

# 인덕턴스형 미소 변위 측정 시스템과 응답 특성의 분석

최동준\*, 최인묵\*, 김수현\*

## An Inductive Micro Position Sensing System and Analysis of its Response Characteristics

Dong-June Choi \*, In Mook Choi \* and Soo Hyun Kim\*

### ABSTRACT

This paper presents a new design of an inductive position sensing system with high sensitivity. The designed system consists of the driving coils, position-detecting coils, movable cores, and closed loop formed magnetic blocks. To obtain high sensitivity we design a symmetric and closed loop type measuring system with small air-gaps. The elements that affect the system characteristics are turn ratio, excitation frequency, air-gap size, capacitance effect, and load resistance. By experimental investigation, the influences of these elements are examined and the system parameters are selected. The sensitivity of the newly designed system is greater than 2800 mV/(V mm) and the linearity error is below  $\pm 0.10\%$  in the range of  $\pm 200\mu$  m.

**Key Words** : inductive(인덕턴스형), position(위치), sensitivity(감도), resolution (분해능)

### 1. 서론

초정밀 산업, 반도체 산업의 급속한 발달과 함께 그 집적도의 증가, 최소 형상 크기 등은 점점 축소되고, 검사 및 계측 공정에서 필요로 하는 정밀도, 정확도는 서브 마이크로 수준에 이르고 있다. 이러한 검사, 계측 공정 중에서, 미세 선폭 측정, 윤곽 및 2, 3 차원 형상 검사등, 초정밀 위치 측정의 요구는 날로 증가하고 있다.

이러한 위치를 탐지하는데 이용되고 있는 것 중의 하나가 전자기장을 이용한 인덕턴스형 시스템이다. 인덕턴스형 위치 탐지 장치는 상대적으로 넓은 영역에 대해서 우수한 선형성과, 높은 신뢰성, 유지성, 그리고, 저렴한 생산원가가 장점이

다.<sup>(1)</sup>

인덕턴스형 위치 탐지 장치에 관한 연구로는 그 기본 원리를 이용한 다양한 형태로 진행되어 왔다. 이러한 인덕턴스형 위치 탐지 장치는 간단한 구조와 변형 가능성으로 많은 곳에서 이용되고 있다.<sup>(2-7)</sup>

인덕턴스형 위치 탐지 시스템은 초정밀 산업에 적합한 몇가지 장점을 가졌음에도 불구하고, 기존 선행 연구들은 일반적으로 수 밀리미터의 측정역에 대해서 마이크로 수준의 측정 정밀도를 갖는 시스템에 그치고 있다. 산업계의 요구가 이미 서브 마이크로 수준에 이르고 있고, 점점 축소화되고 있는데, 측정 감도가 부족하여 서브 마이크로 영역의 측정에는 다소 불리한 점을 지니고 있다.<sup>(4-6)</sup> 기존 시스템에서는 이러한 점을 극복하고자

\* 한국과학기술원 기계공학과

전기 회로적인 신호 증폭의 방법을 사용하여 해결하고 있다. 즉, 측정하고자 하는 양이 미소하여 질수록 그 증폭비는 더욱 커져야 한다. 신호 증폭을 통한 해결은 잡음이나, 사용환경에 따라 민감하게 변하는 단점이 있을 수 있고, 사용 증폭비가 증가할수록 그 문제는 더욱 크게 나타나게 된다. 이는 곧, 안정적인 출력을 기대하지 못하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기구적인 새로운 개념을 도입하여 시스템 자체의 감도를 향상하여 초정밀 측정이 용이한 서브 마이크로용 측정 시스템을 제시하고자 한다. 시스템 자체의 감도가 크기 때문에 외부 변수에 대해 덜 민감하며, 기존 인덕턴스형 측정장치보다 미세한 측정이 가능하다.

## 2. 새롭게 구성된 인덕턴스형 위치 측정 시스템

본 시스템은 구동 코일에 전원을 인가하여 시스템 내에 자기장을 형성하고, 위치 입력에 따라 발생하는 유도 전압을 이용하여 위치 정보를 출력한다. 이러한 측정 원리는 페러데이 및 렌츠의 법칙으로 설명되어지며 다음 식으로 주어진다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $E$  는 전기의 세기 (electric field intensity)이고,  $B$  는 자속밀도 (magnetic flux density)이다. 식 (1)의 양변을 면적분하고, 스토크(Stoke)의 정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\oint_c E \cdot dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds \quad (2)$$

식 (2)는 정지 폐선로에 대해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\oint_c E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds \quad (3)$$

$v = \oint_c E \cdot dl$ ,  $\phi = \int_s B \cdot ds$ 로 정의하면 식 (3)은 다음과 같이 정리 된다.

$$v = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에서와 같이 유도 전압은 자속량의 시간 미분에 비례하게 된다.

시스템의 출력이 구동 전압 및 입력에 대해 선형적인 경우 감도(sensitivity)는 다음과 같이 정의된다.

$$sensitivity = \frac{system\text{출력}}{구동전원, 입력량} \quad (5)$$

한편, 본 시스템과 같은 아날로그형 출력 시스템의 경우 분해능은 다음과 같이 정의된다.

$$resolution = \frac{noise}{sensitivity} \quad (6)$$

즉, 시스템의 측정 분해능을 향상시키기 위해서는 노이즈를 작게 하고, 감도를 크게 하여야 한다. 노이즈는 그 발생 원인을 정확히 알 수 없을 뿐더러 사용환경이나 여러 요인에 민감하게 변하기 쉽다. 이러한 노이즈를 줄이기 위해서 필터를 사용하게 되는데 역시 완전한 제거는 불가능하다. 초정밀 측정 시스템에서는 분해능을 언급할 때에 필터 등을 사용하여 기준 환경에서 얻을 수 있는 노이즈 레벨 -가령 예를 들면 1mV- 을 임의로 잡고, 그 값을 기준으로 하여 시스템의 분해능을 정하고 있다. 결국 안정적으로 분해능을 향상시키기 위해선 시스템의 감도를 증가시켜야 한다. 그러나, 대부분의 위치 탐지 장치는 그 자체만으로는 감도가 작아서 서브 마이크로 수준의 측정은 불가능하다. 이런 점을 극복하고자 본래의 신호를 받아서 전기 회로적인 증폭을 하여 사용하게 된다. 그러나 원 시스템 자체의 감도가 극히 작은 경우 원 신호의 무한정 증폭도 불가할 뿐 아니라, 회로 증폭은 사용환경이나, 기타 요인에 민감하게 변하며, 증폭비가 증가할수록 이런 민감성은 증가하는 경향이 있다. 본 연구에서는 초정밀 측정에 유리하며, 사용환경이나 다른 요인에 덜 민감하도록 하는데 있어서, 신호 증폭에 의한 방법이 아니라, 시스템 자체의 감도 향상을 기하도록 기구학적으로 새로운 모델을 제시하여 원감도 자체가 향상되어 순차적으로 분해능의 향상이 이루어지도록 하였다.

본 연구에서는 측정하고자 하는 입력에 따라 변하는 자속의 분포에 따른 유도 전압을 출력하고, 또한 일정 구동원에 대해 발생하는 자속밀도가 더 강하도록 시스템을 구성하여 감도를 높였다. 기존 인덕턴스형 측정장치 중의 하나인 원통형 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)의 경우 이동 코어와 자성체 차폐 쉴드(shield)간의 거리가 커서

발생 자속 강도가 떨어지고, 완벽한 차폐가 되지 않아서 자속의 누설이 발생하는 등의 약점을 가지고 있다. 본 시스템은 Fig. 1 과 같이 구동 코일, 위치 탐지 코일, 코어 및 페루프를 구성하는 강자성체 블록으로 구성된다. 강자성체 블록 및 코어의 재질은 페라이트이다. 강자성체 블록은 고정되고, 코어는 입력 위치에 따라 움직이게 된다. 대칭형의 폐회로를 채택하여 자속의 누설을 줄이고, 일정 전원에 대해서 더 강한 자속이 발생하도록 시스템내에 동작을 위해 필요한 코어와 고정 블록간의 공극은 작게 유지하도록 하였다. 또한 위치 탐지 코일 내에 강자성체를 삽입하여 자속을 끌어당기도록 하여 강한 유도 전압을 발생하도록 하였다.

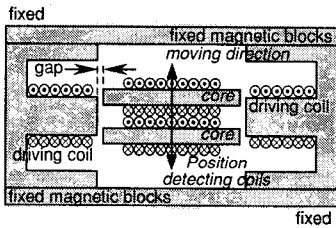


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed system

Fig. 2 에는 고안된 시스템의 3 차원 형상 및 크기가 나타나 있다. 가로, 세로, 높이가 각각 35mm, 58mm, 6.5mm 이다.

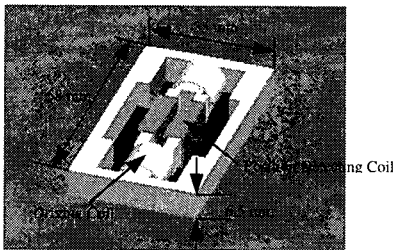
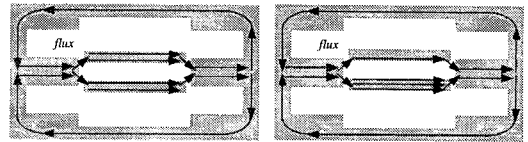


Fig. 2 3D view and the dimension of the proposed system

구동 코일에 전원이 인가되면 시스템내의 자기장이 형성된다. Fig. 3 에서와 같이 자속은 페라이트를 따라 형성되고, 코어의 위치에 따라 각각의 코어를 지나가는 자속의 양이 변한다. 가운데에 위치하는 코어가 (a)와 같이 정중앙에 위치시 각각의 코어를 통과하게 되는 자속의 양은 서로 같

게 된다. 탐지하고자 하는 양이 입력되는 경우에는 (b)와 같이 입력량에 비례하여 2 개의 코어는 같은 방향으로 동시에 움직이게 된다. 입력량에 따라 각각의 코어를 지나게 되는 자속의 양은 차이가 발생하고 이는 곧 유도 전압의 차를 야기한다. 유도 전압이 발생하는 위치 탐지 코일은 서로 차동 전압이 발생하도록 연결하였다.



(a) Center position (b) Upward position  
Fig. 3 Flux distributions according to input position

고안된 시스템의 유도 전압은 다음 식과 같이 자기 회로식을 이용하여 얻어질 수 있다.

$$\phi = \varphi \mathfrak{I} \quad (7)$$

여기서,  $\mathfrak{I}$ 는 기자력(magneto-motive force),  $\varphi$ 는 퍼어미언스(permeance)이다. 퍼어미언스는 시스템의 형태에 따라 결정되어진다. 투자율(permeability)  $\mu$  인 선형 균일 등방성 자성체가 단면적  $S$ , 길이  $d$  를 가지면, 퍼어미언스는 다음과 정의된다.

$$\varphi = \frac{\mu S}{d} \quad (8)$$

구동 코일 감은수가  $N_1$  이고, 구동 전류가  $i_1$  인 경우 기자력은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathfrak{I} = N_1 \cdot i_1 \quad (9)$$

본 시스템은 강자성체를 따라서 자속이 유동하며, 코어 양단에 존재하는 공극을 통해서 코어로 자속의 교류가 이루어진다. 코어 양단에서의 자속의 교류는 Fig. 4 에서와 같이 크게 경로 ①, ②, ③을 통해서 이루어진다. 경로 ①은 고정단에서 발생하는 자속이 코어와 서로 맞닿는 면적을 통해서 코어로 전해지는 자속이다. 경로 ②는 맞닿는 부분이 아닌 곳을 통해서 코어로 전해지는 자속이며, 경로 ③은 자속의 교류가 코어를 거치지 않게 되어 유도 전압 발생에 기여하지 않는 자속을 나타낸다. 즉, 경로 ①, ②는 유도 전압 발생에 기여하

고, 경로 ③은 기여하지 못하게 된다.

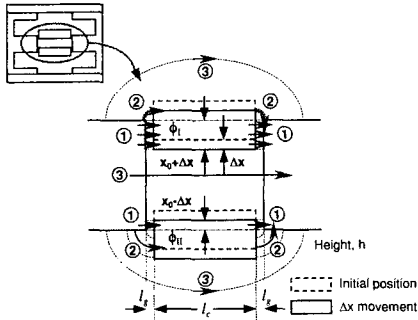


Fig. 4 Flux paths near cores

$l_g$  는 코어 양단 공극의 크기이고,  $l_c$  는 코어의 길이이다.  $l_g \ll l_c$  인 경우 자속의 교류는 주로 고정단과 코어간의 맞닿는 부분을 통해서 대부분의 교류가 발생한다. 즉, 경로 ①을 통한 자속 교류가 대다수 이고, 경로 ②, ③의 경우는 무시할 만한 수준이 된다. 무시한 경로를 통한 자속의 교류는 시스템의 비선형성으로 작용하게 되나, 그 크기는 매우 작다. 따라서 여기서는 경로 ①만을 통해서 자속의 교류가 이루어진다고 가정하자. 그러면 발생하는 자속은 식 (7), (8), 및 (9)를 연립하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi = \frac{N_1 i_1 \mu S}{2l_g} \quad (10)$$

여기서,  $S$  는 Fig. 5 에서와 같이 코어와 구동코일이 감겨져 있는 강자성체간의 겹쳐지게 되는 부분의 면적이 되며, 각각의 코어에서  $h(x_0 + \Delta x)$ ,  $h(x_0 - \Delta x)$  가 된다. 여기서,  $h$  는 코어의 높이가 된다.

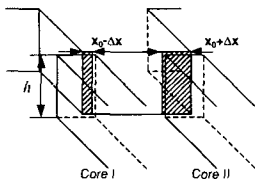


Fig. 5 Overlap area according to movement of the cores

위치 탐지 코일에서 유도되는 전압은 식 (4)와 (10)에서 얻을 수 있으며, 다음과 같다.

$$v = - \frac{N_1 N_2 \mu S}{2l_g} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (11)$$

여기서,  $N_2$  는 위치 탐지 코일의 감은수이다. 두개의 위치 탐지 코일은 차동전압이 발생하도록 연결되어진다. 발생하는 차동전압은 다음과 같다.

$$v_{diff} = - \frac{N_1 N_2 \mu h \Delta x}{l_g} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (12)$$

즉, 유도되는 차동전압은 입력량  $\Delta x$  에 비례하게 된다.

### 3. 성능 실험

Fig. 6 은 새로이 고안된 시스템의 성능을 평가하기 위한 실험장치의 사진이다. 시스템의 변수들, 공극, 기준 위치 입력을 정확하게 조절하기 위해서 마이크로미터가 달린 광학 스테이지가 사용되었다. 1, 2 번 마이크로미터는 코어 양단의 공극을 조절하고, 3 번 마이크로미터는 기준 위치 입력을 조절한다. 시스템의 AC 입력 전원을 발생하고, 유도된 차동 전압을 받아서 특성 및 감도를 측정하기 위하여 시그널 어널라이저(HP35670A)를 사용하였다.

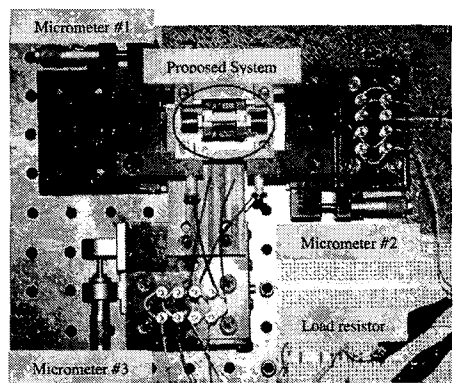


Fig. 6 Photo of the experimental setup

먼저 시스템의 권선수 비에 관한 실험을 행하였다. 이때 코어 양단의 공극은 0.2mm, 기준 입력 변위는 0.5mm 로 하였다. Fig. 7 에 권선수 비의 증가에 따른 시스템 주파수 응답을 보여준다. 1 차측의 권선수는 입력 전원의 최대 허용 전류에 의해 제한되어지는데, 150 턴을 사용하였다. 일반적으로

인덕턴스형 위치 탐지 장치의 측정 가능한 최대 허용 공간 주파수는 입력 전원의 주파수에 의해 결정되는데 일반적으로 수십 kHz 의 영역까지 사용하게 된다. 또한 사용되는 측정 주파수 영역에서는 안정적인 응답을 얻어야 한다. 구동 코일 감은수와 위치 탐지 코일 감은수의 비가 150:750 인 경우 측정 영역인 30kHz 부근에서 공진점이 발생한다. 20kHz 이상의 영역에서부터는 공진에 따른 계인의 확연한 상승을 보이기 시작한다. 이러한 공진 현상은 2 차측의 권선수가 증가하면서 자체의 커패시턴스의 크기가 증가하면서 생기는 LC 공진 현상이다. 권선수의 비가 더욱 커지는 경우 공진점은 저주파수로 이동하며 그 영향이 더 낮은 주파수에 까지 미치게 된다. 공진점은 외부요인에 매우 민감하게 변하므로 측정 주파수 대역에 그 영향이 미치지 않도록 하는 것이 좋다.

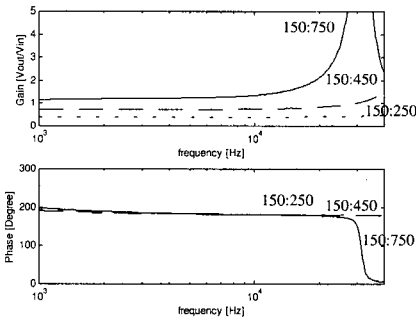


Fig. 7 Frequency responses according to turn ratio

Fig. 8 은 공진에 의한 영향을 축소하고, 구동 주파수에 대해 일정한 계인을 얻도록 부하저항에 따른 응답함수를 보여준다. 사용된 부하저항은 5k, 10k, 15k, 그리고, 20kOhm 이다.

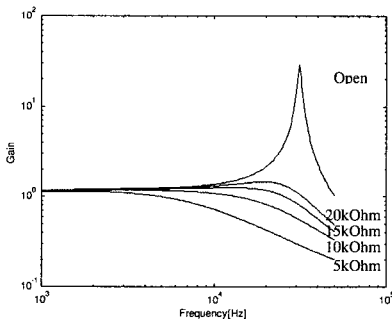


Fig. 8 Frequency responses according to load resistance

부하저항의 크기가 작은 경우 사용주파수 영역에서 공진에 따른 계인의 변동을 억제하지만 그와 동시에 시스템 자체의 응답을 축소하고 있다. 부하 저항을 크게 하면 점점 공진의 영향이 나타나게 된다. 부하 저항은 사용 주파수에서 공진의 영향을 차단하고, 사용주파수 영역에서 계인의 변동을 억제하며, 내재된 감도의 축소량은 적도록 해야 한다. 사용 영역을 20kHz 정도까지 고려한다면 15kOhm 정도의 부하저항이 적합함을 알 수 있다.

Fig. 9 는 코어 양단의 간극에 따른 시스템의 응답 특성을 보이고 있다. 간극이 줄어들수록 따라 시스템의 감도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 실제 시스템의 적용을 할 경우 측정하고자 하는 입력량에 비례하여 코어가 이동하도록 하는 역할의 적절한 코어 가이드가 설계되어야 할 것이다. 간극이 감소할수록 가이드의 설계 기준은 더욱 까다로와 질 것이고, 따라서 시스템 감도와 가이드 설계 간의 적절한 상호 보완이 필요하다.

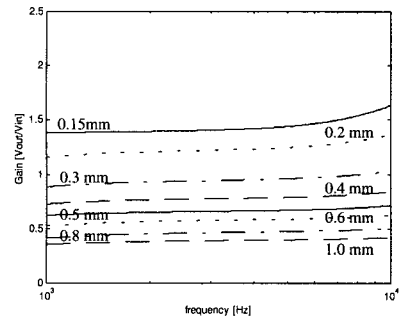


Fig. 9 Frequency responses according to air-gap dimension

Fig. 10 은 앞서 행한 실험 결과를 바탕으로 150:750 의 턴수비, 0.2mm 의 공극에 대해서 입력 범위 -0.2mm 에서 +0.2mm 의 영역을 0.05mm 간격으로 측정한 시스템의 감도 및 선형성을 나타낸다. 사용된 주파수는 2.5kHz, 5.0kHz 및 10.0kHz 이다. 측정한 결과와 각각의 측정 포인트를 최소자승법 (least square method)을 이용하여 직선 맞춤한 선을 도시하였다. 주파수 증가에 따라 감도의 증가가 있으며, 동시에 비선형성도 증가하는 경향을 보인다. 구동 주파수가 2.5kHz 인 경우 감도와 선형성 오차는 각각 2200mV/(V mm), ± 0.03%이다. 구동 주파수가 5kHz 와 10kHz 인 경우 2300mV/(V mm), ± 0.08%와 2800mV/(V mm), ± 0.10%이다.

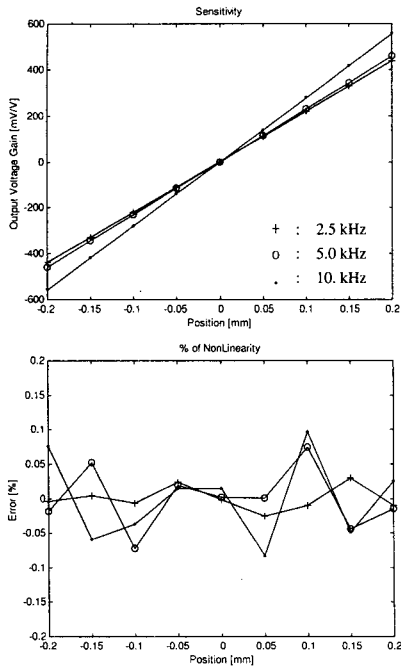


Fig. 10 Sensitivity and linearity error of the experimental test results

감도가 2500mV/(V mm)이고, 구동 전압이 5V 인 경우 입력값 1mm 에 대해 시스템 자체의 출력이 12.5V 에 이른다. 노이즈 레벨이 1mV 인 경우 80nm 의 변위를 신호 증폭 없이 얻을 수 있으며, 적절한 신호 증폭을 하는 경우 더욱 정밀한 측정이 가능하다.

또한 본 시스템은 우수한 선형성을 가지고 있다. 일반적으로 인덕턴스형 초정밀 측정시스템의 경우 선형성 오차는 ± 0.25% 수준이다. 이에 반하여 본 시스템은 ± 0.10%이내의 선형성 오차를 갖는 우수한 성능을 지니고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 위치 변화에 따른 발생 자속의 차를 이용한 고감도의 위치 측정 시스템을 소개하였다. 위치 변화에 따라 자속의 경로가 바뀌도록 시스템을 설계하였고, 출력 감도를 향상하고자 강자성체의 대칭형 페루프 구조를 도입하였다. 페루프 구조는 같은 입력 전원에 대해 더 큰 자속의 세기를 발생하게 되며, 또한 누설 자속을 줄이게

되어 이는 곧 출력 감도 향상에 기여하였다.

채택된 구조는 코일 감은수의 비, 코어 양단간의 공극 크기, 부하저항, 커패시턴스 효과의 영향을 받게 된다. 이러한 시스템 매개 변수에 대한 실험 결과를 제시하였다.

고안된 새 위치 측정 시스템은 2.5kHz-10.0kHz 의 구동 주파수 범위에서 2200mV/(V mm) 이상의 높은 감도를 가졌고 선형성 오차는 ± 0.10% 이하이다.

향후 본 연구 결과를 바탕으로 시스템의 모델링을 개발하고, 이를 바탕으로 하여 시스템의 응답 특성을 도출하며 각각의 설계 변수들이 출력에 미치는 영향을 좀더 체계적으로 제시하고자 한다.

#### 후기

본 연구는 두뇌 한국 21 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. J. D. Garratt, "Survey of displacement transducers below 50mm," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, pp. 563 - 573, 1979.
2. Barry E. Jones, "Sensors in industrial metrology," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 20, pp. 1113 - 1126, 1987.
3. E. O. Doebelin, *Measurement System- Application and design*, 4th Ed. McGraw-Hill, 1990.
4. Y. Kano, S. Hasebe, C. Huang, and T. Yamada, "New Type Linear Variable Differential Transformer Position Transducer," IEEE Tr. on Instr. and Meas., Vol. 38, No. 2, pp. 407 - 409, 1989.
5. S. C. Saxena and S. B. Lal Seksena, "Inductive ratio transducer instrumentation system for displacement measurement," Meas. Sci. Technol., Vol. 1, pp. 475 - 480, 1990.
6. P. H. Sydenham, V. Taing, D. J. Mounsey, and Yu Wen-Xin, "Low-cost, precision, flat inductive sensor," Measurement, Vol. 15, pp. 179 - 188, 1995.
7. J. A. Brandao Faria, "A new magnetic displacement sensor and linear actuator device," Journal of Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp. 7076 - 7078, 2000.