

논문 2011-48SD-12-14

LVDT 구조를 이용한 신호 매핑 기반의 변위측정 알고리즘

(Displacement Measurement Algorithm Based on Signal Mapping in LVDT Structure)

손 진 호*, 조 상 복**

(Jin-Ho Son and Sang-Bock Cho)

요 약

본 논문에서는 LVDT 구조를 이용한 신호 매핑 기반의 새로운 변위측정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방식은 상대 값을 이용한 신호 매핑방식을 사용하기 때문에 PCB상에 구현되는 코일 패턴이나, 트랜스 소자의 변수들에 독립적으로 동작할 수 있다. 이는 절대 값을 사용하면서 발생하는 다수의 튜닝작업이 필요 없고 단지 상대 값을 추출하기 위해 최종단계에서의 범위를 측정하는 캘리브레이션 공정만 필요하다. TI DSP 칩셋인 TMS320F2812에 코일 패턴이 다른 다수의 보드를 통하여 본 논문에서 제안하는 기법을 구현해 본 결과, PCB 코일 패턴이 조악하더라도 높은 정밀도와 신뢰성을 갖는 출력 신호를 얻음으로써 제안하는 기법의 우수성을 검증하였다.

Abstract

We propose a novel displacement measurement method in the LVDT (Linear Variable Differential Transformer) structure. This proposed algorithm is independent of coil pattern, which may be implemented to PCB, or transformer component, because it is based on the signal-mapping method. we have manufactured several boards which have different coil patterns and our algorithm is ported into TMS320F2812 of TI DSP chipset. The output signal has high accuracy and high stability although PCB coil pattern are coarse.

Keywords : LVDT, Signal mapping, Displacement measurement, Calibration

I. 서 론

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 구조는 변위, 압력, 힘, 레벨, 흐름 및 기타 물리량을 측정하는데 널리 이용된다^[1~6]. 이 구조는 넓은 범위에서 감지능력과 선형성이 비교적 우수하고, 항상 동일한 출력, 높은 신뢰성, 그리고 내구성이 우수한 것으로 알려져 있다.^[7] 이의 구조는 그림 1에 나타낸 것과 같이 하나의 1차 코일, 두 개의 2차 코일, 그리고 운동하는 코

어로 구성되어^[8] 있고 이의 동작에 대해서는 [9]에 자세하게 설명되어 있다. LVDT 동작은 일종의 양측과대역압 반송파(Double Side Band Suppressed Carrier AM : DSBSC-AM) 통신 시스템^[8]으로 1차 코일의 출력 $E(t)=A\cos(\omega t)$ 의 반송파에 대한 2차 코일의 차동 출력 $M(t)$ 는 식(1)과 같이 해석된다. $d(t)$ 는 코어 변위 정보이다.

$$M(t) = d(t) \cdot A\cos(\omega t) \quad (1)$$

LVDT 설계 목적은 $E(t)$ 와 $M(t)$ 를 사용하여 $d(t)$ 를 나타내는 DC출력전압을 구하는 것이다. 이것을 설명하는 두 가지 주요 방법과 여러 가지 기술에 대한 자료는 [10~19]에 설명되어 있다.

첫 번째 방법은 $d(t) = M(t)/E(t)$ 를 계산한 결과에 의

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 울산대학교 전기공학부 (School of Electrical Engineering, University of Ulsan)

※ 본 논문은 2009년도 울산대학교 교비연구비의 지원에 의해 작성되었음.

접수일자: 2011년12월1일, 수정완료일: 2011년12월7일

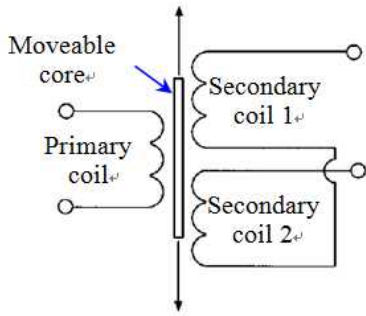


그림 1. LVDT의 구조
Fig. 1. LVDT structure.

하여 위치를 결정하는 비율기반의 접근방식이다. 그러나, 이 방법은 출력 $d(t)$ 가 노이즈에 매우 민감하게 반응하는 심각한 문제가 있다.

두 번째 방법은 DSBSC - AM 복조 기술로 로컬 커리어를 곱한 후 저역통과필터를 거친 $M(t)$ 를 적용한다. 그러나, $M(t)$ 와 로컬 커리어는 같은 위상에 위치하여야 하는 문제점이 있다.

코어의 위치와 LVDT의 출력의 선형적 관계는 높은 정밀도와 정확도를 위한 필수요소이다. 그러나 실제로는 변압기의 형태, 기본 및 보조 코일의 배열, 코어의 소재, 여기전류와 주파수의 변화, 그리고 주변과 코일의 온도변화 등에 영향을 받아 비선형으로 표현된다.^[7] 따라서 이러한 비선형 문제를 해결하기 위해 다양한 기법들이 소개되고 있으나, 이들 방식들은 근본적으로 LVDT에서 사용되는 모든 전기적 값을 그대로 이용하는 즉, 절대 값을 이용하고 있어 각 처리단계마다 튜닝 작업을 필요로 한다. 또 이러한 튜닝작업을 거쳤다 하더라도 완벽하게 선형성을 유지하기 위해서는 많은 제약요소가 존재한다.^[8~9, 12, 17~18]

본 논문에서는 이러한 비선형 문제를 해결하기 위해 상대 값을 이용하는 LVDT의 신호 조정의 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 신호매핑 기반의 상대 값을 이용하는 것으로 출력 값의 조건에 맞게 매핑 함으로써 선형성을 유지하도록 하며 잡음 민감성 문제도 함께 제거하도록 한다.

즉, 제안하는 기법은 DC 출력 범위, 정확도와 정밀도, 동작범위 등을 간단한 논리 계산을 통해 쉽게 변경할 수 있도록 신호 매핑을 수행한다. 또한, 이 새로운 접근은 상용화가 가능하도록 하기 위해 작은 용량의 메모리를 포함하는데 이는 한 번의 신호 매핑 연산과정을 통하여 필요한 수치를 메모리에 기억시켜 매번 출력 값에 맞춰 수치를 조정해야하는 상황을 없애줄 수 있다.

본 논문은 II장에서 새로운 신호매핑 기반의 변위측정 알고리즘을 설명하고 III장에서 제안된 알고리즘을 실험을 통해 결과를 분석하고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 신호매핑 기반의 변위측정 알고리즘

그림 2는 제안된 신호 매핑 방식의 순서도를 보여준다. 여기서 M 은 LVDT 2차코일의 ADC입력, R 은 센서의 동작범위, T 는 입력신호의 허용오차, C 는 출력신호의 DC 오프셋, 그리고 F 는 출력의 변화량을 나타낸다. 식 (1)을 일반형으로 변형하기 위해서는, 민감성과 1차와 2차 코일 간의 위상차를 고려하여야 한다. 따라서 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M(t) = d(t) \cdot S \cdot A \cos(\omega_c t + \phi) \tag{2}$$

여기서 S 는 민감성을, ϕ 는 위상차를 의미한다. LVDT 구조에서, 2차 코일의 차동 출력 $M(t)$ 은 코일의 차수, 1차와 2차 권선의 감긴 형태와 횡수, 그리고 코어에 의해 결정된다. 그러나 실제로는 이 상수들이 완벽하게 서로 동일하지 않기 때문에 출력 신호는 넓은 범

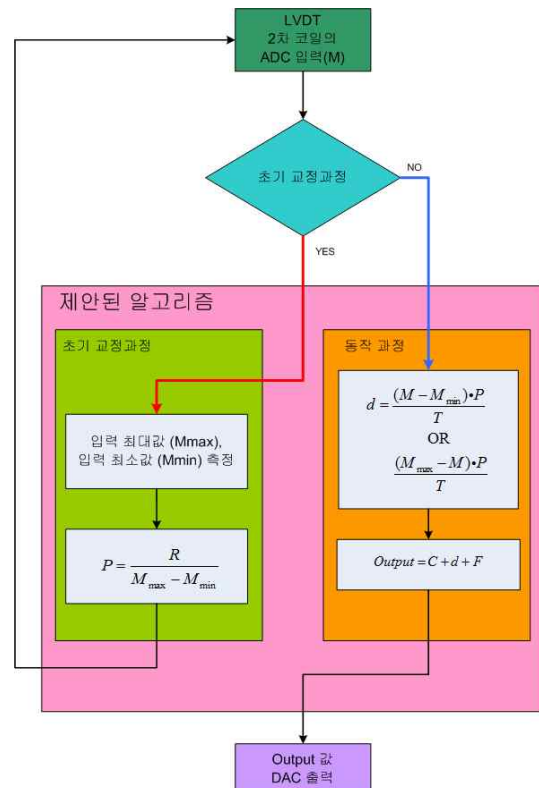


그림 2. 제안된 신호 매핑 방식의 순서도
Fig. 2. Flow diagram of the proposed signal mappings method.

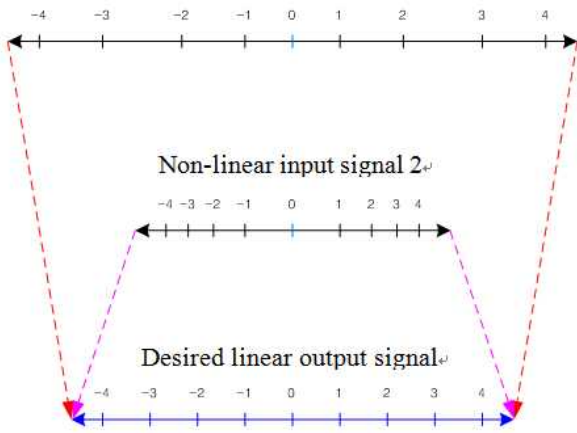


그림 3. 신호 매핑 방식의 개념
Fig. 3. Description of the signal mapping method.

위의 선형성이 보장되지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 근래까지의 많은 연구들은 1차 코일에서 여기되는 신호의 조건에 대해 초점을 두어왔는데^[8] 매우 복잡한 연산을 기반으로 하고 있어 강력하고 고성능인 DSP가 요구되었다. 반면, 제안하는 알고리즘은 실제 동작범위를 원하는 범위로의 확장 또는 축소를 통해 매핑을 수행하는 것으로 그 개념은 그림 3과 같다.

즉, 입력신호가 비록 비선형 특징을 갖더라도 각 점에 대해 일대일로 선형 신호로 매핑하여 선형성을 유지하도록 하는 방법이다. 그리고 LVDT를 사용하여 위치 또는 변위 측정에서 모든 측정값은 특별한 경우를 제외하고 한 단위에서 상대적인 값을 사용하기 때문에 절대 값이 아닌 상대적인 값을 사용한다.

2차코일 1의 최대 값과 최소 값을 $M_{max,1}$ 과 $M_{min,1}$ 로 각각 정의하고, 같은 방법으로 2차코일 2의 최대 값과 최소 값을 $M_{max,2}$ 와 $M_{min,2}$ 로 각각 정의한다.

식 (1) 또는 식 (2)의 변위 $d(t)$ 는 LVDT의 각 코일의 출력 값 $M_1(t)$ 또는 $M_2(t)$ 에 의해 결정된다. 일반적으로 원하는 동작 범위 R 과 측정 정밀도 P 는 변위센서의 설계 초기에 결정되므로 정밀도 P 는 동작범위 R 과 각 2차 코일의 최대, 최소 값을 사용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \frac{R}{M_{max,1} - M_{min,1}}, \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{R}{M_{max,2} - M_{min,2}}$$

일반적으로 두 개의 2차 코일의 정밀도는 이들 코일의 구조가 정확히 대칭되지 않으므로 식 (3)과 같이 다

르게 표현된다. 따라서 각 2차코일의 변위는 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$d_1(t) = (M_1(t) - M_{min,1}) \cdot P_1, \quad (4)$$

$$d_2(t) = (M_{max,2} - M_2(t)) \cdot P_2$$

또 입력 신호의 허용 오차 T 를 고려하여 식 (4)를 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$d_1(t) = \frac{(M_1(t) - M_{min,1}) \cdot P_1}{T}, \quad (5)$$

$$d_2(t) = \frac{(M_{max,2} - M_2(t)) \cdot P_2}{T}$$

실제의 LVDT 체계에서는 전체 시스템의 안정성과 신뢰성을 높이기 위해 두 2차코일의 서로 다른 DC 오프셋 값과 서로 다른 출력 전압레벨을 갖도록 하는 경우가 많다. 따라서 이를 식 (5)에 적용하면 식 (6)과 같이 일반화할 수 있다.

$$d_1(t) = C_1 + \left\{ \frac{(M_1(t) - M_{min,1}) \cdot P_1}{T} \right\} \cdot F_1, \quad (6)$$

$$d_2(t) = C_2 + \left\{ \frac{(M_{max,2} - M_2(t)) \cdot P_2}{T} \right\} \cdot F_2$$

여기서 C_1, C_2 는 각 채널의 DC 오프셋이고, F_1, F_2 는 각 채널의 증가 값이다.

기존의 LVDT 구조를 이용한 일적인 변위센서는 같은 구성요소를 사용하여 설계되었을 경우 동일한 조건에서는 항상 동일한 결과를 출력한다. 그런데 절대 값을 사용하게 되면 구조 구현의 공차 발생으로 인해 동일 조건에서 동일 결과를 출력하는 것은 매우 어렵고, 매번 튜닝작업을 필요로 한다. 그러나 제안된 알고리즘은 입력 값의 최대, 최소 값을 인식하는 단계만 필요하다. 이 과정은 초기 교정단계가 아닌 최종 생산 공정을 마치고 검사 과정에서 검사와 함께 수행되며 구성 요소의 공차에 영향을 받지 않는다는 장점을 갖는다.

III. 실험 및 결과

제안된 알고리즘을 확인하기 위하여 그림 4과 같이 TI DSP 칩셋인 TMS320F2812를 탑재한 LVDT 시스템을 설계 제작하였다. 1차 코일은 보드의 하단 층에, 3개의 2차 코일을 상단 층에 배치하였으며, 여기서 중간의

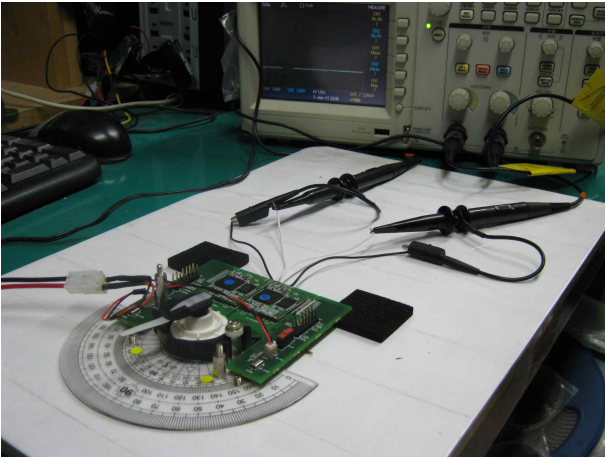


그림 4. TMS320F2812를 사용한 LVDT 보드
Fig. 4. LVDT Board using TMS320F2812.

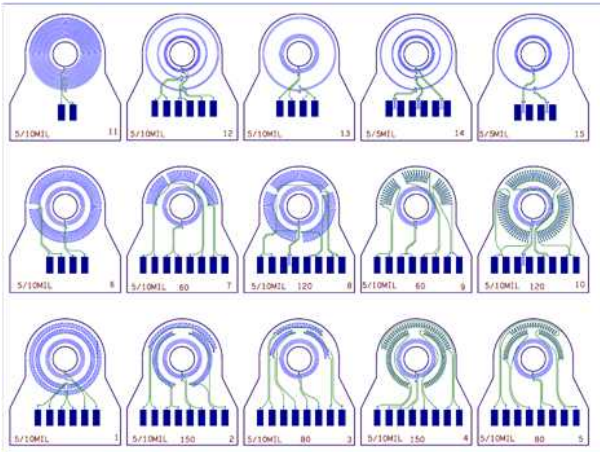


그림 5. 다양한 모양의 1, 2차 코일 패턴
Fig. 5. Several types of the primary and secondary coil.

2차 코일은 응답 및 노이즈 특성을 분석하기 위해 특별히 배치한 것이다. 또 각 2차 코일에 DSP 칩셋을 장착하여 각 입력 조건에 대한 연산을 독립적으로 수행하도록 구성하였다. 이는 2차 코일의 구현이 완전히 대칭되지 않을 수 있기 때문에 별도의 연산을 수행해야 하기 때문이다.

입력 신호의 다양성을 알아보기 위해 1, 2차 코일의 패턴을 그림 5와 같이 달리하여 설계 제작하였다. 그림 5의 첫 번째 줄이 1차 코일을, 두 번째와 세 번째 줄은 2차 코일의 패턴의 종류를 나타낸 것이다. 회전체의 각도 측정을 위해 제안된 알고리즘을 적용하였고 DAC의 최종 출력으로 그 결과를 분석하였다. 첫 번째 2차 코일의 DC 오프셋 값은 0.7V로 하였고 동작 범위는 0.7V에서 4.1V로 하였다. 정밀도는 1'로 하였다. 그림 6는 코일의 패턴을 통한 실험의 1차 코일의 입력 파형에 대

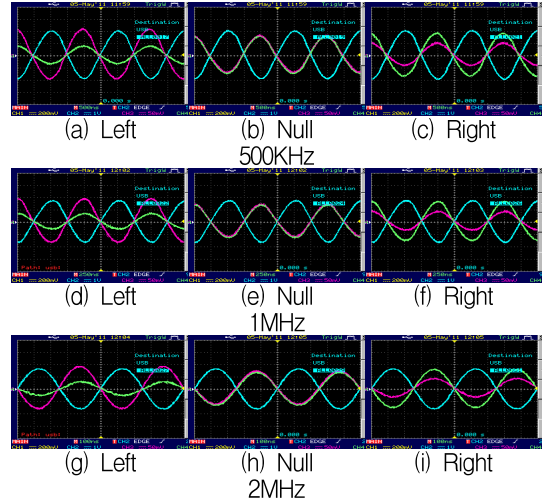


그림 6. 주파수와 코어의 위치에 따른 출력파형
Fig. 6. The output waveform according to the position of the core and frequency.

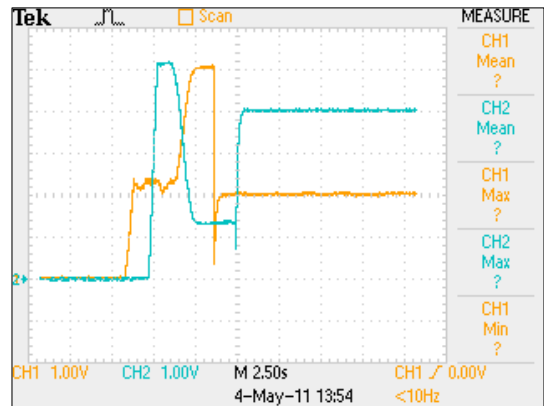


그림 7. 초기 교정과정 파형
Fig. 7. Initial calibration waveform.

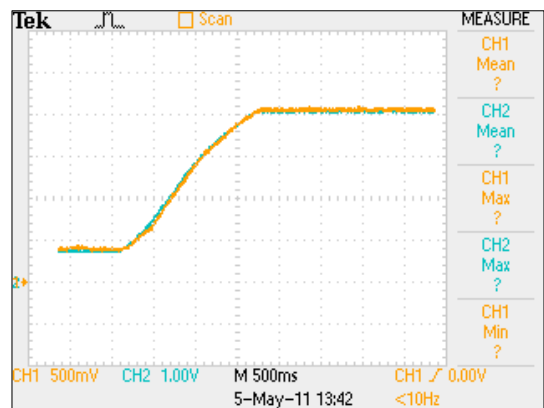


그림 8. 증가 동작 파형
Fig. 8. Going up waveform.

한 2차 코일의 출력 파형으로 코어의 위치와 1차 코일의 입력주파수의 변화에 따른 결과를 보인다. 그림 7은 제안한 알고리즘에서 입력 동작 범위를 측정하는 과정

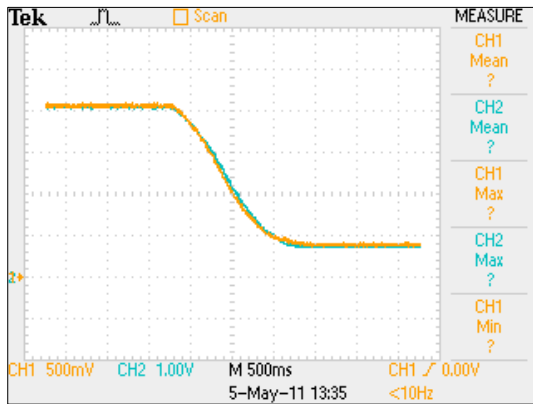


그림 9. 감소 동작 파형
Fig. 9. Going down waveform.

즉, 최종 튜닝 과정을 보여준다. 그림 8과 그림 9은 오실로스코프를 이용하여 변위 즉 회전체가 회전하면서 출력하는 결과 출력 파형을 보여주고 있다. 그림 7, 8, 9의 두 개의 파형은 각각 LVDT 2차 코일의 2개의 출력을 나타내며 둘의 출력은 제안된 알고리즘에 의해 출력값의 조정을 원하는 변위의 출력전압으로 조정이 가능한 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 신호 매핑 방식을 기초로 한 고급 변위 측정 알고리즘을 제안하였다. 이것은 1, 2차 코일의 코일 패턴 또는 모양과는 무관하게 상대 값을 이용한 신호 매핑 방식을 기초로 한 신호 조정방식이다. 제안된 알고리즘은 센서의 정확도, 동작 범위, 출력 값의 범위 등을 쉽게 조정할 수 있으며, 또한 입력신호의 비선형 특성을 조정 작업을 통하여 선형으로 변환할 수 있다는 장점을 갖는다.

신호 매핑기반의 알고리즘을 확인하기 위하여 다양한 패턴모양의 보드를 제작, 실험하였다. 그 결과 PCB의 코일 패턴이 조잡하더라도 출력신호는 항상 동일한 결과를 출력하고, 높은 정확성과 높은 신뢰성을 갖게 됨을 확인하였다.

PCB 패턴이 너무 조악하여 DSP의 입력신호가 왜곡되거나 또는 많은 노이즈가 발생하더라도 제안된 알고리즘은 신호 매핑을 통해 입력신호를 선형신호로 변환함은 물론 넓은 범위에서 선형성을 유지하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. K. P. Neubart., "Instrument Transducer-An Introduction to Their Performance and Design.," pp.163-222. Oxford, U.K. Clarendon Press. 1975.
- [2] G. Jaura., "Development of a variable inductance type instrument transformer." J. Inst. Eng. (I), vol. 60, EI-3, pp. 85-89, Apr. 1980.
- [3] K. Ara., "A differential transformer with temperature and excitation independent output ", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-21, pp.249-255. Aug. 1972.
- [4] K. S. Lion. "Instrumentation in Scientific Research. New York", McGraw-Hill. 1962.
- [5] H.N. Norton. "Hand Book of Transducers for Electronic Measuring System." Englewood Cliffs. NJ, Prentice-Hall, 1968.
- [6] H. N. Norton. "Sensor and Analyzer Hand Book." Englewood Cliffs, NI Prentice-Hall. 1982.
- [7] S. Saxena and S. Seksen, "A self-compensated smart LVDT transducer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 38, pp. 748 - 753, 1989.
- [8] Ralph M. Ford, Robert S. Weissbach, David R. Loker. "A Novel DSP-Based LVDT Signal Conditioner." Trans. Instrum. Meas., vol. 50, pp 768-773, 2001.
- [9] G. Novacek, "Accurate linear measurement using LVDTs," Circuit Cellar Ink, Issue 106, pp. 20 - 27, 1999.
- [10] P. T. Ormiston, "Measuring displacement with LVDT transducers," Electron. Eng., vol. 50, pp. 69 - 71, 1978.
- [11] N. Gray, "Simplifying LVDT signal conditioning," Mach. Des., pp.103 - 106, 1987.
- [12] J. Sylvan, "Monolithic signal conditioner simplifies displacement sensing," Electron. Eng., vol. 62, pp. 41 - 46, 1990.
- [13] F. Yassa and S. Garverick, "A multichannel digital demodulator for LVDT/RVDT position sensors," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 25, pp. 441 - 450, Apr. 1990.
- [14] E. E. Herceg, "An LVDT primer, Sensors," vol. 13, pp. 27 - 30, 1996.
- [15] D. Crescini, A. Flammini, D. Marioli, and A. Taroni, "Application of an FFT-based algorithm to signal processing of LVDT position sensors," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, pp. 1119 - 1123, 1998.
- [16] Ralph M. Ford, Robert S. Weissbach, and David R. Loker, "A Novel DSP-Based LVDT Signal Conditioner", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 50,

pp.768-773, JUNE 2001.

[17] A. Flammini, et al., "Least Mean Square Method for LVDT Signal Processing," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, pp. 1119 - 1123, 1998.

[18] Saroj Kumar Mishra, Ganapati Panda, and Debi Prasad Das, "A Novel Method of Extending the Linearity Range of Linear Variable Differential Transformer Using Artificial Neural Network", IEEE Trans. Instrum. Meas., VOL. 59, pp.947-953, APRIL 2010.

[19] 김기엽, 정규원, "인덕티브 변위센서 및 그 수신코일 구조와 갭 보정을 위한 신호처리방법", 대한민국특허청 등록특허공보, 등록번호 10-1023198, 2011년 3월

저 자 소 개



손진호(학생회원)
 2010년 울산대학교 전기전자정보
 시스템공학부 학사 졸업.
 2012년 울산대학교 전기공학부
 석사 졸업
 <주관심분야 : 컴퓨터, 신호처리,
 제어>



조상복(정회원)
 1979년 한양대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1981년 한양대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1985년 한양대학교 전자공학과
 박사 졸업.
 1994년~1995년 Univ. of Texas, Austin
 교환교수
 2003년~2004년 Univ. of California, San Diego
 교환 교수
 2000년~2001년 울산대학교 자동차전자연구센터
 센터장
 2006년~현재 울산대학교 e-Vehicle 연구
 인력양성사업단장
 (2단계 BK21 정보기술사업단)
 <주관심분야 : SoC/VLSI 설계 및 테스트, 자동차
 전장시스템 설계, 영상처리 회로 설계 및 제작, 머
 신비전 시스템 개발, 초고집적 메모리 설계>