

비접촉식 4-전극형 전기용량 센서를 이용한 *in situ* 정밀측정

Precise *in situ* Measurement using Non-Contacting

Capacitive Sensor with 4-Electrodes

이래덕, 김한준 (한국표준과학연구원) Yu.P.Semyonov (VNIIM, 러시아),

나필선, 김재열 (조선대학교)

ABSTRACT

Non-contacting capacitive sensors, based on principle of the cross capacitor, for measuring small displacement less than 1.95 ± 0.5 mm have been fabricated and characterized. To overcome disadvantages of the existed capacitive sensors, the new sensor is consisted of 4-electrodes which are formed 2 active electrodes and 2 guard electrodes on a sapphire plate with diameter 17 mm and thickness 0.7 mm, and are symmetrically situated with constant gap of 0.2 mm among the electrodes. The sensor is evaluated to be correlation coefficient of 0.9987 for the range of 1.95 ± 0.5 mm and that of 0.9995 for 1.95 ± 0.25 mm range. This sensor can be used for *in situ* measurements in the mechanical mirror polishing with precision less than $\pm 1 \mu\text{m}$.

1. 서론

현대 산업에서 초정밀가공은 필수적인 요구 조건이 되었고 이를 위하여 각종 센서를 이용한 물리량 정밀 측정방법이 이미 널리 사용되고 있다.[1-5] 초정밀 가공 정확도 수준은 측정기술 수준에 의해 결정되기 때문에 가공과정에서 가공물을 공작기계에서 떼어내지 않고 *in situ*로 측정할 수 있다면 더욱 편리할 뿐만 아니라 측정오차요인을 제거할 수도 있게 된다. 이 때 접촉식 센서를 이용하여 피측정물의 표면에 손상이나 변형이 우려되는 경우에는 반드시 비접촉센서를 이용해야 한다. 비접촉 방법으로 미소 변위를 정밀하게 측정할 수 있는 방법으로는 와전류, 초음파, 광, 레이저, 적외선, 자기저항, 전기용량 등이 이용되고 있다. 이 중에서 전기용량형 비접촉센서는 구조가 간단하고 소형, 경량으로 제작이 가능하며

사용이 용이하고 넓은 주파수 영역에서 감도가 높기 때문에 미소한 진동측정, 미소 두께측정, 회전변위, 표면분석 등의 측정에 널리 응용되고 있다.[6-8] 이러한 비접촉식 센서의 경우는 대부분 평행판 capacitor 원리를 사용하여 왔다. 이 때의 전기용량은 일반적으로 $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$ 로 표현되며, 어떤 물리량을 측정하기 위해서는 유전체의 유전상수(ϵ_r), 전극의 대향면적(A), 대향전극의 간격(d)등을 변화시키는 방법들이 사용된다. 그러나 전극주변에서의 edge effect로 인하여 전극의 설계값과 전기용량 측정값과는 큰 차이가 발생된다. 이를 보완하기 위하여 guard 전극을 사용하여 왔고 최적조건을 위한 주전극의 크기와 비율도 발표되었다.[11,12] 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 전극의 크기가 커지는 문제점 이외에도 가드 전극과 guarded 전극과의 평면도, 대향전극과의 평행도 등에 의한 불확도 문제는 여전히 남게 된다.

본 연구에서는 사파이어 원판 위에 cross capacitor 원리를 이용한 4-전극형 전극을 형성한 새로운 센서를 설계 제작하였다. 이 센서는 측정 대상 물체의 종류에 무관하게 측정할 수 있는 정밀급 비접촉식 센서이다. 이 센서의 특성을 분석한 결과 측정범위 1.95 ± 0.25 mm 범위에서 불확도가 ± 0.05 % 이었다. 이 센서를 경면가공과 같은 초정밀 가공이 이루어지는 선반이나 밀링 등에 직접 설치하여 가공물의 진원도 및 직진도 등을 비접촉방법으로 불확도 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 *in situ* 측정할 수 있음을 확인하였다.

2. 기존의 비접촉 전기용량 센서

전기용량 센서의 전극은 측정 대상체와 측정 전극 사이에서 발생되는 전기장이 전극 전체에 걸쳐 균일하게 구성되어야만 측정된 전기용량 크기와 대상물체의 변위가 직선적인 관계를 지니게 된다. 그러나 실제적으로 전극의 가장자리에

서 발생하는 전기장의 edge effect로 인해 계산값과 측정값 사이에 큰 차이가 발생된다. 이를 보완하기 위해 측정전극 주변에 guard ring을 첨가한 2-전극형 전극구조를 이용하지만 edge effect에 의한 영향이 여전히 남게 된다. 이를 개선하기 위하여 두 전극 사이에 보조전극을 삽입하고 측정전극과 동일한 전압을 공급함으로써 보다 균일한 전기장을 형성할 수 있는 3-전극형 전극구조의 센서가 이미 상품화되었으며 측정범위 1 ± 0.5 mm, 정확도 1%, 분해능 0.1%의 특성을 지니고 있다.[9-10]

이러한 2-전극형 및 3-전극형 센서들은 대향전극에 해당하는 측정 대상체가 금속류의 도체로서 반드시 하나의 전극으로 사용되어야 하는 제한조건을 지니고 있기 때문에 비금속류의 간격 및 변위는 직접 측정할 수 없다. 또한 전극구조 구성상 금속으로 제작된 2~3개의 동심원통들이 절연체를 이용하여 필히 대칭으로 조립되어야 한다. 더구나 각 부품크기간의 비율을 적당하게 선정하지 않으면 edge effect를 완전히 제거할 수 없게 된다. 즉 Fig.1과 같은 guard-ring형 전기용량센서 구조에서 $s \ll d_o$, $d_o \ll R_i \ll R_o$ 일 때, 전기용량 C_o 는

$$C_o = \frac{\pi \epsilon_o \epsilon_r \left(R_1 + \frac{s}{2} \right)^2}{d_o} = \frac{\pi \epsilon_o \epsilon_r R_i^2}{d_o} \quad (1)$$

이다. 여기서 $R_i = R_1 + s/2$ 이다. 그러나 실제적으로 guard ring 및 측정전극이 일정한 크기로 제한되기 때문에 식(1)의 조건이 실제 측정값과 일치하지 않는다. 이미 Kelvin guard-ring의 반경 (R_o)과 측정전극의 반경 (R_1)의 차이가 d_o 의 약 5배일 때 식(1)에 의한 전기용량 계산치와

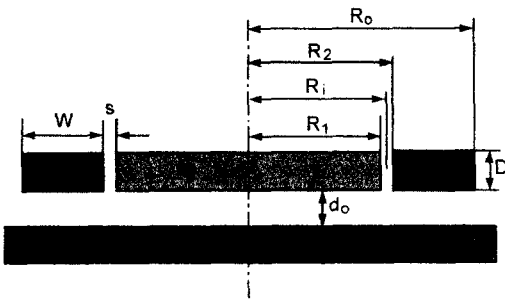


Fig.1. Structure of the guard-ring type sensor

거의 일치한다. 그러나 측정치와 계산치가 보다 정확하게 근사적으로 일치하기 위해서는 edge effect의 영향을 최소화시켜야 하며 이를 위해 Fig.1에서 각 부분 사이에는 다음과 같은 관계를 만족시켜야 한다.[11,12]

$$\delta_w = \exp(-\pi W/d_o)$$

$$\delta_D = \exp(-\pi D/s) \quad (2)$$

$$\delta_s = \exp(-\pi d_o/s)$$

여기서 δ 는 edge effect에 의한 영향을 의미한다. 즉 1 ppm 이하의 정확도를 얻기 위해서는 $W \geq 4.4 d_o$, $D \geq 4.4 s$, $d_o \geq 4.4 s$ 의 조건이 만족되어야 한다. 실제적으로 이 조건을 만족시키기 위해서는 필연적으로 센서전극의 전체크기가 증가된다. 센서의 크기를 감소시키기 위해서는 가능한 얇은 절연체를 이용하는 방법도 있겠으나 가공상 한계가 있다. 특히 이러한 센서는 $\Delta C = 1/\Delta d$ 의 관계가 있으므로 측정거리가 클수록 edge effect의 영향을 직접 받는 영역이 넓어지게 되고 측정감도도 떨어지게 되는 단점이 있고, 피측정체가 하나의 capacitor 전극이 되어야 하기 때문에 피측정체의 표면의 불균일한 오염상태에 따라 측정되는 전기용량은 달라지게 되므로 기계가공중에 있는 가공물의 변위측정 등에 사용할 수 없게 된다. 또한 식(1)에서의 전기용량은 측정전극의 넓이에 해당되는 피측정 영역의 평균치로서 측정되기 때문에 피측정체의 표면상태를 미세하게 분석하기에 부족하다.

3. 4-전극형 센서 제작 및 특성 측정

위에서 언급된 문제점을 해결하기 위하여 Fig.2와 같은 4-전극형 센서 감지부를 설계 제작하였다. 이 구조는 Thompson-Lampard 정전기 이론[13,14]에 의한 cross capacitance 측정원리를 적용시킨 것이다. 이 원리에 의하면 닫혀진 임의의 단면이 4개의 좁은 절연 gap으로 나뉘어진 전극구조에서 대향하고 있는 전기용량 C_1 및 C_2 사이에는

$$\exp(-\pi C_1/\epsilon_o) + \exp(-\pi C_2/\epsilon_o) = 1 \quad (3)$$

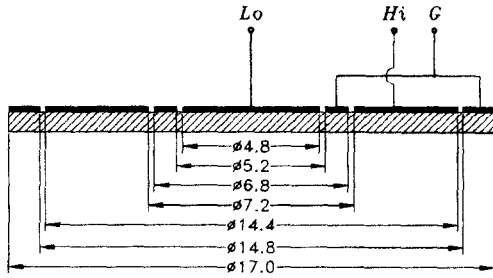


Fig.2. Sensing part of the 4-electrodes sensor

의 관계가 성립한다. 여기서 ϵ_0 은 진공의 유전율을 의미한다. 이 원리에서는 상호 대향하고 있는 전극 내부에서 C_1 과 C_2 는 상호 보상이 되기 때문에 한쪽 전극의 표면에 기름층 등 같은 이물질 존재여부에 관계없이 정밀측정이 가능하게 된다. 이 원리를 응용하여 한 쪽 전극의 변위상태를 고감도로 측정할 수 있는 센서를 개발하였다. Fig.2와 같이 중심으로부터 측정전극 (Lo), guard (G), 대향전극 (Hi), guard (G)의 순서로 구성되어 Lo 와 Hi 사이의 자체 전기용량을 측정하므로서 측정 대상체의 재질 및 대향전극으로써 사용여부에 관계없이 간격 및 미소변위를 $\Delta C = \Delta d$ 의 관계로서 측정할 수 있도록 제작하였다.

각 부위의 크기는 2D Field Simulator를 이용하여 센서와 피측정 대상체와의 간격에 따른 전기용량의 변화가 가장 직선적인 특성을 지닌 최적 조건을 찾았다. 특히 각 전극간의 대칭 조립시 절연체를 이용한 전극간의 간격유지 방법을 피하기 위하여 직경 17 mm, 두께 0.7 mm인 사파이어 평행원판위에 RF sputtering 시스템을 이용하여 두께 0.3 μm 의 copper 전극을 형성시켰다. 따라서 각 전극을 간격 0.2 mm로 균일하게 유지할 수 있었고 완전한 대칭유지가 가능하였다. 또한 형성된 copper 전극이 센서조립시 사파이어의 뒷면에 놓여지기 때문에 센서의 사용과정에서 copper 전극표면의 손상을 방지할 수 있게 된다. 이 경우 전기용량 측정시 사파이어 자체의 유전상수 ($\epsilon_r = 9$) 영향이 일정하게 포함되므로 변위 측정에는 전혀 지장이 없다. 이러한 센서구조에서 유전체의 종류 즉 유전상수의 크기가 서로 다른 경우에 대한 전기용량 측정값에 미치는 영향을 조사한 결과 Fig.3과 같았다. 즉 센서와 피측정 물체와의 간격에 따른 전기용량 변화 유전상

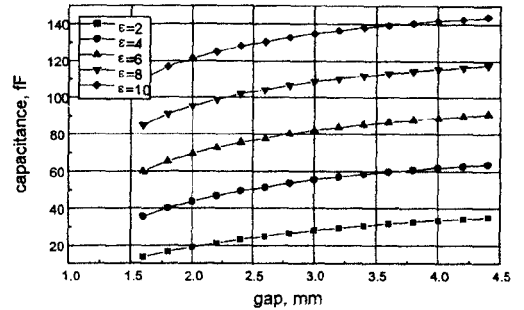


Fig.3. Capacitance characteristics with various dielectrics

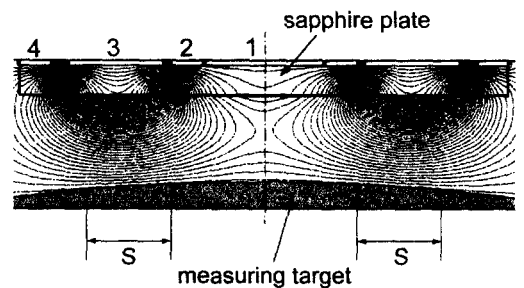


Fig.4. Distribution of equipotential surfaces on new sensor

수에 따라 측정되는 전기용량 값은 달라지지만 특성은 동일함을 알 수 있다. 따라서 균일한 물성을 지닌 임의의 유전체를 사용하더라도 본 구조와 같은 센서에서는 전혀 영향이 없다는 장점이 있다. Fig.4는 직경 70 mm 원통 피측정물의 진원도 및 직진도를 이 센서로 측정할 경우의 등전위면 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 1~4는 Fig.2의 각 전극을 의미한다. 거의 모든 전기력선들이 폭이 "S"인 고리모양에 밀집되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 측정결과를 나타내는 data들이 센서의 실제 단면 전체에서 주어지는 것이 아니라 극히 얇은 폭을 지닌 고리부분에서만 얻어짐을 의미한다. 따라서 기존의 센서에 비해 피측정체의 표면상태를 미세하게 분석할 수 있게 된다. 왜냐하면 기존의 센서의 경우 측정전극의 넓이와 동일한 피측정 영역의 전체 면적에 대한 전기용량 평균치로부터 측정결과가 얻어지기 때문에 피측정체 표면상의 미세한 흠집이나 요철부분을 분리 측정할 수 없기 때문이다. 또한 사파이어 내부의 전기장 분포가 실제 측정영역에 대해 영향

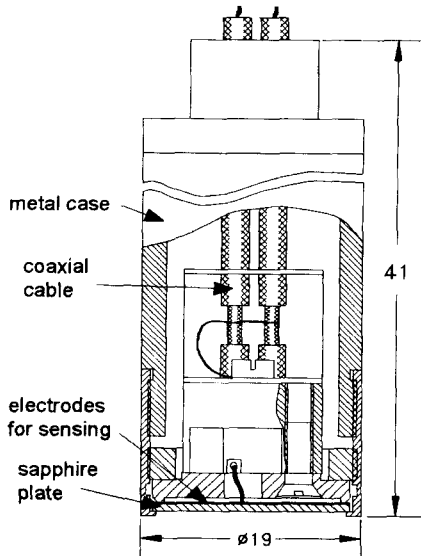


Fig.5. Configuration of the assembled sensor

을 주지 않음도 알 수 있다. Fig.5는 조립 완성된 4-전극형 전기용량 센서의 형태를 나타낸 것이다. 감지부인 사파이어 원판이 지지구조의 축과 수직을 유지하면서 내부에서의 stray capacitance가 제거되고 조립이 간편한 구조를 지니고 있다. 본 센서의 결선이 2-terminal pair 형태로 배선되었고 전기용량 측정은 1 kHz Ultra-Precision Capacitance Bridge (AH-2500A)를 이용하였기 때문에 약 5 ppm 이하의 정확도로 측정할 수 있었다. 이 bridge는 전압 변성비가 권선비와 일치하고 온도 및 습도의 변화, 인가전압의 변동 등에 대해서 극히 안정한 특성을 지니고 있다. 분해능이 0.5 μm 인 마이크로미터를 이용하여 제작된 linear tester를 이용하여 개발된 센서의 특성을 분석하였다. 즉 제작된 센서와 측정 대상체의 간격을 50 μm 로 변화시키면서 센서에 유도되는 전기용량 변화를 분석한 결과 센서전극 표면에서 측정 대상체까지의 간격을 1.98 mm로 유지한 상태에서 전후의 변위를 측정하는 것이 선형도와 측정분해능과의 최적으로 판단되었다. 이 영역에서 단위 길이당 전기용량의 변화는 10 aF/ μm 으로 분석되었으며 측정범위 1.95 \pm 0.5 mm에서의 상관계수는 $r=0.9987$, 1.95 \pm 0.25 mm에서의 상관계수는 $r=0.9995$ 이었다. 즉 측정범위가 작을수록 완전한 직선특성인 $r=1$ 에 가깝게 됨을 알 수 있다. 실제 측정된 전기용량을 변위값으로 환산해 본 결과 측정범위 1.95 \pm 0.5 mm full range

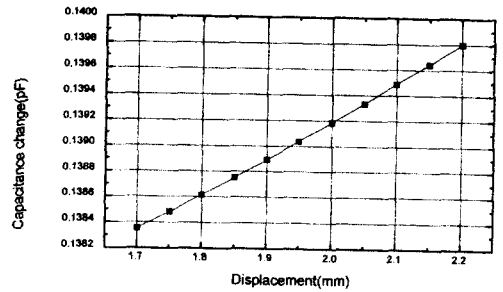


Fig.6. Capacitance change with displacement of the sensor for metallic target.

에서의 불확도는 0.65 %로 나타났으며, 측정범위 1.95 \pm 0.25 mm full range에서의 불확도는 0.05 %이하로 분석되었다. 이 결과로 판단할 때 개발된 센서의 비선형성을 보완할 수 있는 signal conditioner를 제작하여 상품화시킬 경우 본 실험에서 브리지를 사용한 측정결과보다 한 order 높은 정밀측정이 가능할 것으로 판단이 된다. Fig.6는 금속 대상물의 변위 특성을 측정범위 1.95 \pm 0.25 mm에서 분석한 것을 나타낸 것이다. 이 센서를 이용하여 미소변위를 측정하기 위해서는 변성비 전기용량 브릿지 또는 초정밀 임피던스 미터에 연결시켜서 사용하는 방법과 signal conditioner를 제작하여 사용하는 방법이 있다.[16] 따라서 이 센서의 sensitivity는 사용된 브릿지 혹은 제작된 signal conditioner의 특성에 의해서 결정된다.

4. 정밀가공에서의 *in situ* 측정

기존의 비접촉센서의 문제점을 개선한 비접촉 전기용량 센서를 이용하여, 전해 연마가공장치로 초정밀 제작된 가공물의 형상을 측정하였다. 가공물의 크기는 길이가 700 mm 이고 지름은 70 mm인 원형봉이다. Fig.7은 비접촉센서를 이용한 가공물의 측정 메카니즘이다. 그림에서 상하에 있는 비접촉센서를 이용하여 가공물의 표면의 진원도와 진직도를 측정하는데 가공물 표면과 각각의 센서와 떨어진 측정거리가 A, B이다. 실제 가공물의 지름은 d이며 센서간의 간격은 C이다. 실제 진직도나 진원도는 전극간의 위치인 C에서 전극과 각 양단의 실제 간격인 A, B를 뺀 값으로 전극의 실제 지름을 측정할 수 있는 것이

5. 결론

사파이어 평행판 위에 4-전극형 센서로 구성된 본 비접촉 전기용량 센서는 측정대상물을 대향전극으로 사용하였던 기존의 개념과는 달리 cross capacitance 측정원리를 이용한 센서로서, 자체 전극 L_o 와 H_i 사이의 자체 전기용량을 측정함으로써 $\Delta C = \Delta d$ 의 관계로 극히 얇은 폭을 지닌 고리모양(informative ring)의 감지영역에 의해 대상물의 변위를 정밀하게 측정할 수 있고, 측정대상물의 재질 및 접지여부에 관계없이 대상물체의 미소변위를 측정할 수 있는 새로운 센서이다. 측정범위에 따라 센서의 직선특성이 약간의 차이가 있으나, 측정범위 1.95 ± 0.25 mm에서의 상관계수가 $r=0.9995$ 로 분석되었다. 따라서 수 μm 내지 수십 μm 범위에서의 미소변위를 측정할 경우 거의 완벽한 직선특성($r=1$)을 지니게 된다.

또한 측정목적에 따라 센서의 크기를 소형화할 수 있으므로 단순한 변위 측정은 물론 원통형 물체의 진원도 및 직진도 측정, 미소진동의 측정, 두께의 미소변화 측정, 회전변위 측정, 회전수 측정, 편심도 측정 등에 응용이 가능하다. 실제적으로 밀링에 의해 길이 700 mm, 직경 70 mm인 가공체를 *in situ*로 측정한 결과 직진도 및 진원도가 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이내로 가공되었음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] P.H.Mansfield, *Electrical Transducers for Industrial Measurement*, London, Butterworths, 1973
- [2] Hermann K. P. Neubert, *Instrument Transducers*, Oxford, Clarendon Press, pp.68-290, 1975
- [3] P.H.Sydenham, "Microdisplacement Transducers," *J.Phys.E: Sci.Instrum.*, vol. 5, pp.721-733, 1972
- [4] R.S.Medlock, "Sensors for Mechanical Properties," *J.Phys.E: Sci. Instrum.*, vol. 16, pp. 962-972, 1983
- [5] R.Puers, "Capacitive Sensors: When and How to Use Them," *Sensors and Actuators A [Physiical]*, vol.: A37-A38, pp.93-105, 1993

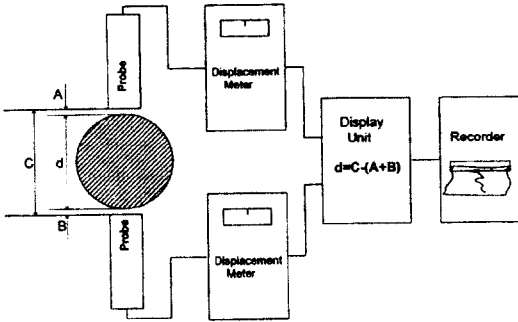


Fig.7. *In situ* measuring system in machinery.

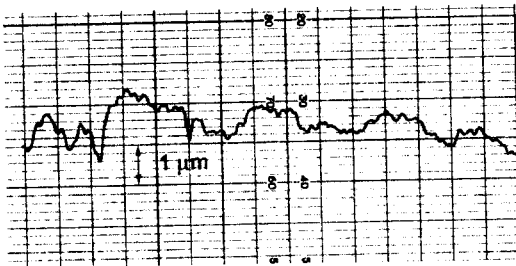


Fig.8. Measured result of straightness

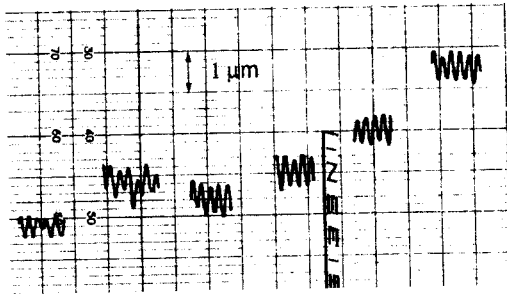


Fig.9. Measured result of roundness

다. 그림과 같이 두 개의 비접촉센서는 가공기계 몸체에 고정되어 있고 측정 대상 가공물은 가공 기계에 설치된다. Fig.8은 가공체를 수평이동시키면서 측정된 결과를 recorder에 기록한 것으로서 가공체의 직진도를 의미한다. 또한 Fig.9는 가공체를 제자리에서 회전시키면서 100 mm마다 측정된 결과를 기록한 것으로서 가공체의 진원도를 의미한다. 기록된 결과로부터 가공체의 직진도 및 진원도가 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이내가 됨을 알 수 있다.

- [6] F.N.Toch, D.Bertels, G.C.M.Meijer, "A low-cost, highly stable reference capacitor for capacitive sensor systems," *IEEE I&M Conf. IMTC Proceedings*, pp.412-415, 1995
- [7] R.Nerino, "Capacitive sensor arrays in dimensional analysis of surfaces," *IEEE I&M vol.44(4)*, pp.875-880, 1995
- [8] Zang Yan-Fen, Liu-Xiang-Yang, Zhang Guo-Xiong, "Method for the straightness measurement of vertical guideways of machine tools using capacitive and inductive sensors," *Proceedings of the SPIE*, vol. 2101 (2), pp.843-847, 1993
- [9] L.Michelson, "Greater Precision for Noncontact Sensors," *Machine Design*, pp.117-121, 1979
- [10] Manual, "Displacement Meter," Iwatsu ST-3501, 1996
- [11] W.C.Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design," *J.Phys.E:Sci. Instrum.* vol.19, pp.897-906, 1986
- [12] W.C.Heerens and F.C.Vermeulen, "Capacitance of Kelvin Guard-ring Capacitors with Modified edge Geometry," *J.Appl.Phys.*, vol.46, no.6, pp.2486-2490, 1975
- [13] D.G.Lampard, "A New Theorem in Electrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance," *Inst. of Elect. Engr. Monograph no.216M*, pp.271-280, 1957
- [14] D.G.Lampard and R.D.Cutkosky, "Some results on the Cross-Capacitances per Unit Length of Cylindrical Three-terminal Capacitors with Thin Dielectric Films on Their Electrodes," *ibid*, no.351M, pp.112-119, 1960
- [15] A.L.Hugill, "Displacement Transducers Based on Reactive Sensors in Transformer Ratio Bridge Circuits," *J.Phys.E: Sci. Instrum.*, vol.15, pp. 597-606, 1982