韓國精密工學會 '96年度 秋季學術大會論文集 pp.291~295

초정밀 측정용 정전용량 변위센서에 관한 연구

A Study on a Capacitance Displacement Sensor for the Ultraprecision Measurement

안형준(서울대 대학원), 정 윤(서울대 대학원), 정성천(삼성전기), 장인배(강원대), 한동철(서울대)
Hyeongjoon Ahn(Graduate School Seoul National Univ), Yoon Joung(Graduate School Seoul National Univ), Sungchun Jung(Samsung Electro-mechatronics), Inbae Chang(Kangwon Univ), Dongchul Han(Seoul National Univ)

ABSTRACT

This paper discusses several design factors of a capacitance displacement sensor with a numerical method and several experiments and describes guide lines of the design of this type sensor. We introduce the charge density method for the analysis of this type sensor, which has feasible accuracy and efficiency. The analysis of this type sensor with the charge density method agrees with displacement sensitivity experiments of a circular plate capacitance sensor with the sensor amp based on the charge transfer principle.

Key Wards : capacitance sensor(정전용량센서), charge-density method(전하밀도법), charge transfer principle(전하전달법), displacement sensitivity(변위민감도), sensor design factor(센서설계인자)

1. 서론

대상물과의 거리가 작은 초정밀 측정에는 변위 민감도가 큰 정전용량센서가 많이 사용된다. 그런데, 상용프루브형 정전용량 센서는 이미 제작된 형상으로 인하여 제한된 공간에서 최대의 민감도가 필요한 초정밀 측정에는 부적합한 경우가 많고, 판형으로 만드는 것이 가공오차나 표면조도 등의 영향을 줄일 수 있는 등의 장점이 있기 때문에 정전용량 센서를 직접 제작하여 Salazar[1], 장인배[2]는 자기베어링에 적용하였고, Chapman[3], 박상신[4]은 공기베어링의 회전정밀도 측정에 적용하였다.

정전용량 센서를 설계하기 위해서 이를 해석해 이하는데, 대표적인 기존 해석방법에는 유한요소법[5]과 해석적인 방법[6]이 있다. 그러나, 유한요소법은 매우 정확한 계산이 가능하나, 외경에 비해 센서와 대상물 사이의 거리가 매우 작으면서 수십μm에서 수백μm로 차수가 변하는 변위센서 경우 모델링이 매우 어렵다. 해석적인 방법은 여러 변수의 물리적인 의미를 알 수 있으나, 식을 간단히 하기 위한 가정이 많아지면 잘 맞지 않는 단점이 있다.

본 논문에서는 도체를 일정한 전하밀도를 가지는 좁은 링 형상의 요소로 자른 후 기하학적인 관계만을 이용하여 전기장을 해석하는 전하밀도법을 적용하여 정전용량 센서의 해석을 수행하였고, 이를 전하전달법에 의한 정전용량 검출회로로 원형평면센서 민감도 실험을 수행하여 이를 검증하였다.

2. 전하밀도법의 이론

2.1 정전용량의 정의[7]

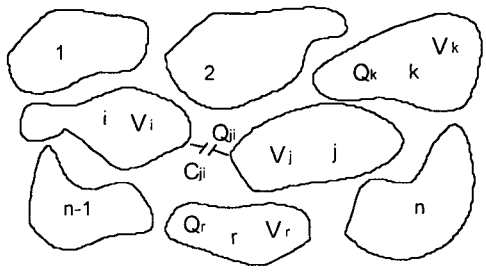

Fig. 1 The definition of capacitance

Fig. 1과 같이 도체들로 이루어진 계에서 어떤 두 도체판 사이의 정전용량(capacitance)C_{ji}은 두 도체 사이에 저장된 전하의 크기Q_{ji}와 두 도체간 전위차V_{ji}의 비로 정의되며, 이를 수학적 식으로 표현하면 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ji} = \frac{|Q_{ji}|}{|V_{ji}|} \quad (CV^{-1}) \text{ or } (F) \qquad (1)$$

또한, 정전용량의 역수인 일래스턴스(elastance) S_{ji}는 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$S_{ji} = |V_{ji}|/|Q_{ji}| \qquad (2)$$

위의 두 도체 사이 정전용량의 정의를 Fig. 1에 나타난 n개의 도체 사이의 식으로 확장하자. n개의 도체들의 전위$V_i(i=1 \text{ to } n)$에 의하여 k번째 도체에 유기되는 전하Q_k는 식(3)과 같이 표현된다.

$$Q_k = c_{k1}V_1 + \ldots c_{kk}V_k + \ldots c_{kr}V_r + \ldots c_{kn}V_n \quad (3)$$

여기서 c_{kk}는 정전용량계수 또는 자기 정전용량계수(Self-capacitance)라 불리며, k번째 도체 외에 다른 도체들이 접지되었을 때($V=0$)의 정전용량으로 정의되고 항상 양의 값이다. 그리고, c_{kr}은 유도(induction) 또는 상호(mutual) 정전용량계수라 불리며, k번째 도체와 r번째 도체를 제외한 나머지 모든 도체가 접지되어 있다고 생각했을 때, r번째 도체의 전위V_r와 k번째 도체의 전하Q_k 사이의 비로 정의되고 부호가 항상 0이거나 음이 된다. 그리고, Green의 역수 정리에 의하여 C_{rk}는 C_{kr}과 같고 행렬C는 대칭행렬이 된다. 또한, 위의 식(3)을 정전용량의 역수인 일래스턴스로 나타내면, n개 도체의 전하$Q_i(i=1 \text{ to } n)$에 의하여 k번째 도체에 유기되는 전위 V_k는 식(4)와 같이 표현된다.

$$V_k = s_{k1}Q_1 + s_{k2}Q_2 + \ldots s_{kn-1}Q_{n-1} + s_{kn}Q_n \quad (4)$$

위의 식(3), (4)의 행렬식은 아래 식(5)와 같다.

$$\{Q\} = [C] \cdot \{V\} = [S]^{-1} \cdot \{V\} \qquad (5)$$

2.2 전하밀도법[8]

전하밀도법은 정전 렌즈와 같은 축대칭 구조물의 전기장 해석에 쓰인다. 이 방법은 전기장을 이산적으로 푸는 다른 수치해법들에 비하여 전기장을 연속적으로 풀기 때문에 정전용량 센서와 같이 경계조건이 열려 있는 구조의 전기장해석에 유리하다. 하지만, 축대칭이라는 한계로 인하여 그 해석 대상이 제한되는 단점이 있으나, 일반적으로 센서는 축대칭으로 설계하는 것이 센서와 대상물사이의 거리 이외의 다른 영향들(기울어진 각도, 비대칭성의 영향 등)을 배제할 수 있기 때문에 정전용량 센서를 해석하는데에는 전혀 문제가 되지 않는다.

진공 속에 있는 축대칭 도체를 일정한 전하밀도를 가지는 좁은 링으로 자르면 각 요소들의 전하밀도 크기가 다른 요소들의 전하에 의하여 유기되는 그 요소의 전위를 그 요소의 면적으로 나눈 것과 같음을 이용하여 도체들의 전위 분포를 구할 수 있는데, 이것이 전하밀도법의 원리이다.

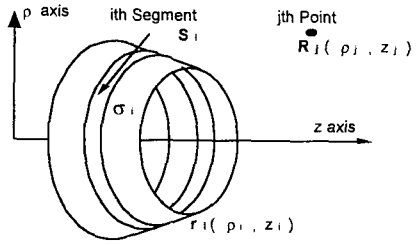

Fig. 2 The charge density method

Fig. 2와 같은 면적이 s_i인 i ($=1 \text{ to } N$)번째 요소가 일정한 표면 전하 밀도σ_i를 가지면 이 요소에 저장된 전하q_i는 $\sigma_i s_i$가 된다. 나머지 N개의 요소들에 의한 j번째 요소 위의 어떤 점 $R_j = (\rho_j, z_j)$에서의 전위$V(R_j)$는 아래 (6)식과 같이 표현된다.

$$V(R_j) = V_j = \sum_{i=1}^{N} A_{ji} q_i \qquad (6)$$

$$\text{여기서} \quad A_{ji} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 s_i} \int_{s_i} \frac{dr_i}{|R_j - r_i|}$$

위의 (6)식에서(ε_0는 permittivity상수이다)A_{ji}는 위의 (4)에 나타난 일래스턴스s_{ji}와 동일하며, 전하q나 전위V의 함수가 아니고 기하학적 위치변수만의 함수이다. 위의 식(6)에 의하여 행렬 A를 구한 후 역수를 취하면 이것은 식(5)에 의하여 정전용량행렬 C가 된다. 이 C 행렬 중에서 적절한 요소를 선택하여 합하면 알고자 하는 정전용량을 구할 수 있다.

3 정전용량 센서의 해석결과

변위를 측정하기 위한 정전용량 센서는 Fig. 3과 같이 센서부, 가드, 틈새, 대상물로 구성된다.[6]

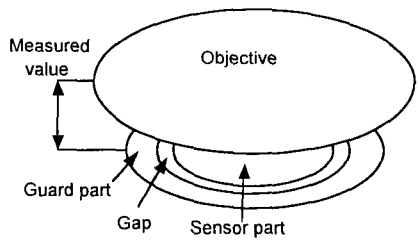

Fig. 3 Configuration of the sensor

Fig. 3에서 가드가 무한히 넓은 평면이라 가정하고, 센서부의 반경을 R_1, 센서부과 가드 사이의 틈새를 g, 센서와 대상물 사이의 거리를 d라 하면 아래와 같은 해석식(7)이 존재한다.[9] 그러나, 실제 센서에서는 그 외경이 제한되고 그 외경 안에서 센서부와 가드, 그리고 둘 사이의 틈새를 적절히 나누어야 하므로 가드가 무한히 넓다고 가정한 식(7)은 정확한 해석에는 적합하지 않다.

$$C = \varepsilon_0 \frac{\pi R_1}{d} + \frac{\varepsilon_0 \pi R_1 g}{d + 0.22g}\left(1 + \frac{g}{2R_1}\right) \quad (7)$$

센서 설계는 우선 센서부와 가드 사이의 틈새를 결정하고, 그 다음 틈새를 제외한 나머지 면적을 센서부와 가드로 적절히 나누는 절차로 행해진다. 그런데, 일반적으로 센서를 가공할 때 센서부과 가드 사이의 틈새는 가공의 한계로 인하여 최소값이 정해진다. 하지만, 센서부가 커질수록 일정한 너비의 틈새가 차지하는 면적의 증가로 실제 센서를 구성하는 센서부과 가드의 면적합이 줄어들기 때문에 설계기준을 정하기가 매우 어렵다. 그래서, 전하밀도법에 의해서 Fig. 3과 같이 센서를 모델링한 후 센서부와 가드 면적을 고정시키고 센서와 가드 사이의 틈새의 너비를 넓히면서 그 영향을 고찰하고, 센서 외경을 고정시키고 센서부(Sen)와 가드(Gua)사이의 면적비를 1:7에서 7:1까지 변화시키면서 면적비 영향을 고찰하였다.

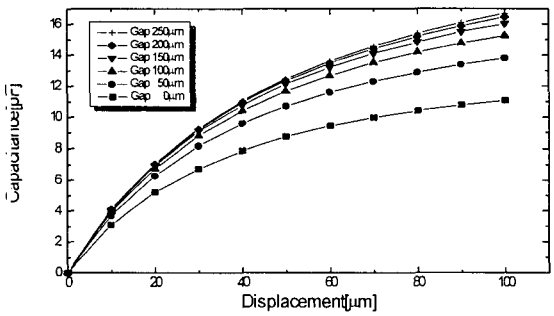

Fig. 4 Earthed terminal flat-circular sensor with increasing gap and fixed area

센서부와 가드 사이의 틈새가 넓어질수록 민감도가 감소할 것이라 추측하기 쉽지만 예상과는 달리 해석 결과를 도시한 Fig. 4에서는 틈새가 0μm에서 250μm까지 50μm씩 넓어질 때 민감도가 커지고 틈새가 어느 정도 이상이 되면 민감도 차이가 없어진다. 다음으로 센서의 외경과 틈새의 너비가 일정할 때, 가드에 대한 센서부의 면적비를 변화시키는 해석 결과를 도시한 Fig. 5에서는 가드에 대한 센서부의 면적비가 증가할수록 민감도가 커진다. 면적비와 틈새 사이의 관계를 알기 위하여 틈새를 0-300μm까지 100μm씩 늘려 면적비 해석을 반복한 결과, 같은 면적비에서 틈새가 증가할수록 민감도가 작아짐과 면적비가 틈새보다 중요한 인자임을 알 수 있다.

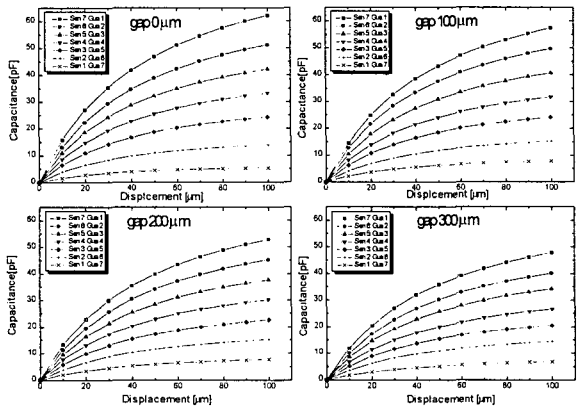

Fig. 4 Earthed terminal flat-circular sensor with increasing gap and fixed outer radius

4. 변위민감도 실험

전하밀도법의 센서 해석을 정확하게 실험으로 검증하기 위해서는 면적비나 틈새 등이 다른 여러 형상의 센서판을 제작하여 각각 실험해야 한다. 하지만, 이런 경우에 매번 실험의 세팅 과정에서 대상물과 센서의 기준 위치가 달라지기 때문에-특히, 대상물과 거리가 아주 작은 곳에서는 민감도가 아주 커서-큰 오차가 발생할 수 있다. 이렇게 정확한 검증이 어렵기 때문에 경향을 알 수 있으면서 위와 같은 세팅의 문제점을 극복할 수 있는 실험장치를 고안하였다. 면적이 같고 틈새가 일정한 도체들로 구성된 원형 센서판과 전하전달법에 의한 정전용량 검출회로를 제작하여 한 지점에서 여러 실험을 동시에 수행하였다.

4.1 측정회로[10],[11]

본 논문에서 사용한 정전용량 측정회로는 Fig. 6에 도시되어 있듯이 CMOS 스위치(S_1-S_4)를 이용하여 미지의 정전용량C_x을 일정한 전압원V_c로 충전시킨 후 이를 방전시켜면서 충전되어 있던 전하로 인하여 흐르는 순간전류를 OP Amp로 적분하여 정전용량에 비례하는 직류전압을 얻는 전하전달(Charge transfer)방법 회로이다.

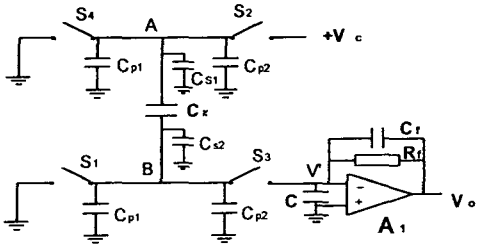

Fig. 6 Sensor amp basic circuit

이 방법의 회로는 자동 원리상 아주 높은 대역폭을 가지며, 전류를 적분하여 출력을 얻기 때문에 잡음이 적고, 따로 정전용량에 비례하는 출력을 얻기 위한 부대 장치-예를 들어 최고치 검출장치, 위상 검출 장치 등-가 필요하지 않아 간단하다. 또한, 특별한 스위칭 방법을 통하여 기생정전용량(C_{s1}, C_{s2}, C_{p1}, C_{p2})을 배제할 수 있으며, 기본 전압 변동량도 줄일 수 있다. 전하전달방법 회로는 Fig. 6과 같이 OP Amp A_1과 귀환 저항 R_1과 귀환 콘덴서 C_f로 구성되는 전류적분회로이다. 그래서, 아주 큰 적분상수 $T_f = R_1C_f$를 택하여 스위칭 주파수f의 영향을 최소화하면, 방전 전류 펄스를 적분한 미지의 정전용량인 C_x에 비례하는 직류전압 출력V_o을 얻을 수 있다. 회로해석을 통하여 얻은 정상상태의 출력과 민감도는 아래식(8)과 같다.

$$V_o = -C_x V_c f R_1 , \quad \frac{dV_o}{dC_x} = -fR_1 V_c \quad (8)$$

위의 (8)식에서 알 수 있듯이 민감도가 충전 전압V_c, 구동 주파수 f, 귀환저항 R_1의 곱으로 표시된다.

4.2 실험장치 및 방법

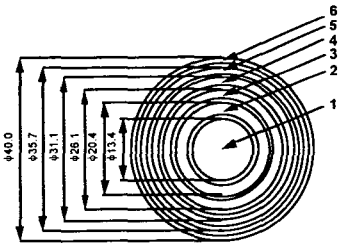

Fig. 7 Sensor test plate configuration

Fig. 7과 같은 면적이 같고 사이의 틈새가 일정한 1-6의 도체들로 이루어진 센서판을 제작한 후 각각의 도체에 스위치를 연결하고 위의 Fig. 8과 같은 실험장치로 대상물을 0-100μm로 10μm씩 이동시키면서 연결한 스위치를 조작하여 한 위치에서 여러 가지 센서 형상변수에 대한 변위민감도 실험을 수행하였다. 측정 대상물을 움직이는 이송장치는 0.01μm 분해능의 압전(piezo) X,Y 테이블이고 변위를 측정하는 장비는 0.05μm 분해능의 광학 레이저 센서를 사용하였다.

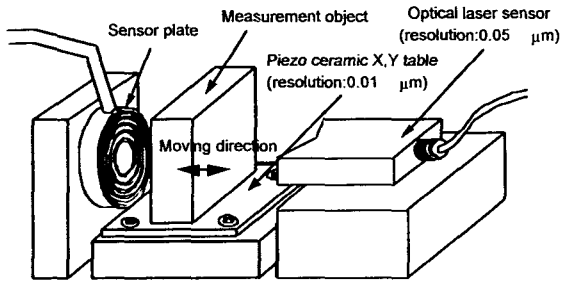

Fig. 8 Sensitivity experimental equipments

표 1. 면적비에 의한 변위민감도실험

센서판	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5
가드	2, 3, 4, 5, 6	3, 4, 5, 6	4, 5, 6	5, 6	6
면적비	1 : 5	2 : 4	3 : 3	4 : 3	5 : 1

표 2. 면적비와 틈새에 의한 변위민감도실험

센서판	1		1, 2		1, 2, 3		1, 2, 3, 4	
가드	2, 3, 4, 5	3, 4, 5 ,6	3, 4, 5	4, 5, 6	4, 5	5, 6	5	6
면적비	1 : 4		2 : 3		3 : 2		4 : 1	

표 3. 접지에 의한 변위민감도실험

센서판	1				
가드	2				
접지	없음	3	3, 4	3, 4, 5	3, 4, 5, 6

스위치를 이용하여 표 1과 같이 면적비를 1:5, 2:4, 3:3, 4:2, 5:1로 증가시킬 때, 표 2와 같이 면적비를 1:4, 2:3, 3:2, 4:1로 증가시키면서 동시에 센서부과 가드의 틈새를 넓힐 때, 표 3과 같이 가드 바깥쪽에 접지를 넓힐 때 대상물과의 거리를 증가시키며 각각 센서 증폭기에서 나오는 전압을 측정하였다.

4.3 실험결과

면적비 실험의 결과를 도시한 Fig. 9에서는 가드에 대한 센서부의 면적비가 증가할수록 민감도가 선형적으로 커짐을 알 수 있으며, 이는 가드가 민감도에 영향을 미치지 않고 단지 센서부를 보호하는 역할만을 수행하는 것으로 설명할 수 있다. 틈새 실험의 결과를 도시한 Fig. 10에서는 면적비가 틈새보다 중요한 인자이며, 같은 면적비에서는 센서와 가드

사이의 틈새가 넓어지면 민감도가 커짐을 알 수 있고, 이는 센서부의 전기장이 가드의 보호없이 옆으로 퍼져나가면서 측정범위가 늘어나 민감도가 커지는 것으로 설명할 수 있다.

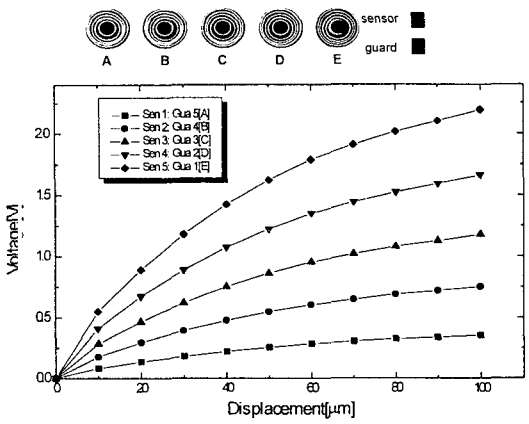

Fig. 9 The effect of area ratio on sensitivity

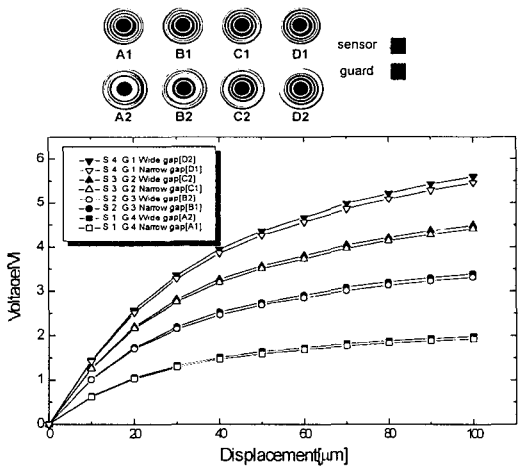

Fig. 10 The effect of gap and area ratio on sensitivity

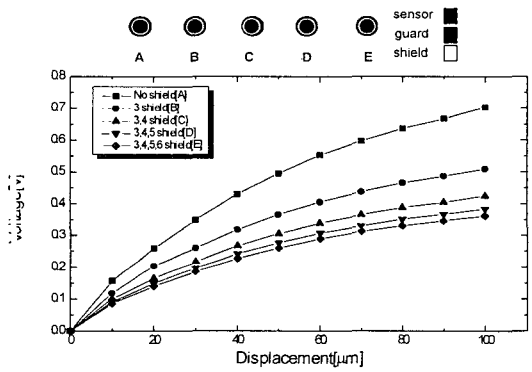

Fig. 11 The effect of shielding on sensitivity

접지 실험의 결과를 도시한 Fig. 11에서는 접지의 면적이 증가할수록 민감도가 줄어들고 접지의 면적이 일정 이상 넓어지면 민감도의 차이가 없어짐을 알 수 있다. 그러나, 접지를 하지 않으면 외부의 잡음에 민감하게 되므로 접지를 하되 되도록 적은 면적으로 해야 한다.

5. 결론

전하밀도법을 이용하여 정전용량 센서의 여러 설계변수가 민감도에 미치는 영향을 해석하였고, 전하전달법을 이용한 회로로 원형평면센서 변위민감도 실험을 수행하여 전하밀도법이 매우 효과적인 해석방법임을 입증하였다. 해석결과에서 가드에 대한 센서부의 면적비를 최대로 하여 설계해야 하고, 틈새가 커질수록, 접지가 적을 수록 민감도가 커짐을 알 수 있었다.

참고문헌

1. A.O.Salazar, W.Dunford, R.Stephan, E.Watanabe. 'A Magnetic Bearing System using Capacitive Sensors for Position Measurement', *IEEE Trans. on Mag.* Vol. 26, No. 5, Sep. 1990.
2. 장인배, '캐패시턴스 센서가 내장된 자기 베어링의 작동 성능향상에 관한 연구', 서울대학교 박사학위논문, 1994
3. P.D.Chapman, 'A Capacitive based Ultraprecision Spindle Error Analyser', *J. of Precesion Engineering.* Vol. 7, No 3, July, 1985
4. 박상신, '초정밀 공작기계용 공기베어링의 해석 및 진동특성 측정에 관한 연구', 서울대학교 박사학위논문, 1995
5. M.Hirasawa,M.Nakamura,M.Kanno,'Optimum Form of Capacitive Transducer for Displacement Measurement', *IEEE Trans. Instru. Meas.*,Vol.33, No.4,1984 pp276-280
6. W.C.Heerens, 'Application of Capacitance Techniques in Sensor Design", *J. Phys. E:Sci.Instrum.*, Vol. 19, 1986, pp 897~906.
7. W.R.Smythe, *Static and Dynamic Electricity* , Mcgraw-hill,
8. A.Renau, F.H.Read, J.N.H.Brunt, 'The charge-density method of solving electrostatic problems with and without the inclusion of space-charge', *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.15, 1982, pp. 347~354
9. 1..R.Pott, R.Schefzyk, "Apparatus for Measuring the Thermal Expansion of Solids between 1.5 and 380 K", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 16, 1983, pp. 444~449.
10. S.M.Huang, J.Fielden, R.G.Green, M.S.Beck, 'A New Capacitance Transducer for Industrial Applications', *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 21, 1988, pp. 251~256.
11. S.M.Huang, R.G.Green, A.Plaskowski, M.S.Beck, 'A High Frequency Stray-immune Capacitance Transducer based on the Charge Transfer Principle', *IEEE Trans. Instru. Meas.*, Vol. 37, No. 3, 1988, pp. 368 ~373.