

사진측량 기반 동영상 동특성 추출

Photogrammetry-based Modal Parameter Extraction from Motion Pictures

김 병 화† · 여 금 수* · 김 수 진*

Byeong Hwa Kim, Keum Soo Yeo and Soo Jin Kim

(2010년 1월 12일 접수 ; 2010년 2월 22일 심사완료)

Key Words : Motion Picture(동영상), Photogrammetry(사진측량기법), Multiple Template Matching Technique(다중 템플릿 매칭 기법), Modal Parameter(동특성)

ABSTRACT

This study introduces a new technique to estimate modal parameters of a vibrating string using motion pictures. The approach requires two motion pictures for a vibrating string captured simultaneously by typical portable digital cameras or camcorders. Applying the space intersection theory and the space resection theory in photogrammetry, the stereoscopic images for the string are constructed from two flat plane pictures. Then the three dimensional displacement components of the string are extracted by a multiple template matching technique. Finally the modal parameters of the string are estimated from the resulting displacement time histories. The accuracy of the approach has been examined through a small-scale mock-up of a string.

1. 서 론

재료 및 구조해석기술의 급속한 발전에 따라서 고강도 케이블을 이용한 사장교나 현수교 형식의 케이블교량이 건설되고 있다. 케이블교량에 설치된 케이블시스템의 구조적 안정성은 교량 전체의 안정성과 직결되는 문제이기 때문에 케이블 시스템은 주요구조부재로써 다루어지고 있다. 또한, 케이블시스템의 유지관리 측면에서 케이블의 동특성은 상시 모니터링되고 있으며, 추출된 케이블의 동특성을 이용하여 케이블의 장력 등이 상시 모니터링 되고 있다⁽¹⁾.

케이블의 장력이 일정할 경우, 케이블의 길이가 길어질수록 케이블의 고유진동수는 저주파대에 놓이게 된다. 저주파 대역의 주파수를 갖는 케이블

은 일반적으로 저주파 가속도계를 이용하여 케이블의 동적응답을 계측한다. 그러나 저주파 가속도계를 사용하는 방법은 케이블의 길이가 길어질수록 가속도계를 케이블 표면에 부착하기 위한 별도의 작업대 및 작업차량을 이용해야 하는 단점이 있다. 그 밖에 방법으로는 레이저를 이용하는 방법⁽²⁾과 영상 이미지를 이용하는 방법⁽³⁾ 등이 있다. 레이저를 이용하는 방법은 정확도가 상대적으로 높지만 비용이 고가인 단점이 있다. 반면, 영상 이미지를 이용하는 방법은 비용이 저렴하고 접근이 어려운 곳에서도 구조물의 처짐 및 동특성 추출이 가능하다는 장점이 있다⁽⁴⁾.

그러나 영상 이미지를 이용할 경우 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 카메라의 흔들림 문제이다. 교량의 상판에서 동적응답을 기록할 경우, 카메라를 고정시키더라도 교량은 교통하중이나 풍하중에 의해서 흔들림이 발생하기 때문이다. 둘째, 영상 이미지에서 표적인식문제이다. 움직이는 물체를 영상 이미지로 기록하면, 물체의 움직임에 의해 잔상이 동

† 교신저자; 정회원, 경남대학교 토목공학과
E-mail : bhkim@kyungnam.ac.kr
Tel : (055)249-2667, Fax : (0505)999-2165

* 경남대학교 대학원 첨단공학과

반되기 때문이다. 셋째, 입력신호 계측 없이 시스템의 응답만을 이용해 동특성을 추정해야 하는 문제이다. 시스템의 응답만을 이용할 경우, 장시간의 데이터 계측이 필요하다. 하지만 일반 카메라는 저장 용량에 한계가 있기 때문에 최소량의 데이터만 가지고 정확한 동특성을 추출하기 위해서는 영상데이터로부터 추출된 변위시간이력이 매우 정확해야만 한다. 상기 세가지 문제들은 김병화⁴⁾가 제안한 다중 템플릿 매칭 알고리즘을 이용하여 해결이 가능하다. 왜냐하면 다중 템플릿 매칭 알고리즘은 미리 알고 있는 다수의 표적 부영상들을 이용하기 때문에 카메라의 흔들림에도 불구하고 매우 정확한 변위시간이력을 추출할 수 있기 때문이다. 그러나 현재까지 다중 템플릿 매칭 알고리즘의 적용은 케이블의 1차원 수직변위에 대한 동특성 추출에만 국한되었다. 3차원 공간상의 케이블 동특성을 추출하기 위해서는 2대 이상의 카메라를 이용한 동영상 이미지의 촬영이 수반되어야 한다. 이는, 사진측량기법을 적용하여 2개 이상의 평면이미지로부터 1개의 입체이미지를 재구성하기 위해서이다.

이 논문은 두 대의 카메라를 이용하여 상시 가진 되고 있는 사장교 케이블의 3차원 형상 결정 및 동특성을 추출할 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 다음과 같이 구성되었다. 우선, 카메라 또는 캠코더를 이용하여 케이블의 특정 위치의 동적 응답을 동시에 촬영한다. 각각의 동영상으로부터 다중 템플릿 매칭 알고리즘을 이용하여 변위시간이력을 추출한다. 추출한 변위시간이력으로부터 다양한 사진측량기법을 적용하여 케이블의 3차원 위치를 결정한다. 마지막으로 추출된 3차원 위치로부터 각각의 방향별 케이블의 동특성을 추출한다.

2. 이 론

2.1 표적인식을 위한 다중 템플릿 매칭 기법

케이블에 부착된 표적이 가진 되고 있다고 가정하자. 일반 디지털 카메라를 이용하여 가진 되고 있는 표적에 대한 동영상 이미지를 획득한다. 이때, 원거리 대상물의 경우에 망원렌즈 등을 이용하여 단위픽셀의 해상도가 충분히 확보되었다고 가정하자. Fig. 1은 고속으로 진동하는 케이블에 부착된 표적의 동영상 이미지를 보인다. 표적의 영상 이미지는

Fig. 1과 같은 잔상효과를 동반한다. 잔상효과를 동반하는 영상 이미지는 잔상에 의해서 표적인식이 실패할 경우가 있다. 표적인식 실패에 대한 해결책으로 다중 템플릿 매칭 기법⁴⁾을 이용할 수 있다. 다중 템플릿 매칭 기법은 다수의 잔상 이미지를 템플릿으로 등록하고 각각의 템플릿과 가장 유사한 원영상의 영역을 추출하는 기법이다. 다중 템플릿 매칭 기법의 개념도는 Fig. 2와 같다. 각각의 템플릿과 가장 일치하는 원영상의 영역의 위치를 찾기 위해서 정규상호 상관관계(correlation)를 이용할 수 있다. 원영상의 위치 (u,v) 에서 i 번째 템플릿에 대한 정규상호상관 $\gamma_i(u,v)$ 은 식 (1)에 의해서 계산할 수 있다.

$$\gamma_i(u,v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [w_i(x-u,y-v) - \bar{w}_i]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 [w_i(x-u,y-v) - \bar{w}_i]^2}} \quad (1)$$

여기서, $w_i(x,y)$ 는 n 개의 부영상 중에서 i 번째 부영상을 나타내고, \bar{w}_i 는 i 번째 템플릿의 평균을 나타낸다. 그리고, $\bar{f}_{u,v}$ 는 원영상 $f(x,y)$ 의 평균을 나타낸다. 원영상 전체에 대하여 원영상 특정영역과

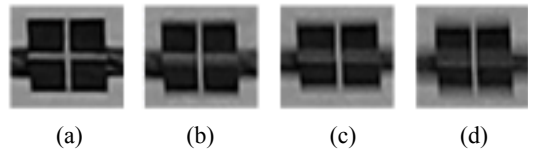


Fig. 1 Blurred images

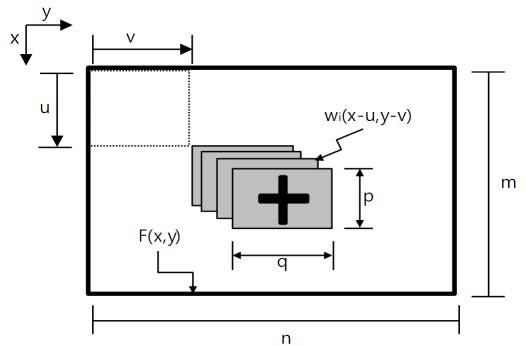


Fig. 2 Multiple template matching process

부영상의 정규상호상관을 계산하고, 정규상호상관이 최대인 위치를 식 (2)에 의해서 찾는다.

$$\gamma(u,v) = \max[\gamma_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

2.2 사진측량기법을 이용한 3차원 위치 결정
 두 대의 카메라 영상좌표를 이용하여 케이블 표적의 3차원 위치는 공간전방교회법(space intersection)으로 결정할 수 있다. 공간전방교회법으로 3차원 위치를 결정하기 위해서 공선조건(collinearity condition)과 공간후방교회법(space resection)을 이용할 수 있다⁽⁵⁾.

공선조건은 Fig. 3과 같이 공간상의 점 A, 공간상의 점 A와 대응하는 사진상의 점 a, 그리고 촬영중심점 L이 동일직선상에 있어야 한다는 조건이다.

사진의 기하학적 성질의 기본이 되는 공선조건식은 다음 식 (3)~(7)과 같다.

$$x_a = x_0 - f \frac{r}{q} \quad (3)$$

$$y_a = y_0 - f \frac{s}{q} \quad (4)$$

$$r = m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L) \quad (5)$$

$$s = m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L) \quad (6)$$

$$q = m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L) \quad (7)$$

여기서, x_a, y_a 는 사진상의 점 a의 좌표, f는 카메라의 초점거리, x_0, y_0 는 주점(principal point), 그리고 r, s, q는 각각 식 (5), (6), (7)과 같다. X_A, Y_A, Z_A 는 공간상의 점 A의 좌표, X_L, Y_L, Z_L 은 촬영중심점 L의 좌표를 나타낸다. 그리고 m은 X, Y, Z축으로 각각 회전하는 회전각 ω, ϕ, κ 의 회전행렬을 나타낸다. Fig. 4와 같이 회전각 ω 는 x축 방향의 회전각, ϕ 는 y축 방향의 회전각, κ 는 z축 방향의 회전각을 나타낸다. 회전행렬은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 공선조건은 총 9개의 미지수가 존재한다.

식 (3), (4)는 비선형방정식의 형태로써, 테일러의 법칙(Taylor's theorem)에 의해서 선형화된 방정식은 다음 식 (9), (10)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$\begin{aligned} & b_{11}d\omega + b_{12}d\phi + b_{13}d\kappa - b_{14}dX_L \\ & - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L + b_{14}dX_A + b_{15}dY_A \\ & + b_{16}dZ_A = J + v_{x_a} \end{aligned} \quad (9)$$

$$m = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\kappa & \sin\omega\sin\phi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa & -\cos\omega\sin\phi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa \\ -\cos\phi\sin\kappa & -\sin\omega\sin\phi\sin\kappa + \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\phi\sin\kappa + \sin\omega\cos\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

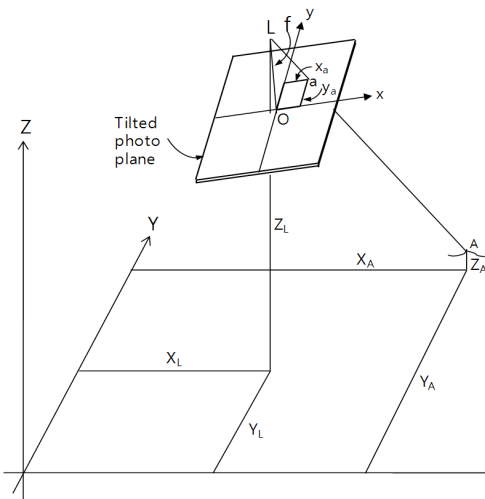


Fig. 3 Collinearity condition

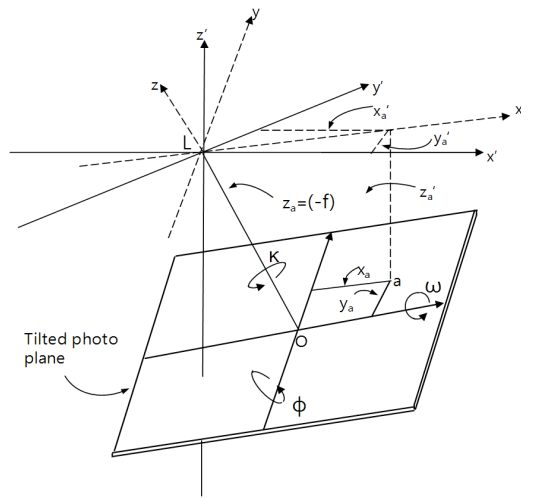


Fig. 4 Rotated image coordinate systems

$$\begin{aligned}
 & b_{21}d\omega + b_{22}d\phi + b_{23}d\kappa - b_{24}dX_L \\
 & - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L + b_{24}dX_A + b_{25}dY_A \\
 & + b_{26}dZ_A = K + v_{y_a}
 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$, dX_L , dY_L , dZ_L , dX_A , dY_A , dZ_A 는 각각의 초기 근사값의 보정량을 나타내고, v_{x_a} , v_{y_a} 는 x_a , y_a 영상좌표의 측정 시 잔차를 나타낸다. 그리고 b 는 식 (4), (5)의 함수에 대한 편미분 계수들의 행렬을 나타내며 식 (11)~(22)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 b_{11} = \frac{f}{q^2} [r(-m_{33}\Delta Y + m_{32}\Delta Z) \\ - q(-m_{13}\Delta Y + m_{12}\Delta Z)]
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 b_{12} = \frac{f}{q^2} [r(\cos\phi\Delta X \\ + \sin\omega\sin\phi\Delta Y - \cos\omega\sin\phi\Delta Z) \\ - q(-\sin\phi\cos\kappa\Delta X + \sin\omega\cos\phi\cos\kappa\Delta Y \\ - \cos\omega\cos\phi\cos\kappa\Delta Z)]
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$b_{13} = \frac{-f}{q} (m_{21}\Delta X + m_{22}\Delta Y + m_{23}\Delta Z) \quad (13)$$

$$b_{14} = \frac{f}{q^2} (rm_{31} - qm_{11}) \quad (14)$$

$$b_{15} = \frac{f}{q^2} (rm_{32} - qm_{12}) \quad (15)$$

$$b_{16} = \frac{f}{q^2} (rm_{33} - qm_{13}) \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 b_{21} = \frac{f}{q^2} [s(-m_{33}\Delta Y + m_{32}\Delta Z) \\ - q(-m_{23}\Delta Y + m_{22}\Delta Z)]
 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 b_{22} = \frac{f}{q^2} [s(\cos\phi\Delta X + \sin\omega\sin\phi\Delta Y \\ - \cos\omega\sin\phi\Delta Z) - q(-\sin\phi\sin\kappa\Delta X \\ + \sin\omega\cos\phi\sin\kappa\Delta Y \\ + \cos\omega\cos\phi\sin\kappa\Delta Z)]
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$b_{23} = \frac{-f}{q} (m_{11}\Delta X + m_{12}\Delta Y + m_{13}\Delta Z) \quad (19)$$

$$b_{24} = \frac{f}{q^2} (sm_{31} - qm_{21}) \quad (20)$$

$$b_{25} = \frac{f}{q^2} (sm_{32} - qm_{22}) \quad (21)$$

$$b_{26} = \frac{f}{q^2} (sm_{33} - qm_{23}) \quad (22)$$

여기서, ΔX , ΔY , ΔZ 는 공간상의 좌표값과 촬영 중심점의 좌표값의 차를 나타낸다. 또한, J , K 는 영상 좌표 값과 9개의 미지수에 대한 초기 근사값의 차를 나타낸다.

공간후방교회법은 Fig. 3과 같은 공간좌표체계에서 사진의 위치와 자세를 결정하는 방법이다⁽⁶⁾. 즉, 공선조건에서 존재한 9개의 미지수 중 6개의 미지수(X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ , κ)를 결정할 수 있다. 공간후방교회법은 공간상의 점 A 의 좌표와 사진상의 점 a 의 좌표로부터 촬영중심점 L 의 좌표와 X , Y , Z 축으로 각각 회전하는 회전각 ω , ϕ , κ 를 구할 수 있다. 공선조건 방정식을 이용한 공간후방교회법의 선형화된 방정식은 식 (23), (24)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 b_{11}d\omega + b_{12}d\phi + b_{13}d\kappa - b_{14}dX_L \\ - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L = J + V_{x_a}
 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
 b_{21}d\omega + b_{22}d\phi + b_{23}d\kappa - b_{24}dX_L \\ - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L = K + v_{y_a}
 \end{aligned} \quad (24)$$

공간후방교회법으로부터 6개의 미지수를 구하는 과정은 다음과 같이 다섯 단계를 통하여 획득한다.

첫째, 사진상의 좌표, 촬영중심점의 좌표 및 회전각에 대한 초기값을 설정한다. 둘째, 각각의 좌표축으로 회전된 회전각에 대한 회전행렬을 계산한다. 여기서, 회전행렬은 식 (8)에 의해 계산할 수 있다. 셋째, 식 (23), (24)를 계산하여 6개의 미지수를 구한다. 이때, J , K 는 식 (3)에 의하여 구하고, b 는 식 (11)~(22)에 의해서 구할 수 있다. 넷째, 상기 과정으로부터 초기값에 대한 보정된 값을 구한다. 마지막으로, 네 번째 과정에서 구한 값을 초기값으로 설정하여 위의 과정을 반복하여 6개의 미지수(X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ , κ)를 계산한다.

공간전방교회법은 Fig. 5와 같이 둘 이상의 사진으로부터 사진상의 점을 공선조건에 맞춰 교차시킴으로써 대상물의 공간상 점 A 의 위치를 결정할 수 있는 방법⁽⁶⁾을 뜻한다. 공간전방교회법은 식 (23),

(24)에 의해 결정된 6개의 미지수($X_L, Y_L, Z_L, \omega, \phi, \kappa$)와 사진상의 좌표(x_a, y_a) 및 초점거리 f 를 이용하여 대상물의 3차원 위치를 결정할 수 있다. 식 (9), (10)에서 식 (23), (24)에 의해 6개의 미지수($X_L, Y_L, Z_L, \omega, \phi, \kappa$)를 결정한다. 남은 미지수 3개(X_A, Y_A, Z_A)는 다음의 공간전방교회법의 선형화된 방정식 (25)와 (26)을 이용하여 산정 할 수 있다.

$$b_{14}dX_A + b_{15}dY_A + b_{16}dZ_A = J + V_{x_a} \quad (25)$$

$$b_{24}dX_A + b_{25}dY_A + b_{26}dZ_A = K + v_{y_a} \quad (26)$$

공간전방교회법으로 3개의 미지수(X_A, Y_A, Z_A)를 구하는 과정은 공간후방교회법과 동일하나, 초기값을 촬영중심점의 좌표와 회전각에 대한 초기값 대신, 좌·우 사진이 교차하는 공간상의 점 A에 대한 좌표를 초기값으로 설정하여 계산한다.

상기 이론에서 설명된 공간후방교회법과 공간전방교회법에 의해 케이블에 부착된 표적의 3차원 위치를 결정하는 순서도는 Fig. 6과 같다.

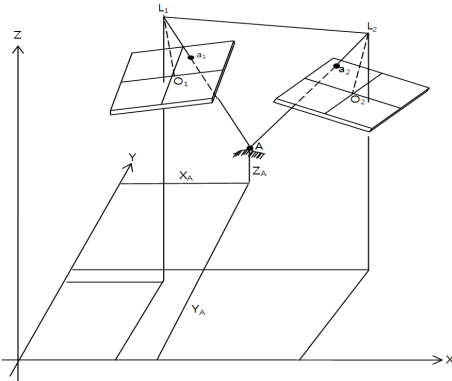


Fig. 5 Space intersection

3. 실험

3.1 실험개요

제안기법의 검증을 위해서 Fig. 7과 같이 사장교 케이블의 축소모형이 제작되었다. 설치된 케이블의 길이, 장력, 단위중량 등은 Table 1과 같다. 제작된 축소모형의 케이블에 Fig. 7과 같이 0.2 m 간격으로 세 개의 십자형 표적들을 부착되었다.

실험은 다음과 같이 수행되었다. 우선, 동영상 촬영은 디지털 카메라(Canon A630)와 캠코더(Samsung VM-HMX20C)를 각각 삼각대로 고정시킨 후 Fig. 7과

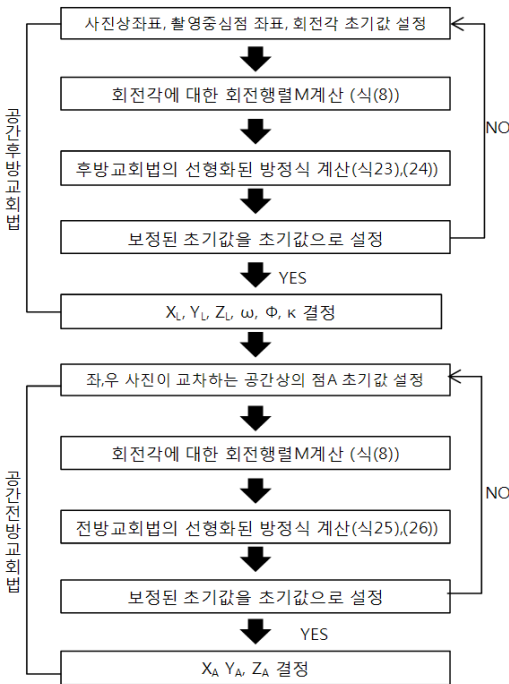


Fig. 6 Flowchart of photogrammetry

Parameter	Value
Cable length, L	6.65 m
Horizontal length, d	6.41 m
Vertical length, h	1.78 m
Cable type	MANHO rope (6×24+7FC, G type)
Cable tension, T	289.98 N
Cable mass, M	0.212 kg/m

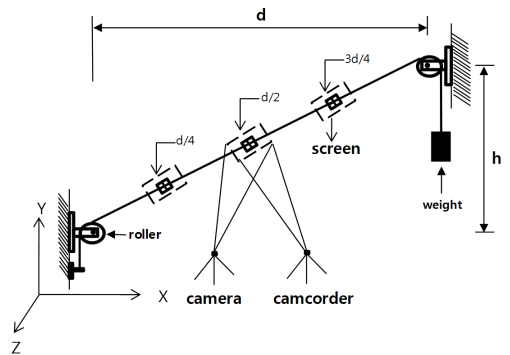


Fig. 7 Test setup

같이 동일한 표적에 대하여 각각 기록하였다. 이때, 표적으로부터 약 2 m 떨어진 위치에서 임팩트 해머를 이용하여 케이블이 가진 되었다. 동영상상을 기록한 표적은 d/4지점(표적1), d/2지점(표적2), 3d/4지점(표적3)이다. Fig. 8은 표적1에 대하여 카메라와 캠코더로 촬영된 각각의 정지영상을 나타낸다. Fig. 8에서 A,B,C,D,E,F는 공간후방교회법 적용시 측정수 추가를 위한 가상의 표적을 나타낸다. 이는 측정수의 수를 추가함으로써 각 측정점의 초기값으로부터 오차의 범위를 최소화하여 정확한 위치를 찾을 수 있을 뿐만 아니라 초점거리의 정확도를 높일 수 있다. 동영상상은 초당 30프레임씩 640×480의 해상도로 5분간 기록하였다.

다음은 동영상이미지로부터 표적 중심점의 변위 시간이력을 추출한다. 표적 중심점의 변위 시간이력 추출을 위하여 우선 기록된 동영상으로부터 이미지 변환 프로그램을 이용하여 정지 영상이미지들을 추출한다. 이때, 카메라와 캠코더의 동일한 동적 응답을 추출하기 위하여 동영상을 동기화할 필요가 있다. 동기화 방법은 촬영의 시작과 끝 지점에 효과음을 넣어 기록한 후에, 동영상 편집 프로그램을 이용하여 효과음의 시작 영상부터 끝나는 영상까지의 구간만을 선택하여 이루어진다.

다음은 카메라와 캠코더로부터 추출된 동기화 영상이미지에 다중 템플릿 매칭 기법을 적용하여, 각각 표적에 대한 변위 시간이력을 추출한다. 이때, 표적은 영상이미지 중에서 Fig. 1과 같이 잔상등급을 여러 단계로 구분하여 템플릿으로 설정한다. 그리고 각각의 영상이미지와 이미 설정된 템플릿이 가장 일치하는 영역을 탐색한다. Fig. 9은 표적1의 카메라 동영상에 다중 템플릿 매칭 기법을 적용하여 추출한 수직변위 시간이력을 보인다. 여기서, 변위의

원점은 카메라 사진의 좌측상단이다.

마지막으로, 후방교회법과 전방교회법을 이용하여 각각의 표적들에 대한 공간상의 좌표 (X, Y, Z)를 추출한다. 공간상의 좌표 추출을 위하여 공간상 임의의 점을 원점으로 설정하였다. 원점에 광과거리 측정기를 설치하여 카메라와 캠코더 중심위치, 자세 및 각각의 표적에 대한 위치를 측정하였다. 여기서, 광과거리 측정기를 이용해 위치를 측정한 이유는 초기 근사값을 실제값과 근사시킴으로써 계산량을 줄일 수 있기 때문이다. 이때, 단위는 픽셀단위를 사용하였다. 단위 환산은 사진의 중심에서 표적의 거리를 센티미터(cm)와 픽셀(pixel)의 비로 구하였다. 카메라의 자세, 위치 및 각 표적의 위치는 측정된 값을 초기 근사값으로 설정하였다. 그리고 식 (23), (24)를 이용하여 초기 근사값의 보정된 값을 구한다. 식 (23), (24)에 의해서 구해진 카메라와 캠코더의 자세, 위치 및 각 표적의 위치를 이용하여 식 (25), (26)에 의해서 각각의 표적에 대한 지상점의 좌표를 추출한다. Fig. 10은 식 (23), (24)를 이용하여 1000회 반복 수행한 결과로써, 카메라와 캠코더의 자세 및 위치가 수렴하고 있음을 나타낸다. 또한, Fig. 11은 식 (25), (26)을 이용하여 1000회 반복 수행하여 추출된 결과로써 카메라의 영상이미지와 캠코더의 영상이미지가 서로 교차하는 공간상의 점이 수렴하고 있음을 나타낸다. 그리고 Table 2는

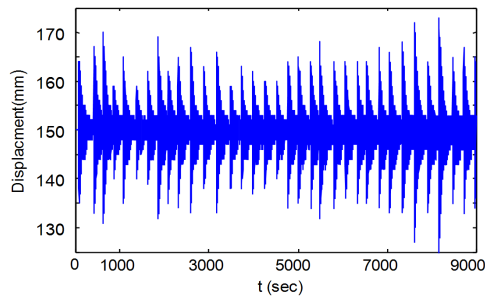
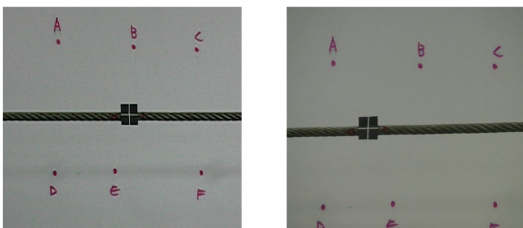


Fig. 9 Extracted displacement time history



(a) Camera (b) Camcorder
Fig. 8 Captured image for target No.1 (d/4)

Table 2 Estimated coordinates targets(cm)

Target No.	X'	Y'	Z'
1	110.53	108.77	54.17
2	224.63	142.18	71.85
3	360.69	178.84	69.28

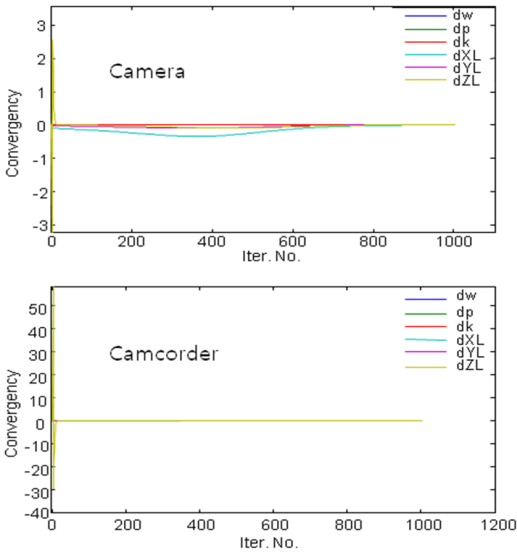


Fig. 10 Convergence of space resection

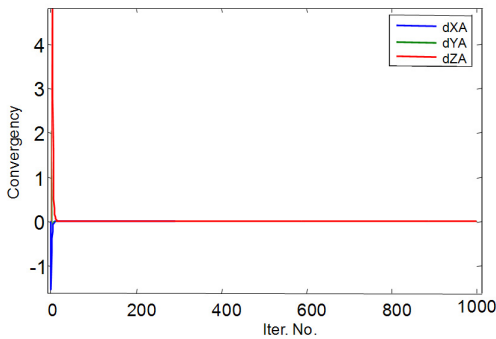


Fig. 11 Convergence of space intersection

전방고회법으로 수렴된 표적들의 3차원 좌표값을 나타낸다.

3.2 케이블의 동특성 추출

상기 실험을 통해 얻은 케이블의 3차원 공간 위치(X, Y, Z)에 대한 변위시간이력은 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 x1,y1,z1은 표적1의 각 방향의 변위를 나타내고, x2, y2, z2는 표적2의 각 방향의 변위, 그리고 x3, y3, z3은 표적3의 각 방향의 변위이다. 변위 시간 이력에 대한 스펙트럼은 Fig. 13과 같다. 여기서 Hanning 윈도우와 NFFT=2¹⁰이 사용되었으며 주파수 해상도는 0.0293 Hz이다.

단위 질량 및 길이가 각각 M 및 L 이고, 장력 T 를 받는 케이블의 n 번째 모드의 고유진동수 f_n (Hz)

Table 4 Natural frequency(Hz)

Mode No.	Theory (f_n)	Accel. (f_n)	Proposed approach		
			X	Y	Z
1	2.78	2.70	2.81	2.78	2.81
2	5.56	5.29	5.50	5.45	5.42
3	8.34	7.98	8.15	8.15	8.17
4	11.12	10.72	11.02	11.02	10.99
5	13.90	13.60	13.51	13.59	13.62

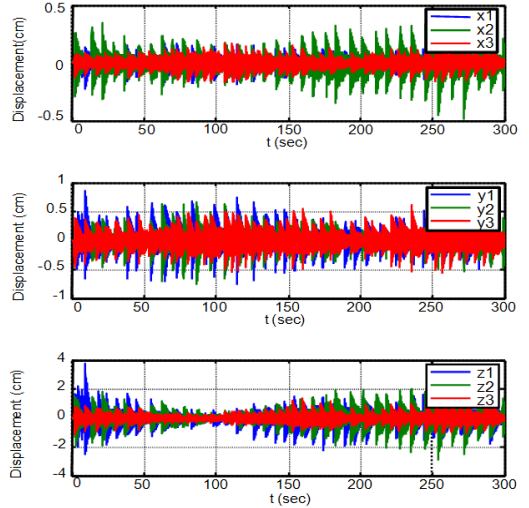


Fig. 12 Extracted displacement time history

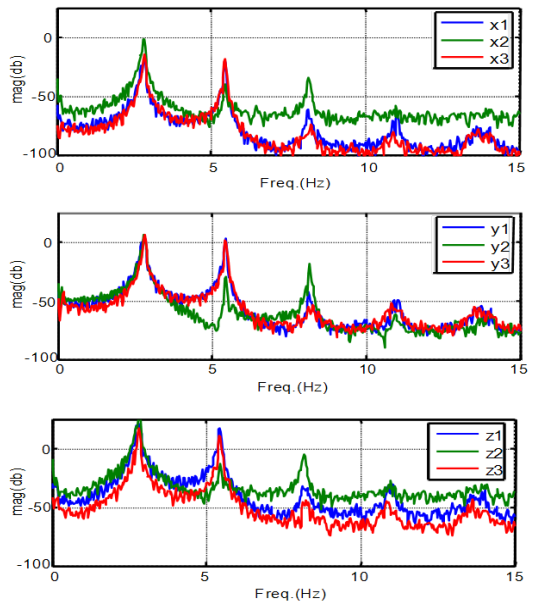


Fig. 13 Power spectrum of displacement

는 다음과 같다.

$$f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (27)$$

Table 1에 보이는 케이블의 제원을 이용하면 각 모드별 고유진동수를 산정할 수 있다. Table 4는 Fig. 13으로부터 침두추출법을 이용하여 추출된 고유진동수 및 이론적 고유진동수가 보인다. 또한, 실험결과와 검증에 위하여 PCB사의 모델 352B10 저주파 가속도계를 케이블에 부착시키고 진동실험에 의해서 추출된 고유진동수가 Table 4에 보인다. Table 4를 관찰해보면, 이론치를 기준으로 하였을 때 제안기법의 오차는 -1.1%~2.8%이며, 가속도계의 오차는 -4.9%~2.2%이다. 가속도계를 이용하여 추정된 케이블의 고유진동수가 영상이미지를 이용하여 추정된 고유진동수보다 다소 작은 경향이 관찰 된다. 이는 케이블에 부착된 가속도계의 무게 때문인 것으로 추정된다.

4. 결 론

이 논문은 카메라 혹은 캠코더 등에 기록된 동영상 이미지로부터 케이블의 동특성을 추출하는 방법을 소개 하였다. 제안기법은 2개의 평면 영상이미지로부터 입체이미지를 구성하는 사진측량기법을 적용하였으며, 공간상에서 진동하는 케이블의 3차원 변위 시간 이력을 추출하고 상응하는 동특성을 추출하였다.

일반 디지털 카메라 혹은 캠코더 등으로 촬영된 동영상이미지로부터 3차원 변위 시간 이력의 추출이 가능하다. 이를 위해서는 평면 영상이미지로부터 입체 영상이미지를 구성해야 한다. 그러므로 2대 이상의 카메라를 이용한 동영상 촬영이 필요하고, 사진측량기법인 공간후방교회법과 공간전방교회법의 적용이 필요하다.

구조물의 전체중량 대비 가속도계의 무게를 무시 못할 경우에, 동영상이미지를 이용한 동특성 추출기법은 정확도 측면에서 가속도계를 이용하는 방법보다 유리할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 사진측량기법을 이용하여 케이블

의 진동 동영상으로부터 3차원 변위시간이력을 추출하는 방법을 제안하였으며, 추출된 변위시간이력의 스펙트럼으로부터 케이블의 고유진동수를 추정하여 제안기법의 정확도를 간접적으로 비교 검토하였다. 향후 케이블의 동영상으로부터 케이블의 모드 형상을 추출할 수 있는 하는 방법을 추가적으로 연구된다면, 제안기법을 이용한 동특성 추출기술이 실무에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구결과물은 2009년도 경남대학교 신진교수 연구비지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) Park, T. and Kim, B. H., 2005, "Estimation of Cable Tension Using System Identification Technique : I. Theory," Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, No. 4A, pp. 661~668.
- (2) Nassif, H. H., Gindy, T. and Davis, J., 2005, "Comparison of Laser Doppler Vibrometer with Contact Sensors for Monitoring Bridge Deflection and Vibration," NDT&E International, Vol. 38, pp. 213~218.
- (3) 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., Vol. 12, pp. 785~794.
- (4) Kim, B. H., 2008, "Modal Parameter Extraction Using a Digital Camera," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1229~1236.
- (5) Wolf, P. R. and Dewitt, B. A., 2008, Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd Ed., McGraw Hill, New York, NY, USA.
- (6) Mikhail, E. M., Bethel, J. S. and McGlone, J. C., 2001, "Introduction to Modern Photogrammetry," John Wiley & Sons, New York, NY, USA.