

출원번호통지서

출원일자 2022.06.13
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1060)
출원번호 10-2022-0071762 (접수번호 1-1-2022-0616232-64)
(DAS접근코드9030)
출원인명칭 한국과학기술원(3-1998-098866-1)
대리인성명 박영우(9-1998-000230-2)
발명자성명 손훈 **마잔시웅** 최재묵
발명의명칭 구조 변위 추정 방법 및 이를 위한 시스템

특허청장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터(☎ 1544-8080)에 문의하여 주시기 바랍니다.
※ 심사제도 안내 : <https://www.kipo.go.kr>-지식재산제도

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	1060
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	한국과학기술원
【특허고객번호】	3-1998-098866-1
【대리인】	
【성명】	박영우
【대리인번호】	9-1998-000230-2
【포괄위임등록번호】	2003-080694-6
【발명의 국문명칭】	구조 변위 추정 방법 및 이를 위한 시스템
【발명의 영문명칭】	Method of estimating displacement of structure and system for the same
【발명자】	
【성명】	손훈
【성명의 영문표기】	SOHN Hoon
【주민등록번호】	691005-1XXXXXX
【우편번호】	34141
【주소】	대전광역시 유성구 대학로 291, 한국과학기술원 (구성동)
【발명자】	
【성명】	마잔시웅

【성명의 영문표기】 MA Zhan Xiong

【주민등록번호】 930405-5XXXXXX

【우편번호】 34141

【주소】 대전광역시 유성구 대학로 291, 한국과학기술원 (구성동)

【발명자】

【성명】 최재묵

【성명의 영문표기】 CHOI Jae Muk

【주민등록번호】 870216-1XXXXXX

【우편번호】 34141

【주소】 대전광역시 유성구 대학로 291, 한국과학기술원 (구성동)

【출원언어】 국어

【심사청구】 청구

【공지예외적용대상증명서류의 내용】

【공개형태】 논문발표1

【공개일자】 2021.11.26

【공지예외적용대상증명서류의 내용】

【공개형태】 논문발표2

【공개일자】 2022.06.07

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 1315001656

【과제번호】 2019-M01S41-002-01010000-2021

【부처명】 행정안전부

【과제관리(전문)기관명】 한국지역정보개발원

【연구사업명】 인적재난기술개발사업

【연구과제명】 IoT기반 도심지 건설현장 상시안전 관리시스템 개발

【기여율】 1/1

【과제수행기관명】 한국전자통신연구원

【연구기간】 2021.01.01 ~ 2021.12.31

【취지】 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 박영우

(서명 또는 인)

【수수료】

【출원료】 0 면 46,000 원

【가산출원료】 68 면 0 원

【우선권주장료】 0 건 0 원

【심사청구료】 20 항 1,023,000 원

【합계】 1,069,000 원

【감면사유】 정부출연연구기관(50%감면)[1]

【감면후 수수료】 534,500 원

【첨부서류】 1. 공지에외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을 적용받기 위한 증명서류[논문발표1-2021]_1통 2. 공지에외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을 적용

받기 위한 증명서류[논문발표2-2022]_1통

1 : 공지에외적용대상(신규성상실의예외, _출원시의특례)규정을_적용받기_위한_증명
서류

[PDF 파일 첨부](#)

2 : 공지에외적용대상(신규성상실의예외, _출원시의특례)규정을_적용받기_위한_증명
서류

[PDF 파일 첨부](#)

【발명의 설명】

【발명의 명칭】

구조 변위 추정 방법 및 이를 위한 시스템{Method of estimating displacement of structure and system for the same}

【기술분야】

<0001> 본 발명은 구조 변위 추정 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 구조 변위 측정을 원하는 위치에 레이더와 가속도를 설치하고, 계측값을 융합하여 원하는 지점에서의 변위를 추정할 수 있는 방법에 관한 것이다.

【발명의 배경이 되는 기술】

<0002> 변위는 구조물의 거동 및 현 상태를 파악하는 데 중요한 정보로, 많은 국가에서 구조물의 안전 지표로 고려하고 있다. 외부 하중으로 야기되는 과도한 변위는 구조물의 안정성에 문제가 있음을 알려주는 1차 지표로 활용될 수 있고, 수치 모델을 개선하거나 손상을 추정하는 등 유지, 관리 및 보수에 활용할 수도 있다.

<0003> 그러나, 변위는 가속도 등의 물리량과는 달리 실제 구조물에서 측정이 어려워 변위 계측을 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer), LDV(Laser Doppler Vibrometer), 간접법 등의 다양한 방법들이 사용되고 있다.

<0004> 가장 보편적으로 사용되고 있는 LVDT는 코어의 기계적 변위와 출력전압이 비례하도록 설계되어 정확도가 높고 신뢰할 수 있다. 다만, LVDT는 센서를 설치할 고정점을 필요하므로, 실 구조물의 변위를 계측하기 위해 가구조물이 추가로 필요하고, 하천, 해상에 건설된 교량의 변위를 측정하기 어려운 문제가 존재한다. LDV는



비접촉식 센서로, 반사된 레이저광의 위상차를 이용해 구조물의 변위를 측정할 수 있다. 레이저광이 계측 지점의 표면에 수직으로 조사되어야 하므로 교량의 중심을 측정할 때, 측정지점의 바닥은 바다에 있어 센서 설치 지점을 찾기 어렵고, 장비가 매우 고가이므로 여러 지점에서의 변위를 동시에 계측하기에 부적합하다.

<0005> 간접법은 가속도와 같은 물리량을 변위로 변환하는 방법이다. 가속도를 측정하는 센서인 가속도계를 구조물에 설치하고, 측정 가속도를 이중 적분하여 변위를 쉽게 추정할 수 있다. 센서 설치를 위한 고정점이 필요하지 않고 비교적 저렴한 장점이 있는 반면, 측정 잡음으로 인하여 저주파 성분이 크게 증폭되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터 방법 등이 제안되었으나, 이러한 방법들은 실제 저주파 대역에서의 구조 변위와 노이즈를 명확히 구분하지 못하는 문제가 있어 여러 센서 데이터를 융합하는 방식이 제안되었다.

<0006> 한편, 레이더 센서를 이용한 구조물의 변위 측정 방법도 알려져 있다. 이 방법은 레이더 센서가 주파수 변조된 신호를 송신하고 물체에서 반사된 신호를 수신한 후 송수신된 신호 사이의 시간 지연으로부터 가시선(Light Of Sight: LOS) 방향으로 변위를 추정한다. 그런데, 종래의 레이더 기반 변위 추정 방법은 다음과 같은 두 가지 문제가 존재한다. 첫째, 레이더 센서는 변위 측정 대상 구조물 이외의 다른 고정점에 설치되어 그 구조물 상의 복수의 타겟을 탐지한다. 이 때 레이더 센서가 탐지한 각 타겟의 위치를 파악하여 구조 변위 추정에 가장 적합한 최적의 타겟을 선택하여야 하고, 레이더와 타겟 간의 가시선(LOS) 방향으로의 변위에서 진동방



향으로의 실제 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 추정하기 위해 초기 보정이 필요하다. 그런데 종래에는 이러한 작업이 자동화되지 못하고, 사용자에 의한 수동 방식으로 이루어졌다. 수동 방식의 초기 보정은 번거롭고, 변위 추정의 정확성과 신속성을 떨어뜨린다. 두 번째, 레이더 측정값에서 추출한 원시 위상이 $[-\pi, \pi]$ 범위를 벗어나면 위상 래핑(Phase Wrapping)이 발생하여 변위 추정이 부정확해진다. 위상 래핑은 특히 구조적 변위가 레이더 파장보다 클 때 심각한 문제가 될 수 있다.

【발명의 내용】

【해결하고자 하는 과제】

<0007> 본 발명의 목적은 계측 대상 구조물에 설치된 가속도계와 레이더 센서의 계측 정보를 함께 활용하여 변위 계측의 정확성을 높일 수 있는 구조물의 변위 추정 방법과 이를 위한 변위 추정 시스템을 제공하는 데 있다.

<0008> 본 발명의 과제들은 이상에서 언급한 과제들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

【과제의 해결 수단】

<0009> 상기한 목적을 달성하기 위하여 본 발명의 일 실시예에 따른 구조 변위 추정 방법은 컴퓨팅 장치에서 실행되는 컴퓨터 프로그램에 의해 수행되는 방법으로서, 상기 컴퓨터 프로그램은 상기 컴퓨팅 장치의 프로세서로 하여금 자동 초기 보정 단계와 구조 변위 모니터링 단계를 수행하도록 구성될 수 있다. 자동 초기 보정은 구



조물의 변위 측정 지점에 직접 설치된 레이더 및 가속도계로부터 각각 측정값을 수집하고, 상기 레이더가 감지한 복수의 후보 타겟들 중에서 하나의 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 상기 최적 타겟에 대한 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위에서 실제 진동 방향의 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 자동으로 산출할 수 있다. 구조 변위 모니터링은 상기 최적 타겟에 대한 레이더 측정값으로부터 추출한 위상에 상기 최종변환계수를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 상기 가속도계로 수집한 측정값을 이중적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출할 수 있다.

<0010> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 레이더를 이용한 측정과 상기 가속도계를 이용한 측정은 동일한 시간 동안 수행될 수 있다.

<0011> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 레이더를 이용한 측정과 상기 가속도계를 이용한 측정은 1분 이하로 수행될 수 있다.

<0012> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 레이더 및 상기 가속도계는 상기 구조물의 변위 측정 지점에 서로 근접하게 설치되어 측정값을 수집할 수 있다.

<0013> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 자동 초기 보정 단계는 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 레이더를 이용하여 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향으로의 초기 변위를 측정하고, 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하며, 상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 측정하고, 상기 가속도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하며, 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여



산출된 복수 개의 제1 변위 각각과 상기 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하고, 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 상기 최적 타겟으로 자동으로 결정하며, 상기 최적 타겟의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 상기 최적 타겟의 최종변환계수로 자동으로 산출할 수 있다.

<0014> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 복수 개의 변환계수 값은 0.5 이상 2.0 이하의 범위 내의 값일 수 있다.

<0015> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 구조 변위 추정 방법은, 상기 자동 초기 보정 단계에서 자동으로 결정된 상기 최적 타겟에 대해 상기 레이더 및 상기 가속도계를 이용한 변위 측정을 주기적으로 수행하는 것을 통해, 상기 구조 변위 모니터링 단계를 주기적으로 수행할 수 있다.

<0016> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 구조 변위 모니터링 단계는, 상기 레이더를 이용하여 상기 최적 타겟에 대하여 레이더 계측을 하여 원시 위상을 추출하고, 상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 계측하고 그 계측된 가속도를 이중 적분하여 상기 가속도 기반 변위를 산출하며, 상기 구조물의 상기 변위 측정 지점의 변위가 상기 레이더의 레이더 신호의 파장보다 커서 상기 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 계측된 상기 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가까운 언래핑 위상을 선택하고, 위상 래핑 문제가 없는 원시 위상 또는 위상 래핑 문제가 있어 언래핑 처리된 위상을 이용하여 상기 가시선 방향의 제3변위를 산출하며, 상기 가



시선 방향의 제3변위에 상기 최종변환계수를 적용하여 진동방향으로의 상기 레이더 기반 변위를 산출하고, 상기 가속도 기반 변위와 상기 레이더 기반 변위를 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터를 이용하여 융합하여 상기 최종 변위를 산출할 수 있다.

<0017>

예시적인 실시예에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하는 단계는, 상기 레이더 기반 변위에 대한 로우패스 필터링을 수행하여 레이더 기반 저주파 변위를 얻고, 상기 가속도 기반 변위에 대하여 하이패스 필터링을 수행하여 가속도 기반 고주파 변위를 얻으며, 상기 레이더 기반 저주파 변위와 상기 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출할 수 있다.

<0018>

예시적인 실시예에 있어서, 상기 언래핑 위상을 선택하는 단계는, (k-1)번째와 (k-2)번째 시간단계에서의 변위 및 (k-1)번째 가속도를 이용하여 k번째 시간단계에서의 예측변위(\hat{u}_k) 및 예측위상($\hat{\varphi}_k$)을 각각 식

$$\hat{u}_k = 2u_{k-1} - u_{k-2} + (\Delta t)^2 a_{k-1} \text{ 와 } \hat{\varphi}_k = 4\pi f_s \frac{\hat{u}_k}{\beta c} \text{ 을 이용하여 구하고,}$$

원시 위상의 $\pm 2p\pi$ 범위 내(단, p는 정수)에 존재하면서 상기 예측위상에서 가장

가까운 언래핑 위상을 식
$$\bar{\varphi}_k = \varphi_k + 2\pi \times \text{round}\left(\frac{\hat{\varphi}_k - \varphi_k}{2\pi}\right)$$
 으로 구하여 상기 레이더 기반 변위를 추정하는 데 이용될 위상으로 선택할 수 있다.

<0019>

예시적인 실시예에 있어서, 상기 최종 변위는, $u_k^* = C_H a + C_L u$ (C_H :



이중 적분 및 $(2M+1)$ 차 하이 패스 필터, a : 계측 가속도 벡터, C_L : $(2M+1)$ 차로우 패스 필터, u : 레이더 기반 변위 벡터)의 수식을 통해 산출할 수 있다.

<0020> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 레이더는 주파수 변조 연속 신호(Frequency Modulation Continuous Wave Radar Signal: FMCW) 밀리미터파 레이더이고, 상기 주파수 변조 연속 신호는 처프(chirp) 신호를 송신한 후, 타겟 후보군에서 반사된 신호를 수신하여, 송수신 신호 간 신호왕복시간을 이용하여 가시선 방향으로의 변위를 추정할 수 있다.

<0021> 본 발명의 다른 실시예에 따른 구조 변위 추정 시스템은, 구조물의 변위 측정 지점에 직접 설치되고, 위치 변화가 없는 복수의 후보 타겟들을 향해 레이더 신호를 송신한 후, 상기 복수의 후보 타겟들로부터 반사된 반사 신호를 수신할 수 있는 레이더, 상기 구조물의 상기 변위 측정 지점에 설치되고, 상기 구조물의 상기 변위 측정 지점에서의 가속도를 측정할 수 있는 가속도계 및 상기 레이더 및 상기 가속도계로부터 각각 측정값을 수집하고, 상기 레이더가 감지한 복수의 후보 타겟들 중에서 하나의 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 상기 최적 타겟에 대한 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위에서 실제 진동 방향의 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 자동으로 산출할 수 있는 자동 초기 보정 기능과, 상기 최적 타겟에 대한 레이더 측정값으로부터 추출한 위상에 상기 최종변환계수를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 상기 가속도계로 수집한 측정값을 이중적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 구조 변위 모니터링 기능을 수행하도록 구성된 변위 추정부를 포함할 수 있다.



<0022> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 변위 추정부는, 상기 자동 초기 보정 기능과 상기 구조 변위 모니터링 기능을 수행하도록 작성된 컴퓨터 프로그램 및 상기 컴퓨터 프로그램을 실행하는 프로세서를 포함할 수 있다.

<0023> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 변위 추정부는, 상기 구조물의 변위 측정 지점에서의 변위가 상기 레이더의 신호의 파장보다 커서 상기 위상에 래핑 문제가 발생하면, 상기 구조물에서 측정한 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가장 가까운 언래핑 위상을 선택하여 레이더 기반 변위를 추정하는 위상 언래핑 처리 기능을 더 수행하도록 구성될 수 있다.

<0024> 예시적인 실시예에 있어서, 상기 자동 초기 보정 기능은 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 레이더를 이용하여 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향으로의 초기 변위를 측정하는 기능과, 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하는 기능과, 상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 측정하는 기능과, 상기 가속도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 기능과, 상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 산출된 레이더 기반 복수 개의 제1 변위 각각과 상기 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하는 기능과, 상기 복수의 후보 타겟들에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 상기 최적 타겟으로 자동으로 결정하는 기능 및 상기 최적 타겟의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 상기 최적 타겟의 최종변환계수로 자동으로 산



출하는 기능을 포함할 수 있다.

<0025>

예시적인 실시예에 있어서, 상기 구조 변위 모니터링 기능은, 상기 레이더를 이용하여 상기 최적 타겟에 대하여 레이더 계측을 하여 원시 위상을 추출하는 기능과, 상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 계측하고 그 계측된 가속도를 이중 적분하여 상기 가속도 기반 변위를 산출하는 기능과, 상기 구조물의 상기 변위 측정 지점의 변위가 상기 레이더의 레이더 신호의 파장보다 커서 상기 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 계측된 상기 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가까운 언래핑 위상을 선택하는 기능과, 위상 래핑 문제가 없는 원시 위상 또는 위상 래핑 문제가 있어 언래핑 처리된 위상을 이용하여 상기 가시선 방향의 제3변위를 산출하는 기능과, 상기 가시선 방향의 제3변위에 상기 최종변환계수를 적용하여 진동방향으로의 상기 레이더 기반 변위를 산출하는 기능 및 상기 가속도 기반 변위와 상기 레이더 기반 변위를 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터를 이용하여 융합하여 상기 최종 변위를 산출하는 기능을 포함할 수 있다.

<0026>

예시적인 실시예에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하는 기능은, 상기 레이더 기반 변위에 대한 로우패스 필터링을 수행하여 레이더 기반 저주파 변위를 얻는 기능과, 상기 가속도 기반 변위에 대하여 하이패스 필터링을 수행하여 가속도 기반 고주파 변위를 얻는 기능 및 상기 레이더 기반 저주파 변위와 상기 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출하는 기능을 포함할 수 있다.

【발명의 효과】

<0027>

본 발명의 예시적인 실시예들에 따른 구조 변위 추정 방법에 따르면 구조물



에 직접 레이더와 가속도계가 설치되므로, 센서 설치를 위한 구조물 외부에 존재하는 고정점이 필요하지 않고, 레이더 기반 변위 추정에 필요한 최적의 타겟 선택과 최종변환계수를 추정하는 초기 보정 단계를 자동으로 수행할 수 있어 시간과 인력, 비용을 절감할 수 있다.

<0028> 또한, 가속도를 이용하여 위상 래핑 문제를 해결하고, 언래핑 된 위상을 기반으로 한 추정 변위는 FIR 필터 기반으로 계측 가속도와 융합하여 더 정확하게 최종 변위를 산출하여 연속으로 구조 변위 추정 모니터링 할 수 있다.

<0029> 다만, 본 발명의 효과는 위에서 언급한 효과에 한정되는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위에서 다양하게 확장될 수 있다.

【도면의 간단한 설명】

<0030> 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 구조 변위 추정 시스템이 교량 구조물에 설치된 예를 개략적으로 도시한 것이다.

도 2는 도 1의 A 부분의 확대도이다.

도 3(A) 및 도 3(B)는 도 1의 구조 변위 추정 시스템에 포함된 레이더의 신호 파형을 각각 주파수와 진폭에 대한 시간함수로 나타낸 일 예시이다.

도 4는 도 1의 구조 변위 추정 시스템을 이용한 구조물의 변위를 추정하는 방법을 나타내는 순서도이다.

도 5는 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 포함된 자동 초기 보정 단계를 나타내는 순서도이다.

도 6은 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 포함된 구조 변위 모니터링



단계를 나타내는 순서도이다.

도 7은 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 적용된 가속도계 보조 위상 언래핑 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

도 8(A) 및 도 8(B)는 각각 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에서 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 최종변환계수를 자동으로 산출하는 단계를 설명하기 위한 도면들이다.

도 9는 도 6의 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 단계를 설명하기 위한 도면이다.

도 10은 단거리 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이다.

도 11은 진동 크기에 따른 추정 변위를 설명하기 위한 도면이다.

도 12는 최종변환계수 및 그 최종변환계수를 적용하여 추정된 변위의 오차를 계산한 결과이다.

도 13은 장거리 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이다.

도 14는 자동 초기 보정 단계를 설명하기 위한 도면이다.

도 15는 언래핑 알고리즘 및 그 언래핑 알고리즘을 적용하여 추정된 변위의 오차를 계산한 결과이다.

도 16은 보행자의 보행에 의해 거대한 진동이 야기되는 구조물에 대한 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이다.

도 17(A)는 자동 초기 보정 단계를 설명하기 위한 도면이고, 도 17(B)는 타겟별 추정 변위 오차를 계산한 결과이다.



도 18은 진동 크기에 따른 추정 변위를 설명하기 위한 도면이다.

도 19는 도 18(B)의 원시 위상 및 언래핑 처리 된 위상을 도시한 것이다.

【발명을 실시하기 위한 구체적인 내용】

<0031>

이하에서는, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 도면상의 동일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.

<0032>

도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 구조 변위 추정 시스템이 교량 구조물에 설치된 예를 개략적으로 도시한 것이다.

<0033>

도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조 변위 추정 시스템(1000)은 변위 측정 대상인 구조물(10)의 변위를 측정하기 위한 측정수단으로서, 레이더(Radio Detection And Ranging(Radar), 20) 및 가속도계(Accelerometer, 30)를 포함할 수 있다. 또한, 구조 변위 추정 시스템(1000)은 또한 레이더(20) 및 가속도계(30)로부터 측정 신호를 받아 구조물(10)의 변위를 추정하기 위한 연산을 수행하는 변위 추정부(50)를 포함할 수 있다.

<0034>

도 1에 변위 추정 대상인 구조물(10)로 교량이 예시되어 있는데, 본 발명이 적용될 수 있는 변위 추정 대상 구조물의 종류에는 특별한 제한이 없다.

<0035>

레이더(20)는 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)에 직접 설치되고, 위치 변화가 없는 복수의 후보 타겟들($t_1 \dots t_n$)을 향해 레이더(20) 신호를 송신한 후, 복수의 후보 타겟들로부터 반사된 반사 신호를 수신할 수 있다.

<0036>

가속도계(30)는 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)에 설치되고, 구조물(10)의



변위 측정 지점(P)에서의 가속도를 측정할 수 있다. 즉, 레이더(20)와 가속도계(30)는 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)에 서로 근접하게 설치되어 각각 측정값을 수집할 수 있다.

<0037> 변위 추정부(50)는, 레이더(20) 및 가속도계(30)와 각각 유선 통신, 무선 통신, 또는 유선 및 무선 통신 방식으로 서로 통신 가능하게 연결될 수 있다. 변위 추정부(50)는 통신을 통하여 레이더(20)로부터 제공되는 레이더(20) 측정 데이터(구조물(10)로부터 반사되는 레이더(20) 수신 신호 처리를 통해 얻어짐)와 가속도계(30)로부터 제공되는 구조물(10)의 가속도 데이터를 제공 받아 구조물(10)의 변위 추정치를 산출할 수 있도록 구성될 수 있다.

<0038> 변위 추정부(50)는, 자동 초기 보정 기능(S100)과 구조 변위 모니터링 기(S200)를 수행하도록 작성된 컴퓨터 프로그램 및 그 컴퓨터 프로그램을 실행하는 프로세서(52)를 포함할 수 있다. 또한, 변위 추정부(50)의 컴퓨터 프로그램은, 구조물(10)의 변위 측정 지점에서의 변위가 레이더(20)의 신호의 파장보다 커서 위상에 래핑 문제가 발생하면, 구조물(10)에서 측정한 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가장 가까운 언래핑 위상을 선택하여 레이더 기반 변위를 추정하는 위상 언래핑 처리 기능을 더 수행할 수 있도록 작성될 수 있다.

<0039> 변위 추정부(50)를 위한 하드웨어 자원은 프로세서(52)를 포함하는 컴퓨팅 장치를 포함할 수 있다. 그 컴퓨팅 장치는 프로세서(52) 외에도, 메모리(54), 비휘발성 저장 장치인 데이터 스토리지(56) 및 입/출력부(58) 등을 포함할 수 있다. 예컨대, 변위 추정부(50)의 하드웨어는 위와 같은 수단들을 포함하는 범용 컴퓨터 또



는 본 발명 전용의 컴퓨터 장치, 워크스테이션 장치 등을 포함할 수 있다.

<0040> 프로세서(52)는, 레이더(20)가 감지한 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 중에서 하나의 최적 타겟(도 5의 A)을 자동으로 결정하고, 최적 타겟(A)에 대한 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)에서 실제 진동 방향의 변위(u)로 변환하기 위한 최종변환계수(B)를 자동으로 산출할 수 있는 자동 초기 보정 기능과, 최적 타겟(A)에 대한 레이더(20) 측정값으로부터 추출한 위상에 최종변환계수(B)를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 가속도계(30)로 수집한 측정값을 이중적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 구조 변위 모니터링 기능을 수행할 수 있다.

<0041> 자동 초기 보정 기능은, 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 레이더(20)를 이용하여 변위 측정 지점의 가시선 방향으로의 초기 변위를 계측하는 기능과, 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하는 기능과, 가속도계(30)로 변위 측정 지점의 가속도를 계측하는 기능과, 가속도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 기능과, 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 산출된 레이더 기반 복수 개의 제1 변위 각각과 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하는 기능과, 복수의 후보 타겟들에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 최적 타겟(A)으로 자동으로 결정하는 기능 및 최적 타겟(A)의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 최적 타겟(A)의 최종변환계수(B)로 자동으로 산출하는 기



능을 포함할 수 있다.

<0042>

구조 변위 모니터링 기능은, 레이더(20)를 이용하여 최적 타겟(A)에 대하여 레이더(20) 계측을 하여 원시 위상을 추출하는 기능과, 가속도계(30)로 변위 측정 지점의 가속도를 계측하고 그 계측된 가속도를 이중 적분하여 가속도 기반 변위를 산출하는 기능과, 구조물(10)의 변위 측정 지점의 변위가 레이더(20)의 레이더(20) 신호의 파장보다 커서 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 계측된 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가까운 언래핑 위상을 선택하는 기능과, 위상 래핑 문제가 없는 원시 위상 또는 위상 래핑 문제가 있어 언래핑 처리된 위상을 이용하여 가시선 방향의 제3변위를 산출하는 기능과, 가시선 방향의 제3변위에 최종변환계수(B)를 적용하여 진동방향으로의 레이더 기반 변위를 산출하는 기능 및 가속도 기반 변위와 레이더 기반 변위를 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터를 이용하여 융합하여 최종 변위를 산출하는 기능을 포함할 수 있다.

<0043>

한편, 언래핑 위상을 선택하는 기능은, 레이더 기반 변위에 대한 로우패스 필터링을 수행하여 레이더 기반 저주파 변위를 얻는 기능과, 가속도 기반 변위에 대하여 하이패스 필터링을 수행하여 가속도 기반 고주파 변위를 얻는 기능 및 레이더 기반 저주파 변위와 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출하는 기능일 수 있다.

<0044>

자동 초기 보정 기능과 구조 변위 모니터링 기능 및 위상 언래핑 처리 기능에 관한 상세한 설명은 각각 도 4 내지 도 9를 참조하여 후술한다.

<0045>

도 2는 도 1의 A 부분의 확대도이고, 도 3(A) 및 도 3(B)는 도 1의 구조 변



위 추정 시스템에 포함된 레이더(20)의 신호 파형을 각각 주파수와 진폭에 대한 시간함수로 나타낸 일 예시이다.

<0046> 도 2를 참조하면, 레이더(20)와 임의의 타겟 간의 거리(D)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

<0047> [수학식 1]

$$D = \frac{c \Delta t}{2}$$

<0048>
<0049> 식 1에서, c는 빛의 속도, Δt 는 신호왕복시간을 나타낸다. Δt 에 대한 상세한 설명은 도 3(B), 수학식 2 및 3을 참조하여 후술한다.

<0050> 예시적인 실시예에서, 레이더(20)는 FMCW 레이더(20)일 수 있다. 구조 변위 추정 시스템(1000)에 있어서, 구조물(10)에 설치된 FMCW 레이더(20)는 밀리미터파 대역의 변조 주파수 신호를 송신하고, 타겟(물체)으로부터 반사되어 온 신호를 수신하며, 소정의 신호 처리를 통해 디지털 신호로 변환하여 변위 추정부(50)에 제공할 수 있다. 변위 추정부(50)는 그 디지털 신호를 처리하여 위상을 계산한 뒤, 변위로 변환할 수 있다. (즉, 송신 신호와 수신 신호 사이의 시간 지연으로부터 가시선(LOS) 방향의 변위(D)를 추정할 수 있다. 이와 동시에, 가속도 센서(30)는 가속도 신호를 이중 적분하여 변위로 변환할 수 있다. 그런 다음, 변위 추정부(50)는 상기 변위들을 결합하여 구조물(10)의 최종 변위를 추정할 수 있다.

<0051> FMCW 레이더(20)에서 송신된 변조 주파수 신호는 복수의 후보 타겟들($t_1 \dots t_n$)에서 반사된 후, 레이더 기반 변위를 추정하는 데 가장 적합한 최적 타겟(A)을



결정하는 초기 보정 처리가 필요하다.

<0052> 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$)은 고정되어 위치가 변하지 않는 타겟들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 커다란 바위, 교량의 교각과 같은 와 같은 물체를 타겟으로 삼을 수 있다.

<0053> FMCW 레이더(20)와 타겟 간 거리는 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D) 정보를 포함할 수 있다. 그러나, 외력에 의한 구조물(10)의 변위(진동) 방향은 임의적일 수 있어, 가시선 방향과 실제 진동 방향이 다를 수 있다. 구조물(10)의 가시선 방향 변위(D)를 실제 (진동 방향) 변위(u)로 환산하기 위해 변환계수가 필요하다.

<0054> 최적의 타겟(A)을 선택하고, 최종변환계수(B)를 추정하는 초기 보정 단계에 관한 상세한 설명은 도 5를 참조하여 후술한다.

<0055> 도 3(A)를 참조하면, FMCW 레이더(20)는 처프 신호(chirp signal)를 사용할 수 있다. 일 예로, 처프 신호는 시간이 증가함에 따라 주파수가 증가하는 파형을 가질 수 있다.

<0056> 도 3(B)를 참조하면, FMCW 레이더(20)는 주파수 변조 신호(21)를 송신한 후, 타겟에서 반사되어 온 신호(22)를 수신할 수 있다. 송신 신호(T(t), 21)는 실선, 반사 신호(R(t), 22)는 점선에 해당한다.

<0057> 반사 신호(22)는 도 3(B)에 도시된 바와 같이, 송신 신호(21)의 시간 지연 버전일 수 있다. 단일 타겟에 대한 송신 신호(21)와 반사 신호(22)는 다음과 같이 표현할 수 있다.



<0058> [수학식 2]

<0059>
$$T(t) = e^{j(2\pi f_s t + \pi K t^2)}$$

<0060> [수학식 3]

<0061>
$$R(t) = \delta T(t - \Delta t) = \delta e^{j(2\pi f_s(t - \Delta t) + \pi K(t - \Delta t)^2)}$$

<0062> 식 2 및 3에서, f_s , K , T_c 및 δ 는 각각 처프 신호의 시작 주파수(Start Frequency, F_s), 주파수 변화율(Slope, K), 주파수 변조 시간(Chirp duration, T_c) 및 진폭 감쇠 계수를 나타낸다.

<0063> 가시선 방향의 변위(D)를 계산하는 데 필요한 신호왕복시간(Δt)은 중간 주파수 신호(Intermodulation Frequency(IF), w) 또는 위상(ϕ)으로부터 추출할 수 있다.

<0064> 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)를 계산하는 데 필요한 신호왕복시간(Δt)은 중간 주파수 신호(Intermodulation Frequency(IF), w) 또는 위상(ϕ)으로부터 추출할 수 있다.

<0065> 중간 주파수 신호는 송신 신호(21)와 반사 신호(22)를 결합하여 믹서(Mixer)에서 생성할 수 있다. 중간 주파수 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

<0066> [수학식 4]

<0067>
$$IF(t) = T(t) \times R^*(t) \approx \delta e^{j(\varphi + \omega t)}, 0 < t < T_c$$
$$\omega = 2\pi K \Delta t$$
$$\varphi = 2\pi f_s \Delta t$$



<0068> 식 4에서, $R^*(t)$ 는 R(t)의 켈레 복소수를 나타낸다.

<0069> 수학식 1 및 4를 결합하여, 단일 타겟에 대한 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)를 다음과 같이 추정할 수 있다.

<0070> [수학식 5]

<0071>
$$D = \frac{c}{4\pi K} \omega = \frac{c}{4\pi f_s} \varphi$$

<0072> 도 1에 도시된 바와 같이, 레이더(20)는 복수의 후보 타겟들(t1...tn)을 감지할 수 있다. 따라서, 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)는 여러 값이 추정될 수 있다.

<0073> 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D) 추정에 이용되는 반사 신호(22) 및 중간 주파수 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

<0074> [수학식 6]

<0075>
$$R(t) = \sum_{m=1}^Q \delta^m e^{j\{2\pi f_s(t-\Delta t^m) + \pi K(t-\Delta t^m)^2\}}$$

<0076> [수학식 7]

<0077>
$$IF(t) \approx \sum_{j=1}^Q \delta^m e^{j(\varphi^m + \omega^m t)}$$
$$\omega^m = 2\pi K \Delta t^m$$
$$\varphi^m = 2\pi f_s \Delta t^m$$

<0078> 식 6 및 7에서, Q, m, δ^m 및 Δt^m 는 각각 복수의 후보 타겟들(t1...tn) 내



포함된 총 타겟수, 타겟 인덱스, m번째 타겟의 진폭 감쇠 계수 및 송신 신호(21)와 m번째 타겟에서 반사되어 온 신호 사이의 신호왕복시간(Δt)을 나타낸다.

<0079> 레이더(20)가 감지한 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$)과 레이더(20)와의 거리(D) 값은 각각 IF 톤(tone)으로 변환될 수 있다. 식 1을 참조하면, 레이더(20)와 타겟 간의 거리(D)는 신호왕복시간(Δt)에 비례한다. 따라서, 거리에 비례하여 신호왕복 시간(Δt)이 지연되고, 시간 지연만큼 여러 톤으로 구성된 IF가 얻어질 수 있다. 여러 톤으로 구성된 IF를 구분하기 위해 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform, FFT)을 사용하여 처리할 수 있다. 푸리에 변환 처리 후, 여러 톤에 대한 개별 피크(Peak)가 나타난 주파수 스펙트럼을 생성할 수 있고, 각 피크는 특정 거리에 존재하는 타겟을 나타낼 수 있다.

<0080> 정리하면, 주파수 또는 위상으로부터 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

<0081> [수학식 8]

$$D^m = \frac{c}{4\pi K} \omega^m = \frac{c}{4\pi f_s} \varphi^m$$

<0082> 이하, 도 4 내지 도 9를 참조하여 컴퓨팅 장치에서 실행되는 컴퓨터 프로그램에 의해 수행될 수 있는 구조 변위 추정 방법(2000)에 관하여 상세히 설명한다.

<0083> 도 4는 도 1의 구조 변위 추정 시스템을 이용한 구조물의 변위를 추정하는 방법을 나타내는 순서도이다.

<0084> 도 4를 참조하면, 컴퓨터 프로그램은 컴퓨팅 장치의 프로세서(52)로 하여금



자동 초기 보정 단계(S100) 및 구조 변위 추정 단계(S200)를 포함하는 구조 변위 추정 방법(2000)을 수행하게 할 수 있다.

<0086> 자동 초기 보정 단계(S100)는, 구조물(10)의 변위 측정 지점에 직접 설치된 레이더(20) 및 가속도계(30)로부터 각각 측정값을 수집하고, 레이더(20)가 감지한 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 중에서 하나의 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고, 최적 타겟(A)에 대한 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)에서 실제 진동 방향의 변위(u)로 변환하기 위한 최종변환계수(B)를 자동으로 산출할 수 있다.

<0087> 자동 초기 보정 단계(S100)는, 레이더(20) 및 가속도계(30)의 측정값을 초기에 소정 시간(예컨대, 1분 이하의 짧은 시간) 동안 수집하여 최적의 타겟을 자동으로 선택하고, 최종변환계수(B)를 자동으로 산출할 수 있다.

<0088> 레이더(20)는 복수의 타겟들을 자동으로 감지할 수 있다. 종래에는 잘못된 타겟을 선택하여 구조 변위 오차가 크게 추정되는 문제가 야기되었으나, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조 변위 추정 방법(2000)은 자동 초기 보정 단계(S100)에서 F 레이더(20)가 감지한 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 중에서 레이더 기반 변위를 추정할 때 가장 적합한 최적 타겟(A)을 자동으로 결정할 수 있다.

<0089> 또한, 레이더(20)와 최적 타겟(A)과의 거리는 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위(D)이므로, 구조물(10)의 변위를 야기하는 실제 진동방향의 변위(u)로 변환이 필요하다. 종래에는 기하 계산을 통하여 수동으로 변환계수를 산출하였으나, 본 발명의 일 실시예에 따른 구조 변위 추정 방법(2000)은 자동 초기 보정 단계(S100)에서 최종변환계수(B)를 자동으로 산출할 수 있다.



<0090> 자동 초기 보정 단계(S100)에서 자동으로 결정된 최적 타겟(A)에 대해 레이더(20) 및 가속도계(30)를 이용한 변위 측정을 주기적으로 수행하는 것을 통해, 구조 변위 모니터링 단계(S200)를 주기적으로 수행할 수 있다.

<0091> 구조 변위 모니터링 단계(S200)는 최적 타겟(A)에 대한 레이더(20) 측정값으로부터 추출한 위상에 최종변환계수(B)를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 가속도계(30) 측정값을 이중 적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 단계를 수행할 수 있다.

<0092> 구조 변위 모니터링 단계(S200)는, 자동으로 선택된 최적 타겟(A)에 대한 레이더(20) 측정값으로부터 추출한 위상에서 가시선 방향의 변위(D)를 얻은 다음, 그 변위에 최종변환계수(B)를 적용하여 계측지점(P)의 진동 방향으로의 레이더 기반 변위를 얻고, 가속도계(30)로 수집한 측정값을 이중적분하여 가속도 기반 변위를 얻을 수 있다. 그 후, 유한 임펄스 응답(Finite impulse response: FIR) 필터 기반으로 그 레이더 기반 변위를 로우 패스 필터링(Low-pass filtering)한 레이더 기반 저주파 변위와 그 가속도 기반 변위를 하이 패스 필터링(High-pass filtering)한 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 레이더(20) 또는 가속도계(30)만 이용하여 추정된 변위보다 정확도가 더 향상된 최종 변위를 산출할 수 있다.

<0093> 도 5는 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 포함된 자동 초기 보정 단계를 구체적으로 나타내는 순서도이다.

<0094> 도 5를 참조하면, 자동 초기 보정(S100)은, 레이더(20) 및 가속도계(30) 각각을 계측하는 단계(S110, S115), 레이더(20) 계측값에 변환계수(β) 값을 적용하



여 복수 개의 제1 변위를 산출하고, 가속도계(30) 계측값을 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 단계(S122, S124) 및 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고, 변환 계수를 자동으로 산출하는 단계(S130)를 포함할 수 있다.

<0095> 먼저, 레이더(20) 및 가속도계(30) 각각을 계측하는 단계(S110, S115)를 수행할 수 있다.

<0096> 복수의 후보 타겟들($t_1 \dots t_n$) 각각에 대하여 레이더(20)를 이용하여 변위 측정 지점(P)의 가시선 방향으로의 초기 변위를 계측하고(S110), 가속도계(30)로 변위 측정 지점(P)의 가속도를 계측할 수 있다(S115).

<0097> 레이더(20)의 탐지범위 내에는 복수 개의 타겟이 존재할 수 있다. 그 타겟들이 제공하는 계측의 정확도는 다를 수 있으므로, 그들 중 가장 정확한 계측을 보장하는 최적 타겟(A)을 선택하는 것이 바람직하다. 가속도계(30)로 계측한 계측지점의 변위값이 최적 타겟(A)을 선정하는 기준이 될 수 있다. 즉, 복수의 후보 타겟 각각에 대하여 레이더(20)와 가속도계(30)를 이용하여 변위를 산출하여 그 산출된 두 변위간의 차이가 가장 작은 후보 타겟을 최적 타겟(A)으로 선택할 수 있다. 이를 위한 신호 처리 과정을 구체적으로 설명한다.

<0098> 설정된 소정의 측정시간 동안 레이더(20)가 탐지범위 내에서 감지한 복수의 타겟 후보군($t_1 \dots t_n$) 중 임의의 하나의 타겟(즉, 제1번 타겟)을 선택하고, 레이더(20)로 선택된 그 타겟에 대한 측정을 수행한다(S110). 레이더(20)가 레이더(20) 신호를 제1번 타겟에 송출하고 그것의 반사신호를 수신하여 위상을 측정하는 것과 동일한 측정시간 동안 가속도계(30)에서는 동일 계측 지점에서의 가속도를 측정한



다(S115). 레이더(20)를 이용한 변위 측정과 가속도계(30)를 이용한 변위 측정은 독립적으로 수행될 수 있다. 도 1을 참조하여 전술한 바와 같이, 레이더(20)와 가속도계(30)는 구조물(10)의 변위 측정 지점에 서로 근접하게 설치되어 측정값을 수집할 수 있다.

<0099> 자동 초기 보정(S100)을 위해 필요한 여러 가지 초기 조건을 설정할 수 있다. 예컨대, 변환계수(도 8의 β)의 초기값을 소정 크기로 설정할 수 있다. 변환계수(β)의 가변 범위도 함께 설정할 수 있다. 일 예로, 변환계수(β)는 0.5 이상 2 미만 범위 내의 값으로 설정할 수 있다. 변환계수(β)가 1일 때 레이더(20)와 타겟 간의 거리 추정 정확도가 가장 높게 추정될 수 있다. 변환계수(β)가 0.5부터 2까지의 변경 범위를 벗어나면, 레이더(20) 반사 신호 세기가 약해져 추정 정확도가 낮아질 수 있어 위 범위 내 값으로 설정한다.

<0100> 레이더(20) 측정과 가속도 측정을 수행하는 한 주기의 시간도 설정할 수 있다. 레이더(20)를 이용한 계측과 가속도계(30)를 이용한 계측은 동일한 시간 동안 수행될 수 있다. 일 예로, 레이더(20)를 이용한 계측과 가속도계(30)를 이용한 계측은 1분 이하로 수행될 수 있다. 초기 보정을 수행하기 위한 데이터를 수집하는데 최대 1분 정도 측정하면 충분하다.

<0101> 다음으로, 레이더(20) 계측값에 변환계수(β) 값을 적용하여 복수 개의 제1 변위를 산출하고, 가속도계(30) 계측값을 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 단계는, 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 각각에 대하여 그 초기 변위에 복수 개의 변환계수(β) 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하고(S122), 가속



도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 단계(S124)를 포함할 수 있다.

<0102> 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 각각에 대하여 레이더(20)를 이용하여 변위 측정 지점(P)의 가시선 방향의 변위(D)를 측정할 수 있다. 가시선 방향의 변위(D)를 초기 변위로 정의할 수 있다. 그 후, 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 각각에 대한 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값(β)을 적용하여 복수 개의 제1 변위를 산출할 수 있다. 제1 변위를 진동 방향의 변위(u)로 정의할 수 있다.

<0103> 한편, 가속도계(30) 측정값을 이중적분하여 그 측정 지점(P)의 제2 변위를 산출할 수 있다.

<0104> 마지막으로, 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고, 변환 계수를 자동으로 산출하는 단계(S130)는, 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 각각에 대하여 산출된 복수 개의 제1 변위 각각과 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하고(S132), 복수의 후보 타겟들($t_1 \cdots t_n$) 각각에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 최적 타겟(A)으로 자동으로 결정한 후(S134), 타겟의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 최적 타겟(A)의 최종변환계수(B)로 자동으로 산출하는 단계(S136)를 포함할 수 있다.

<0105> 제1 변위 및 제2 변위에 하이패스 필터링을 수행하여 제1 고주파 변위 및 제2 고주파 변위를 얻을 수 있다. 구조물(10)의 가속도를 측정하고 이를 시간 영역에서 적분하여 제2 변위를 산출할 때, 실제 구조물(10)의 초기 속도 불확실성, 측정 신호의 잡음(Noise)이 시간 적분과정에서 누적되어 저주파 증폭(Low-frequency



Drift)이 발생하여 계산된 제2 변위의 값이 발산하는 문제가 있다. 따라서, 이러한 저주파 증폭 효과를 막기 위해 하이 패스 필터링을 수행할 수 있다. 하이패스 필터링 처리 시 컷오프 주파수는 예컨대 0.5 Hz로 설정할 수 있다.

<0106> 하이 패스 필터링 처리된 제1 고주파 변위 및 제2 고주파 변위 간 RMSE를 계산하여(S132), 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고(S134), 최종변환계수(B)도 자동으로 산출할 수 있다(S136). RMSE를 계산하여 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고, 최종변환계수(B)도 자동으로 산출하는 단계(S132, S134, S136)에 관한 상세한 설명은 도 8을 참조하여 설명한다.

<0107> 도 8(A) 및 도 8(B)는 각각 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에서 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 최종변환계수를 자동으로 산출하는 단계를 설명하기 위한 도면들이다.

<0108> 도 8(A)를 참조하면, 변환계수(β)를 점진적으로 증가시키면서 제1 변위 각각과 제2 변위 간 RMSE를 계산할 수 있다(S132).

<0109> 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 레이더(20)를 이용하여 측정한 초기 변위에 복수 개의 변환계수(β) 값을 적용하여 산출한 제1 변위 각각 및 가속도계(30) 측정값을 이중적분하여 산출한 제2 변위 간의 RMSE 계산하여, RMSE와 변환계수(β) 간 상관관계를 구할 수 있다. 복수 개의 변환계수 값은 0.5 이상 2.0 이하의 범위 내의 값을 선택할 수 있다.

<0110> 오차함수(RMSE)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

<0111> [수학식 9]



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (pred - target_i)^2}$$

<0112>

<0113>

구체적으로, 임의로 선택한 제1 타겟에 대하여 위와 같은 레이더(20) 기반 변위와 가속도계(30) 기반 변위 간의 RMSE를 산출할 수 있다.

<0114>

이 때, RMSE 산출은 변환계수(β)를 초기값 0.5부터 2까지 점진적으로 증가 시키면서 반복적으로 수행할 수 있다. 이를 통해, 제1 타겟에 대하여, 변환계수 (β) 값의 증가에 따른 RMSE 값들을 구할 수 있다.

<0115>

도 8(A)에 도시된 바와 같이, 변환계수(β) 값의 증가에 따른 RMSE 값들은 그래프로 나타낼 수 있고, 최소 RMSE 값에 대응하는 변환계수 값(E)을 선택할 수 있다.

<0116>

제1 타겟(t_1)에 대하여 최소 RMSE(E) 값에 대응하는 변환계수(β) 값을 구하는 위와 같은 연산을 복수의 타겟 후보군($t_1 \cdots t_n$)에 포함되는 나머지 모든 타겟 들($t_2 \cdots t_n$)에 대해서도 동일하게 수행할 수 있다.

<0117>

이런 과정을 통해, 레이더(20)가 감지한 전체 타겟들의 갯수와 동일한 갯수의 최소 RMSE(E) 값을 얻을 수 있다.

<0118>

도 8(B)를 참조하면, 타겟별로 구한 최소 RMSE(E) 값으로부터 최적 타겟(A)을 자동으로 결정하고, 최종변환계수(B)를 자동으로 산출할 수 있다.

<0119>

도 8(B)에 도시된 바와 같이, 전체 타겟에 각각 대응하는 최소 RMSE (E) 값들의 크기를 서로 비교하는 연산을 통해 그 중에서 가장 작은 크기를 갖는 최소 RMSE(E) 값에 대응하는 타겟을 최적 타겟(도 5의 A, 도 8(B)의 best target)으로



자동으로 결정할 수 있다(S134).

<0120> 또한, 최적 타겟(A)이 선택되면, 그 선택된 최적 타겟(A)의 최소 RMSE(E) 값에 대응하는 변환계수(β)가 구하고자 하는 최종변환계수(B)로 자동으로 산출될 수 있다(S136).

<0121> 위 과정을 통해, 사람의 개입 없이 프로그램에 의한 연산처리를 통해 레이더(20) 기반 구조 변위를 추정하는데 가장 적합한 최적 타겟(A)을 자동으로 선택할 수 있고, 구조물(10)의 가시선 방향의 변위(D)에서 구조물(10)의 실제 진동방향의 변위(u)로 변환하기 위한 최종변환계수(B)를 자동으로 추정할 수 있다.

<0122> 도 6은 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 포함된 구조 변위 모니터링 단계를 구체적으로 나타내는 순서도이다.

<0123> 도 6을 참조하면, 구조 변위 모니터링(S200)은, 먼저 최적 타겟(A)에 대하여 레이더 계측을 하여 원시 위상을 추출할 수 있다(S210). 그 추출된 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 가속도 정보를 활용하는 가속도계(30) 보조 언래핑 알고리즘을 이용하여 위상 언래핑 처리를 하여 얻어지는 언래핑 위상을 실제 위상으로 선택할 수 있다(S212). 위상 언래핑 문제가 없는 경우는 원시 위상을, 위상 래핑 문제가 생기는 경우에는 언래핑 위상을 이용하여 가시선 방향의 제3 변위를 산출하고(S214), 그 산출된 제3 변위에 자동 초기 보정 단계(S100)에서 얻은 최종변환계수(B)를 적용하여 변위 측정 지점의 진동방향으로의 레이더 기반 변위를 얻을 수 있다(S216).

<0124> 언래핑 알고리즘에 관한 상세한 설명은 도 7을 참조하여 후술한다.



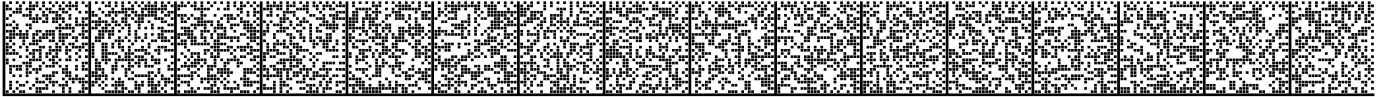
<0125> 가속도계(30)로 측정한 가속도를 이중적분하여 가속도 기반 변위를 산출한 후(S220), FIR 필터 기반으로 레이더 기반 변위 및 가속도 기반 변위를 융합하여 최종 변위를 산출할 수 있다(S230). 최종 변위를 산출하는 단계(S230)에 관한 상세한 설명은 도 9를 참조하여 후술한다.

<0126> 구조 변위 모니터링(S200)은 구조물(10)의 구조 변위를 일정한 주기로 추정하여 안정성을 모니터링 하거나, 즉각적인 대응이 필요한 경우 실시간으로 구조 변위를 추정할 수 있다. 이 때, 자동 초기 보정 단계(S100)에서 자동으로 선택된 그 최적 타겟(A) 및 그 최종변환계수(B)를 계속 사용할 수 있다. 즉, 자동 초기 보정 단계(S100)에서 최적 타겟(A)을 선정하고, 그 타겟에 대한 최종변환계수(B)를 얻은 다음, 구조 변위 모니터링 단계(S200)를 수행하여 구조물(10)의 변위를 산출할 수 있다.

<0127> 도 7은 도 4의 구조물의 변위를 추정하는 방법에 적용된 가속도계(30) 보조 위상 언래핑 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

<0128> 도 1에 도시된 바와 같이, 레이더(20)가 타겟을 향해 주파수 변조 신호를 송신한 후, 그 타겟에서 반사되어 온 신호를 수신할 수 있다. 변위 추정부(50)는 그 반사 신호를 신호 처리 하여 원시 위상을 추출할 수 있다.

<0129> 도 7을 참조하면, 레이더(20)와 타겟 사이의 거리가 아무리 증가하거나 감소하여도, 거리 변화에 해당하는 위상 변화($\Delta\phi$)는 $-\pi$ 에서 π 사이의 값만 출력할 수 있다. 따라서, 신호 처리를 통해 추출한 그 원시 위상은 레이더(20)와 타겟 간의 거리를 정확히 추정하지 못하여 구조 변위 추정 오차가 커지는 문제를 야기할



수 있다.

<0130> 구체적으로, 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)의 변위가 레이더(20)신호의 파장보다 큰 경우 위상 래핑(Wrapping) 문제가 야기될 수 있다. 예를 들면, 위상이 0 부터 점점 증가하여 π 를 지나는 순간 갑자기 $-\pi$ 로 감소한 후 다시 π 를 향해 증가하여 위상이 래핑될 수 있어, 래핑된 위상으로부터 의미 있는 정보를 얻기 위해 위상 언래핑(Phase Unwrapping) 처리가 필요할 수 있다.

<0131> 예시적인 실시예에서, 레이더(20) 측정값으로부터 얻은 원시 위상에 대하여 가속도 정보를 더 활용하는 가속도계(30) 보조 언래핑 알고리즘을 적용할 수 있다. 이를 통해, 원시 위상이 래핑된 위상인 경우 실제 위상으로 복구할 수 있다.

<0132> 도 7을 참조하여, 언래핑 위상을 선택하는 단계를 이하 자세히 설명한다.

<0133> 먼저, k번째 시간 단계에서 예측변위(\hat{u}_k)와 예측위상($\hat{\varphi}_k$)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

<0134> [수학식 10]

<0135>
$$\hat{u}_k = 2u_{k-1} - u_{k-2} + (\Delta t)^2 a_{k-1}$$

<0136> [수학식 11]

<0137>
$$\hat{\varphi}_k = 4\pi f_s \frac{\hat{u}_k}{\beta c}$$

<0138> 식 10 및 11에서, u_{k-1} , u_{k-2} 및 a_{k-1} 는 각각 k-1번째 및 k-2번째 시간 단계에서의 변위와 k-1번째 시간단계에서의 가속도이고, Δt 는 신호왕복시간,



f_s, K, T_c , β 및 c 는 각각 처프 신호의 시작 주파수, 변환계수 및 빛의 속도를 나타낸다.

다음으로, 원시 위상(φ_k)의 $\pm 2p\pi$ 범위 내(단, p 는 정수)에 존재하면서, 예측위상($\hat{\varphi}_k$)에서 가장 가까운 언래핑 처리된 위상($\bar{\varphi}_k$)을 선택하기 위해 다음과 같은 반올림 함수(round function)를 사용할 수 있다.

[수학식 12]

$$\bar{\varphi}_k = \varphi_k + 2\pi \times \text{round}\left(\frac{\hat{\varphi}_k - \varphi_k}{2\pi}\right)$$

마지막으로, 레이더(20) 기반 변위(u_k)를 구할 수 있다.

[수학식 13]

$$u_k = \beta \frac{c}{4\pi f_s} (\bar{\varphi}_k - \varphi_0)$$

식 13에서, $u_k = \beta \frac{c}{4\pi f_s} (\bar{\varphi}_k - \varphi_0)$ 는 초기 위상을 나타낸다.

위와 같이 가속도 정보를 이용하면, 진동으로 레이더(20) 파장 보다 더 큰 구조 변위가 발생한 경우에도 언래핑된 위상을 선택하여 구조물(10)의 변위를 정확하게 추정할 수 있다.

도 9는 도 6의 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 단계를 설명하기 위한 도면이다.

도 9를 참조하면, 최종 변위를 산출하는 단계(S230)는 레이더(20) 기반 변위



를 얻은 후 로우패스 필터링을 수행하고(S214, S232), 가속도 기반 변위를 얻은 후 하이패스 필터링을 수행한 후(S222, 234), 레이더(20) 기반 저주파 변위 및 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출하는 단계(S236)를 포함할 수 있다.

<0149> 도 7을 참조하여 전술한 바와 같이, 레이더(20) 기반 변위와 가속도계(30) 기반 변위는 노이즈로 인한 에러 성분이 포함되어 있을 수 있다. 가속도계(30) 기반 변위의 저주파 노이즈를 제거하기 위해 하이 패스 필터링을 수행할 수 있다(S234). 이 과정에서 실제 변위 데이터가 가진 저주파 에너지를 복원할 수 없어, 이를 보완하기 위해 레이더(20) 측정값을 기반으로 저주파 변위를 융합하여 변위를 추정할 수 있다.

<0150> 예시적인 실시예에서는, 그러한 노이즈 제거를 위해 FIR 필터를 사용할 수 있다. FIR 필터에서는, 앞서 최종변환계수(B)를 적용하여 레이더(20) 기반 변위를 얻고(S214), 로우 패스 필터링하여 레이더(20) 기반 저주파 변위를 얻을 수 있다(S216). 또한, 가속도 측정값을 이중적분한 후(S222) 하이 패스 필터링을 통해 가속도 기반 고주파 변위를 얻을 수 있다(S234). 그렇게 얻은 가속도 기반 고주파 변위와 레이더(20) 기반 저주파 변위를 융합함으로써 정확도가 향상된 최종 변위를 산출할 수 있다(S236).

<0151> 두 가지 물리량을 융합하기 위하여 최소화 함수를 사용할 수 있다.

<0152> [수학식 14]

$$\min \Pi_E(u) = \min \left\{ \frac{1}{2} \|L_a L_c u - L_a (\Delta t)^2 \bar{a}\|_2^2 + \frac{\lambda^2}{2} \|u - \bar{u}\|_2^2 \right\}$$

<0153>



<0154>

식 14에서, L_a 및 L_c 는 각각 가중치 대각행렬 및 미분연산자를 나타내고, u , \bar{u}, \bar{a} 는 추정 변위, 측정 변위 및 측정 가속도 각각의 벡터 표현을 나타내며, Δt 는 신호왕복시간을 나타낸다. 정규화 상수 λ 는 $46.81 (2N+1)^{-1.95}$ 로 정의된다.

<0155>

이를 정리하면, 최종 변위(u_k^*)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

<0156>

[수학식 15]

<0157>

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

<0158>

[수학식 16]

<0159>

$$u_k^* = C_H a + C_L u$$

<0160>

식 15 및 16에서, $L = L_a L_c$, C_H 는 $\{\lambda^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1}\}$ 의 (N+1)번째 행으로서 측정 가속도에 적용되는 필터 계수, C_L 은 $\{(\Delta t)^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} L^T L_a\}$ 의 (N+1)번째 행으로서 레이더(20) 측정에 적용되는 필터 계수, a 는 측정 가속도 벡터 $\{a_{k-M}, a_{k-M+1}, \dots, a_{k+M}\}^T$, u 는 레이더(20) 기반 변위 벡터 $\{u_{k-M}, u_{k-M+1}, \dots, u_{k+M}\}^T$ 이다. $M\Delta t$ 만큼의 시간 지연만 희생하여 더 정확하게 k번째 시간단계에서 변위를 추정할 수 있다.

<0161>

도 10 내지 도 19는 본 발명의 실시예에 따른 구조 변위 추정 방법 및 이를 이용한 시스템에 대한 실제 실험 검증 결과를 나타낸다.

<0162>

실제 실험은 단거리, 장거리 및 보행자에 의해 큰 진동이 야기되는 다리의



구조 변위를 측정하였다. 실측 변위(reference, 실선)를 기준으로, 본 발명의 실시예에 따라 추정된 구조 변위(이하, "제안 기술 변위")와 기존 방법에 따라 추정된 구조 변위(이하, "종래 기술 변위")를 함께 산출하였다. 종래 기술 변위는, 임의로 타겟을 선정하고, 레이더(20)와 타겟 간의 기하 관계를 이용하여 변환계수(β_2)를 얻은 후 추정하였다.

<0163> 도 10은 단거리 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이고, 도 11은 진동 크기에 따른 추정 변위를 설명하기 위한 도면이며, 도 12는 최종변환계수 및 그 최종변환계수를 적용하여 추정된 변위의 오차를 계산한 결과이다.

<0164> 도 10을 참조하면, 구조물(10) 상에 레이더(20) 및 가속도계(30)가 직접 설치되고, 구조 변위를 실측하기 위하여 지면 상에 LDV를 설치하였다. 구조물(10)은 웨이커에 의해 수평 방향으로 진동하도록 설계하였다.

<0165> 도 11을 참조하면, 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)의 변위가 레이더(20) 신호의 파장보다 큰 경우, 위상 래핑(Wrapping) 문제가 야기될 수 있다. 도 11(B) 및 11(C)에 도시된 바와 같이, 큰 진동(1Hz sine wave) 및 실제 진동이 야기되는 다리에서 시뮬레이션 결과, 종래 기술 변위(일점쇄선)는 위상이 래핑되어 실측 변위(실선)보다 발산하는 결과를 보인다.

<0166> 반면, 도 11(A) 내지 도 11(C)에 도시된 바와 같이, 제안 기술 변위(이점쇄선)는 실측 변위(실선)와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

<0167> 도 12(A)를 참조하면, 제안 기술 변위(상향 빗금)는 종래 기술 변위(하향 빗금)보다 RMSE 오차가 38% 더 감소한 것을 확인할 수 있다. 제안 기술 변위를 추정



하기 위해 소요된 시간 지연은 0.5초에 불과하다.

<0168> 도 13은 장거리 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이고, 도 14는 자동 초기 보정 단계를 설명하기 위한 도면이며, 도 15는 언래핑 알고리즘 및 그 언래핑 알고리즘을 적용하여 추정된 변위의 오차를 계산한 결과이다.

<0169> 도 13을 참조하면, 구조물(10) 상에 레이더(20) 및 가속도계(30)가 직접 설치되고, 구조 변위를 실측하기 위하여 지면 상에 LDS를 설치하였다. 구조물(10)은 웨이커에 의해 수평 방향으로 진동하도록 설계하였다.

<0170> 도 14를 참조하면, 최소 RMSE(E) 값인 0.457을 갖는 타겟(Best target)이 최적 타겟(A)으로 자동으로 결정되고, 그 타겟의 E값인 0.457이 최종변환계수(B)로 자동으로 추정된다. (도표 상에서 소수점 셋째 자리까지만 표기하여 동일한 값을 가지는 타겟들이 존재하는 것처럼 보이나, 소수점 넷째 자리 이상까지 구하면 서로 값이 상이함을 확인할 수 있다.)

<0171> 도 15(A)를 참조하면, 구조물(10)의 변위 측정 지점(P)의 변위가 레이더(20) 신호의 파장보다 큰 경우, 위상 래핑(Wrapping) 문제가 야기될 수 있다. 따라서, 종래 기술 변위(하향빗금)는 오로지 0.3Hz 정도의 약한 진동 하에서만 구조 변위를 실측 변위에 가깝게 추정할 수 있다.

<0172> 반면, 도 15(A) 및 도 15(B)에 도시된 바와 같이, 제안 기술 변위(상향 빗금)는 가속도계(30) 보조 언래핑 알고리즘을 적용하여 래핑된 위상도 언래핑 처리함으로써 변위 추정 오차를 줄일 수 있다. 도 15(B)에 도시된 바와 같이, FIR 필터 기반으로 산출한 최종 변위는 RMSE 오차가 11% 더 감소한 것을 확인할 수 있다.



<0173> 도 16은 보행자의 보행에 의해 거대한 진동이 야기되는 구조물에 대한 시뮬레이션을 위한 구성 배치도이고, 도 17(A)는 자동 초기 보정 단계를 설명하기 위한 도면이고, 도 17(B)는 타겟별 추정 변위 오차를 계산한 결과이며, 도 18은 진동 크기에 따른 추정 변위를 설명하기 위한 도면이며, 도 19는 도 18(B)의 원시 위상 및 언래핑 처리 된 위상을 도시한 것이다.

<0174> 도 16을 참조하면, 구조물(10) 상에 레이더(20) 및 가속도계(30)가 직접 설치되고, 구조 변위를 실측하기 위하여 지면 상에 LDV를 설치하였다.

<0175> 도 17(A)를 참조하면, 최대 진폭을 갖는 타겟(target 1)과 달리 최적 타겟(best target)은 7m 거리에 위치한 타겟으로 자동으로 결정된다. 도 17(B)를 참조하면, 최대 진폭을 갖는 타겟(target 1)으로 추정한 구조 변위의 RMSE 오차가 0.208mm까지 나타나는 반면, 제안 기술 변위는 최대 RMSE 오차가 0.030mm에 불과하다. 즉, 최대 진폭을 갖는 타겟과 최적의 타겟이 무관함을 확인할 수 있다.

<0176> 도 18(A)는 14명의 사람들이 천천히 교량을 통과하는 경우, 도 18(B)는 14명의 사람들이 천천히 걸어가고, 5명의 사람들이 교량의 1/2지점에서 뛰는 경우 및 도 18(C)는 교량의 1/2 지점에서 6명의 사람들이 뛰는 경우 시뮬레이션 한 결과이다.

<0177> 도 18(A) 내지 도 18(C)에 도시된 바와 같이, 진동이 커질수록 종래 기술 변위는 RMSE 오차가 커져 변위 추정 정확도가 감소함을 확인할 수 있다. 반면, 제안 기술 변위의 최대 RMSE 오차는 0.026mm에 불과하여 종래 기술에 비해 더 정확하게 변위를 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.



<0178> 도 19를 참조하면, 원시 위상(점선)은 35초 이후부터 위상 래핑 문제가 발생한 것으로 나타났으나, 제안 기술 변위는 언래핑 알고리즘을 적용하여 언래핑 위상(실선)을 획득한 후, 레이더(20) 기반 변위를 추정한다. 따라서, 제안 기술 변위는 위상 래핑 문제를 고려하지 않은 종래 기술 변위보다 더 정확하게 구조 변위를 추정할 수 있다.

<0179> 이상에서 설명된 실시예에 따른 구조 변위 추정 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현된 소프트웨어일 수 있다. 그 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 그 프로그램 명령은 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다.



<0180> 설명된 실시예에 따른 구조 변위 추정 시스템(1000) 및 구조물 변위 추정 방법(2000)을 실시하기 위한 컴퓨터 수단은 예를 들어, 프로세서, 컨트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다.

<0181> 이상에서 본 실시예에 대해 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고, 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념에 대한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

【부호의 설명】

- <0182>
- 10 : 구조물

P : 변위를 측정하기 원하는 위치
- 20 : 레이더

30 : 가속도계
- 50 : 변위 추정부

52 : 프로세서
- 54 : 메모리

56 : 데이터 스토리지
- 58 : 입출력부

1000 : 구조 변위 추정 시스템
- t1...tn : 복수의 후보 타겟들



【청구범위】

【청구항 1】

컴퓨팅 장치에서 실행되는 컴퓨터 프로그램에 의해 수행되는 방법으로서,

상기 컴퓨터 프로그램은 상기 컴퓨팅 장치의 프로세서로 하여금,

구조물의 변위 측정 지점에 직접 설치된 레이더 및 가속도계로부터 각각 측정값을 수집하고, 상기 레이더가 감지한 복수의 후보 타겟들 중에서 하나의 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 상기 최적 타겟에 대한 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위에서 실제 진동 방향의 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 자동으로 산출할 수 있는 자동 초기 보정 단계; 및

상기 최적 타겟에 대한 레이더 측정값으로부터 추출한 위상에 상기 최종변환계수를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 상기 가속도계로 수집한 측정값을 이중 적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 구조 변위 모니터링 단계를 수행하도록 구성된 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 2】

제1항에 있어서, 상기 레이더를 이용한 계측과 상기 가속도계를 이용한 계측은 동일한 시간 동안 수행되는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 3】

제1항에 있어서, 상기 레이더를 이용한 계측과 상기 가속도계를 이용한 계측은 1분 이하로 수행되는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.



【청구항 4】

제1항에 있어서,

상기 레이더 및 상기 가속도계는 상기 구조물의 변위 측정 지점에 서로 근접하게 설치되어 측정값을 수집하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 5】

제1항에 있어서, 상기 자동 초기 보정 단계는

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 레이더를 이용하여 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향으로의 초기 변위를 측정하는 단계;

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하는 단계;

상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 측정하는 단계;

상기 가속도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 단계;

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 산출된 복수 개의 제1 변위 각각과 상기 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하는 단계;

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 상기 최적 타겟으로 자동으로 결정하는 단계; 및

상기 최적 타겟의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 상기 최적 타겟의 최종변환계수로 자동으로 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 구



조 변위 추정 방법.

【청구항 6】

제5항에 있어서,

상기 복수 개의 변환계수 값은 0.5 이상 2.0 이하의 범위 내의 값인 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 7】

제1항에 있어서, 상기 자동 초기 보정 단계에서 자동으로 결정된 상기 최적 타겟에 대해 상기 레이더 및 상기 가속도계를 이용한 변위 측정을 주기적으로 수행하는 것을 통해, 상기 구조 변위 모니터링 단계를 주기적으로 수행하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 8】

제1항에 있어서, 상기 구조 변위 모니터링 단계는,

상기 레이더를 이용하여 상기 최적 타겟에 대하여 레이더 계측을 하여 원시 위상을 추출하는 단계;

상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 계측하고 그 계측된 가속도를 이중 적분하여 상기 가속도 기반 변위를 산출하는 단계;

상기 구조물의 상기 변위 측정 지점의 변위가 상기 레이더의 레이더 신호의 파장보다 커서 상기 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 계측된 상기 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가까운 언래핑 위상을 선택하는 단계;

위상 래핑 문제가 없는 원시 위상 또는 위상 래핑 문제가 있어 언래핑 처리



된 위상을 이용하여 상기 가시선 방향의 제3변위를 산출하는 단계;

상기 가시선 방향의 제3변위에 상기 최종변환계수를 적용하여 진동방향으로의 상기 레이더 기반 변위를 산출하는 단계; 및

상기 가속도 기반 변위와 상기 레이더 기반 변위를 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터를 이용하여 융합하여 상기 최종 변위를 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 9】

제8항에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하는 단계는, 상기 레이더 기반 변위에 대한 로우패스 필터링을 수행하여 레이더 기반 저주파 변위를 얻는 단계; 상기 가속도 기반 변위에 대하여 하이패스 필터링을 수행하여 가속도 기반 고주파 변위를 얻는 단계; 및 상기 레이더 기반 저주파 변위와 상기 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 10】

제8항에 있어서,

상기 언래핑 위상을 선택하는 단계는,

(k-1)번째와 (k-2)번째 시간단계에서의 변위 및 (k-1)번째 가속도를 이용하

여 k번째 시간단계에서의 예측변위(\hat{u}_k) 및 예측위상($\hat{\varphi}_k$)을 각각 식



$\hat{u}_k = 2u_{k-1} - u_{k-2} + (\Delta t)^2 a_{k-1}$ 와 식 $\hat{\varphi}_k = 4\pi f_s \frac{\hat{u}_k}{\beta c}$ 을 이용하여 구하는

단계; 및

원시 위상의 $\pm 2p\pi$ 범위 내(단, p는 정수)에 존재하면서 상기 예측위상에서

가장 가까운 언래핑 위상을 식 $\bar{\varphi}_k = \varphi_k + 2\pi \times \text{round}(\frac{\hat{\varphi}_k - \varphi_k}{2\pi})$ 으로 구하

여 상기 레이더 기반 변위를 추정하는 데 이용될 위상으로 선택하는 단계를 포함하
는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 11】

제8항에 있어서,

상기 최종 변위는,

$$u_k^* = C_H a + C_L u$$

(C_H : 이중 적분 및 (2M+1)차 하이 패스 필터, a : 계측 가속도 벡터,

C_L : (2M+1)차 로우 패스 필터, u : 레이더 기반 변위 벡터)

의 수식을 통해 산출하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 12】

제1항에 있어서,

상기 레이더는 주파수 변조 연속 신호(Frequency Modulation Continuous

Wave Radar Signal: FMCW) 밀리미터파 레이더이고, 상기 주파수 변조 연속 신호는



처프(chirp) 신호를 송신한 후, 타겟 후보군에서 반사된 신호를 수신하여, 송수신 신호 간 신호왕복시간을 이용하여 가시선 방향으로의 변위를 추정하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 방법.

【청구항 13】

구조물의 변위 측정 지점에 직접 설치되고, 위치 변화가 없는 복수의 후보 타겟들을 향해 레이더 신호를 송신한 후, 상기 복수의 후보 타겟들로부터 반사된 반사 신호를 수신할 수 있는 레이더;

상기 구조물의 상기 변위 측정 지점에 설치되고, 상기 구조물의 상기 변위 측정 지점에서의 가속도를 측정할 수 있는 가속도계; 및

상기 레이더 및 상기 가속도계로부터 각각 측정값을 수집하고, 상기 레이더가 감지한 복수의 후보 타겟들 중에서 하나의 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 상기 최적 타겟에 대한 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향의 변위에서 실제 진동 방향의 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 자동으로 산출할 수 있는 자동 초기 보정 기능; 및 상기 최적 타겟에 대한 레이더 측정값으로부터 추출한 위상에 상기 최종변환계수를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 상기 가속도계로 수집한 측정값을 이중적분하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하는 구조 변위 모니터링 기능을 수행하도록 구성된 변위 추정부를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 14】

제13항에 있어서,



상기 변위 추정부는,

상기 자동 초기 보정 기능과 상기 구조 변위 모니터링 기능을 수행하도록 작성된 컴퓨터 프로그램; 및

상기 컴퓨터 프로그램을 실행하는 프로세서를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 15】

제13항에 있어서,

상기 변위 추정부는,

상기 구조물의 변위 측정 지점에서의 변위가 상기 레이더의 신호의 파장보다 커서 상기 위상에 래핑 문제가 발생하면, 상기 구조물에서 측정한 가속도를 이용하여 예측한 위상에 가장 가까운 언래핑 위상을 선택하여 레이더 기반 변위를 추정하는 위상 언래핑 처리 기능을 더 수행하도록 구성된 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 16】

제13항에 있어서,

상기 자동 초기 보정 기능은

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 레이더를 이용하여 상기 변위 측정 지점의 가시선 방향으로의 초기 변위를 계측하는 기능;

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 상기 초기 변위에 복수 개의 변환계수 값을 적용하여 진동방향으로의 복수 개의 제1 변위를 산출하는 기능;



상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 측정하는 기능;

상기 가속도를 이중 적분하여 제2 변위를 산출하는 기능;

상기 복수의 후보 타겟들 각각에 대하여 산출된 레이더 기반 복수 개의 제1 변위 각각과 상기 제2 변위 간의 RMSE를 계산하고, 계산된 RMSE 값들 중에서 최소 값을 해당 후보 타겟의 최소 RMSE 값으로 결정하는 기능;

상기 복수의 후보 타겟들에 관해 결정된 복수의 최소 RMSE 값들 중에서 크기가 가장 작은 최소 RMSE 값을 갖는 후보 타겟을 상기 최적 타겟으로 자동으로 결정하는 기능; 및

상기 최적 타겟의 최소 RSME 값을 구하는 데 적용된 변환계수를 상기 최적 타겟의 최종변환계수로 자동으로 산출하는 기능을 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 17】

제13항에 있어서,

상기 구조 변위 모니터링 기능은,

상기 레이더를 이용하여 상기 최적 타겟에 대하여 레이더 측측을 하여 원시 위상을 추출하는 기능;

상기 가속도계로 상기 변위 측정 지점의 가속도를 측정하고 그 측정된 가속도를 이중 적분하여 상기 가속도 기반 변위를 산출하는 기능;

상기 구조물의 상기 변위 측정 지점의 변위가 상기 레이더의 레이더 신호의 파장보다 커서 상기 원시 위상에 위상 래핑 문제가 발생하면, 측정된 상기 가속도



를 이용하여 예측한 위상에 가까운 언래핑 위상을 선택하는 기능;

위상 래핑 문제가 없는 원시 위상 또는 위상 래핑 문제가 있어 언래핑 처리된 위상을 이용하여 상기 가시선 방향의 제3변위를 산출하는 기능;

상기 가시선 방향의 제3변위에 상기 최종변환계수를 적용하여 진동방향으로의 상기 레이더 기반 변위를 산출하는 기능; 및

상기 가속도 기반 변위와 상기 레이더 기반 변위를 유한 충격 응답(Finite Impulse Response(FIR)) 필터를 이용하여 융합하여 상기 최종 변위를 산출하는 기능을 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 18】

제13항에 있어서, 상기 최종 변위를 산출하는 기능은,

상기 레이더 기반 변위에 대한 로우패스 필터링을 수행하여 레이더 기반 저주파 변위를 얻는 기능;

상기 가속도 기반 변위에 대하여 하이패스 필터링을 수행하여 가속도 기반 고주파 변위를 얻는 기능; 및

상기 레이더 기반 저주파 변위와 상기 가속도 기반 고주파 변위를 융합하여 최종 변위를 산출하는 기능을 포함하는 것을 특징으로 하는 구조 변위 추정 시스템.

【청구항 19】

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 기재된 구조 변위 추정 방법을 수행하기 위하여 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체에 저장된 컴퓨터 실행가능 프로그램.



【청구항 20】

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 기재된 구조 변위 추정 방법을 수행하기
위한 컴퓨터 실행가능 프로그램이 기록된 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체.



【요약서】

【요약】

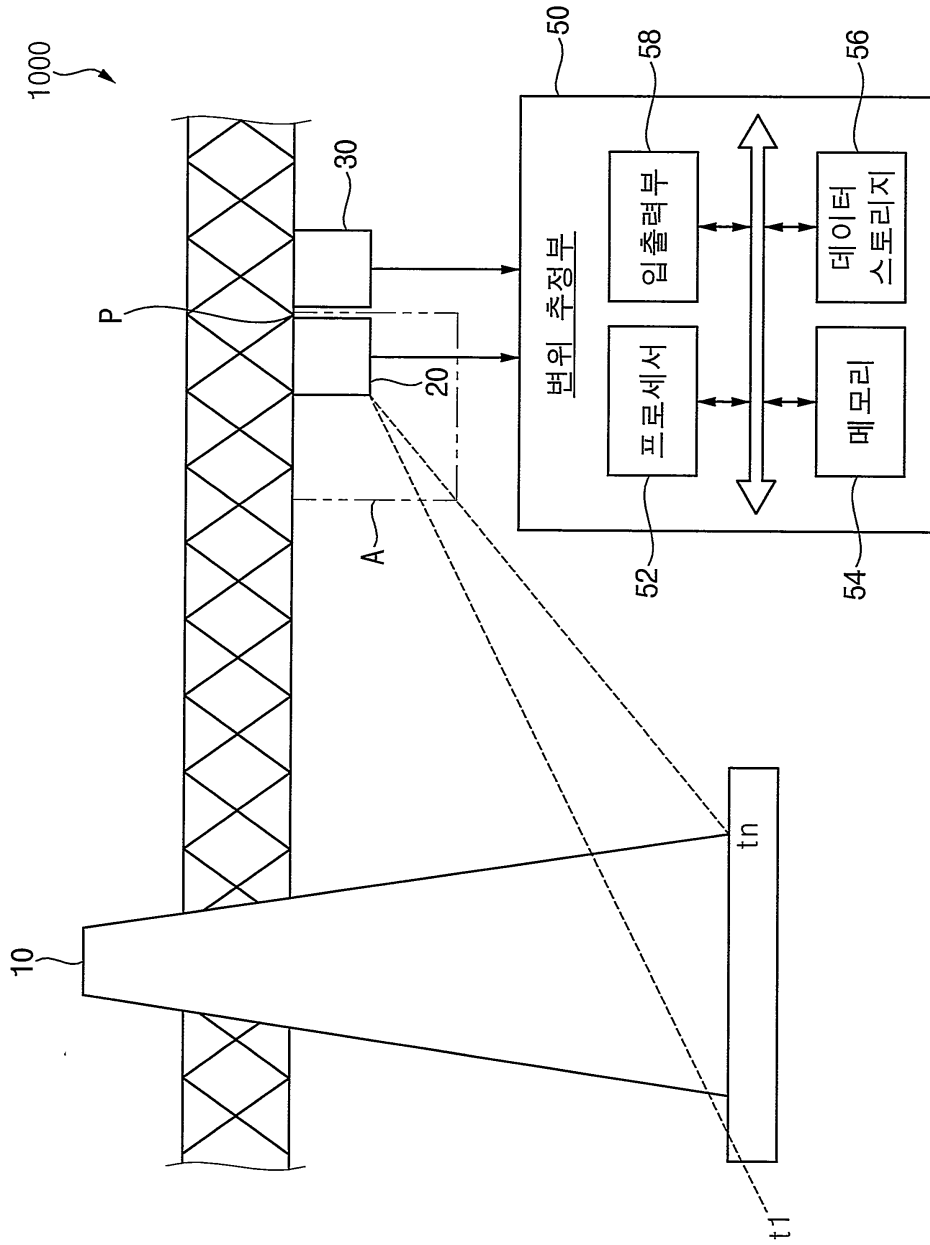
구조 변위 추정 방법은 컴퓨팅 장치에서 실행되는 컴퓨터 프로그램에 의해 수행되는 방법으로서, 컴퓨터 프로그램은 컴퓨팅 장치의 프로세서로 하여금, 자동 초기 보정 단계 및 구조 변위 모니터링 단계를 수행하도록 할 수 있다. 자동 초기 보정은, 구조물에 직접 설치된 레이더 및 가속도계로부터 각각 측정값을 수집하고, 레이더가 감지한 타겟들을 포함하는 복수의 타겟 후보군 중에서 하나의 최적 타겟을 자동으로 결정하고, 최적 타겟에 대한 가시선 방향의 변위에서 실제 진동 방향의 변위로 변환하기 위한 최종변환계수를 자동으로 산출할 수 있다. 구조 변위 모니터링은, 최적 타겟에 대한 레이더 측정값으로부터 추출한 위상에 최종변환계수를 적용하여 얻은 레이더 기반 변위와, 가속도계로 수집한 측정값을 이중적분 하여 얻은 가속도 기반 변위를 FIR 필터 기반으로 융합하여 최종 변위를 산출하여 구조 변위 예측의 정확성을 높일 수 있다.

【대표도】

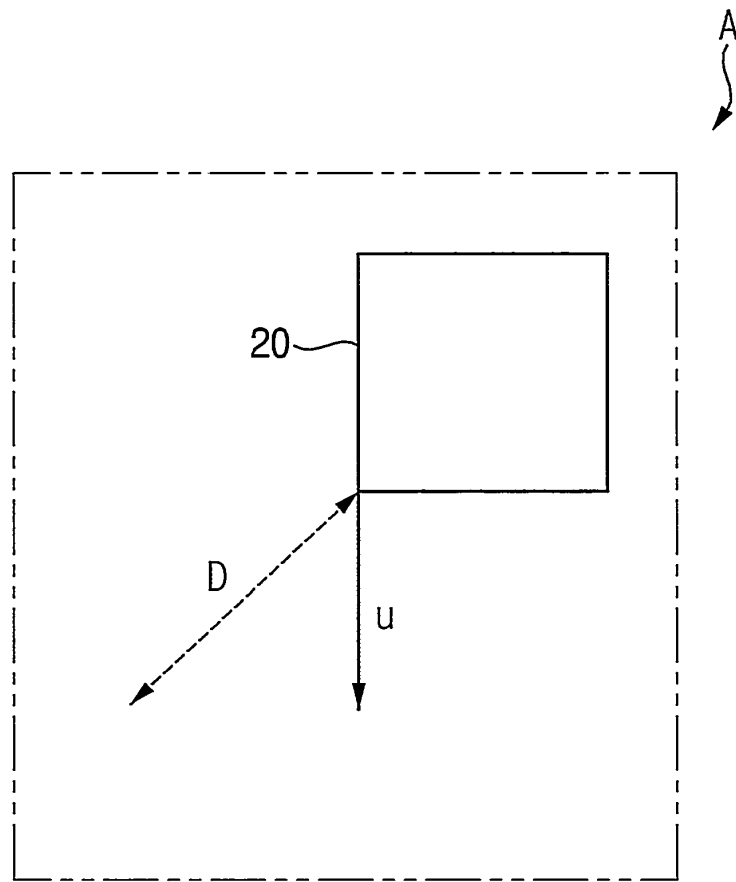
도 1



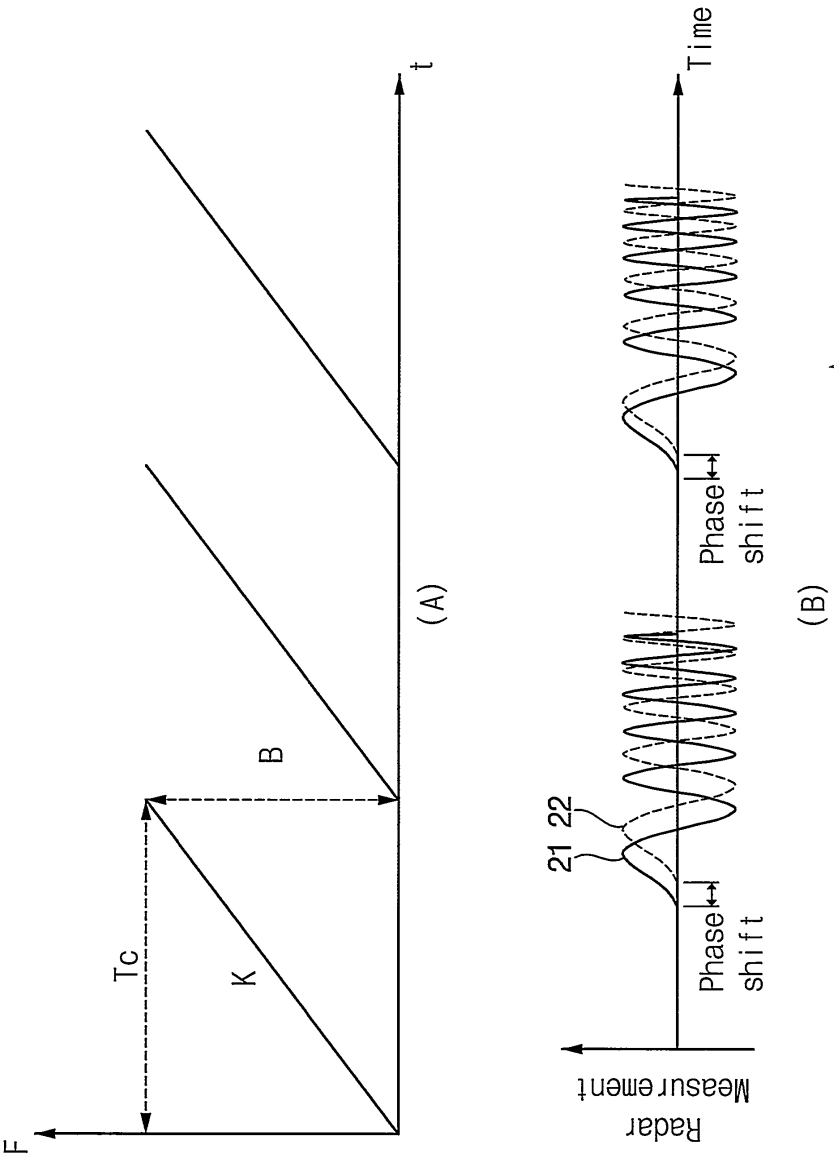
【도 1】



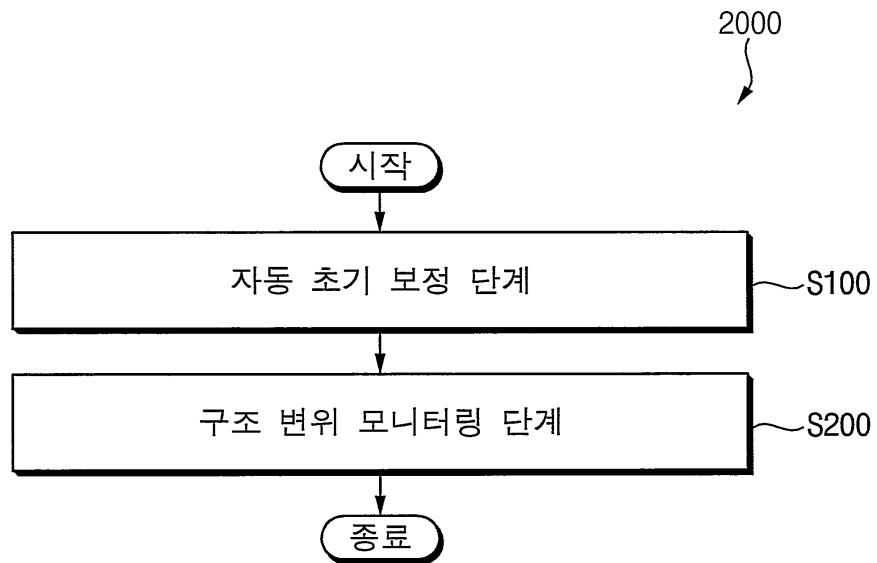
【도 2】



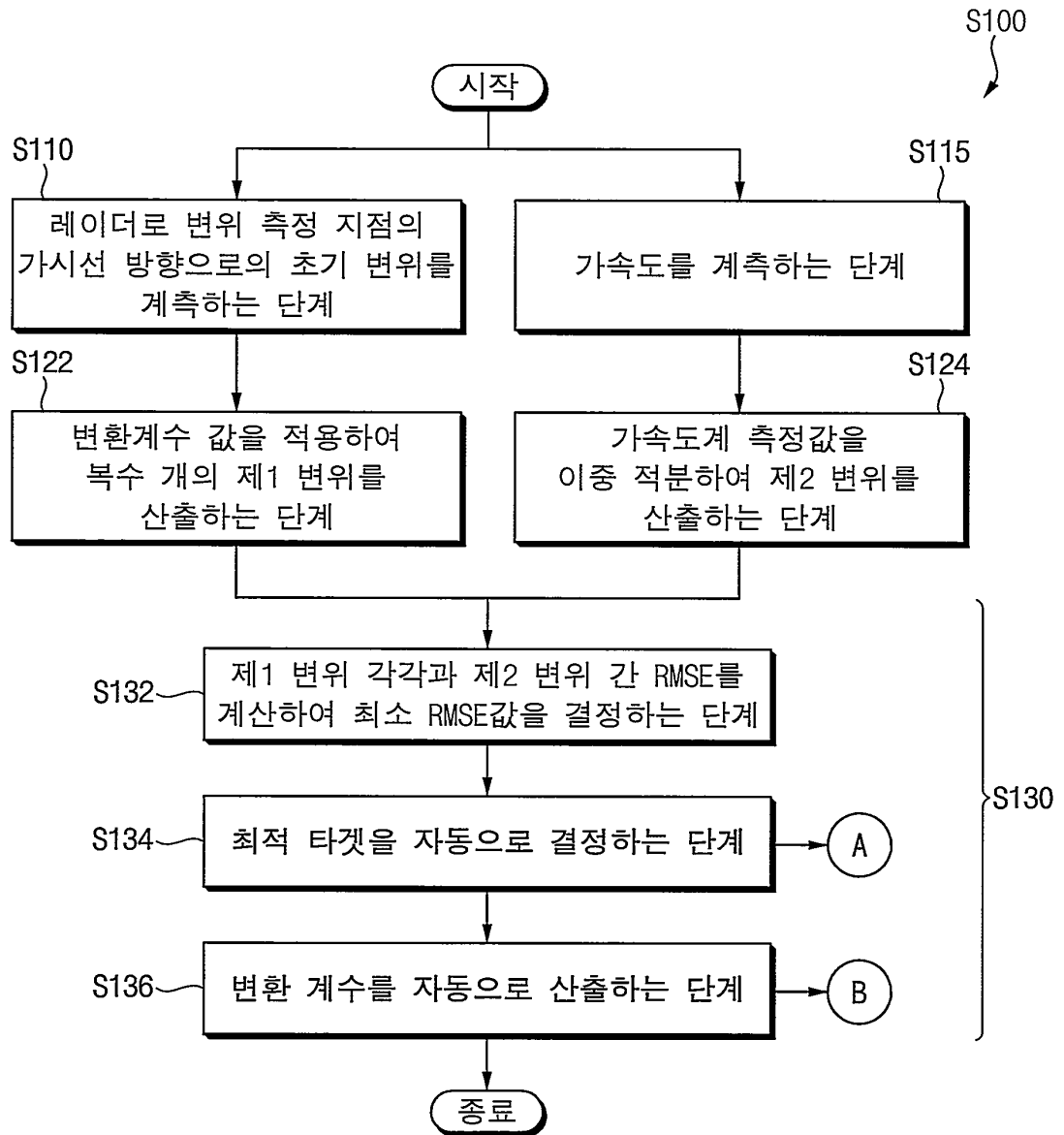
【도 3】



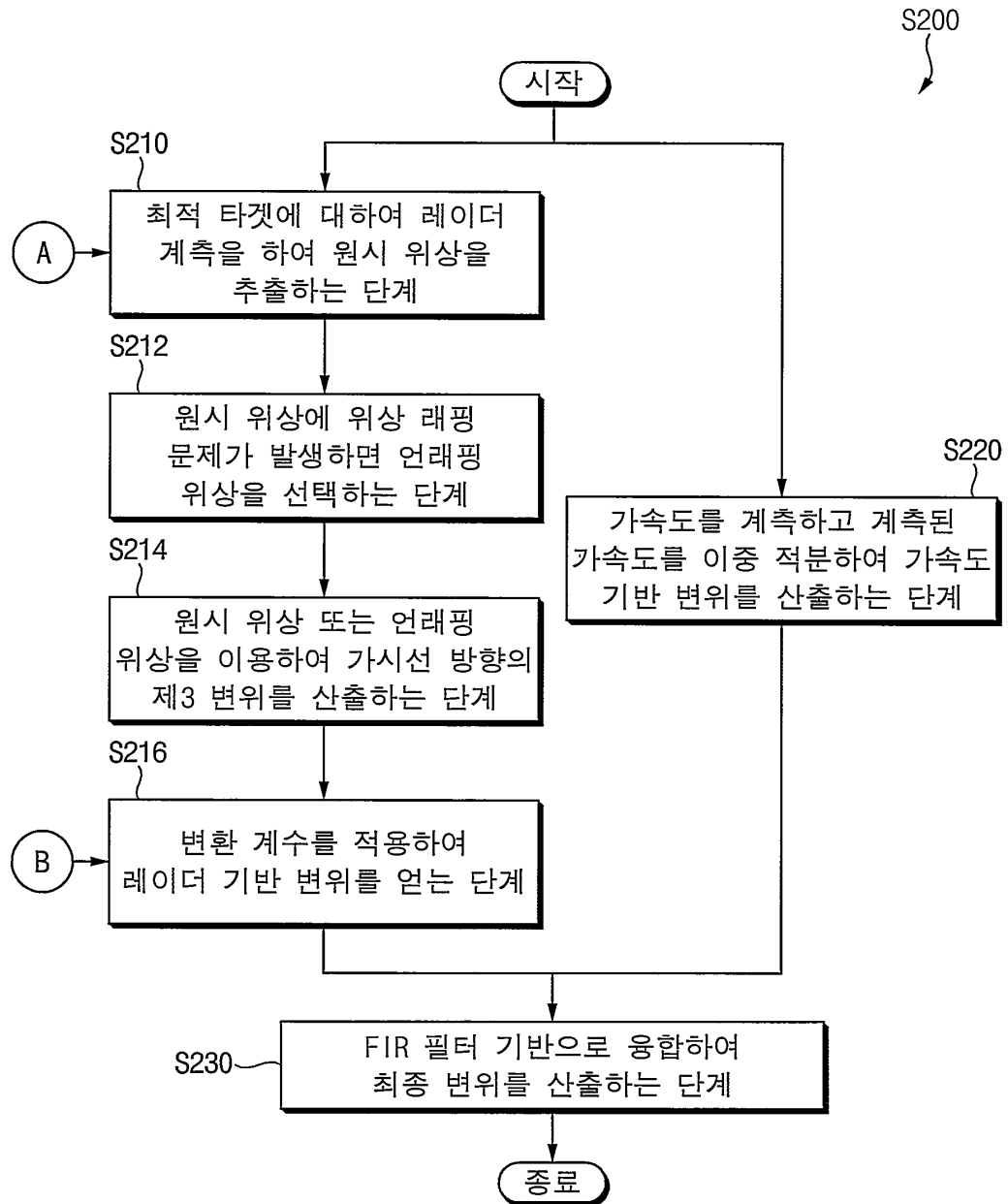
【도 4】



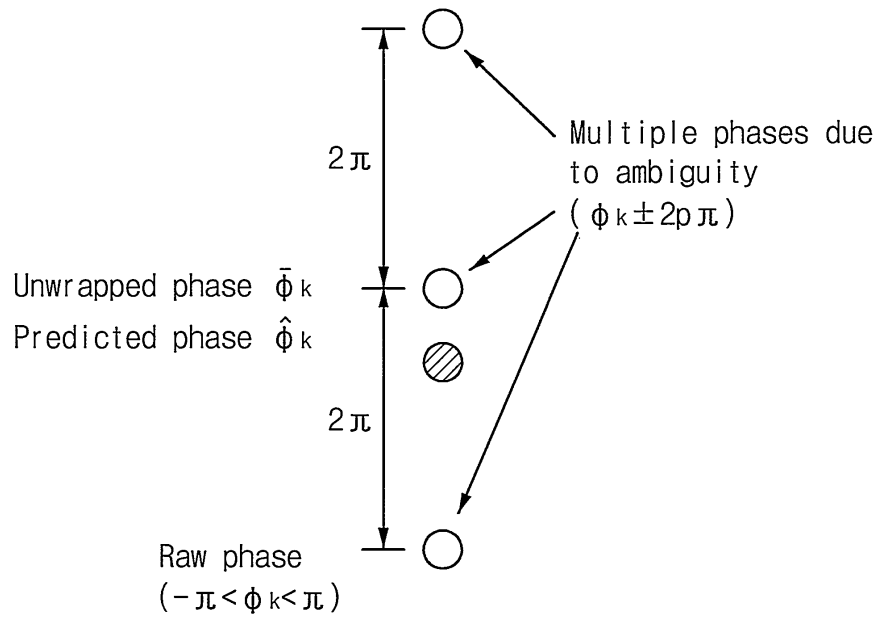
【도 5】



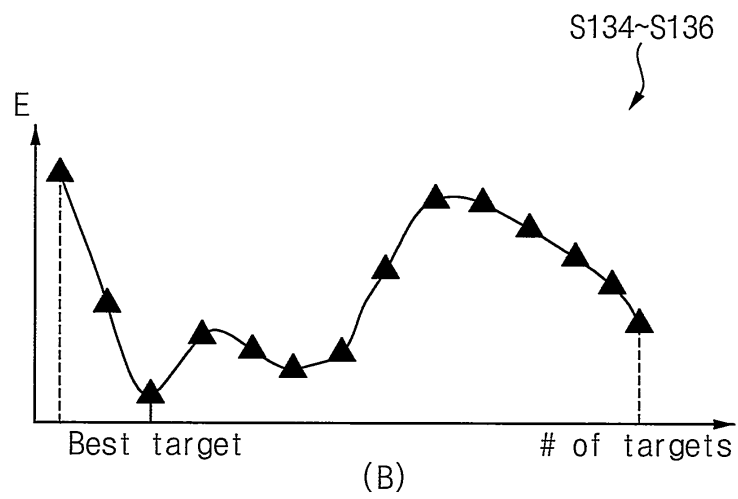
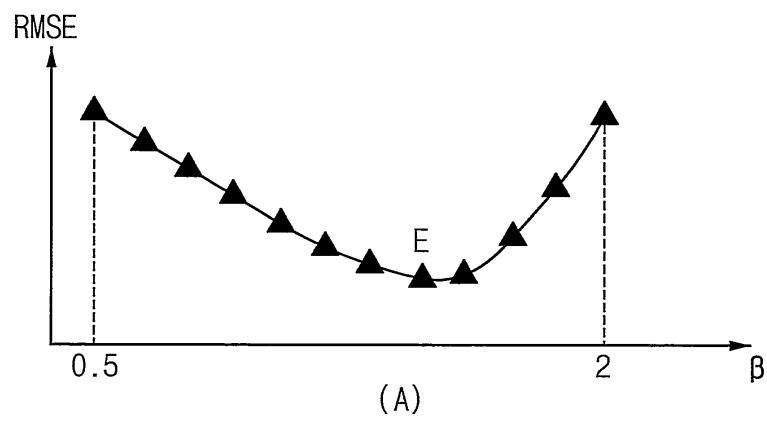
【도 6】



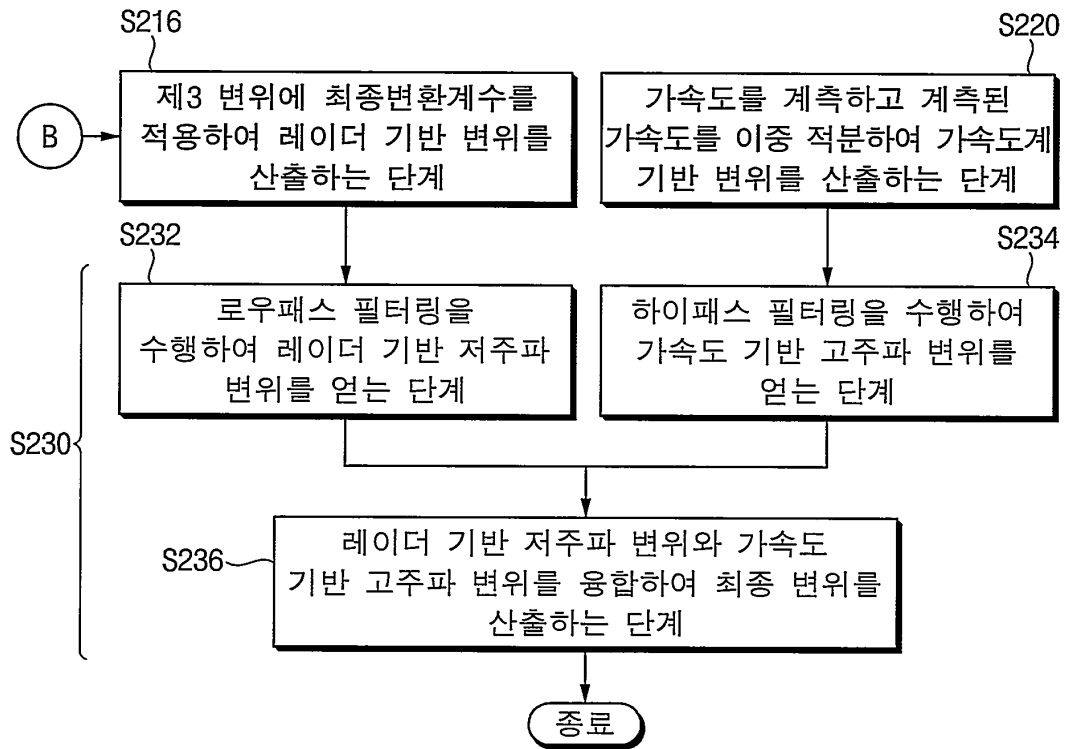
【도 7】



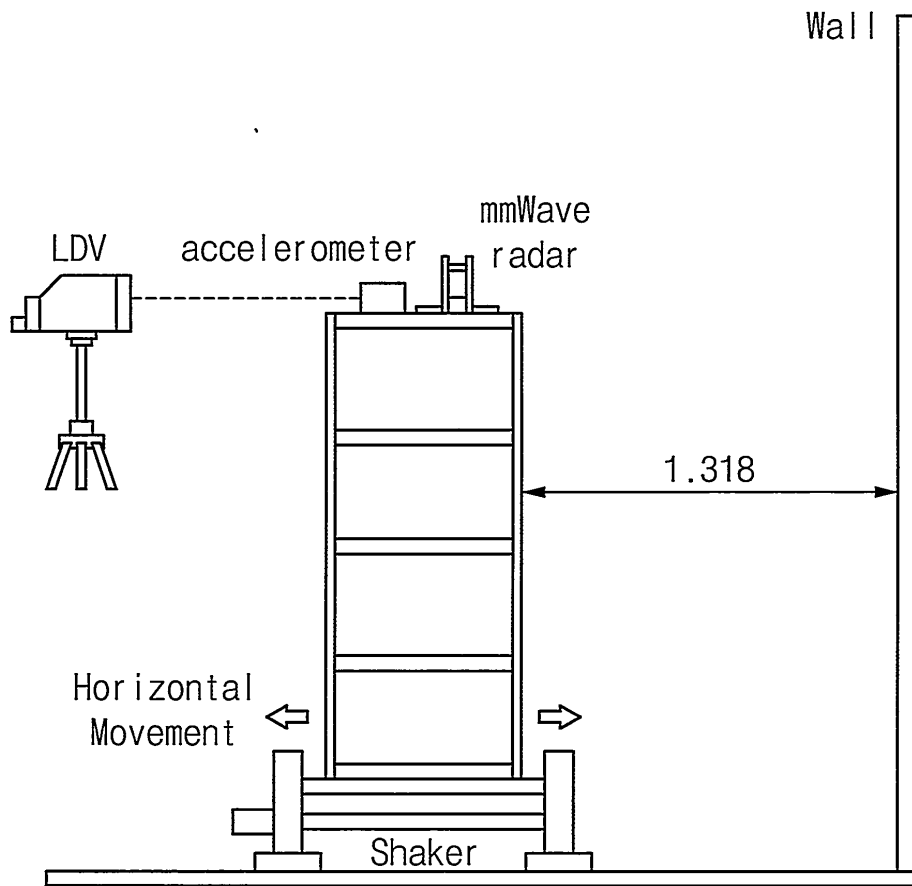
【도 8】



【도 9】

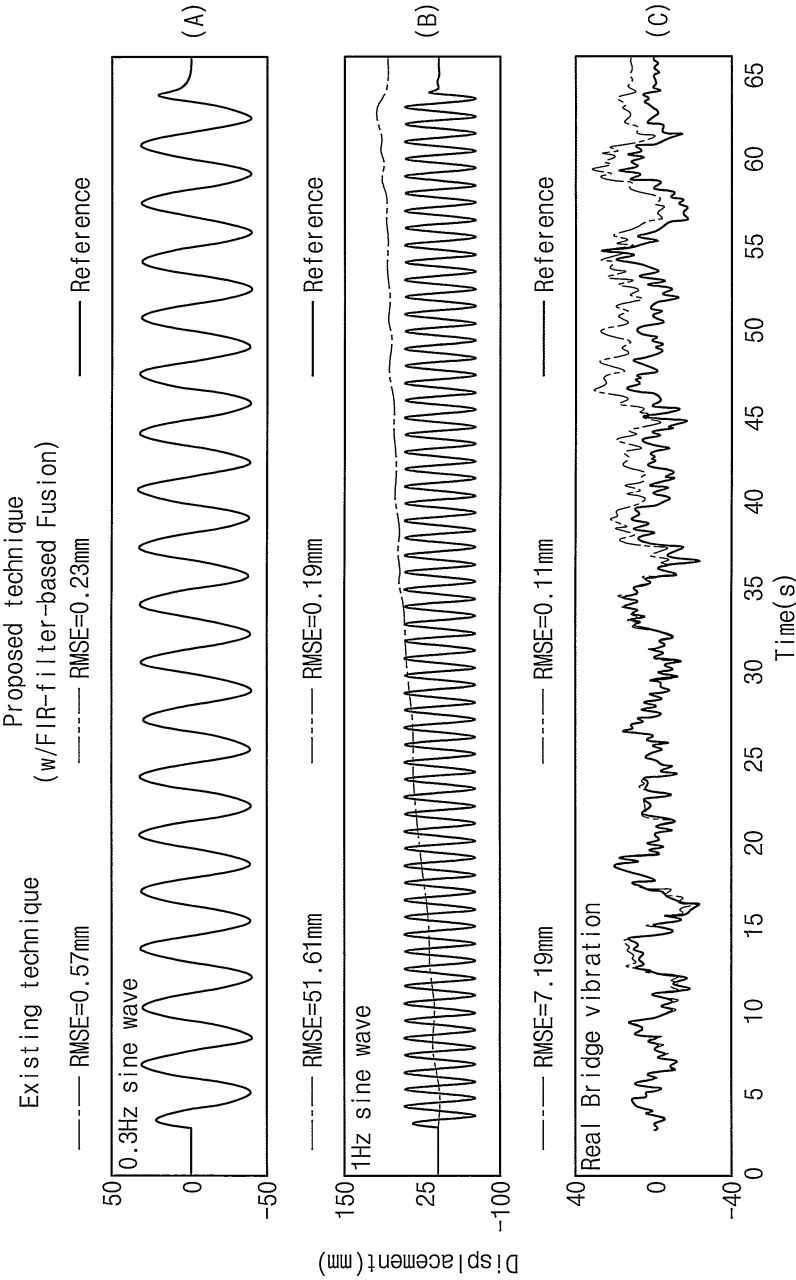


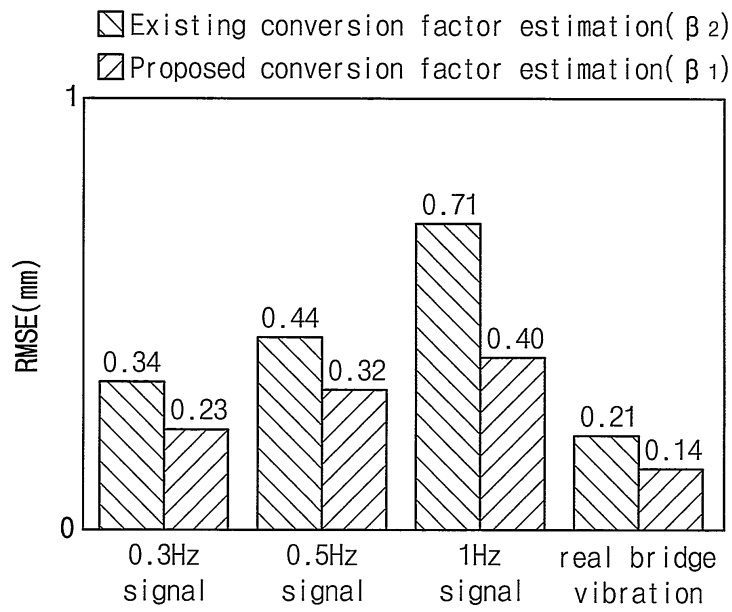
【도 10】



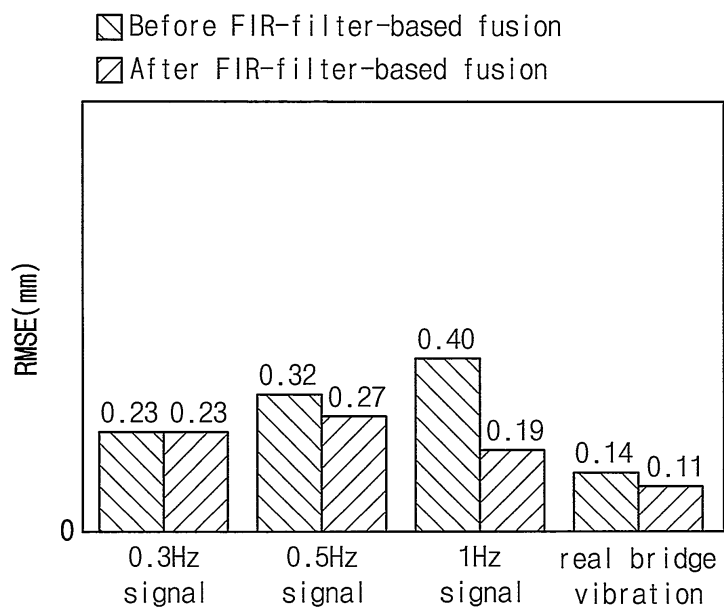


【图 11】



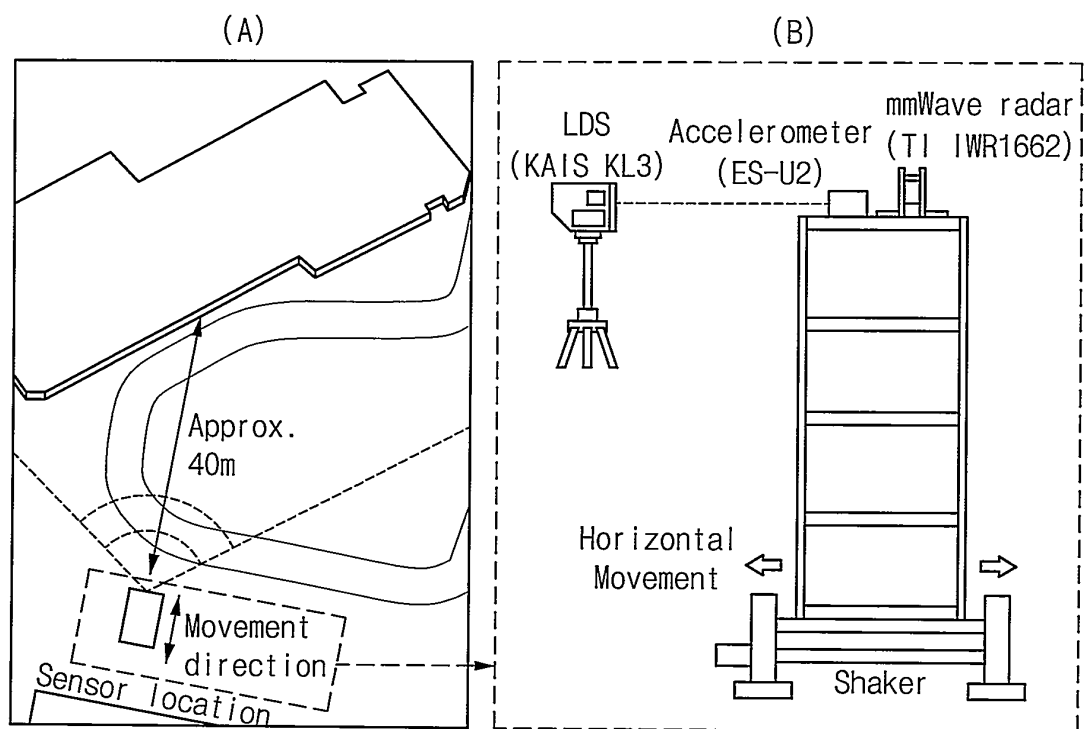


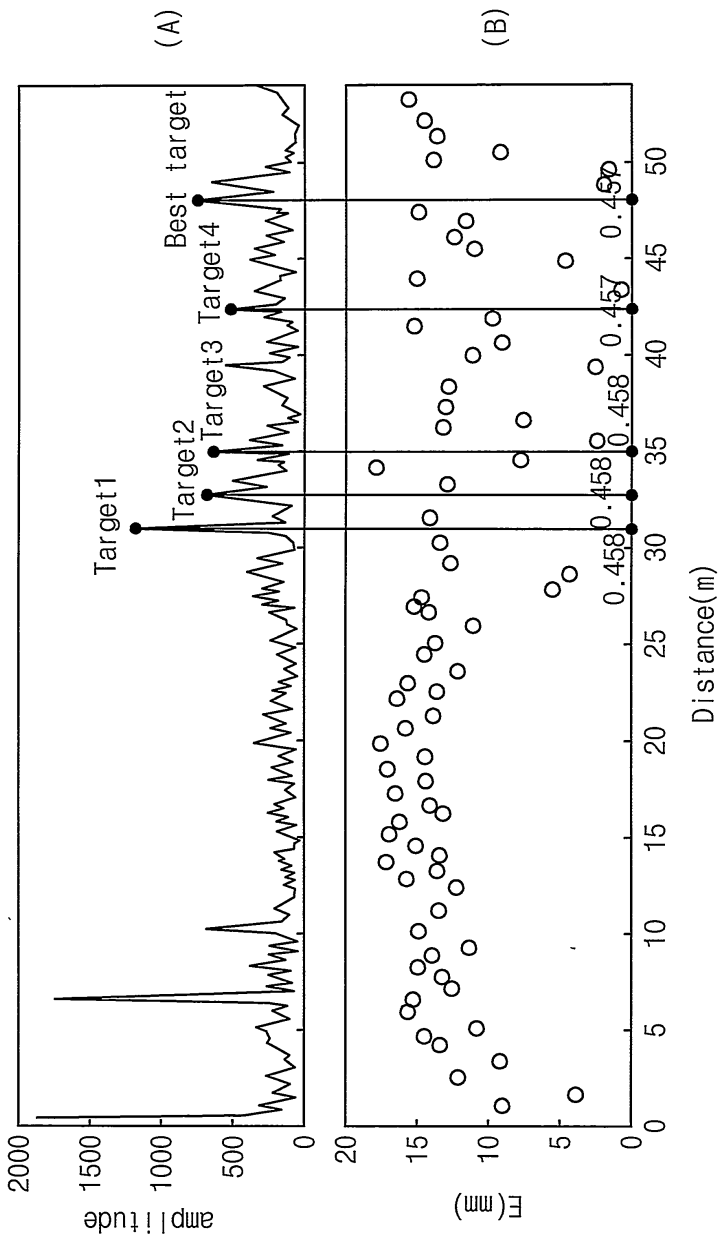
(A)

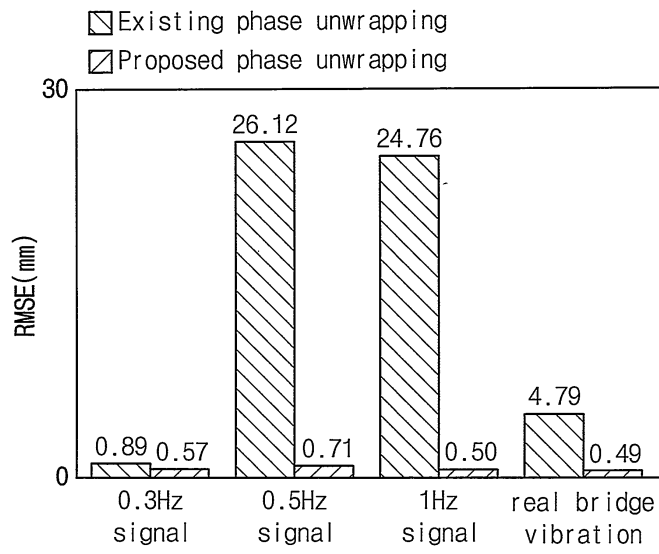


(B)

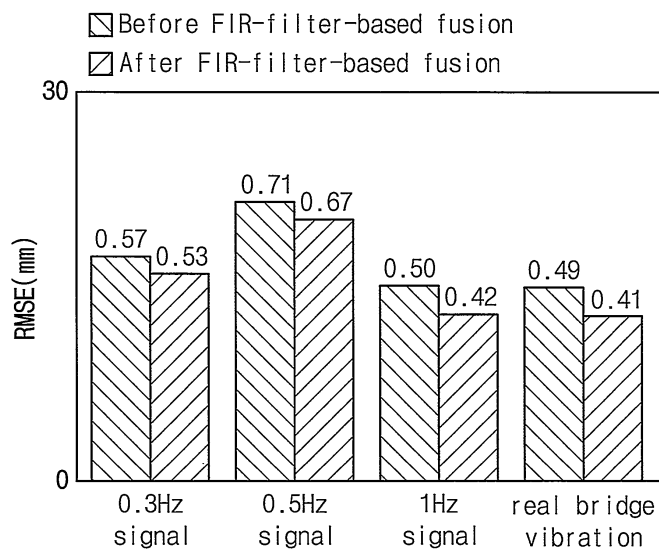
【図 13】







(A)



(B)

