



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0063308
(43) 공개일자 2020년06월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01B 21/32 (2006.01) E01D 21/00 (2006.01)
G01D 5/12 (2006.01) G01M 5/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01B 21/32 (2013.01)
E01D 21/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0143234
(22) 출원일자 2018년11월20일
심사청구일자 2018년11월20일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
신도형
서울특별시 강남구 삼성로 150 (대치동, 한보미도맨션) 210동 205호
이강혁
인천광역시 부평구 장제로156번길 20 (부평동, 부림맨션) 202호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인아이더스

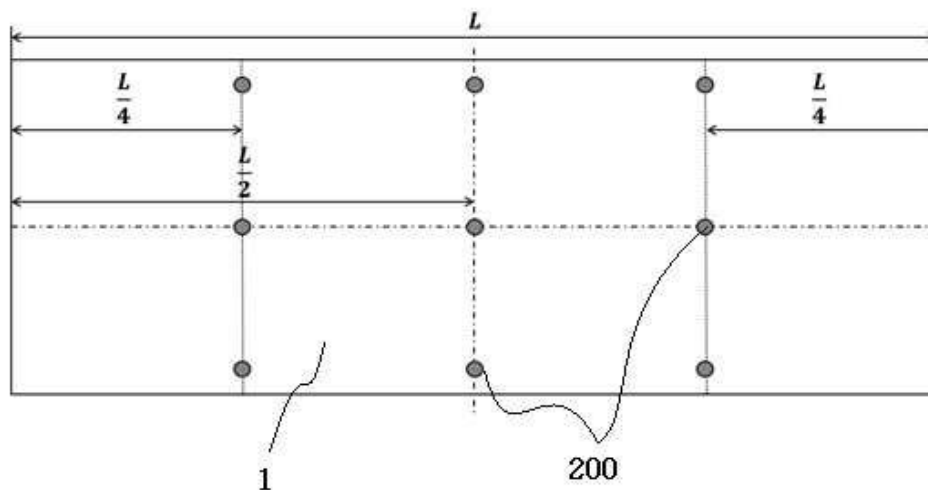
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법

(57) 요약

본 발명은 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법에 관한 것으로, 본 발명은 교량의 위험을 실시간으로 파악하기 위해 SHM 시스템을 통해 얻을 수 있는 PSC 교량의 작은 거동을 나타내는 가속도, 변위, 변형률 등의 교량 계측데이터를 이용해 텐던의 손상을 추정할 수 있도록, 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 제1단계; 상기 교량 계측데이터를 '비 손상 상태' 데이터로 간주하여 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 생성하는 제2단계; 상기 교량 계측부로부터 실시간으로 계측되는 교량 계측데이터가 입력되면 텐던 손상 추정모델을 통해 '비 손상 상태' 데이터인지를 판단하여 교량 텐던의 손상 여부를 파악하는 제3단계;를 포함하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법을 제공한다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G01D 5/12 (2013.01)

G01M 5/0041 (2013.01)

(72) 발명자

박주환

경기도 안산시 단원구 고잔로 115(고잔동, 안산 센트럴 푸르지오) 104동 1104호

정민웅

경기도 부천시 길주로 262 (중동, 이안 더클래식) B동 902호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1615010075

부처명 국토교통부

연구관리전문기관 국토교통과학기술진흥원

연구사업명 건설기술연구

연구과제명 중소 노후교량 성능평가 기술개발 및 개선방안 제시

기 여 율 1/1

주관기관 한국시설안전공단

연구기간 2018.01.01 ~ 2018.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

교량에 설치되어 교량의 거동을 계측하는 교량 계측부로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 제1단계;

상기 교량 계측데이터를 '비 손상 상태' 데이터로 간주하여 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 생성하는 제2단계;

상기 교량 계측부로부터 실시간으로 계측되는 교량 계측데이터가 입력되면 텐던 손상 추정모델을 통해 '비 손상 상태' 데이터인지를 판단하여 교량 텐던의 손상 여부를 파악하는 제3단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 제1단계는 교량의 상판에 설정 간격으로 배치되어 교량의 거동을 계측하는 복수의 교량 계측부로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 단계인 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 제2단계에서 교량 계측데이터의 수집은 교량 상판에 하나 이상의 센서로 이루어지는 교량 계측부를 설치하는 순간부터 초기 1 ~ 2년간 계측되는 교량 계측데이터를 '비 손상 상태'의 데이터로 간주하는 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 교량 계측부는 교량의 거동을 나타내는 데이터 또는 환경의 변화를 나타내는 데이터를 계측하는 하나 이상의 센서인 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 교량 계측부는 가속도센서를 포함하는 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 6

제 1항에 있어서,

상기 제3단계는 실시간으로 확보되는 교량의 거동 데이터를 평균 제곱 오차(Mean Square Error)를 이용해 오차

를 구해 설정된 경계값(threshold) 보다 높은 값이 나타나게 되면 '손상 상태'로, 경계값(threshold) 이내의 값으로 나타나면 '비 손상 상태'로 판단하는 단계인 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

청구항 7

제 1항에 있어서,

상기 제2단계 이후에, 상기 텐던 손상 추정모델은 정기점검 또는 안전진단을 통한 교량의 상태점검시 계속되는 교량 점검데이터를 반영한 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 업데이트하는 제4단계;를 더 수행하는 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 교량의 위험을 실시간으로 파악하기 위해 오토인코더(auto-encoder)를 이용한 딥러닝 기반의 PSC 교량 텐던의 손상을 추정하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 노후교량의 증가와 함께 노후된 PSC(PreStressed Concrete) 교량의 텐던(Tendon) 부식으로 인한 텐던 손상 사례가 전세계적으로 다수 보고되고 있으며, 심지어는 텐던의 부식으로 교량의 붕괴까지 이어져 큰 인명 피해를 입힌 사례도 있다.

[0003] 이에 노후교량의 증가와 함께 PSC 교량의 유지관리에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 경우 PSC 교량의 가장 중요한 구조 요소는 긴장된 텐던의 손상 여부를 파악하는 것이 PSC 교량 안전 확보에 가장 중요하다.

[0004] 이러한 실제 PSC 교량의 텐던 파단 사례들을 종합하여 보면, 텐던 파단 전 사전 징후가 육안검사 및 여러 점검 결과에 나타나지 않았다는 특징이 있으며, 이에 따라, 교량 붕괴 사고를 막고 교량 사용자의 안전을 보장하기 위해 텐던의 손상을 실시간으로 알아내는 것이 필요하다.

[0005] 한편, 상시적으로 구조물의 손상 파악을 위하여 SHM(Structural Health Monitoring)을 이용한 구조물 거동 데이터가 활용되는 추세이며, 이와 관련하여 등록특허 제10-0947042호 등이 제안된 바 있다.

[0006] 하지만 PSC 교량은 큰 하중이 재하되어도 안정성 및 사용성에 영향을 주지 않도록 설계되어 구조물의 거동 변화가 눈에 띄지 않는다. 예를 들어, 실제 많은 차량이 교량 위에 위치해 있거나 심지어 텐던이 끊어지더라도 SHM 시스템을 통한 흔들림, 처짐 등의 교량의 거동이 눈에 띄게 측정 되지 않는 한계가 있다.

[0007] 특히, 긴장된 텐던의 손상을 상시 파악하는 것은 쉽지 않으며, 특히 텐던이 내부에 위치하면 이러한 파악은 더욱 어려워진다.

[0008] 또한, 비록 PSC 교량의 구조적 안전성이 확보되어 당장은 큰 사고가 일어나지 않을지라도, 교량의 텐던이 끊어지게 되면 교량의 내하력이 비대칭으로 분포되므로 하중의 쏠림 현상으로 인한 위험 단면의 이동, 중립축의 변화 등과 같은 잠재적인 위험요소를 내포하게 된다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 참고문헌 1: 등록특허 제10-0947042호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 따라서, 본 발명은 이러한 문제점들을 해결하기 위한 것으로서, 본 발명은 교량의 위험을 실시간으로 파악하기 위해 SHM 시스템을 통해 얻을 수 있는 PSC 교량의 작은 거동을 나타내는 가속도, 변위, 변형률 등의 교량 계측 데이터의 오토인코더(auto-encoder) 학습을 통해 텐던의 손상을 추정할 수 있는 딥러닝 기반의 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0011] 이와 같은 기술적 과제를 해결하기 위해 본 발명은;
- [0012] 교량에 설치되어 교량의 거동을 계측하는 교량 계측부로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 제1단계; 상기 교량 계측데이터를 '비 손상 상태' 데이터로 간주하여 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 생성하는 제2단계; 상기 교량 계측부로부터 실시간으로 계측되는 교량 계측데이터가 입력되면 텐던 손상 추정모델을 통해 '비 손상 상태' 데이터인지를 판단하여 교량 텐던의 손상 여부를 파악하는 제3단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법을 제공한다.
- [0013] 이때, 상기 제1단계는 교량의 상판에 설정 간격으로 배치되어 교량의 거동을 계측하는 복수의 교량 계측부로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 단계인 것을 특징으로 한다.
- [0014] 그리고, 상기 제2단계에서 교량 계측데이터의 수집은 교량 상판에 하나 이상의 센서로 이루어지는 교량 계측부를 설치하는 순간부터 초기 1 ~ 2년간 계측되는 교량 계측데이터를 '비 손상 상태'의 데이터로 간주하는 것을 특징으로 한다.
- [0015] 아울러, 상기 교량 계측부는 교량의 거동을 나타내는 데이터 또는 환경의 변화를 나타내는 데이터를 계측하는 하나 이상의 센서인 것을 특징으로 한다.
- [0016] 또한, 상기 교량 계측부는 가속도센서를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0017] 아울러, 상기 제3단계는 실시간으로 확보되는 교량의 거동 데이터를 평균 제곱 오차(Mean Square Error)를 이용해 오차를 구해 설정된 경계값(threshold) 보다 높은 값이 나타나게 되면 '손상 상태'로, 경계값(threshold) 이내의 값으로 나타나면 '비 손상 상태'로 판단하는 단계인 것을 특징으로 한다.
- [0018] 그리고, 상기 제2단계 이후에, 상기 텐던 손상 추정모델은 정기점검 또는 안전진단을 통한 교량의 상태점검시 계측되는 교량 점검데이터를 반영한 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 업데이트하는 제4단계;를 더 수행하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0019] 본 발명에 따르면, 교량의 거동을 계측하는 교량 계측부로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하여 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 텐던 손상 추정모델을 생성하고 이를 이용해 실시간으로 계측되는 교량 계측데이터로 교량 텐던의 손상 여부를 파악함으로써 PSC 교량 손상탐지를 보다 효율적이고 효과적으로 수행할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0020] 도 1은 본 발명에 따른 PSC 교량의 텐던 손상 추정을 위한 일반적인 오토인코더(auto-encoder)의 구조도이다.
- 도 2는 본 발명에 따른 PSC 교량의 텐던 손상 추정 개요도이다.
- 도 3은 본 발명에 따른 PSC 교량의 텐던 손상 추정을 위한 센서의 교량 위치 예를 도시한 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 본 발명에 따른 PSC 교량의 텐던 손상 추정시 에러(error) 적용을 위한 가우스 분포(gaussian distribution)의 표준편차가 50%일 때의 검증 결과도이다.
- 도 5는 본 발명의 본 발명에 따른 PSC 교량의 텐던 손상 추정시 가우스 분포(gaussian distribution)의 표준편차를 조정하여 오차를 적용한 데이터들로 학습된 각 오토인코더(auto-encoder)들의 정확도 및 경계값

(threshold)을 도시킨 표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0021] 이하, 본 발명에 따른 오토인코더를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법을 첨부한 도면을 참고로 하여 상세히 기술되는 실시 예에 의하여 그 특징들을 이해할 수 있을 것이다.
- [0022] 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니 되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.
- [0023] 따라서, 본 명세서에 기재된 실시 예와 도면에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 일 실시 예에 불과할 뿐이고, 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 출원시점에 있어서 이들은 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형 예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다.
- [0024] 본 발명은 PSC(PreStressed Concrete) 교량을 구성하는 텐던의 손상을 추정하기 위해 도 1에 도시된 바와 같은 오토인코더(Auto-encoder)(100)를 사용된다. 이러한 오토인코더(Auto-encoder)(100)는 인공신경망의 비지도학습(Unsupervised Learning)을 이용한 딥러닝 기법으로, 이를 이용한 손상추정의 기본적 원리는 정상데이터로 학습된 모델에 비정상 데이터가 입력 값으로 들어왔을 때 이를 감지해내는 것이다.
- [0025] 이러한 일반적인 오토인코더(Auto-encoder)(100)는 인코더(Encoder)(110)와 디코더(Decoder)(120)로 구분된다. 상기 인코더(Encoder)(110)는 입력 데이터(Input data)의 차원축소를 통하여 데이터가 가지는 일반적인 특성으로 변화시키는 것이고, 디코더(Decoder)(120)는 해당 특성을 기초하여 다시 입력값으로 변환시키는 역할을 한다.
- [0026] 이러한 오토인코더(Auto-encoder)(100)는 다음과 같은 [식 1] 및 [식 2]를 통해 데이터를 변환한다.
- [0027] 디코더(Decoder) : $z = s(W'y + b')$ [식 1]
- [0028] 인코더(Encoder) : $y = s(Wx + b)$ [식 2]
- [0029] 여기서 x 는 input vector이고, y 는 인코더(Encoder)로 계산된 latent vector이고, z 는 디코더(Decoder)로 계산된 reconstructed vector이고, w, w' 는 인코더(Encoder) 및 디코더(Decoder)의 weight matrix이고, b, b' 은 인코더(Encoder) 및 디코더(Decoder)의 bias vector이다.
- [0030] 본 발명에서는 이러한 오토인코더(Auto-encoder)(100)의 정확도를 판별할 수 있는 loss 함수로는 평균 제곱 오차(Mean Square Error)를 이용하였으며 이는 다음의 [식 3]과 같다.
- [0031]
$$L(x_i, z_i) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (z_i - x_i)^2}$$
 [식 3]
- [0032] 여기서 x_i 는 input vector의 i 번째 요소이고, z_i 는 reconstruction vector의 i 번째 요소이며, N 은 input vector의 총 요소 개수이다.
- [0033] 본 발명에서는 loss를 기반으로 손실함수를 최적화하기 위한 방법으로 일반적인 역전파(Backpropagation) 알고리즘을 이용하며, 경사법(gradient method)으로는 다음과 같은 RMSPROP 최적화(optimization) 기법[식 4] 및 [식 5]를 활용하였다.
- [0034] $E[g^2]_t = \gamma E[g^2]_{t-1} + (1 - \gamma)g_t^2$ [식 4]
- [0035]
$$\Delta w_t = -\frac{\eta}{\sqrt{E[g^2]_t + L(x_i, z_i)}} g_t$$
 [식 5]
- [0036] 여기서 g_t 는 t 시간의 gradient vector이고, $E[g^2]_{t-1}$ 는 g_{t-1}^2 의 기대값을 나타내는 vector이고, γ 는 decay parameter(본 발명에서는 0.9 이용)이고, Δw_t 는 weight의 변화량이며, η 는 learning rate(본 발명에서는 0.001 이용)이다.

- [0037] 이러한 식들을 통해 구동되는 오토인코더(Auto-encoder)(100)를 기반으로 하는 그룹 분류를 쉽게 설명하면 아래와 같다. 예를 들어, A, B 두 그룹에 대한 데이터가 존재한다고 가정하면, A그룹 데이터로 오토인코더(Auto-encoder)(100)를 학습하게 되면 해당 오토인코더(Auto-encoder)(100)의 인코더(encoder)(110)와 디코더(decoder)(120)는 A그룹 데이터의 특성을 뽑고 그 특성을 통해 A그룹 데이터를 복원하는데 최적화된다.
- [0038] 따라서, 만약 오토인코더(Auto-encoder)(100)의 입력 데이터(input data)로 B그룹의 데이터가 들어오게 되면, 해당 오토인코더(Auto-encoder)(100)는 데이터의 복원이 원활하게 되지 않게 되므로, 오토인코더(Auto-encoder)(100)를 통해 해당 데이터를 A그룹이 아니라고 판정할 수 있다.
- [0039] 본 발명에서는 이러한 성질을 이용하여 오토인코더(Auto-encoder)(100)를 통해 교량의 손상 여부를 판정할 수 있다. 이에 이하에서는 이러한 오토인코더(Auto-encoder)를 이용한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 과정을 설명한다.
- [0040] 도 2를 참고하면, 본 발명에 따른 텐던 손상 추정방법은, 교량에 설치되어 교량의 거동을 측정하는 복수의 교량 계측부(200)로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 제1단계(데이터 수집 단계); 상기 교량 계측데이터를 '비 손상 상태' 데이터로 간주하여 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 생성하는 제2단계(텐던 손상 추정모델 생성 단계); 상기 교량 계측부(200)로부터 실시간으로 측정되는 교량 계측데이터가 입력되면 텐던 손상 추정모델을 통해 '비 손상 상태' 데이터인지를 판단하여 교량 텐던의 손상 여부를 파악하는 제3단계(텐던 손상 판단 단계);를 포함한다.
- [0041] 이하, 본 발명의 각 단계를 구체적으로 설명한다.
- [0042] 제1단계(데이터 수집 단계)는 교량의 상판(1)에 설정 간격으로 배치되어 교량의 거동을 측정하는 교량 계측부(200)로부터 설정기간 동안 교량 계측데이터를 수집하는 단계로서, 이는 초기 텐던 손상 추정모델을 생성하기 위해 데이터의 수집이 필요하며 해당하는 교량 계측데이터는 최소 1년 이상의 장기간의 데이터를 축적해야한다.
- [0043] 특히, 본 발명에서는 교량의 텐던에 손상이 있을 때 생긴 데이터를 '손상 상태'의 데이터로 정의하고, 교량의 텐던 손상이 없을 때의 데이터를 '비 손상 상태'의 데이터로 정의한다.
- [0044] 이 경우 교량 상판(1)에 하나 이상의 센서로 이루어지는 교량 계측부(200)를 설치하는 순간부터 초기 1 ~ 2년간의 교량 계측데이터를 '비 손상 상태'의 데이터로 간주한다. 이러한 교량 계측데이터는 교량 손상 탐지를 위한 오토인코더(Auto-encoder)의 학습에 이용한다. 이는 실제 교량이 설치되었을 때 얻을 수 있는 초기의 교량 계측데이터를 교량이 가장 건강한 상태로 가정하기 위함이다.
- [0045] 이러한 하나 이상의 센서로 이루어지는 교량 계측부(200)의 구비 위치는 일 예로 도 3에 도시된 바와 같다. 이에 의하면 교량 계측부(200)는 예를 들어 교량 상판(1)의 하부 9곳에 설치될 수 있으며, 이 경우 교량 상판(1)의 길이방향 1/4, 2/4, 3/4 위치의 중앙과 양측 가장자리에 설치될 수 있다.
- [0046] 이때, 교량 계측부(200)는 교량의 다양한 거동 및 환경에 관한 계측데이터를 감지하기 위해 하나 이상의 센서로 이루어진다. 이때, 교량에서 수집되는 교량 계측데이터는 가속도, 변형률, 변위 등의 교량의 거동을 나타내는 데이터와 온도, 풍하중 등 환경의 변화를 나타내는 데이터일 수 있으며, 이들 교량 계측데이터의 종류는 하나 이상이 함께 이용될 수 있다. 물론, 추후 실시간으로 측정되는 데이터 역시 센서 위치, 데이터 형식도 동일하게 유지해야 함은 당연하다.
- [0047] 이러한 교량 계측부(200)는 교량 계측데이터 측정을 위해 하나 이상의 가속도센서, 변위센서, 온도센서 등을 가급적 설치 및 해체가 쉬운 교량의 상판(1) 하부에 설치하는 것이 바람직하지만, 교량에 따라 그 설치 위치는 다양하게 설치해도 무방하나 적어도 9곳 이상 설치하며, 가속도 센서는 포함하는 것이 바람직하다.
- [0048] 한편, 제2단계(텐던 손상 추정모델 생성 단계)에서는 제1단계(데이터 수집 단계)를 통해 수집된 초기 1 ~ 2년간의 교량 계측데이터를 이용해 오토인코더(Auto-encoder)의 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터의 패턴을 가진 데이터만을 잘 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 생성한다.
- [0049] 다음으로 제3단계(텐던 손상 판단 단계)는 학습된 오토인코더(Auto-encoder) 모델인 텐던 손상 추정모델을 이용하여 실시간으로 교량의 거동을 나타내는 교량데이터를 확보하여 텐던 손상을 추정한다.
- [0050] 이때, 학습된 오토인코더(Auto-encoder) 모델인 텐던 손상 추정모델을 이용하여 실시간 교량데이터를 복원하게 되는데, 교량의 손상이 생기게 되면 '비 손상 상태'의 데이터의 패턴과 다른 실시간 데이터가 취득되게 된다. 이때, 오토인코더(Auto-encoder)는 손상 상태의 데이터를 학습하지 않아 이를 잘 복원하지 못하므로 전술한 오

토크인코더(Auto-encoder)의 [식 3]을 통해 얻을 수 있는 오차가 커지게 되고, 이러한 오차가 커지게 되면 교량의 상태가 변화(텐던의 손상)를 감지할 수 있다.

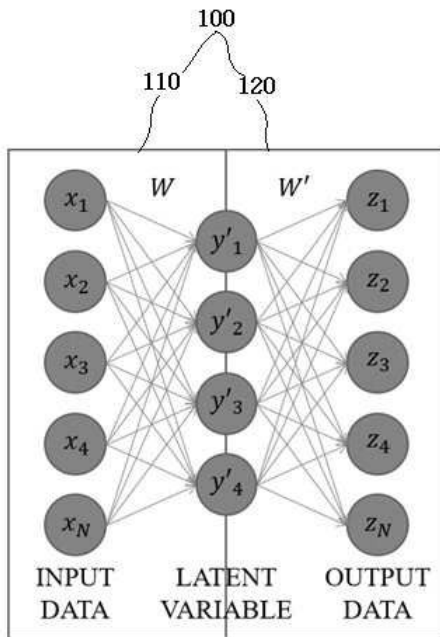
- [0051] 좀 더 구체적으로 설명하면, 실시간으로 확보되는 교량의 거동 데이터는 전술한 오토인코더(Auto-encoder)의 [식 3]에서 구성한 오토인코더(Auto-encoder)의 loss 함수(function)를 이용하여 오차를 구해낸다. 일반적으로는 오토인코더(Auto-encoder)를 학습시킨 '비 손상 상태'와 유사한 패턴의 실시간 교량 계측데이터가 확보된다면 loss는 학습의 가장 마지막 단계의 오차와 비슷한 수준의 오차를 나타내게 되며, 이러한 성질을 이용하여 '비손상 상태'와 '손상 상태'를 구분하는 경계값(threshold)을 설정한다.
- [0052] 상기 설정된 경계값(threshold)은 오토인코더(Auto-encoder)의 마지막 학습 오차를 기반으로 설정하며, 실시간 데이터가 학습된 오토인코더(Auto-encoder)에 입력값으로 활용될 때, 나타나는 loss가 설정된 경계값(threshold) 보다 높은 값이 나타나게 되면 '손상 상태'로, 경계값(threshold) 이내의 값으로 나타나면 '비 손상 상태'로 구분할 수 있다.
- [0053] 이에 교량에 손상이 생겨 교량의 거동이 변화되게 되면, '비손상 상태'의 데이터와 약간 다른 거동의 패턴을 나타내게 되며, 따라서 도 4와 같이 교량의 비손상 및 손상 상태의 데이터를 구분하여 판단할 수 있게 된다.
- [0054] 한편, 본 발명은 상기 제2단계(텐던 손상 추정모델 생성 단계)에서 생성된 텐던 손상 추정모델은 정기점검 또는 안전진단을 통한 교량의 상태점검시 계측되는 교량 점검데이터가 입력되면 교량 점검데이터를 반영한 오토인코더(Auto-encoder) 학습을 진행하여 '비 손상 상태' 데이터만을 복원할 수 있는 텐던 손상 추정모델을 업데이트하는 제4단계(텐던 손상 추정모델 업데이트 단계);를 더 수행한다.
- [0055] 즉, 추후 교량의 상태를 파악할 수 있는 정기점검 등의 안전점검이 진행된 뒤 실제 교량의 손상 여부를 실제로 파악할 수 있게되는데, 이때 손상이 진행되지 않았다면 초기 교량 계측데이터의 시점부터 정기점검이 진행된 시점까지를 기초데이터로 활용할 수 있다.
- [0056] 따라서, 교량 점검데이터 반영으로 더 많은 데이터의 패턴을 확인할 수 있으므로 텐던 손상 추정모델 업데이트로 인한 성능향상의 장점이 있다. 반면에 만약 손상이 진행되었다면, 안전점검의 진행 시점에서 부터 1 ~ 2년의 교량 계측데이터를 확보한 뒤 새로운 텐던 손상 추정모델의 학습을 진행하여야 하며, 이러한 교량 계측데이터로 학습된 텐던 손상 추정모델을 이용해 손상 이후의 추가적으로 교량의 손상 여부를 파악할 수 있다.
- [0057] 이상의 본 발명에서 제안한 PSC 교량의 텐던 손상 추정 방법의 검증을 위해 실제 교량에 인위적으로 손상을 발생시켜 이에 따른 실제 응답데이터를 확보하기는 사실상 불가능하다. 이에 서울의 PSC-I 교인 한남2교가교를 Midas/civil 해석 프로그램으로 모델링 하였으며 이에 대한 시뮬레이션 데이터를 검증에 활용하였다. 다양한 하중을 지닌 차량이 단 한 대 다양한 속도로 지나갈 때를 가정하여 생성되었으며, 이용된 데이터는 가속도 데이터이고 총 1,260개의 데이터를 사용하였다. 특히, 실제 데이터의 경우 많은 오차를 포함하고 있는데, 이와 비슷한 환경을 조성하기 위해 시뮬레이션 가속도 데이터에 인위적인 오차를 가우시안 오차(표준편차의 크기를 달리하여 단계를 달리함)에 기반하여 추가하고자 하였으며 오차에 따른 검증 결과도 확인하였다.
- [0058] 이러한 시뮬레이션을 통해 생성된 데이터 중 비손상 데이터만을 이용하여 오토인코더(Auto-encoder)를 학습하였으며, 테스트 데이터를 통하여 학습된 CNN 오토인코더(Auto-encoder)가 손상데이터와 비손상 데이터를 잘 구분하고 있는지 확인한 검증 결과는 도 5와 같다. 검증 결과, 손상 상태 및 비손상 상태의 데이터를 오차의 크기에 관계없이 약 99%의 정확도로 나누고 있음을 확인하였으며, 실제 데이터도 명확하게 차이나는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상대적으로 큰 50%의 오차가 존재할 때도 이러한 결과를 보였으므로, 오차가 존재할 여지가 있는 실제 공용중인 교량에서도 바로 적용이 가능하다.
- [0059] 특히, 오토인코더(Auto-encoder)의 검증 결과 데이터가 오차를 포함하여도 정확도가 크게 변동하지 않는 견고한(robustness) 결과를 보이고 있기 때문에 실제 공용으로 사용중인 교량에서도 안정된 성능을 보일 것으로 판단되며, 따라서 본 발명을 이용하게 되면 PSC 교량 손상탐지를 보다 효율적이고 효과적으로 수행할 수 있다.
- [0060] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 수정 및 변형 가능한 것으로, 본 발명의 보호범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

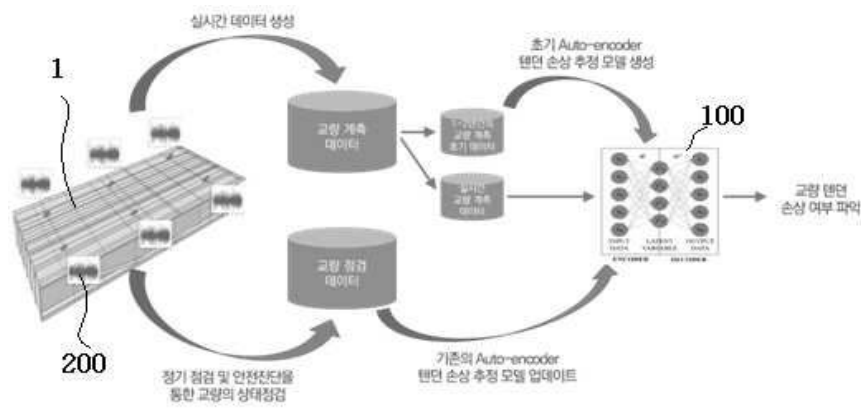
- [0061]
- | | |
|-------------------|--------------------------|
| 1: 교량 상판 | 100: 오토인코더(Auto-encoder) |
| 110: 인코더(Encoder) | 120: 디코더(Decoder) |
| 200: 교량 계측부 | |

도면

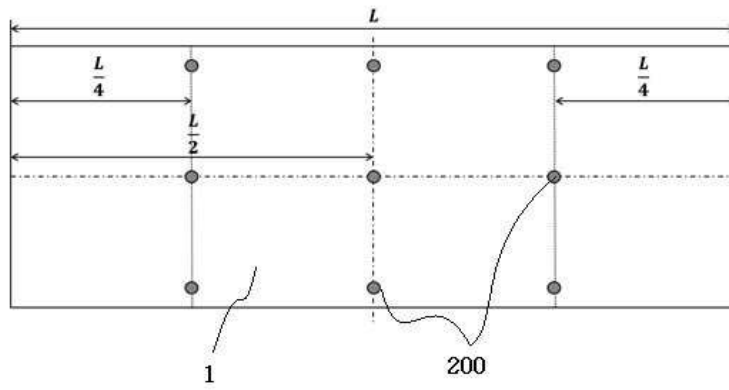
도면1



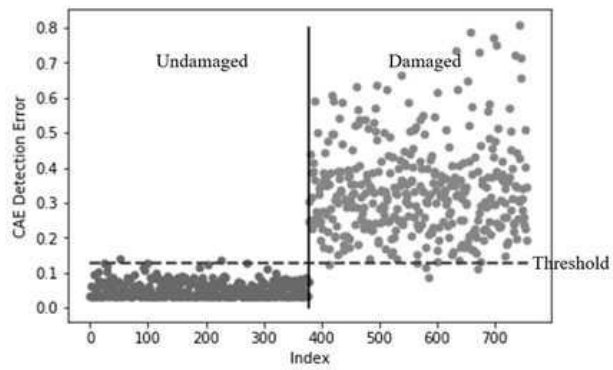
도면2



도면3



도면4



도면5

가속도계 오차 (Gaussian Distribution of Error)		Final epoch error	Threshold	Threshold rate	Accuracy
mean	Std				
No error		0.048	0.105	2.172	99.21
0	5%	0.049	0.136	2.806	99.74
0	10%	0.049	0.140	2.889	99.74
0	20%	0.050	0.098	1.946	99.47
0	30%	0.049	0.137	2.788	99.47
0	50%	0.050	0.128	2.570	99.07
				average	99.45