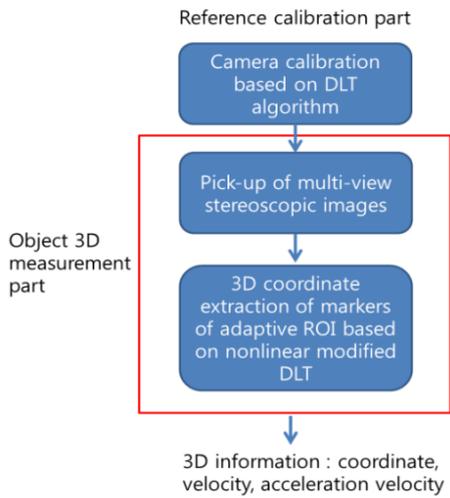


OS, 프로그래밍	Windows 7 64bit, Visual C++, MFC, MIL, OpenCV, Qt
Workstation	M/B: ASUS Z8PE-D12X CPU: 2×Intel Qaud-core Xeon E5620 RAM: 12×16GB DDR3 ECC :192GB
Camera	PointGray Gazelle, GZL-CL-41C6MC 2048×2048 at 150FPS
Digital interface	Camera Link LVDS Metrox Solios eV-CLF
Lens	AF-S Nikkon 20-300mm

<그림 2> 다중 변위 영상 계측 하드웨어 구성

2.4 시스템 소프트웨어 구성

시스템 소프트웨어 구성은 <그림 3>에서 나타난 것과 같이 먼저 다수의 카메라의 절대공간좌표의 위치 정보를 구하는 카메라 캘리브레이션을 수행한 후 초당 100 프레임의 속도로 마커 정보가 담긴 영상을 획득하여 적응적 관심영역(Adaptive ROI)내에 마커의 3차원 좌표를 실시간으로 계측한다. 개발된 시스템은 180GB정도의 메모리를 카메라 연속촬영에 할당하는 경우 두 대의 카메라로 4M(2048×2048) 영상을 촬영하는 경우, 약 3분 정도의 연속 촬영이 가능하다(1초: 4M×2×100/s=800M/s, 180GB=800M×225s). 최종적으로 얻은 마커의 3차원 정보를 가지고 교량의 3차원 변위 정보를 얻을 수가 있다.

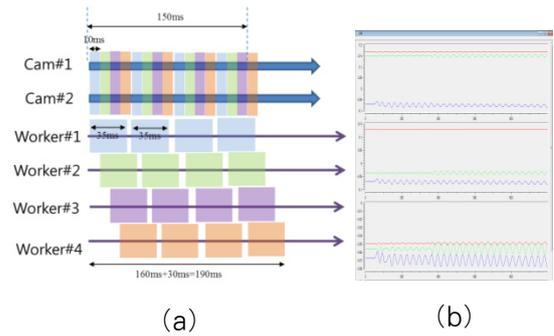


〈그림 3〉 다중 변위 영상 계측 시스템 영상처리 프로시저

실시간 3D 변위 계측 프로세싱을 소프트웨어적으로 두 가지 아이디어가 적용되었다. 첫 번째는 〈그림 4 (a)〉에서 나타낸 실시간 모니터링을 위한 병렬 처리 연산 기능이다. 두 대의 카메라로부터 초당 100frames의 4M크기의 이미지를 촬영하여 순차적으로 이미지 버퍼에 이미지가 기록되면 10개의 이미지 처리 스레드(worker)가 병렬적으로 할당된 이미지 버퍼 슬롯에 저장된 이미지를 해석한다.

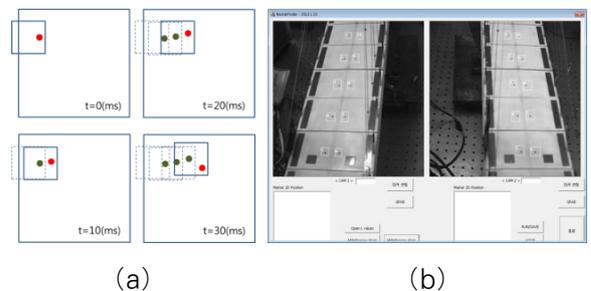
〈그림 4(a)〉에서는, 스테레오 카메라로부터 얻은 영상이 이미지 버퍼에 10ms마다 순차적으로 저장되는 과정을 나타내었다. 영상을 저장하고 이미지 처리과정을 통해 다중 마커의 2D좌표를 찾는 시간이 10ms 보다 초과되면 분석할 영상이 누적되면서 실시간 계측이 어려워진다. 하지만 4개 독립적인 이미지 분석 스레드(Worker#1~#4)가 각각 병렬로 영상을 분석하는데 40ms미만의 시간이 소요된다고 하면 영상이 이미지 버퍼에 누적되는 일 없이 실시간으로 영상 처리가 가능해진다. 본 연구에서 개발한 시스템은 실시간 처리를 위해 10개의 스레드를 사용하고 있다. 〈그림 4〉의 (b)는 본 시스템의 다중 마커의 3D 좌표의 실시간 데이터 가시화 그래프를 보여준다.

두 번째는 실시간 성능을 높이고, 마커의 분석 시간을 줄이기 위하여 적응적 관심영역(adaptive region



〈그림 4〉 실시간 처리 알고리즘; (a) 멀티스레드 처리 (b) 실시간 데이터 가시화

-of-interest(ROI) 추적 알고리즘이다. 〈그림 5〉의 (a)에서 나타낸 것과 같이 유한한 속도로 움직이는 마커는 영상 샘플링 시간인 10ms안에 움직이는 범위가 일정 범위 안에 한정되기 때문에 사용자가 초기의 관심영역을 설정해주면, 매 프레임마다 마커의 히스토리의 평균 위치를 현재 프레임에서의 관심 영역의 중심위치로 삼으면 관심영역이 마커를 항상 포함하도록 적응적으로 이동시켜줄 수 있다. 마커에 관심영역을 할당하는 이유는 두 가지 인데, 첫 째는 다수의 마커를 관심영역별로 구역 분할하여 구분하기 위해서이고, 두 번째는 마커의 위치를 검색하는 이미지 해석 시간을 최소화하기 위함이다. 이미지 전체를 분석하지 않고 관심영역만 분석해도 원하는 그 안에 있는 마커의 위치를 효율적으로 분석할 수 있는 것이다. 〈그림 5(b)〉는 10개의 마커에 적응적 관심영역을 할당하고, 실시간으로 추적하는 상황을 보여주는 시스템 인터페이스이다



〈그림 5〉 적응적 관심영역 알고리즘; (a) 마커추적과 적응적 관심영역 탐색(b) 영상 계측 프로그램 UI 화면

3. 3D 다중 변위 계측 실험

3.1 실험 셋업

대우건설기술연구소에서MDLT 영상 계측 시스템의 정확성을 평가하기 위한 계측 실험을 진행하였다. 실험에서는 그림 6에서 보는 바와 같이4대의 카메라를 2개씩 묶어 2개의 스테레오 카메라 세트를 (카메라#1,2 와 카메라#3,4) 구성하였다.



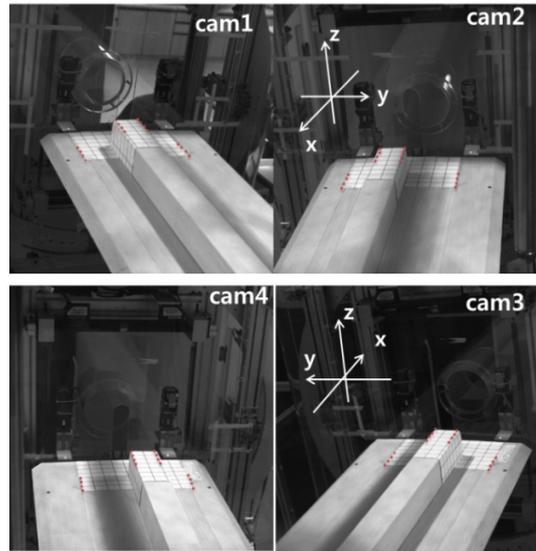
〈그림 6〉 다중 변위 영상계측 시스템 자유 진동 실험 셋업

스테레오 카메라 세트 #1,2와 카메라 세트 #3,4는 동시에 구조물을 계측할 수 있도록 동기화가 이뤄져 있다. 시스템의 계측 정밀도를 비교평가하기 위해 구조물의 진동 평가에 주로 사용되는 레이저 변위계 (LK-501, Keyence)를 장착하여 변위 측정 데이터를 비교하였다.

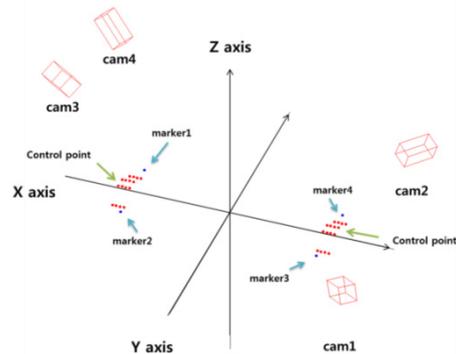
3.2 카메라 캘리브레이션

섹션 2.2에서 설명한 바와 같이 카메라 캘리브레이션을 위해서는 최소 8개의 제어점이 필요하다. 스테레오 카메라 #1,2 및 카메라 #3,4의 캘리브레이션용 레퍼런스 물체 이미지를 〈그림 7〉에 보였다. 본 실험에서는 각각의 세트에 대해서여 16개의 캘리브레이션 제어점을 사용하였다.

MDLT 캘리브레이션의 결과를 〈그림 8〉에 나타내었다. 〈그림 8〉 reference 모델과 카메라의 위치를 〈그림 8〉에서와 같이 나타내어 표현하였다. 절대좌표계, 4대의 카메라의 절대위치와 회전위치, 16개의 조절점 및 움직임을 계측할 마커의 시작점 위치를 표시하였다.



〈그림 7〉 카메라 캘리브레이션에 사용된 스테레오 이미지



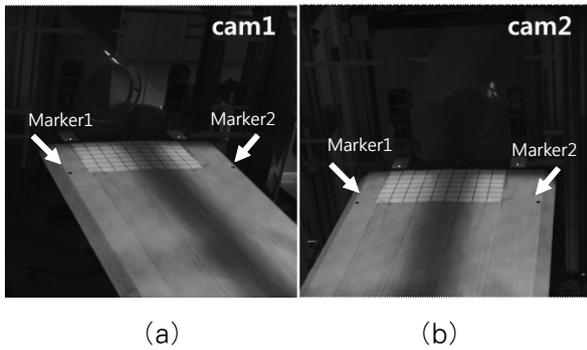
〈그림 8〉 카메라 캘리브레이션 결과: 레퍼런스 좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치

3.3 3차원 다중 변위 계측

본 시스템의 카메라 해상도는 2048×2048이므로, 이미지의 영역에 대응되는 초점 평면에서의 실공간의 크기가 1m×1m인 경우, 카메라의 한 픽셀이 표현하는 실공간 영역의 크기는488 μ m가 된다. 즉 초점 평면에서의 공간 분해능 488 μ m인 셈이 된다. 카메라의 초점 거리를 길게 바꾸어, 카메라가 바라보는 실공간의 크기를 반으로 줄이면, 계측의 공간 분해능은 두배로 높아진다.

본 실험에서는 〈그림 9〉에서 보는 바와 같이 구조

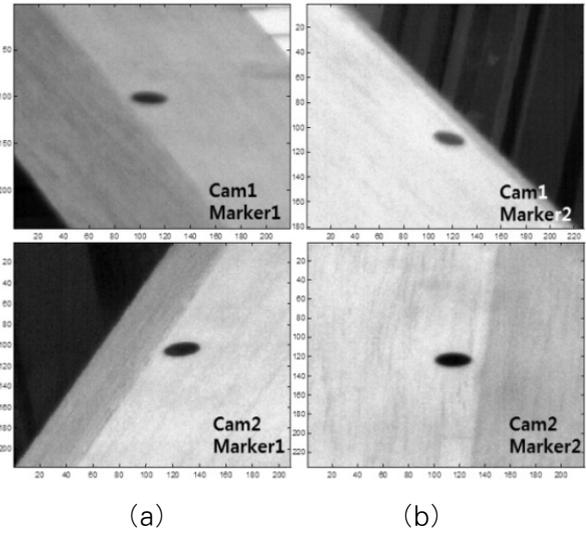
물의 상단부에 부착된 마커들의 3D 진동 변위를 계측하였다. <그림 9(a)>와 <그림9(b)>는 마커가 부착된 구조물의 좌/우 영상을 보여준다. 이미지 프로세싱시에 패턴 인식이 잘되는 명확한 마커의 설정과 고속 촬영에 적합한 조명 환경이 실시간 변위 성공적인 계측을 위해 중요하다. <그림 10>과 같이 계측 시스템에서 설정된 마커의 관심영역 내부에서 기초적인 영상 처리 기법인 SAD(sum of absolute differences)를 사용하여 마커의 2D 위치를 분석한다. 마커의 레퍼런스 이미지를 관심영역안에서 스캐닝하면서 스캐닝 위치별 SAD 값을 계산하는데, SAD가 최소인 지점을 마커가 놓여 있는 중심 위치라고 하였다. 이러한 방식으로 좌/우 카메라에서 얻은 영상에서 마커의 위치를 추출한다.



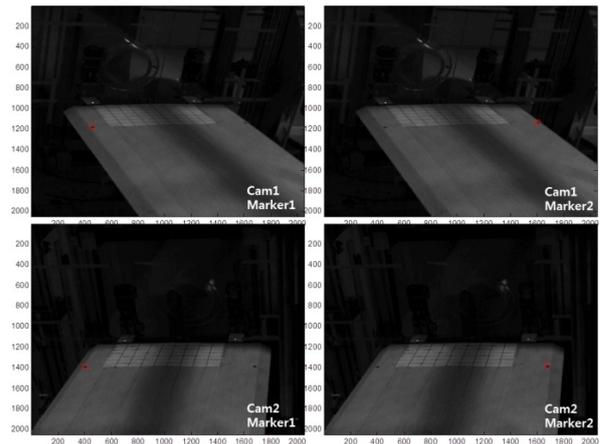
<그림 9> 스테레오 카메라의 (a) 좌 (b) 우 이미지

<그림 11>에는 원본 이미지에 마커의 위치를 표시하기 전과 마커의 2D 위치 분석 후에 붉은색사각형으로 마커의 위치를 표시한 후의 이미지를 비교하고 있다. SAD와 같은 간단한 분석방법을 통해서도 마커가 선명하게 영상에 담겨 있으면 구조물 위에 마커 위치를 정확히 찾을 수 있다.

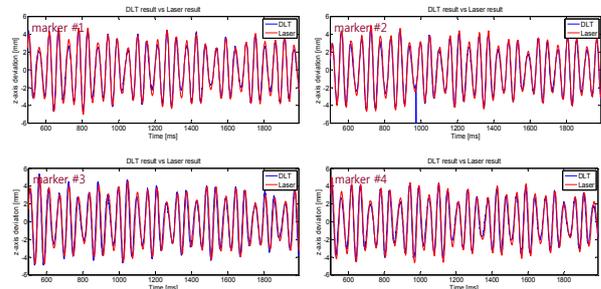
구조물의 자유진동을 유발한 후 스테레오 카메라 #1,2로부터 marker1, marker2 그리고 카메라#3,4로부터 marker3, marker4에 3차원 변위 데이터를 분석하였다. 레이저 변위계로부터 얻은 marker1~4의 z축 변위 데이터와 MDLT 계측에서 얻은 z축 변위 데이터를 <그림 12>에서 비교하였다.



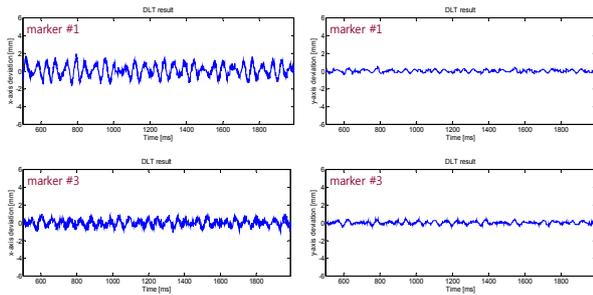
<그림 10> (a) 좌 (b) 우 마커의 관심 영역 이미지 추출



<그림 11> 구조물 위에 마커와 영상처리기법을 통해 얻어진 좌표와의 비교



<그림 12> 영상 계측 시스템과 레이저로부터 얻은 구조물의 z축 변위 데이터 그래프



〈그림 13〉 영상 계측 시스템으로 구한 구조물의 marker#1과 marker#3의 x, y축 변위 데이터

〈그림 13〉에는 레이저 변위계로 측정할 수 없는 x, y 축 수평 방향 변위의 시변 계측 데이터를 보였다. z-축 방향 레이저 변위계와의 비교에서 볼 수 있는 계측 신뢰성을 고려해 볼 때, 영상계측 시스템의 수평방향의 계측 정확성도 신뢰할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 고에서는 건축 구조물의 3D 실시간 다중 변위 영상 계측 시스템의 개념과 대우건설 기술연구원에서 개발하고 있는 시스템 프로토타입의 하드웨어 구성, 소프트웨어 구성, 및 MDLT 알고리즘 이론을 소개하였다. 구축한 시스템을 통해 대우건설 기술연구원에서 수행한 구조물의 자유진동에 대한 레이저 변위계 계측결과와 영상 계측결과를 비교하여 영상계측방법의 정확성을 보였다.

다중 변위의 실시간 3D 분석 방법론은 기술적 안정화를 위해, 그리고 환경적 변수가 다양한 야외에서 건축/토목 구조물에 직접 적용되기 위해서는 보다 많은 현장 적용에 대한 연구 개발이 필요하지만, 본 고에서 보인 바와 같이 기본적인 하드웨어 및 소프트웨어 구현 및 모형 계측 실험을 통해 그 영상 계측 시스템의 성공 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. K. Y. Billah and R. H. Scanlan, Resonance, Tacoma narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks, Am. J. Phys., Vol 59, pp. 118-124, 1991.
2. 한국도로공사, 모니터링 기반의 케이블교량 유지관리 시스템 개발 연구, 2011.
3. H. H. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration, NDT & E International, Vol. 38, pp. 213-218, 2005.
4. J.-J. Lee and M. Shinozuka, Real-time displacement of a flexural bridge using digital image processing technique, Exp. Mechanics, Vol. 26, pp. 105-114, 2006.
5. Y. F. Ji and C. C. Chang, Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement, J. Bridge Eng., Vol. 13, pp. 34-42, 2008.
6. 김성완, 김남식, 영상처리기법을 이용한 다중 변위 응답 측정 알고리즘의 검증, 대한토목학회논문집, 제30권, pp. 297-307, 2010.
7. H. Hatze, High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach, J. Biomechanics, Vol. 21, pp. 533-538, 1988.