



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년04월18일
(11) 등록번호 10-2387166
(24) 등록일자 2022년04월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01B 7/16 (2006.01) G01P 15/02 (2006.01)
G06F 17/16 (2006.01) G06F 17/17 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01B 7/16 (2021.01)
G01P 15/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0072048
(22) 출원일자 2020년06월15일
심사청구일자 2020년06월15일
(65) 공개번호 10-2021-0155065
(43) 공개일자 2021년12월22일
(56) 선행기술조사문헌
KR101803503 B1
KR1020170008410 A
KR101880193 B1
KR101520231 B1

(73) 특허권자
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
(72) 발명자
손훈
대전광역시 유성구 대학로 291, 한국과학기술원
(구성동)
마찬시웅
대전광역시 유성구 대학로 291, 한국과학기술원
(구성동)
(74) 대리인
박영우

전체 청구항 수 : 총 16 항

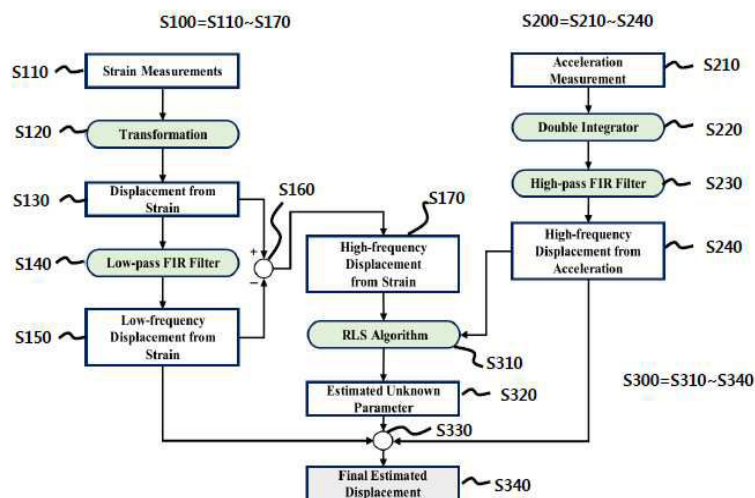
심사관 : 김윤선

(54) 발명의 명칭 교량의 변위를 추정하는 방법 및 전자 장치

(57) 요약

교량의 변위를 추정하는 방법에서는, 기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 측정된 스트레인을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출하고, 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고, 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 산출한다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G06F 17/16 (2013.01)

G06F 17/17 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2019015923
과제번호	2019015923
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업
연구과제명	(EZBARO)스마트 수중 터널 시스템 연구 센터(2019)
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한국과학기술원
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

교량의 변위를 추정하는 방법으로서,

기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 측정된 스트레인을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출하는 단계;

상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하는 단계;

상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 산출하는 단계를 포함하고,

상기 제1 변위를 산출하는 단계는

상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하는 단계;

상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하는 단계;

상기 서브 변위들에 기초하여 상기 제1 변위를 산출하는 단계;

상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하는 단계; 및

상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분을 획득하는 단계를 포함하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 제2 변위를 산출하는 단계는

상기 가속도 센서에서 상기 가속도를 측정하는 단계;

상기 측정된 가속도를 이중 적분하는 단계; 및

상기 이중 적분된 가속도에 대하여 하이 패스 필터를 적용하여 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 획득하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하는 단계는

상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 대하여 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하는 단계;

상기 재귀적 최소 자승 알고리즘의 결과에 기초하여 상기 미지의 파라미터를 추정하는 단계; 및

상기 제1 변위의 상기 저주파 성분, 상기 추정된 미지의 파라미터 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 기초로 연산을 수행하여 상기 최종 변위를 제공하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 최종 변위는 상기 추정된 미지의 파라미터로 상기 제1 변위의 상기 저주파 성분을 나누고, 상기 나눈 결과에 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 합산하여 산출되는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 추정된 미지의 파라미터는 상기 교량의 추정된 모드 형상과 실제 모드 형상의 차이를 보정하기 위한 스케일링 팩터에 해당하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 복수의 쌍들 각각은 상기 지점들 각각에서 상기 제1 방향과 수직하는 제2 방향으로 제2 거리만큼 이격된 제1 스트레인 센서와 제2 스트레인 센서를 포함하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 제1 스트레인 센서와 상기 제2 스트레인 센서가 측정한 서브 스트레인들의 차이는 하기의 [수학식 1]로 표현되고,

[수학식 1]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

상기 [수학식 1]에서, $\Delta \varepsilon$ 은 서브 스트레인들의 차이를 나타내고, x 는 상기 제1 방향으로의 위치를 나타내고, k 는 k 번째 타이밍을 나타내고, $u(x, k)$ 는 제1 변위를 나타내고, $h(x)$ 는 상기 제2 거리를 나타내는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 제1 변위는 하기의 [수학식 2]로 표현되고,

[수학식 2]

$$u(x, k) = \sum_{j=1}^L \varphi_j(x) q_j(k)$$

상기 [수학식 2]에서 φ_j 는 j 번째 모드 형상을 나타내고, q_j 는 j 번째 모달 응답을 나타내고 L 은 모드들의 수를 나타내고,

상기 [수학식 2]를 상기 [수학식 1]에 대입하면,

[수학식 3]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \sum_{j=1}^L \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} q_j(k)$$

인 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 [수학식 3]을 벡터 표현으로 나타내면

[수학식 4]

$$\Delta \varepsilon(k) = \mathbf{H} \Phi \mathbf{q}(k)$$

상기 [수학식 4]는 하기의 [수학식 5], [수학식 6], [수학식 7] 및 [수학식 8]을 만족함.

[수학식 5]

$$\Delta \varepsilon(k) = [\Delta \varepsilon(x_1, k) \quad \dots \quad \Delta \varepsilon(x_m, k)]^T_{1 \times m}$$

[수학식 6]

$$\mathbf{q}(k) = [q_1(k) \quad \dots \quad q_L(k)]^T_{1 \times L}$$

상기 [수학식 6]에서 m은 복수의 지점들을 나타내고,

[수학식 7]

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{d^2 \varphi_1(x_1)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_1)}{dx^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 \varphi_1(x_m)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_m)}{dx^2} \end{bmatrix}_{m \times L}$$

[수학식 8]

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(x_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h(x_m) \end{bmatrix}_{m \times m}$$

모달 응답(q(k))는 상기 [수학식 4]로부터 하기의 [수학식 9]로 도출되고,

[수학식 9]

$$\mathbf{q}(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

인 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 [수학식 9]를 상기 상기 [수학식 2]에 대입하면, 상기 제1 지점에서의 상기 제1 변위는 하기의 [수학식 10]으로 표현되고,

[수학식 10]

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{T} \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

상기 [수학식 10]은 하기의 [수학식 11]과 [수학식 12]를 만족하고,

[수학식 11]

$$\mathbf{T} = \Psi(x_d) [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$$

[수학식 12]

$$\Psi = [\varphi_1(x_d) \quad \dots \quad \varphi_L(x_d)]_{1 \times L},$$

상기 교량의 추정 모드 형상과 실제 모드 형상 사이의 차이를 보정하기 위한 스케일링 팩터(α)를 고려하면,
상기 제1 변위는 하기의 [수학식 12]로 표현되고,
[수학식 12]

$$u(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

여기서, \mathbf{T}_a 는 행렬(\mathbf{T})에 대한 근사 행렬인 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,
유한 응답 펄스가 하기의 [수학식 13]으로 표현되는 경우,
[수학식 13]

$$\mathbf{u}^* = (\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a \mathbf{a} + \lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{u}$$

상기 [수학식 13]에서, \mathbf{u}^* 는 상기 최종 변위의 벡터 표현, \mathbf{u} 는 상기 스트레인으로부터 변환된 상기 제1 변위의 벡터 표현, \mathbf{a} 는 상기 가속도의 벡터 표현이고, \mathbf{L}_a 는 $(2N+1)$ 차의 대각선 가중치 행렬을 나타내고 λ 는 정규화 팩터로서 하기의 [수학식 14]를 만족하고,

[수학식 14]

$$\lambda = 46.81(2N + 1)^{-1.95}$$

[수학식 14]에서 λ 는 하기의 [수학식 15]를 만족하고,

[수학식 15]

$$\lambda = 2N + 1 = \frac{2.68}{f_1 \Delta t}$$

상기 [수학식 15]에서 f_1 은 상기 교량의 제1 고유 주파수를 나타내고,

상기 [수학식 13]에 중첩을 적용하면 하기의 [수학식 16]이 도출되고,

[수학식 16]

$$\mathbf{u}^*(k) = \mathbf{C}_H \mathbf{a} + \mathbf{C}_L \mathbf{u}$$

상기 [수학식 16]에서 \mathbf{C}_H 는 $(\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a$ 의 $(N+1)$ 번째 행을 나타내고 이중 적분과 하이-패스 필터의 결합에 해당하고, \mathbf{C}_L 은 $\lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1}$ 의 로우-패스 필터에 해당하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,
상기 제1 변위는 하기의 [수학식 17]로 표현되고,

[수학식 17]

$$\mathbf{u}_s = \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}\}^T,$$

상기 제1 변위의 저주파 성분과 제1 고주파 성분은 하기의 [수학식 18]과 [수학식 19]로 표현되고,

[수학식 18]

$$\mathbf{u}_s^l(k) = \mathbf{C}_L \mathbf{u}_s$$

[수학식 19]

$$\mathbf{u}_a^h(k) = \mathbf{C}_H \mathbf{a},$$

상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분은 하기의 [수학식 20]으로 표현되고

[수학식 20]

$$\mathbf{u}_s^h(k) = \mathbf{u}_s(k) - \mathbf{u}_s^l(k),$$

상기 추정된 최종 변위는 하기의 [수학식 21]로 표현되고,

[수학식 21]

$$\mathbf{u}^*(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{u}_s^l(k) + \mathbf{u}_a^h(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{C}_L \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}\}^T + \mathbf{C}_H \mathbf{a},$$

상기 [수학식 19]에서 $\alpha(k)$ 는 스케일링 팩터에 해당하는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 14

제1항에 있어서,

상기 최종 변위는 상기 제1 지점에서의 상기 교량의 변위인 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 스트레인 센서들은 상기 스트레인을 제1 샘플링 주파수로 측정하고, 상기 가속도 센서는 상기 가속도를 상기 제1 샘플링 주파수보다 큰 제2 샘플링 주파수로 측정하고,

상기 제1 변위는 삼차 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 사용하여 업-샘플링되는 것을 특징으로 하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 16

교량의 변위를 추정하는 방법으로서,

기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하는 단계;

상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하는 단계;

상기 서브 변위들에 기초하여 제1 변위를 산출하는 단계;

상기 제1 변위에 로우 패스필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하는 단계;

상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분을 획득하는 단계;

상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서에서 가속도를

측정하는 단계;

상기 측정된 가속도를 이중 적분하는 단계;

상기 이중 적분된 가속도에 대하여 하이 패스 필터를 적용하여 제2 변위의 제2 고주파 성분을 획득하는 단계;

상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 대하여 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하는 단계;

상기 재귀적 최소 자승 알고리즘의 결과에 대하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 추정하는 단계; 및

상기 제1 변위의 상기 저주파 성분, 상기 추정된 미지의 파라미터 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 기초로 연산을 수행하여 상기 교량의 최종 변위를 산출하는 단계를 포함하는 교량의 변위를 추정하는 방법.

청구항 17

교량의 변위를 추정하는 전자 장치로서,

기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들 및 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서와 통신하고, 상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들로부터 측정된 스트레인과 상기 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 제공받는 통신부;

상기 통신부로부터 상기 스트레인과 상기 가속도를 수신하고, 상기 스트레인과 상기 가속도에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 추정하는 제어부; 및

상기 제어부로부터 상기 추정된 최종 변위를 제공받고, 상기 추정된 최종 변위를 표시하는 디스플레이부를 포함하고,

상기 제어부는

상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하고, 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고, 상기 서브 변위들에 기초하여 제1 변위를 산출하고, 상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분을 획득하여 상기 스트레인을 기초로 상기 저주파 성분과 상기 제1 고주파 성분을 포함하는 상기 제1 변위를 산출하고,

상기 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고,

상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 최종 변위를 산출하는 전자 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 변위 추정에 관한 것으로 보다 상세하게는 교량의 스트레인 및 가속도에 기초하여 교량의 변위를 추정하는 방법 및 이러한 방법을 수행하는 전자 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 토목 구조물 특히 교량의 경우, 차량하중이나 풍하중으로 인해 성능이 악화될 수 밖에 없다. 콘크리트 교량의 경우 내구성의 악화는 주로 콘크리트의 크랙으로 발생하며, 이러한 손상을 조기에 발견하는 것은 매우 중요한 일이다. 하지만, 육안검사로는 크랙을 찾기에 많은 시간과 인력이 소요되며, 또한 크랙의 정확한 깊이 및 그로 인한 영향을 평가하기는 쉽지 않다. 하지만, 육안검사로는 크랙을 찾기에 많은 시간과 인력이 소요되며, 또한 크랙의 정확한 깊이 및 그로 인한 영향을 평가하기는 쉽지 않다. 크랙이 발생하면 구조물의 중립축의 위치가 변하게 된다. 중립축이란, 단면에서 스트레인(변형률)이 0이 되는 위치를 의미한다.

[0003] 일반적으로 교량의 상부는 압축을 하부는 인장을 받으므로 이를 찾기 위해서 현재는 굽힘을 받는 교량의 상-하면에 스트레인 센서를 설치하여 변형률이 0이 되는 위치, 즉 중립축을 추정하였다.

[0004] 또한 스트레인 센서에서 측정된 스트레인을 주파수 도메인으로 변환하여 미지의 파라미터를 추정하는데, 주파수 도메인의 특성상 에러가 항상 존재한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 이에 따라, 본 발명의 일 목적은 정확성을 높일 수 있는 교량의 변위를 추정하는 방법을 제공하는데 있다.

[0006] 본 발명의 일 목적은 정확성을 높일 수 있는 교량의 변위를 추정하는 전자 장치를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 일 목적을 달성하기 위한 본 발명의 실시예에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법에서는, 기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 측정된 스트레인을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출하고, 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고, 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 산출한다.

[0008] 실시예에 있어서, 상기 제1 변위를 산출하기 위하여, 상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하고, 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고, 상기 서브 변위들에 기초하여 상기 제1 변위를 산출하고, 상기 제1 변위에 로우 패스 유한 임펄스 응답 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분을 획득할 수 있다.

[0009] 실시예에 있어서, 상기 제2 변위를 산출하기 위하여, 상기 가속도 센서에서 상기 가속도를 측정하고, 상기 측정된 가속도를 이중 적분하고, 상기 이중 적분된 가속도에 대하여 하이 패스 유한 임펄스 응답 필터를 적용하여 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 획득할 수 있다.

[0010] 실시예에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하기 위하여, 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 대하여 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하고, 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘의 결과에 기초하여 상기 미지의 파라미터를 추정하고, 상기 제1 변위의 상기 저주파 성분, 상기 추정된 미지의 파라미터 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 기초로 연산을 수행하여 상기 최종 변위를 제공할 수 있다.

[0011] 상기 일 목적을 달성하기 위한 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법에서는 기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하고, 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고, 상기 서브 변위들에 기초하여 제1 변위를 산출하고, 상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분을 획득하고, 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서에서 가속도를 측정하고, 상기 측정된 가속도를 이중 적분하고, 상기 이중 적분된 가속도에 대하여 하이 패스 필터를 적용하여 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 대하여 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하고, 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘의 결과에 대하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 추정하고, 상기 제1 변위의 상기 저주파 성분, 상기 추정된 미지의 파라미터 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 기초로 연산을 수행하여 상기 교량의 최종 변위를 산출한다.

[0012] 상기 일 목적을 달성하기 위한 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 전자 장치는 통신부, 제어부 및 디스플레이부를 포함한다. 상기 통신부는 기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들 및 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서와 통신하고, 상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들로부터 측정된 스트레인과 상기 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 제공받는다. 상기 제어부는 상기 통신부로부터 상기 스트레인과 상기 가속도를 수신하고, 상기 스트레인과 상기 가속도에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 추정한다. 상기 통신부는 상기 제어

부로부터 상기 추정된 최종 변위를 제공받고, 상기 추정된 최종 변위를 표시한다. 상기 제어부는 상기 스트레인을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출하고, 상기 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고, 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 최종 변위를 산출한다.

발명의 효과

[0013] 본 발명의 예시적인 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법 및 전자 장치에서는 변위 추정에 있어서 RLS 알고리즘을 사용하므로 스케일링 팩터를 주파수 도메인이 아닌 시간 도메인에서 추정할 수 있고, 상기 추정된 변위 및 추정된 스케일링 팩터가 고유 주파수의 정확성에 의한 영향을 받지 않으므로 교량의 변위를 보다 정확히 추정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 본 발명의 일 실시예에 교량의 변위를 추정하는 방법에 따라 교량에 스트레인 센서들과 가속도 센서를 부착한 모습을 나타낸다.

도 2는 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법을 나타내는 흐름도이다.

도 3은 변하는 단면을 가지는 실제 교량이 경험하는 수직 로딩과 축방향 로딩을 나타낸다.

도 4는 도 3의 교량에 설치되는 복수의 스트레인 센서 쌍들 중 하나의 스트레인 센서 쌍에서 측정되는 스트레인을 나타낸다.

도 5는 도 2의 교량의 변위를 추정하는 방법을 보다 상세히 나타내는 흐름도이다.

도 6a는 본 발명의 변위를 추정하는 방법이 적용되는 샘플 교량을 나타내고, 도 6b는 샘플 교량의 단면의 크기를 나타낸다.

도 7은 도 6a의 샘플 교량에 인가되는 그라운드 여기 신호들을 나타낸다.

도 8a 내지 도 8c은 각각 도 6a 샘플 교량에 도 7의 그라운드 여기 신호들이 인가될 때의 추정된 변위를 나타낸다.

도 9는 본 발명의 변위 추정 방법이 적용될 수 있는 단면의 크기가 변화하는 다양한 샘플 교량의 예들을 나타낸다.

도 10은 도 9의 제1 샘플 교량에 본 발명의 변위 추정 방법에 적용되는 경우에 실제 모드 형상(mode shape)과 추정된 모드 형상의 차이를 나타낸다.

도 11은 본 발명의 실시예들에 따른 변위 추정 방법을 실제 교량에 적용한 결과를 나타낸다.

도 12는 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법을 수행하는 전자 장치를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 본문에 개시되어 있는 본 발명의 실시예들에 대해서, 특정한 구조적 내지 기능적 설명들은 단지 본 발명의 실시예를 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로, 본 발명의 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본문에 설명된 실시예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 아니 된다.

[0016] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 구성요소에 대해 사용하였다.

[0017] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수

있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다.

- [0018] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- [0019] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 실시된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0020] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0021] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 도면상의 동일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.
- [0022] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 본 발명의 일 실시예에 교량의 변위를 추정하는 방법에 따라 교량에 스트레인 센서들과 가속도 센서를 부착한 모습을 나타낸다.
- [0023] 도 1을 참조하면, 기준점(RP)으로부터 제1 방향(D1)으로 연장되는 교량(10)의 제1 방향(D1)의 복수의 지점들(x_1, x_2, \dots, x_m)에 복수의 쌍들의 스트레인 센서들(스트레인 게이지들)(20a, 20b, ..., 20m)을 설치하고, 기준점(RP)으로부터 제1 방향(D1)으로 제1 거리(xd)만큼 이격된 제1 지점에 가속도 센서(30, accelerometer)를 설치한다.
- [0024] 교량(10)의 복수의 지점들(x_1, x_2, \dots, x_m) 각각에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들(20a, 20b, ..., 20m) 각각은 복수의 지점들(x_1, x_2, \dots, x_m) 각각에서 제1 방향(D1)과 수직인 제2 방향(D2)으로 이격되는 제1 스트레인 센서와 제2 스트레인 센서를 포함할 수 있다.
- [0025] 설치되는 스트레인 센서들(20a, 20b, ..., 20m)로부터 측정된 스트레인(변형률)을 변위로 변환하고, 가속도 센서(30)로부터 측정된 가속도를 변위로 변환하고, 상기 변위들을 결합하여 교량(10)의 변위를 추정할 수 있다.
- [0026] 도 2는 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법을 나타내는 흐름도이다.
- [0027] 도 1 및 도 2를 참조하면, 기준점(RP) 제1 방향(D1)의 복수의 지점들(x_1, x_2, \dots, x_m , m은 3 이상의 자연수)에 설치된 복수의 쌍들의 스트레인 센서들(20a, 20b, ..., 20m)에서 측정된 스트레인을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출한다(S100).
- [0028] 기준점(RP)으로부터 제1 방향(D1)으로 제1 거리(xd)만큼 이격된 제1 지점에 설치된 가속도 센서(30)로부터 측정된 가속도 센서를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출한다(S200).
- [0029] 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승(recursive least square(RLS)) 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 산출한다(S300).
- [0030] 제1 변위를 산출하기 위하여(S100), 복수의 쌍들의 스트레인 센서들(20a, 20b, ..., 20m)에 서브 스트레인들을 측정하고(S110), 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고(S120), 상기 서브 변위들에 기초하여 상기 제1 변위를 산출하고(S130), 상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여(S140) 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고(S150), 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여(S160) 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분을 획득(S170)할 수 있다.
- [0031] 제2 변위를 산출하기 위하여(S200), 가속도 센서에서 상기 가속도를 측정하고(S210), 상기 측정된 가속도를 이중 적분하고(S220), 상기 이중 적분된 가속도에 대하여 하이 패스 필터를 적용하여(S230) 상기 제2 변위의 상기

제2 고주파 성분을 획득(S240)할 수 있다.

[0032] 최종 변위를 산출하기 위하여(S300), 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 대하여 상기 재귀적 최소 자승(RLS) 알고리즘을 적용하고(S310), 상기 재귀적 최소 자승 알고리즘의 결과에 기초하여 상기 미지의 파라미터를 추정하고(S320), 상기 제1 변위의 상기 저주파 성분, 상기 추정된 미지의 파라미터 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 기초로 연산을 수행하여(S330) 상기 최종 변위를 제공(S340)할 수 있다.

[0033] 실시예에 있어서, 상기 최종 변위는 상기 추정된 미지의 파라미터로 상기 제1 변위의 상기 저주파 성분을 나누고, 상기 나눈 결과에 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분을 합산하여 산출될 수 있다.

[0034] 실시예에 있어서, 상기 추정된 미지의 파라미터는 상기 교량(10)에 관련된 추정된 모드 형태와 실제 모드 형태 사이의 차이를 보상하기 위한 스케일링 팩터에 해당할 수 있다..

[0035] 도 3은 변하는 단면을 가지는 실제 교량이 경험하는 수직 로딩과 축방향 로딩을 나타낸다.

[0036] 도 3을 참조하면, 교량(10a)은 변하는 단면(cross-section)을 가질 수 있고, 축방향 로딩(axial loading)과 수직 로딩(vertical loading)을 경험할 수 있다.

[0037] 도 4는 도 3의 교량에 설치되는 복수의 스트레인 센서 쌍들 중 하나의 스트레인 센서 쌍에서 측정되는 스트레인을 나타낸다.

[0038] 도 4는 도 3의 교량(10a)의 임의의 지점에서의 스트레인 센서 쌍을 나타낸다.

[0039] 교량(10a)의 임의의 지점에 설치되는 스트레인 센서 쌍은 제2 방향(D2)으로 제2 거리(h(x))만큼 이격되는 제1 스트레인 센서(21)와 제2 스트레인 센서(22)를 포함할 수 있다.

[0040] 교량(10a)의 임의의 지점에서 측정되는 서브 스트레인($\epsilon(x, y, k)$)은 균일한 축방향 서브 스트레인($\epsilon^u(x, k)$)과 선형적으로 변하는 벤딩 서브 스트레인($\epsilon^b(x, y, k)$)으로 구분될 수 있다.

[0041] 도 4에서 (0)는 교량(10a)의 단면의 제2 방향(D2)으로의 중심을 나타낸다.

[0042] 이러한 벤딩 스트레인으로부터 스트레인과 변위 사이의 관계는 하기의 [수학식 1]로 표현될 수 있다.

[0043] [수학식 1]

$$\epsilon^b(x, y, k) = y \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

[0044] [수학식 1]에서 u는 제2 방향(D2)으로의 교량(10a)의 변위를 나타낸다.

[0045] 도 3에서 복수의 스트레인 센서 쌍들 각각이 도 4의 스트레인 센서 쌍과 같이 제1 스트레인 센서 및 제2 스트레인 센서를 포함하는 경우에, 상기 제1 스트레인 센서와 상기 제2 스트레인 센서가 측정한 서브 스트레인들의 차이는 하기의 [수학식 2]로 표현될 수 있다.

[0046] [수학식 2]

$$\Delta \epsilon(x, k) = h(x) \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

[0047] 상기 [수학식 2]에서, $\Delta \epsilon$ 은 서브 스트레인들의 차이를 나타내고, x는 상기 제1 방향으로의 위치를 나타내고, k는 k번째 타이밍을 나타내고, u(x, k)는 제1 변위를 나타내고, h(x)는 상기 제2 거리를 나타낼 수 있다.

[0048] 상기 제1 변위는 하기의 [수학식 3]로 표현될 수 있다.

[0049] [수학식 3]

$$u(x, k) = \sum_{j=1}^L \varphi_j(x) q_j(k)$$

[0050]

[0053] 상기 [수학식 3]에서 φ_j 는 j번째 모드 형상을 나타내고, q_j 는 j번째 모달 응답을 나타내고 L은 모드들의 수를 나타내고,

[0054] 상기 [수학식 3]을 상기 [수학식 2]에 대입하면, 하기의 [수학식 4]가 도출될 수 있다.

[0055] [수학식 4]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \sum_{j=1}^L \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} q_j(k)$$

[0056]

[0057] 상기 [수학식 4]을 벡터 표현으로 나타내면

[0058] [수학식 5]

$$\Delta \varepsilon(k) = \mathbf{H} \Phi \mathbf{q}(k)$$

[0059]

[0060] 상기 [수학식 5]는 하기의 [수학식 6], [수학식 7], [수학식 8] 및 [수학식 9]를 만족할 수 있다.

[0061] [수학식 6]

$$\Delta \varepsilon(k) = [\Delta \varepsilon(x_1, k) \quad \dots \quad \Delta \varepsilon(x_m, k)]^T_{1 \times m}$$

[0062]

[0063] [수학식 7]

$$\mathbf{q}(k) = [q_1(k) \quad \dots \quad q_L(k)]^T_{1 \times L}$$

[0064]

[0065] 상기 수학식 7에서 m은 복수의 지점들을 나타내고,

[0066] [수학식 8]

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{d^2 \varphi_1(x_1)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_1)}{dx^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 \varphi_1(x_m)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_m)}{dx^2} \end{bmatrix}_{m \times L}$$

[0067]

[0068] [수학식 9]

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(x_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h(x_m) \end{bmatrix}_{m \times m}$$

[0069]

[0070] 모달 응답(q(k))는 상기 [수학식 9]로부터 하기의 [수학식 10]으로 도출될 수 있다.

[0071] [수학식 10]

$$\mathbf{q}(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

[0072]

[0073] 상기 [수학식 10]를 상기 [수학식 3]에 대입하면, 상기 제1 지점에서의 상기 제1 변위는 하기의 [수학식 11]로 표현될 수 있다.

[0074] [수학식 11]

$$u(k) = \mathbf{T} \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

[0075]

[0076] 상기 [수학식 11]은 하기의 [수학식 12]와 [수학식 13]을 만족할 수 있다.

[0077] [수학식 12]

$$\mathbf{T} = \mathbf{\Psi}(x_d)[\mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi}]^{-1} \mathbf{\Phi}^T$$

[수학식 13]

$$\mathbf{\Psi} = [\varphi_1(x_d) \quad \dots \quad \varphi_L(x_d)]_{1 \times L}$$

상기 교량의 추정 모드 형상과 실제 모드 형상 사이의 차이를 보정하기 위한 스케일링 팩터(α)를 고려하면,

상기 제1 변위는 하기의 [수학식 13]으로 표현되고,

[수학식 13]

$$u(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

여기서, \mathbf{T}_a 는 행렬(\mathbf{T})에 대한 근사 행렬일 수 있다.

유한 응답 펄스가 하기의 [수학식 14]로 표현되는 경우,

[수학식 14]

$$\mathbf{u}^* = (\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a \mathbf{a} + \lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{u}$$

상기 [수학식 14]에서, \mathbf{u}^* 는 상기 최종 변위의 벡터 표현, \mathbf{u} 는 스트레인으로부터 변환된 상기 제1 변위의 벡터 표현, \mathbf{a} 는 상기 가속도의 벡터 표현일 수 있다.

상기 [수학식 14]에서, \mathbf{L}_a 는 $(2N+1)$ 차의 대각선 가중치 행렬을 나타내고 λ 는 정규화 팩터로서 하기의 [수학식 15]와 같이 표현될 수 있다.

[수학식 15]

$$\lambda = 46.81(2N + 1)^{-1.95}$$

[수학식 15]에서 $2N+1$ 은 시간 윈도우 내의 시간 간격들의 수를 나타내고, 하기의 [수학식 16]으로 표현될 수 있다.

[수학식 16]

$$2N + 1 = \frac{2.68}{f_1 \Delta t}$$

[수학식 16]에서 f_1 은 타겟 구조물(즉, 교량(10a))의 제1 고유 주파수를 나타낸다.

상기 [수학식 14]에 중첩을 적용하면 하기의 [수학식 17]이 도출될 수 있다.

[수학식 17]

$$\mathbf{u}^*(k) = \mathbf{C}_H \mathbf{a} + \mathbf{C}_L \mathbf{u}$$

상기 [수학식 17]에서 \mathbf{C}_H 는 $(\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a$ 의 $(N+1)$ 번째 행을 나타내고 이중 적분과 하이-패

스 필터의 결합에 해당하고, \mathbf{C}_L 는 $\lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1}$ 의 로우-패스 필터에 해당할 수 있다.

상기 제1 변위는 하기의 [수학식 18]로 표현될 수 있다.

[0102] [수학식 18]

$$[0103] \quad \mathbf{u}_s = \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}\}^T,$$

[0104] 상기 제1 변위의 저주파 성분과 제1 고주파 성분은 하기의 [수학식 19]와 [수학식 20]로 표현될 수 있다.

[0105] [수학식 19]

$$[0106] \quad \mathbf{u}_s^l(k) = \mathbf{C}_L \mathbf{u}_s,$$

[0107] [수학식 20]

$$[0108] \quad \mathbf{u}_a^h(k) = \mathbf{C}_H \mathbf{a}$$

[0109] 또한 제2 변위의 고주파 성분은 하기의 [수학식 21]로 표현될 수 있다.

[0110] [수학식 21]

$$[0111] \quad \mathbf{u}_s^h(k) = \mathbf{u}_s(k) - \mathbf{u}_s^l(k),$$

[0112] 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 제1 변위의 제1 고주파 성분에 적용하면, 제2 변위의 제2 고주파 성분과 제1 변위의 제1 고주파 성분이 각 시각에서 유사하므로, 제2 변위의 제2 고주파 성분은 하기의 [수학식 22]로 표현될 수 있다. [수학식 22]

$$[0113] \quad \mathbf{u}_a^h(k) \approx \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{u}_s^h(k)$$

[0113]

[0114] [수학식 22]에서 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 RLS 알고리즘을 사용하여 추정하면,

[0115] [수학식 23]

$$[0116] \quad \alpha(k) = \alpha(k-1) + p(k) \mathbf{u}_a^h(k) [\mathbf{u}_s^h(k) - \mathbf{u}_a^h(k) \alpha(k-1)],$$

[0117] 상기 [수학식 23]에서 $p(k)$ 는 현재 측정값과 이전 추정값에 부여되는 상대 가중치일 수 있다.

[0118] [수학식 23]에서 $p(k)$ 는 하기의 [수학식 24]로 표현될 수 있다.

[0119] [수학식 24]

$$[0120] \quad p(k) = \frac{p(k-1)}{1 + p(k-1) [\mathbf{u}_a^h(k)]^2}$$

[0121] 추정된 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 제1 변위의 저주파 성분을 스케일하는데 사용하면, 상기 추정된 최종 변위는 하기의 [수학식 25]로 표현될 수 있다.

[0122] [수학식 25]

$$[0123] \quad \mathbf{u}^*(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{u}_s^l(k) + \mathbf{u}_a^h(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{C}_L \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}\}^T + \mathbf{C}_H \mathbf{a},$$

[0124] 전형적으로, 스트레인 센서들(20a~20m)이 스트레인을 측정하는 샘플링 주파수는 가속도 센서(30)가 가속도를 측정하는 샘플링 주파수에 비하여 작을 수 있다. 따라서 스트레인으로부터 변형된 제1 변위는 가속도 센서(30)의 샘플링 주파수와 매치하기 위하여 삼차 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 사용하여 업-샘플링된다. 또한 나이퀴스트 차단 주파수를 가지는 로우-패스 버터워스(Butterworth) 필터가 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 추정하기 전에, 제1 변위의 제1 고주파 성분과 제2 변위의 제2 고주파 성분에 적용될 수 있다.

[0125] 상술한 [수학식 1] 내지 [수학식 25]를 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법에서

는 변위 추정에 있어서 RLS 알고리즘을 사용하여 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 주파수 도메인이 아닌 시간 도메인에서 추정할 수 있고, 상기 추정된 변위 및 추정된 스케일링 팩터가 고유 주파수의 정확성에 의한 영향을 받지 않으므로 교량의 변위를 보다 정확히 추정할 수 있다.

- [0126] 도 5는 도 2의 교량의 변위를 추정하는 방법을 보다 상세히 나타내는 흐름도이다.
- [0127] 도 5에서는 도 2의 각 단계에서 측정 또는 산출되는 파라미터들을 함께 도시하였다.
- [0128] 도 5에서는 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 추정하고(S320), 추정된 스케일링 팩터($\alpha(k)$)를 이용하여 제1 변위의 저주파 성분을 스케일링하는(S325) 단계가 더 포함된다.
- [0129] 도 6a는 본 발명의 변위를 추정하는 방법이 적용되는 샘플 교량을 나타내고, 도 6b는 샘플 교량의 단면의 크기를 나타낸다.
- [0130] 도 6a를 참조하면, 샘플 교량(50)은 10m의 길이를 가지고, 기준점으로부터 제1 방향(D1)으로 2m, 5m, 8m 이격된 지점에 스트레인 센서들(strain gage)이 쌍으로 설치되고, 5m 이격된 지점(60)에 가속도 센서(accelerometer)가 설치된다. 5m 이격된 지점(60)에서의 샘플 교량(50)의 변위가 추정된다. 도 6a에서 참조 번호(110)는 그라운드 여기 신호를 나타낸다.
- [0131] 도 7은 도 6a의 샘플 교량에 인가되는 그라운드 여기 신호들을 나타낸다.
- [0132] 도 7을 참조하면, 서로 다른 가속도를 가지는 그라운드 여기 신호들(121, 122, 123)이 샘플 교량(50)에 인가된다.
- [0133] 도 8a 내지 도 8c는 각각 도 6a 샘플 교량에 도 7의 그라운드 여기 신호들이 인가될 때의 추정된 변위를 나타낸다.
- [0134] 도 8a 내지 도 8c를 참조하면, 도 6a의 샘플 교량(50)에 도 7의 그라운드 여기 신호들이 인가될 때, 본 발명의 실시예들에 따라서 된 샘플 교량(50)의 변위를기준 변위(Reference) 및 기존의 방법이 적용될 때의 추정된 변위(PSD)를 함께 나타낸다.
- [0135] 기존의 방법은 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density (SPD)) 스킴을 적용한 것으로 가정한다.
- [0136] 도 8a 내지 도 8c를 참조하면, 그라운드 여기 신호의 가속도의 변화가 증가할수록 본 발명의 실시예들에 따른 변위 추정 방법에 의하여 추정된 변위와 기준값(Reference)과의 차이가 SPD 스킴과 기준값과의 차이보다 작아짐을 알 수 있다.
- [0137] 도 9는 본 발명의 변위 추정 방법이 적용될 수 있는 단면의 크기가 변화하는 다양한 샘플 교량의 예들을 나타낸다.
- [0138] 도 10은 도 9의 제1 샘플 교량에 본 발명의 변위 추정 방법에 적용되는 경우에 실제 모드 형상(mode shape)과 추정된 모드 형상의 차이를 나타낸다.
- [0139] 도 9 및 도 10을 참조하면, 교량의 단면이 제1 샘플 교량(I)과 같이 변화하는 경우에 1차 내지 및 2차(131, 133)에서 실제 모드 형상과 추정된 모드 형상의 차이가 거의 없고, 2차(132)에서 실제 모드 형상과 추정된 모드 형상 사이에 차이가 있음을 알 수 있다.
- [0140] 도 11은 본 발명의 실시예들에 따른 변위 추정 방법을 실제 교량에 적용한 결과를 나타낸다.
- [0141] 도 11을 참조하면, 특정 시간대(13~17초 사이)에서 본 발명의 실시예들에 다른 변위 추정 방법에 의하여 추정된 변위가 기준값(Reference)과 매우 유사한데 반하여 기존의 방법(PSD technique)과 기준값(Reference)은 차이가 있음을 알 수 있다.
- [0142] 도 12는 본 발명의 실시예들에 따른 교량의 변위를 추정하는 방법을 수행하는 전자 장치를 나타낸다.
- [0143] 도 1 및 도 12를 참조하면, 교량의 변위를 추정하는 전자 장치(200)는 통신부(210), 제어부(220) 및 디스플레이부(230)를 포함할 수 있다.
- [0144] 통신부(210)는 교량(10)의 제1 방향(D1)의 복수의 지점들(x_1, x_2, \dots, x_m) 각각에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들(20a, 20b, ..., 20m)로부터 스트레인(STS)을 수신하고, 기준점(RP)으로부터 제1 방향(D1)으로 제1 거리(x_d)만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서(30)로부터 가속도(ACS)를 수신한다.

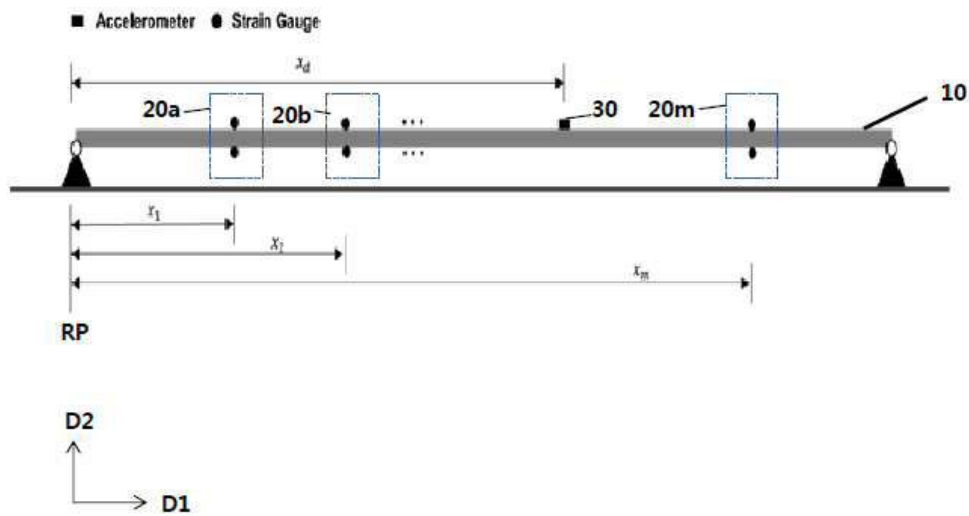
- [0145] 구체적으로, 상기 통신부(210)는 전자 장치(300)와 무선 통신 시스템 사이 또는 전자 장치(300)와 전자 장치(300)가 위치한 네트워크 사이의 무선 통신을 가능하게 하는 하나 이하의 모듈을 포함할 수 있다. 예를 들어, 통신부(310)는 방송 수신 모듈, 이동통신 모듈, 무선 인터넷 모듈, 근거리 통신 모듈 및 위치정보 모듈 등을 포함할 수 있다.
- [0146] 방송 수신 모듈은 방송 채널을 통하여 외부의 방송 관리 서버로부터 방송 신호 및/또는 방송 관련된 정보를 수신한다. 상기 방송 채널은 위성 채널, 지상파 채널을 포함할 수 있다. 상기 방송 관리 서버는, 방송 신호 및/또는 방송 관련 정보를 생성하여 송신하는 서버 또는 기 생성된 방송 신호 및/또는 방송 관련 정보를 제공받아 단말기에 송신하는 서버를 의미할 수 있다. 상기 방송 신호는, TV 방송 신호, 라디오 방송 신호, 데이터 방송 신호를 포함할 뿐만 아니라, TV 방송 신호 또는 라디오 방송 신호에 데이터 방송 신호가 결합한 형태의 방송 신호도 포함할 수 있다.
- [0147] 상기 방송 관련 정보는, 방송 채널, 방송 프로그램 또는 방송 서비스 제공자에 관련한 정보를 의미할 수 있다. 상기 방송 관련 정보는, 이동통신망을 통하여도 제공될 수 있다. 이러한 경우에는 상기 이동통신 모듈에 의해 수신될 수 있다.
- [0148] 이동통신 모듈은, 이동 통신망 상에서 기지국, 외부의 단말, 서버 중 적어도 하나와 무선 신호를 송수신한다. 상기 무선 신호는, 음성 호 신호, 화상 통화 호 신호 또는 문자/멀티미디어 메시지 송수신에 따른 다양한 형태의 데이터를 포함할 수 있다.
- [0149] 무선 인터넷 모듈은 무선 인터넷 접속을 위한 모듈을 말하는 것으로, 무선 인터넷 모듈은 전자 장치(300)에 내장되거나 외장될 수 있다. 무선 인터넷 기술로는 WLAN(Wireless LAN)(WiFi), Wibro(Wireless broadband), Wimax(World Interoperability for Microwave Access), HSDPA(High Speed Downlink Packet Access) 등이 이용될 수 있다.
- [0150] 근거리 통신 모듈은 근거리 통신을 위한 모듈을 말한다. 근거리 통신 기술로 블루투스(Bluetooth), RFID(Radio Frequency Identification), 적외선 통신(IrDA, infrared Data Association), UWB(Ultra Wideband), ZigBee, WiHD, WiGig 등이 이용될 수 있다.
- [0151] 위치정보 모듈은 전자 장치의 위치를 확인하거나 얻기 위한 모듈이다. 상기 위치정보 모듈의 대표적인 예로는 GPS(Global Position System) 모듈이 있다.
- [0152] 제어부(320)는 통신부(320)로부터 스트레인(STS)과 가속도(ACS)를 수신하고, 상술한 본 발명의 교량의 변위 추정 방법을 수행하여 최종 변위를 추정하고, 추정된 최종 변위를 디스플레이부(330)에 표시할 수 있다.
- [0153] 제어부(320)는 스트레인(STS)을 기초로 저주파 성분과 제1 고주파 성분을 포함하는 제1 변위를 산출하고, 상기 가속도(ACS)를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고, 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 최종 변위를 산출할 수 있다.

산업상 이용가능성

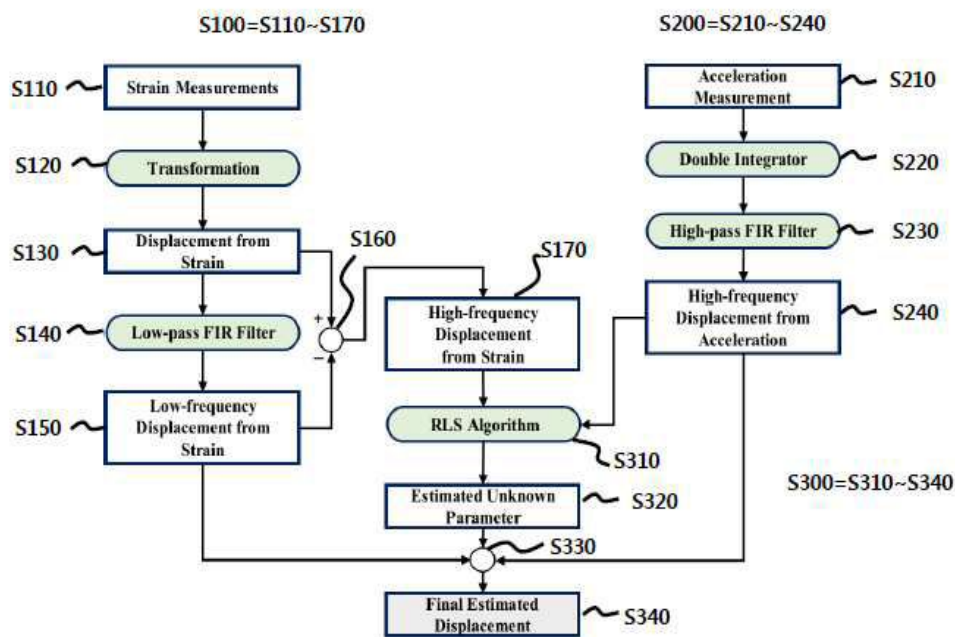
- [0154] 본 발명은 교량의 변위를 측정하는 방법 및 장치에 다양하게 사용될 수 있다.
- [0155] 상기에서는 본 발명의 실시예들을 참조하여 설명하였지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 하기의 특허청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 것이다.

도면

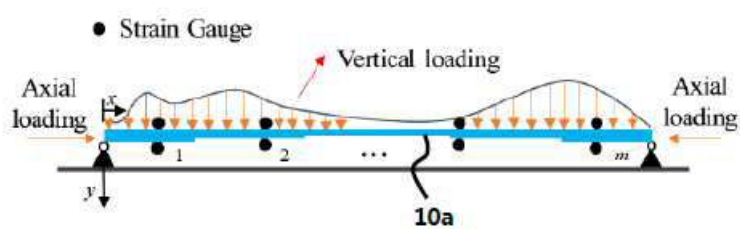
도면1



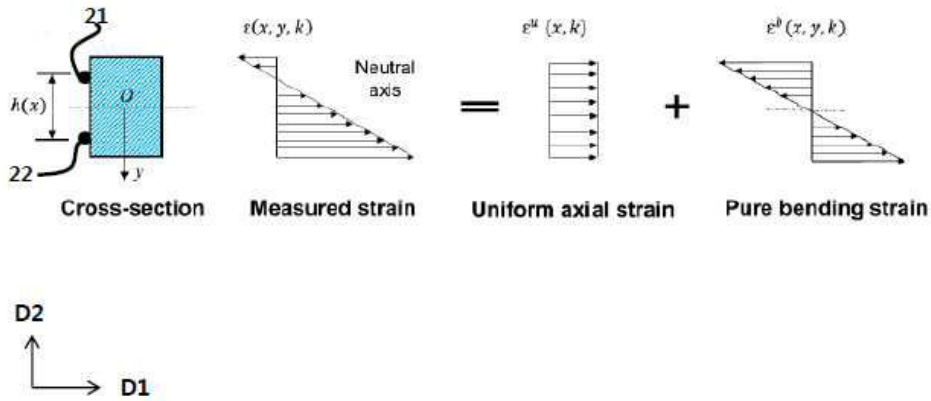
도면2



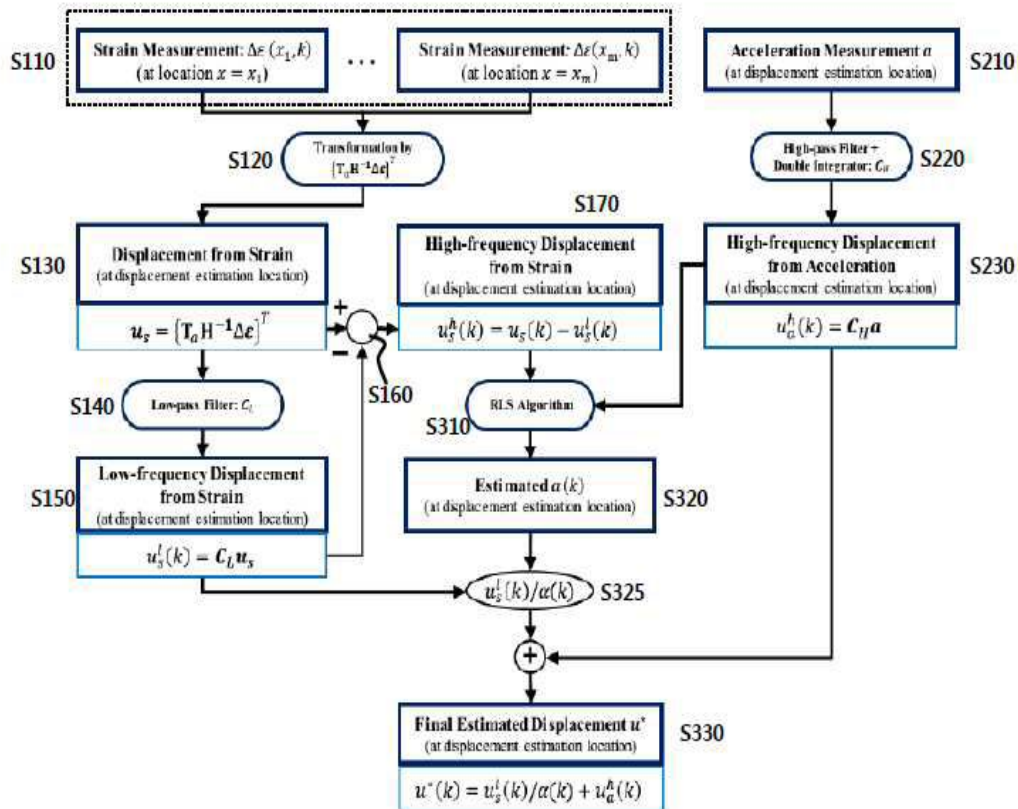
도면3



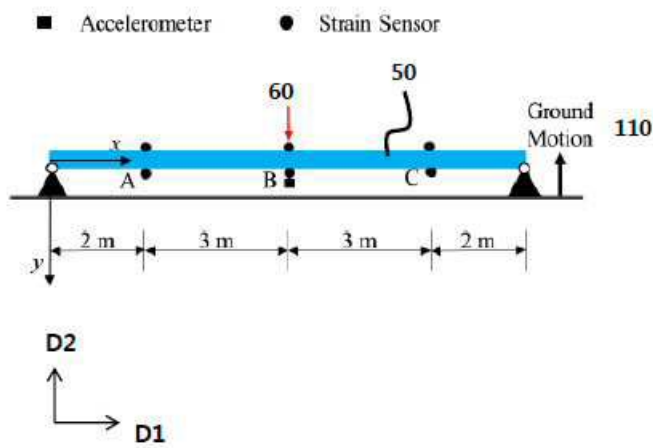
도면4



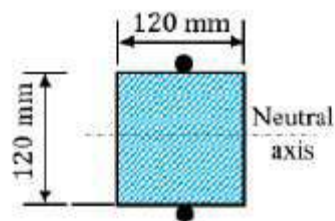
도면5



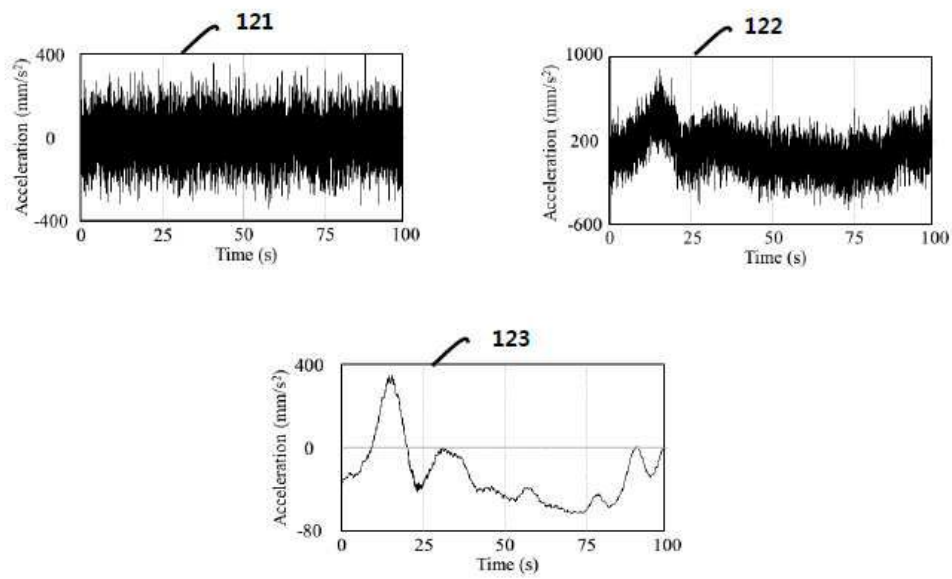
도면6a



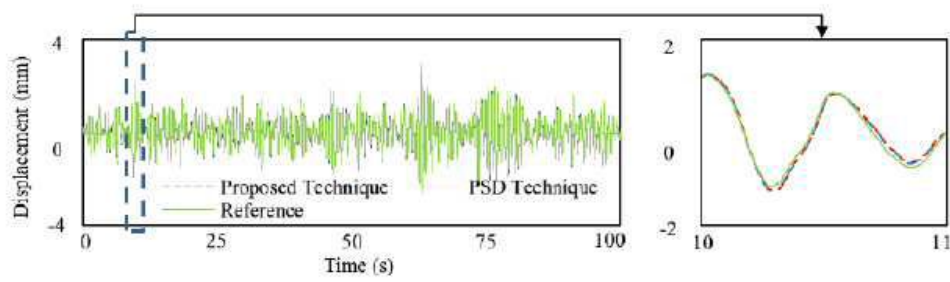
도면6b



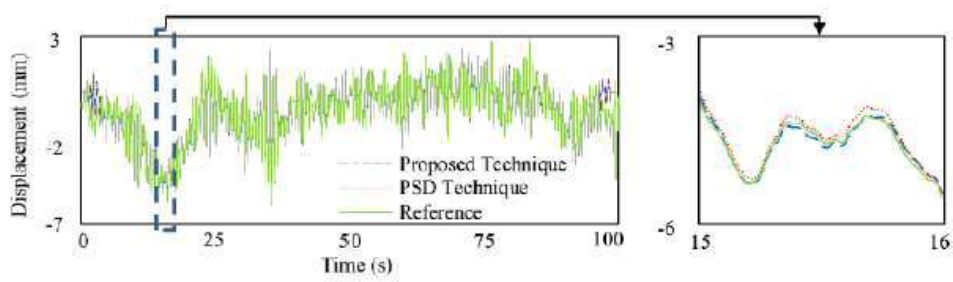
도면7



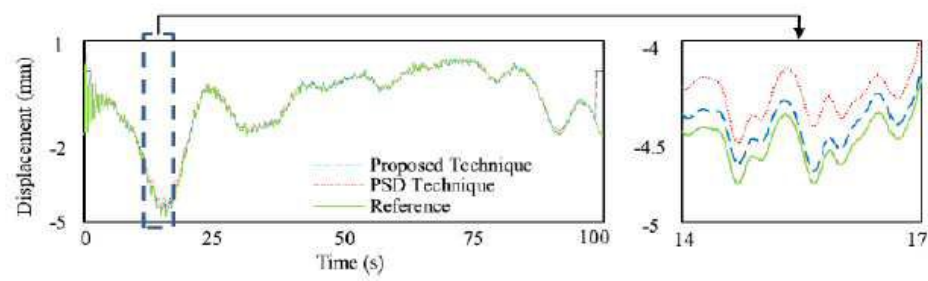
도면8a



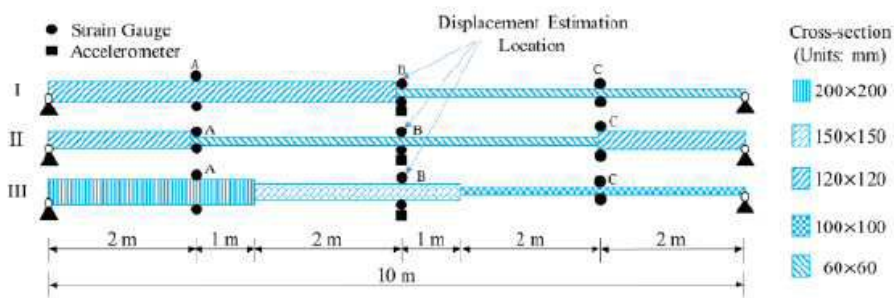
도면8b



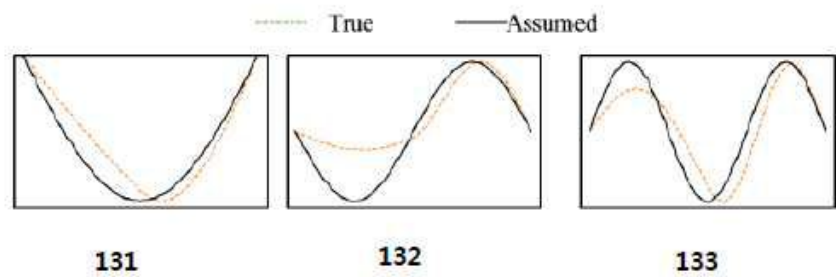
도면8c



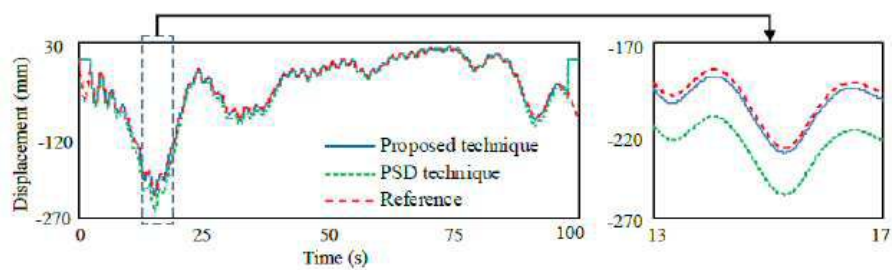
도면9



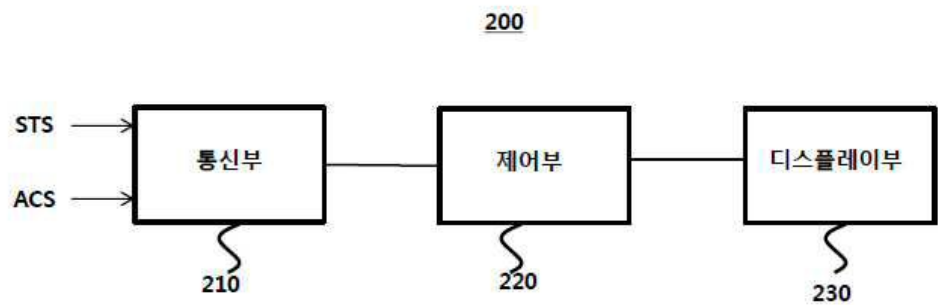
도면10



도면11



도면12



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 17

【변경전】

교량의 변위를 추정하는 전자 장치로서,

기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들 및 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서와 통신하고, 상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들로부터 측정된 스트레인과 상기 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 제공받는 통신부;

상기 통신부로부터 상기 스트레인과 상기 가속도를 수신하고, 상기 스트레인과 상기 가속도에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 추정하는 제어부; 및

상기 제어부로부터 상기 추정된 최종 변위를 제공받고, 상기 추정된 최종 변위를 표시하는 디스플레이부를 포함

하고,

상기 제어부는

상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하고, 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고, 상기 서브 변위들에 기초하여 제1 변위를 산출하고, 상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 상기 제1 고주파 성분을 획득하여 상기 스트레인을 기초로 상기 저주파 성분과 상기 제1 고주파 성분을 포함하는 상기 제1 변위를 산출하고,

상기 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고,

상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 최종 변위를 산출하는 전자 장치.

【변경후】

교량의 변위를 추정하는 전자 장치로서,

기준점으로부터 제1 방향의 복수의 지점들에서 상기 교량에 설치되는 복수의 쌍들의 스트레인 센서들 및 상기 기준점으로부터 상기 제1 방향으로 제1 거리만큼 이격된 제1 지점에 설치되는 가속도 센서와 통신하고, 상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들로부터 측정된 스트레인과 상기 가속도 센서로부터 측정된 가속도를 제공받는 통신부;

상기 통신부로부터 상기 스트레인과 상기 가속도를 수신하고, 상기 스트레인과 상기 가속도에 기초하여 상기 교량의 최종 변위를 추정하는 제어부; 및

상기 제어부로부터 상기 추정된 최종 변위를 제공받고, 상기 추정된 최종 변위를 표시하는 디스플레이부를 포함하고,

상기 제어부는

상기 복수의 쌍들의 스트레인 센서들에서 서브 스트레인들을 측정하고, 상기 측정된 서브 스트레인들을 서브 변위들로 변환하고, 상기 서브 변위들에 기초하여 제1 변위를 산출하고, 상기 제1 변위에 로우 패스 필터를 적용하여 상기 제1 변위의 저주파 성분을 획득하고, 상기 제1 변위에서 상기 저주파 성분을 감산하여 상기 제1 변위의 제1 고주파 성분을 획득하여 상기 스트레인을 기초로 상기 저주파 성분과 상기 제1 고주파 성분을 포함하는 상기 제1 변위를 산출하고,

상기 가속도를 기초로 제2 고주파 성분을 포함하는 제2 변위를 산출하고,

상기 제1 변위의 제1 고주파 성분과 상기 제2 변위의 제2 고주파 성분에 재귀적 최소 자승 알고리즘을 적용하여 상기 변위와 관련된 미지의 파라미터를 산출하고, 상기 미지의 파라미터, 상기 제1 변위의 저주파 성분 및 상기 제2 변위의 상기 제2 고주파 성분에 기초하여 상기 최종 변위를 산출하는 전자 장치.