

적응필터링 기법을 사용하여 자체진동을 보상하는 레이저 도플러 진동측정계

論 文
52C-11-6

Body Vibration Compensated Laser Doppler Vibrometer using Adaptive Filtering

崔盛旭* · 曹永鈞* · 金鎬成** · 張泰奎** · 姜珉植§

(Sungwook Choi · Youngkyun Cho · Hoseong Kim · TaeGyu Chang · MinSig Kang)

Abstract - A novel dual beam heterodyne Laser Doppler Vibrometer (LDV) in conjunction with FM demodulators, which utilizes a residual beam to eliminate the perturbation due to the vibrometer body vibration without any external reference surface, has been developed. Residual laser beam from the beam splitter is used to pick up the vibration of damper, which is mounted in the vibrometer, and combined with reference beam at the photodetector. The output signal of this detector and main signal are processed to extract the object vibration, using a least mean square adaptive algorithm. It is shown experimentally that the body vibration of 1-5 Hz can be effectively removed from the measured signal using DSP technology to extract unperturbed 100 Hz original signal.

Key Words : LDV , Vibration compensation , Adaptive Filter

1. 서 론

Heterodyne detection 방식을 사용하는 레이저 도플러 진동계(Laser Doppler Vibrometer, 이하 LDV)는 비접촉식이라는 우수성 때문에 널리 사용되고 있으며 상업적으로도 큰 잠재력을 지니고 있다. 또한 여타 광계측장비와 마찬가지로 동작 범위가 넓고, 해상도가 우수하며, 전자기 교란의 영향에도 강한데다가 신호대 잡음비(SNR)가 높다는 장점을 가지고 있다. 비록 작동상 다루기 어렵고 고가라는 단점이 있지만 자동차 [1]와 고전압 장비와 같은 중장비에서부터 CD플레이어 [2]와 진동측정용 MEMS 장비 [3]와 같은 작고 섬세한 장치까지 넓은 응용분야에 걸쳐 이용되고 있다. 한편 디지털 신호 처리 기술 또한 아날로그 주파수 변조 혹은 위상 변조 기술 [4,5]에서 발생하는 여러 가지 에러를 해결하기 위해 LDV에 적용되어 왔다. LDV 자체의 진동 때문에 신호가 왜곡되는 것을 방지하기 위해서 LDV를 무겁고 부피가 큰 방진 테이블 위에서 동작시켜야 하며 만약 Silicon 기판 위에서 초소형구조물이 진동할 때와 같이 측정되어질 진동 표면이 고정된 기준면에 영향을 끼치지 않을 때에는 차등모드(differential mode) two point 레이저 도플러 진동계를 사용할 수도 있다 [3]. 그러나 자동차와 같이 무거운 물체의 진동을 측정할 때 그러한 고정면을 찾기는 어렵다. 한편 laser object beam의 방향과 평행하

게 LDV 몸체가 움직이면 자체진동이 측정하고자 하는 물체의 진동신호에 중첩되는데 실제적인 경우 자체의 진동주파수가 대단히 낮고 그 주파수를 미리 알 수 없으므로 아날로그 필터를 사용해 그 진동 성분을 제거해 내는 것은 어려운 일이다.

본 연구에서는 LDV 자체의 진동성분을 제거할 수 있는 새로운 dual beam heterodyne 레이저 도플러 진동계를 개발하였다. 기존 LDV의 레이저빔과 beam splitter에서 생기는 여분의 레이저빔을 동시에 사용하였고 두 빔이 완전히 독립적이며 DSP에 기반을 둔 LMS 적응 필터 [1] 기법을 적용하였기 때문에 본 연구에서 개발된 LDV는 독립된 두 개의 object beam을 이용하는 LDV로 사용할 수도 있으며 별도의 외부 기준면 [2]을 사용할 수 없는 경우에는 자체 진동 제거 메커니즘을 갖는 진동 측정기로 사용할 수도 있어 그 응용분야가 확대되리라 사료된다.

2. 본 론

2.1 이론 및 장치 setup

자체 진동을 측정하기 위해 여분의 레이저빔을 이용하고 FM 복조 방식을 이용하는 heterodyne 레이저 도플러 간섭계(interferometer)를 개발하였다

LDV의 광원으로는 1 mW HeNe 레이저를 사용하였고, 몸체를 진동시키기 위해 그림 1과 같이 모터로 작동되는 회전 원판과 크랭크 축을 결합시켜서 1~5Hz의 주기로 레일을 따라 수평으로 움직이도록 만들었다. 그림 1에서 굵은 선은 기존의 LDV 광경로를 나타내고 점선은 LDV 자체 진동을 측정하기 위한 광경로를 보여준다.

* 正 會 員 : 中央大學 電氣電子工學部 碩士課程

** 正 會 員 : 中央大學 電氣電子工學部 教授

§ 正 會 員 : 景園大學 機械工學科 教授

接受日字 : 2003년 2월 26일

最終完了 : 2003년 9월 18일

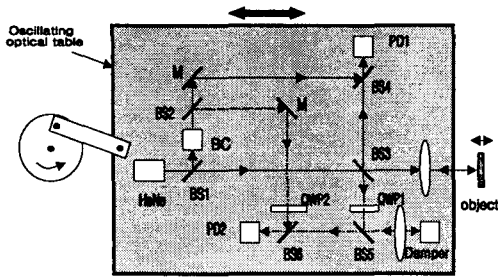


그림 1 LDV 실험 설치. BS: Beam splitter, M: Mirror, BC: Bragg Cell, QWP: Quaterwave Plate, PD: Photodiode.

Fig 1 Experimental setup for LDV : BS: Beam splitter, M: Mirror, BC: Bragg Cell, QWP: Quaterwave Plate, PD: Photodiode.

일반적인 LDV 구조에서와 같이 선형 편광된 레이저빔은 beam splitter (BS1)에서 주 object beam과 기준빔으로 나누어진다. beam splitter (BS3)와 렌즈를 통과한 beam의 초점은 진동하는 물체의 표면에 모아진다. 반사 및 산란되는 빛의 대부분은 다시 beam splitter BS3를 거친 후 BS4를 통과하여 주 간섭계로 돌아간다. 한편 기준빔은 acousto optic modulator (Bragg Cell)를 지나게 되는데 여기서 $f_B=40MHz$ 의 주파수 천이가 일어난다. 주파수가 천이된 기준빔과 주 object beam의 경로를 BS4에서 일치시켜 간섭이 일어나도록 유도한다. 그런 다음 검출기(PD1)를 이용해 간섭이 발생한 두 빔의 power를 검출해 낸다.

보조 광경로에서는 BS3를 통해 나온, 기존의 LDV에서는 손실에 해당하는, 여분의 빛을 사용하여 damper 진동자의 표면 진동을 측정한다. 이는 진동 측정계의 자체 진동을 측정하기 위한 부분이다. 보조 object beam이 $\lambda/4$ plate QWP1을 거쳐 BS5와 렌즈를 차례로 통과하면 damper의 표면에 그 초점이 모아지게 된다. damper 표면에서 반사된 원형 편광의 beam 중에서 절반은 beam splitter BS5와 BS6을 차례로 거쳐 보조 간섭계로 들어가게 되고 나머지 반은 BS5에서 QWP1를 거쳐 main 간섭계로 되돌아간다. QWP1을 두 번에 걸쳐 통과한 beam의 편광은 main 빔의 편광과 수직이 되므로 서로 간섭이 일어나지 않게 된다. BS2를 통과한 후 QWP2를 지나면서 원형 편광된 보조 기준빔과 보조 object beam은 BS6에서 서로 간섭이 일어나게 되고 검출기2(PD2)를 사용해 그 때의 power를 검출한다.

LDV에서 photodetector의 전기적 출력은 FM신호임을 다음 수식으로부터 알 수 있다. 크기가 A이고 각 주파수가 ω_s 인 진동하는 물체 표면의 변위는

$$S(t) = A \cos(\omega_s t) \tag{1}$$

$$\delta(t) = 4\pi S(t)/\lambda \tag{2}$$

로 나타낼 수 있고 기준빔 (E_1)과 반사된 빔 (E_2)의 전계 강도를

$$E_1(t) = E_1 \exp(j\omega t) \tag{3}$$

$$E_2(t) = E_2 \exp[j(\omega + \omega_B)t + \delta(t)] \tag{4}$$

로 표현할 때, ω 는 HeNe 레이저빔의 주파수이고, $\omega_B = 2\pi f_B$, $\delta(t)$ 는 변위 때문에 생기는 위상 천이를 나타낸다. 위 두 beam은 광검출기에서 간섭이 일어나서 검출되고 광검출기의 출력 전류는 입사된 빛의 power에 비례하기 때문에 $(E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^*$ 에 비례한다. 그러므로 출력 전류의 ac성분은[6]

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_B t + 4\pi S(t)/\lambda) \tag{5}$$

이 된다.

출력 전류의 주파수는 식(5)의 위상을 미분하면 얻어지므로 다음과 같이 표현되며

$$f = f_B + 2v(t)/\lambda = f_B + 2A \omega_s \sin(\omega_s t)/\lambda \tag{6}$$

이것은 진동 표면의 순간 속도가 된다.

식(6)에서 주파수와 주파수의 시간에 대한 변화율을 측정하면 기존의 FM 변조 기술을 이용해서 진동 크기 A와 주파수 ω_s 를 계산해 낼 수 있다. 실험에서는 두 개의 동일한 변조기에 하나의 발진기(39MHz)를 공통으로 사용하여 중심 주파수(IF)가 1MHz인 신호를 만들었다. 그리고 phase locked loop(PLL)를 이용하여 주파수의 변화(속도)에 비례하는 전압 출력을 얻을 수 있었다. 그림2는 변조 회로의 block diagram을 보여준다.

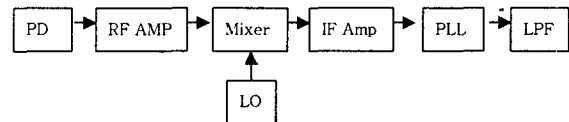


그림 2 변조 회로의 블록 다이어그램. LO: Local Oscillator
Fig 2. Block diagram of the demodulator. LO: Local Oscillator

제작된 damper의 구조는 그림 3과 같이 구형 원통의 내부에 정성이 있는 액체가 가득 채워져 있고 밀봉 처리되어 있으며 초기 응력이 가해진 두 개의 스프링 코일이 피스톤 형태의 물체를 지탱하도록 하였다. 자체 진동을 측정하기 위해 적절한 크기의 진동을 만들어 낼 수 있는 스프링 상수 K, 원통 질량 M, 용액의 점성 C를 계산하여 설계하였다.

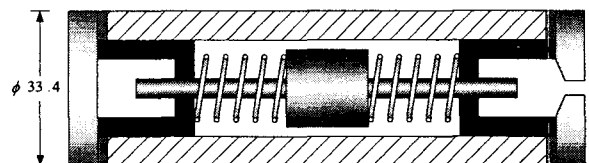


그림 3 Damper의 구조
Fig 3 Schematic diagram of the damper.

자체 진동을 갖는 LDV 시스템을 그림4에서 보여진 것처럼 모델링하였다. 그림4에서 χ 는 LDV 몸체를 기준으로 한 원통 물체의 변위이고 y 는 가상의 고정면을 기준으로 한 LDV 몸체의 변위이다.

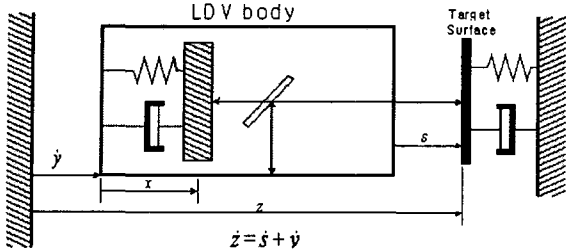


그림 4 LDV와 자체진동자 모델링. x 와 z 는 가상 절대 평면으로부터 떨어진 거리.
Fig. 4 Modeling of LDV and body vibration; y and z are the distances from the virtual absolute plane.

χ 와 y 사이의 관계식은

$$M\ddot{\chi} + C\dot{\chi} + K\chi = -M\ddot{y} \quad (7)$$

로 표현된다.

만일 이 방정식의 계수를 정확히 결정할 수 있다면 몸체의 변위 y 또한 구할 수 있다. 그러나 오차를 모델링 하는 것이 불가능하고 그 계수가 온도에 대한 함수이므로 변위 y 를 결정하는 것이 매우 어렵다. 이런 문제점으로 인해 DSP를 기반으로 한 adaptive filtering 기술을 사용하기로 하였다.

2.2 실험결과

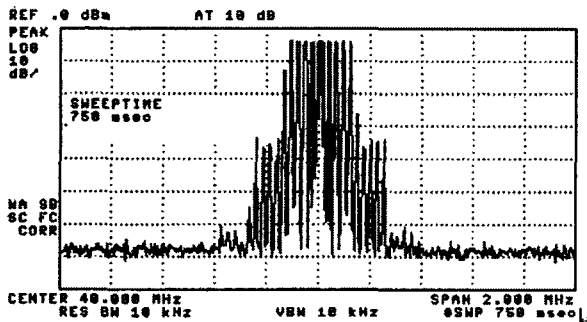


그림 5 타겟 표면이 100Hz로 진동하고 있을 때 증폭된 photodiode의 스펙트럼.
Fig. 5 Spectrum of PD output when the target vibrates at 100 Hz.

그림 5는 측정하고자 하는 물체의 표면이 100 Hz로 진동할 때 광검출기 출력 신호의 스펙트럼을 보여준다. 이 신호는 FM신호임이 분명하지만, 그 주기가 스펙트럼 analyzer의 FFT(Fast Fourier Transform)의 적분시간보다 매우 길기 때문에 전형적인 FM 스펙트럼과는 다르며 단지 그 스펙트럼은 신호의 순간적인 주파수 성분을 나타낼 뿐이다.

측정하고자 하는 물체의 표면이 100 kHz와 같이 충분히

높은 주파수로 진동할 때 스펙트럼은 그림6에서 나타난 것과 같이 전형적인 FM 스펙트럼 패턴을 보여준다.

그림 7은 측정 물체로 사용한 스피커가 100Hz로 진동할 때의 진동 속도를 검출한 복조기 1의 출력 신호이며 그것은 예상한 바대로 100 Hz의 정현파임을 확인 할 수 있었다.

LDV 몸체가 진동하고, 측정하고자 하는 물체의 표면은 고정되어 있을 때에는 그림 8과 같은 LDV의 자체 진동신호를 측정할 수 있었다. 이 때 그림 8의 시간 축은 그림 7에서의 시간축의 50배이다.

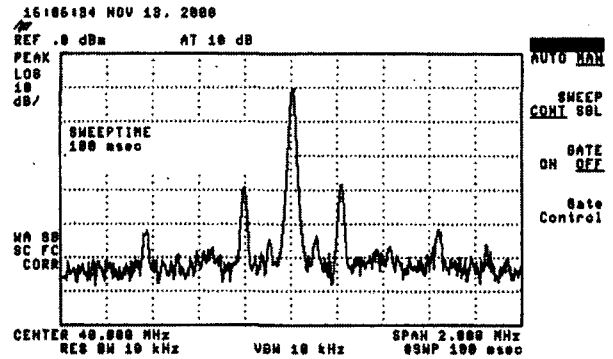


그림 6 타겟 표면이 100kHz로 진동하고 있을 때 증폭된 photodiode의 스펙트럼.
Fig. 6 Spectrum of PD output when the target vibrates at 100 kHz.

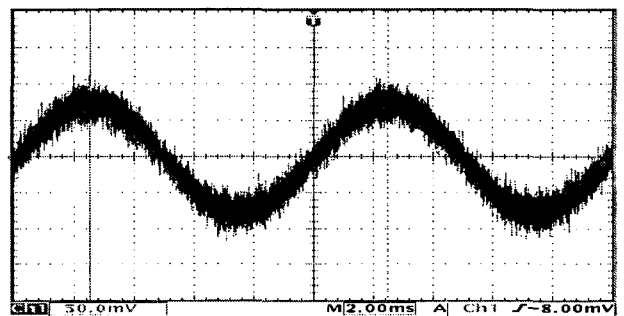


그림 7 100Hz로 진동하는 타겟 표면의 속도에 대한 복조기 1에서의 출력신호.
Fig. 7 Output signal of demodulator 1, corresponding the velocity of the target surface vibrating at 100 Hz

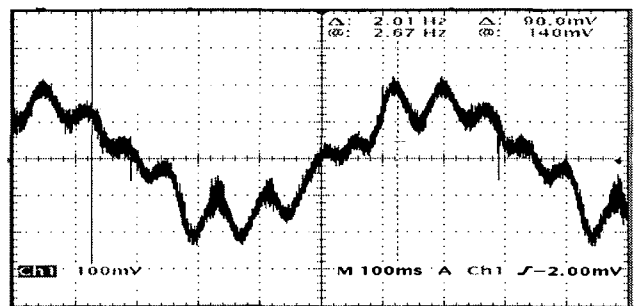


그림 8 타겟 표면이 고정되고 자체진동자가 1.5Hz로 진동할 때 복조기 1에서의 출력신호.
Fig. 8 Output of demodulator 1 when the target surface is fixed and the LDV body is vibrating at 1.5 Hz.

LDV의 자체 진동신호는 복잡한 패턴을 보이는데 그 이유는 LDV의 몸체가 1.5Hz를 기본주파수로하고 많은 harmonic 성분을 가지면서 진동하기 때문이다.

LDV 몸체에 고정되어 있는 damper는 가속도계이기 때문에, 복조기 2의 출력은 그림 9에서 보는 것과 같이 그림 8 파형의 미분값이 된다. 그것이 노이즈 같이 보이지만, 이론적으로는 이 신호를 시간에 따라 적분을 하게 되면 그림 8과 같아질 것이다.

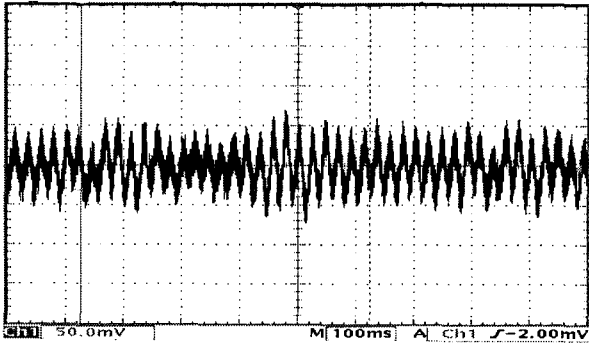


그림 9 타겟 표면이 고정되고 자체진동자가 1.5Hz로 진동할 때 복조기 2에서의 출력신호.

Fig. 9 Output of demodulator 2 when the target surface is fixed and the LDV body is vibrating at 1.5 Hz.

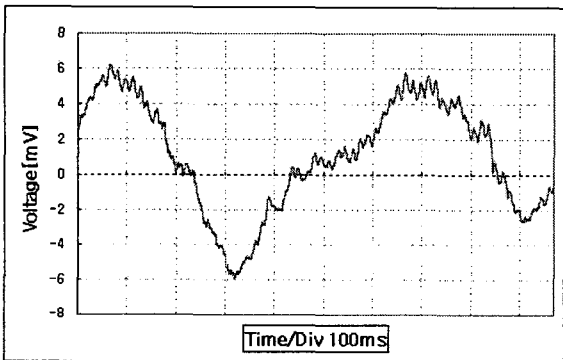


그림 10 그림. 8의 신호와 비슷한 그림. 9 신호에서의 수치 시간 적분된 신호.

Fig. 10 Numerical time integration of the signal in Fig. 9, which is similar to the signal in Fig. 8.

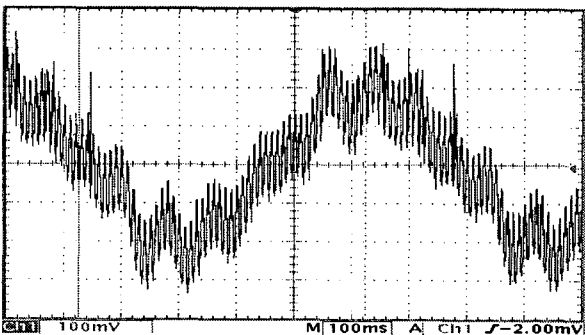


그림 11 타겟 표면과 자체진동자가 각각 100Hz와 1.5Hz로 진동할 때 복조기 1에서의 출력신호.

Fig. 11 Output of demodulator 1 when the target surface and the LDV body are vibrating at 100 Hz and 1.5 Hz, respectively.

그러나 그림 10에서 보는 바와 같이 적분의 결과는 측정과정에서 생기는 노이즈와 아날로그 신호 처리과정에서 생기는 노이즈에 의해 그림 8과 완전히 일치하지 않는다.

측정하고자 하는 물체의 진동과 LDV 자체 진동이 동시에 일어날 때 복조기 1의 출력은 그림 11과 같이 그림 7과 그림 8을 중첩한 것이 된다. 그림 7과 같은 물체만의 진동 신호를 대상물체와 몸체가 동시에 진동할 때의 신호인 그림 9의 신호에서 추출해 내는 것이 목표이다. 이론적으로는 그림 11의 신호에서 복조기 2의 출력을 시간 적분한 값인 그림 10의 신호를 빼주면 물체만의 진동신호를 얻을 수 있지만 적분한 신호에 너무 많은 noise 성분이 혼재하므로 이것은 매우 어려운 작업이며 실제의 경우에도 원하는 신호를 아날로그 필터링 방법으로 복원하는 것은 거의 불가능하다. 그 이유는 자체 진동의 주파수 특성을 예측한다는 것이 불가능하고 매우 낮은 주파수 범위에서 넓은 대역폭을 가지기 때문이다. 그런 이유로 주 신호로부터 자체 진동 신호를 제거하기 위해 DSP 기술을 사용하였는데 그 개요를 그림 12에 나타내었다.

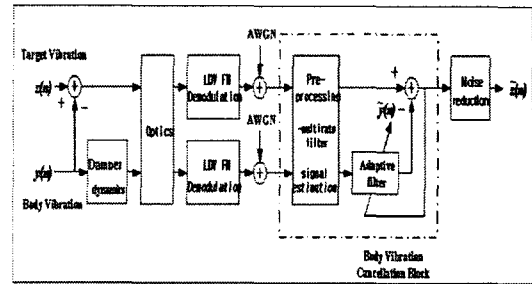


그림 12 적응 필터링 기술의 블록 다이어그램.

AWGN: Additive white gaussian noise

Fig. 12 Block diagram of adaptive filtering technique.

AWGN: Additive white gaussian noise

입력신호에서 자체 진동 신호를 제거하는 adaptive filter는 PD1에서 검출된 주 신호와 filter estimation 사이의 차이값이 filter input과 상관관계가 없을 때까지 least means square(LMS) 알고리즘을 사용하여 필터 계수를 갱신한다. 본 실험에서는 오실로스코프의 수치 데이터를 PC에 저장하고 DSP 작업을 PC에서 수행하였다. 노이즈를 제거한 후에 얻은 측정하고자 하는 물체의 진동 신호는 그림 13과 같다. 그림 13의 신호는 LDV 자체 진동에 의해 교란되어버린 측정 신호로부터 얻고자 하는 진동 신호만을 깨끗이 뽑아 낼 수 있음을 보여준다.

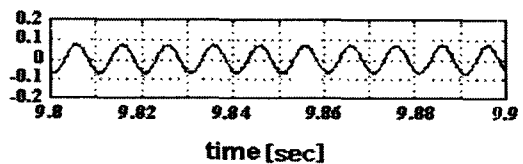


그림 13 타겟 표면과 자체진동자가 각각 100Hz와 1.5Hz로 진동할 때 노이즈를 제거하고 마지막으로 저장된 타겟 신호.

Fig. 13 Final restored target signal, after noise reduction when the target surface and the LDV body are vibrating at 100 Hz and 1.5 Hz, respectively.

3. 결 론

자체 진동 때문에 발생하는 교란성분을 외부의 기준 표면 없이 제거할 수 있는 새로운 dual beam 레이저 도플러 진동계를 개발하였다. 기존의 LDV와 달리 Beam splitter에서 나오는 여분의 레이저 빔을 진동계에 장착한 damper 진동자의 진동을 추출하는데 사용하였고 광검출기(photodetector)에서 기준빔과 합쳐지도록 만들었다. 물체의 진동을 추출해내기 위해 LMS 적용 알고리즘을 detector의 출력신호와 주신호에 적용시켜 처리하였다. DSP 기술을 이용하여 자체 진동에 의한 교란 성분을 측정 신호로부터 효과적으로 제거할 수 있었다. 본 연구에서는 LDV 출력 신호를 오실로스코프에 저장한 후 수치 자료를 PC로 옮겨서 처리하였다. 따라서 데이터를 실시간으로 처리하기 위해서는 중앙연산 처리 장치를 사용한 온라인 하드웨어(online hardware)가 필요하고 사료되며 이 단계가 완성된다면 그 응용분야는 더욱 넓어질 것이다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학재단의 특정기초연구(1999-2-302-015-3)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Aatola, Vibration measurements of automobile catalyst, First international Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 2358, 359 364 (1994)
- [2] G. Liotto and C.Wang, Vibration measurement by a laser Doppler displacement meter, Second international Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 2868, 337 343 (1996)
- [3] J. Wang and E. Zhang, Application of laser vibrometer in vibration measurement of Microstructures, Second international Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 2868, 318 325 (1996)
- [4] A. Link, J. Gerhardt, and H. von Martens, Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range, 37-48 (1966)
- [5] V.A. Grechikhin and B.S. Rinkevichius, Digital Hilbert transform for processing of laser Doppler vibrometer signals, Second international Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 2868, 89-96 (1996)
- [6] Seonghoon Kim, Jinhwan Kim, Hoseong Kim, Development of high resolution laser Doppler Vibrometer, Trans. KIEE, Vol. 49C, No. 2, 125-132 (2000)
- [7] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 1996

저 자 소 개

최 성 옥(崔 盛 旭)

1975년 2월26일생. 2002년 중앙대학교 전자전기공학부 학사. 2002년3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정.

조 영 균(曹 永 鈞)

1975년 4월10일생. 2002년 중앙대학교 전자전기공학부 학사. 2002년3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정.



김 호 성(金 鎬 成)

1957년 10월 11일생. 1980년 서울공대 전기공학과 학사 1982년 동 대학원 전기 공학과 석사. 1992년 SUNY ay Buffalo 전기공학과 박사. 1983년 9월 -1986년 8월 금성전기 기술연구소 주임 연구원. 1993년 3월-현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 02-820-5292, Fax : 02-825-9210

E-mail : hkim@cau.ac.kr

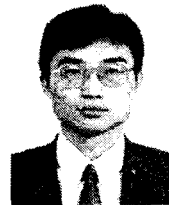


장 태 규(張 泰 奎)

1955년 11월 13일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 한국과학 기술 원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1981년-1982년 현대엔지니어링(주). 1982년-1984년 현대전자산업(주). 1987년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년-1990년 Tennessee State University, Assistant Professor. 1990년-현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수.

Tel : 02-820-5318, Fax : 02-812-1293

E-mail : tgchang@cau.ac.kr



강 민 식(姜 珉 植)

1957년 8월 27일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사). 1987년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년-1998년 국방과학연구소.

1998년-현재 경원대학교 기계공학과 교수.

Tel : 031-750-5524, Fax : 031-750-5273

E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr