

# 인쇄회로기판 검사용 프로브시스템의 광학센서

## An Optical Sensor of a Probing System for Inspection of PCBs

°심재홍\*, 조형석\*\*, 김성권\*\*\*

\*삼성전자 생산기술센터 자동화연구소(Tel: +82-331-200-2848; Fax: +82-331-200-2420;  
E-mail: jhshim@srtf.sec.samsung.co.kr)

\*\*한국과학기술원 기계공학과(Tel: +82-42-869-3213; Fax: +82-42-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

\*\*\*삼성전자 생산기술센터(Tel: +82-331-200-2200; Fax: +82-331-200-2252)

**Abstract** We have developed a highly responsive probing system for inspection of electrical properties of assembled PCBs (printed circuit boards). However, as the duration of the impact occurring between a probe and a solder joint on PCB is very short, it is very difficult to control the harmful peak impact force and the slip motion of the probe to sufficient level only by its force feedback control with high gains. To overcome these disadvantages of the prototype, it needs to obtain some information of the solder joint in advance before the contact. In addition, to guarantee the reliability of the probing task, the probing system is required to measure several points around the probable target point at high speed. Therefore, to meet such requirements, we propose a new non-contact sensor capable of detecting simultaneously position and normal vectors of the multiple points around the probable target point in real time. By using this information, we can prepare a control strategy for stable contact motion on impact. In this paper, we described measuring principle, design, and development of the sensor. The effectiveness of the proposed sensor is verified through a series of experiments.

**Keywords** inspection, probing, solder joint, non-contact sensor, surface normal, contact motion

### 1. 서론

최근의 표면실장 기술의 비약적인 발전으로 인쇄회로기판의 고밀도화가 촉진되어오고 있다. 따라서 인쇄회로기판의 검사는 더욱 더 정밀하고, 정확한 방법을 요구하고 있다. 통전검사 (in-circuit test)는 인쇄회로기판 검사공정중 하나로서, 고속으로 인쇄회로기판상의 납땜부의 통전성을 검사한다. 이공정은 납땜후 저항, 콘덴서, IC 같은 전자부품의 장착성, 납땜양불성을 검사하는 제품의 품질보증에 있어서 대단히 중요한 부분이다. 가장 진보된 통전검사방법은 로봇의 말단효과부에 프로브를 장착하여 납땜점에 직접 프로브를 장착시켜 통전검사를 하는 이동프로브(flying probe)방법이다. 이방식은 그림1에서 보는바와 같이 프로브가 납땜표면과 접촉할때 수동스프링에 의해서만 충격에너지를 흡수한다. 따라서, 이와 같은 장치로는 프로브가 고속으로 납땜부와 접촉할때 발생하는 접촉력을 효과적으로 제어하기 힘들다. 이러한 제어상태에서는 프로브가 납땜표면과 접촉시 과도한 접촉력이 발생하여 표면에 흠집을 발생시키며, 진동과 같은 불안정한 접촉운동을 일으킨다. 과도한 접촉력은 납땜표면에 소성변형을 일으키며, 납땜불량의 원인이 될 수 있고, 접촉진동은 부정확한 신호계측을 일으킬 수 있다. 특히, 소성변형된 납땜표면은 그 표면이 쉽게 산화부식되며, 부식된 부위는 작은 충격에도 쉽게 부서지기 쉽다.

기존 방법에 의해 발생가능한 또하나의 문제점은 프로브 팁의 미끄러짐이다. 납땜표면의 급경사면과 팁이 접촉하면 프로브 팁의 탄성으로 인해 접촉표면에서 팁이 미끄러질 수 있다. 이때, 접촉표면의 급한 부위는 납땜시 납땜표면에 도포되는 플럭스(flux)층을 파괴한다. 이는 앞서 말한 납땜표면의 산화부식을 가속화시키는 작용을 한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 최초 접촉이전에 목표 접촉대상 납땜표면의 표면 법선기울기등의 사전 정보가 필요하다.

저자들은 통전검사용 프로브 시스템을 제안한바 있다 [1,2]. 제안된 원형은 직렬 매크로/마이크로 매니플레이터 구조로

되어 있다. 마이크로 운동기구는 전자기학 원리를 이용하여 작은 관경과 높은 제어밴드를 갖도록 설계되었다. 그러나, 충격시간이 매우 짧기때문에, 높은 이득을 갖도록 설계된 힘제한제어만으로는 최초 접촉시 발생하는 최대 접촉력을 충분히 감소시킨다는 것이 매우 어려운 일이다. 일련의 예비실험을 통하여, 제안된 원형 프로브 시스템은 0.1 m/sec이하의 저속으로 접촉하는 경우에 효과적인 접촉운동을 할 수 있음을 알게 되었다.

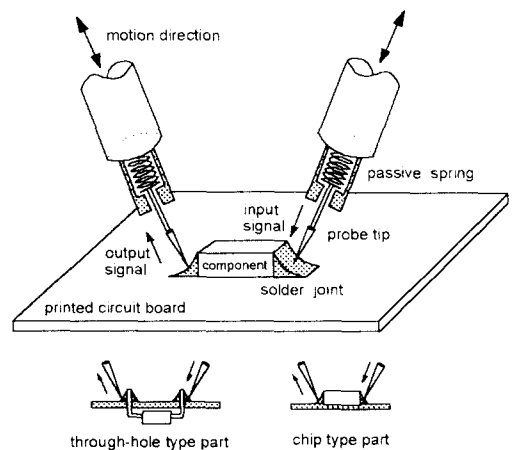


그림 1. 종래의 통전검사 장치.

Fig. 1. Conventional in-circuit test of a printed circuit board.

전술한 원형시스템의 단점을 극복하고, 최서의 접촉력과 미끄러짐을 방지하면서 안정된 접촉운동을 발생시키기 위한 한 방법으로서 프로브 팁의 위치를 적절하게 제어하여, 충격시의 속도를 제어하는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법을 실현하기 위해서는 접촉전에 미리 납땜부에 관한 사전정보를 알 필요가 있다.

CAM 시스템에 있어서 어떤 물체의 모델을 측정하기 위해서 여러가지 비접촉센서가 개발되어 왔다[3,4]. 그러나, 이들 대부분은 한 측정점의 위치만을 알 수 있다. Aoyama [5] 등은 한 측정점의 위치 벡터와 법선 벡터를 동시에 측정할 수 있는 광학센서를 제안하였다. 그러나, 통전검사 작업의 신뢰성을 보장하기 위해서는 기존의 센서와는 달리, 고속으로 한 측정점 부근의 여러 점을 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 그러므로, 이런 요구사항을 만족시키기 위해 새로운 비접촉센서가 본 논문에서 제안되었다.

본 논문은 새롭게 설계된 광학센서와 측정원리를 소개한다. 제안된 광학센서는 4개의 레이저 소스와 하나의 피라미트 PSD (position sensing device). 그리고 피라미트 거울등으로 구성되어 있다. 4개의 레이저를 사용하는 광학센서는 공간으로 다양한 위치정보를 제공할 수 있다. 즉, 프로브 팁과 접촉 예상되는 납땜 조인트 표면사이의 상대거리와 접촉점 부근의 표면 기울기등의 정보를 제공할 수 있다. 제안된 센서의 유효성은 일련의 실험을 통하여 증명되었다.

## 2. 측정 원리

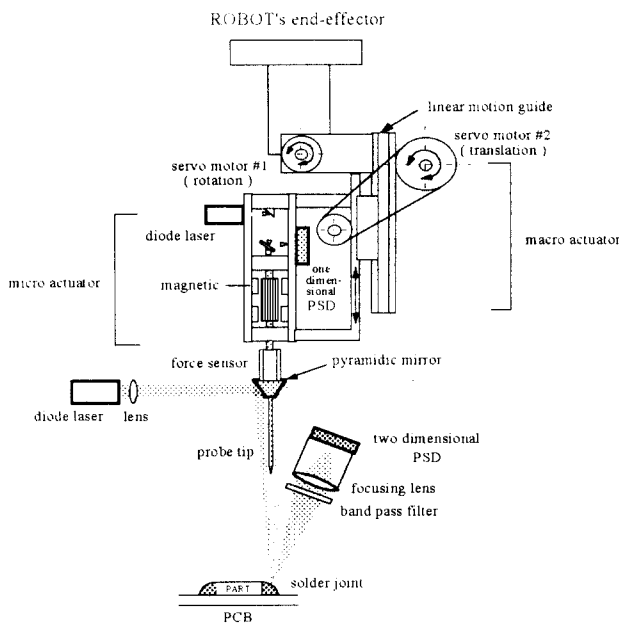


그림 2. 제안된 측정시스템의 개략도.

Fig. 2. A schematic of the proposed probing system.

그림 2는 제안된 광학센서와 전체 프로브 시스템의 개략적인 모습을 보여주고 있다. 이 시스템에 있어서, 측정물체의 난반사 (lambertian) 성분이 경면반사 (specular) 성분보다 훨씬 강하다고 가정하자. 만약 레이저 광이 프로브상에 장착되어 있는 거울에 의해 물체의 표면에 반사된다면, 표면에서 난반사되어지는 빛이 대역광필터와 초점렌즈를 통한 뒤 PSD 센서로 입사된다. 정확하게 물체의 목표점에 레이저 광을 위치시키기 위해서는 레이저는 프로브 팁과 간섭을 피할 수 있는 방향으로 경사지게 굴절되어야 한다. 그러므로, 그림에서 보는바와 같이 수평으로 놓여 있는 레이저 소스로부터 나온 레이저 광은 45도 이상의 기울기각을 갖는 거울에 의해 목표점으로 굴절된다. 결과적으로, 프로브와 측정대상 위치사이의 간격은 전형적인 삼각측정법에 의해 구해진다[6]. 이 경우, PSD는 반사광의 중심위치를 측정할 수 있다[7]. 그러나, 프로브 매니플레이터의 위치 제어 부정확과 광학센서의 측정오차로 인해 하나의 거리정보만으로는 신뢰할

수 있는 거리정보를 얻기는 힘들다. 따라서, 보다 정확한 거리와 표면기울기 정보를 구하기 위해서는 접촉점부근의 영역정보가 필요하다.

그림 3에서 보는 바와 같이 4개의 레이저를 이용하여 그와 같은 영역 정보를 구할 수 있다. 피라미트 거울은 4개의 레이저 소스와 짝을 이루도록 4개의 기울어진 거울로 구성되어 있다. 만약 4개의 레이저가 순차적으로 켜지고 꺼진다면, 4개의 독립적인 거리정보가 얻어질 수 있다.

### 2.1 거리 측정

그림 3에서 보는 바와 같이  $i$  번째 레이저로부터 나온 광이 피라미트 거울에 의해 점  $P_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}]^T$  에서 굴절되고, 이어 벡터  $\hat{u}_i$  방향으로 납땜조인트 표면상의 한 점  $P_{1i} = [X_{1i}, Y_{1i}, Z_{1i}]^T$  으로 투사된다. 이때,  $\hat{u}_i$  는 점  $P_{2i} = [X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i}]^T$  을 통과하게 된다. 점  $P_{2i}$  은 광학설계 사양으로부터 이미 알고 있는 값이다. 여기서, 첨자  $i$  는 레이저 소스의 순서를 의미한다.

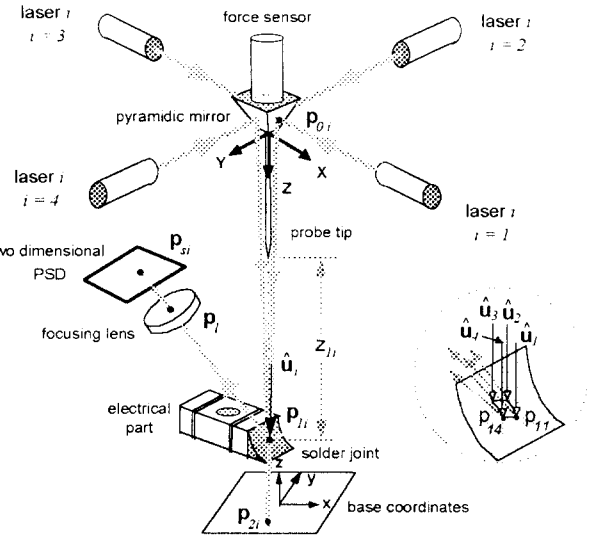


그림 3. 거리 측정을 위한 광경로.

Fig. 3. A diagram used to derive equations for gap distance.

이때, 물체표면으로부터 반사된 광은 초점렌즈의 중심  $P_l = [X_l, Y_l, Z_l]^T$  을 통하여 센서 PSD  $P_{sl} = [X_{sl}, Y_{sl}, Z_{sl}]^T$  에 입사된다. 납땜조인트 상의 점  $P_{1i}$  은 두개의 선,  $\overline{P_{0i}P_{2i}}$  과  $\overline{P_{sl}P_l}$  의 교차점으로부터 구해진다.

$$P_{1i} = [X_{1i}, Y_{1i}, Z_{1i}]^T = \overline{P_{0i}P_{2i}} \cap \overline{P_{sl}P_l} \quad (1)$$

여기서,  $\overline{P_{0i}P_{2i}}$  은 두점  $P_{0i}$  과  $P_{2i}$  을 지나는 직선이고,  $\overline{P_{sl}P_l}$  은 두 점  $P_{sl}$  과  $P_l$  을 지나는 직선이다.

$$\overline{P_{0i}P_{2i}}(x, y, z) = \frac{x - X_{0i}}{X_{2i} - X_{0i}} = \frac{y - Y_{0i}}{Y_{2i} - Y_{0i}} = \frac{z - Z_{0i}}{Z_{2i} - Z_{0i}} \quad (2)$$

$$\overline{P_{sl}P_l}(x, y, z) = \frac{x - X_{sl}}{X_l - X_{sl}} = \frac{y - Y_{sl}}{Y_l - Y_{sl}} = \frac{z - Z_{sl}}{Z_l - Z_{sl}} \quad (3)$$

여기서, 평균 거리(average gap distance)  $z_a$ 는 식(1)의  $z_{li}$ 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} z_{li}}{N_d} \quad (4)$$

여기서  $N_d$ 는 투사된 레이저 소스의 숫자이다.

## 2.2 평면 패치를 이용한 표면기울기 측정

납땜조인트의 표면기울기를 구하기 위해 네 점  $P_{li}$ 으로 구성된 평면패치 개념이 사용되었다. 즉, 최초의 레이저광이 벡터  $\hat{u}_1$  방향으로 납땜조인트의 모른는점  $P_{l1}$ 에 투사되면, PSD의 측정위치  $P_s$ 가 구하여진다. 식(1)로부터 우리는 점  $P_{l1}$ 을 구할 수 있다. 그러면, 그림4에서 보는바와 같이 평면패치와 레이저광 경로  $\hat{u}_1$ 가 교차하는 점을 평면패치의 한쪽지점  $P_{l1}$ 으로 정의한다. 이와 똑같은 방법으로, 평면패치의 꼭지점  $P_{l2}, P_{l3}, P_{l4}$ 들이 얻어진다.

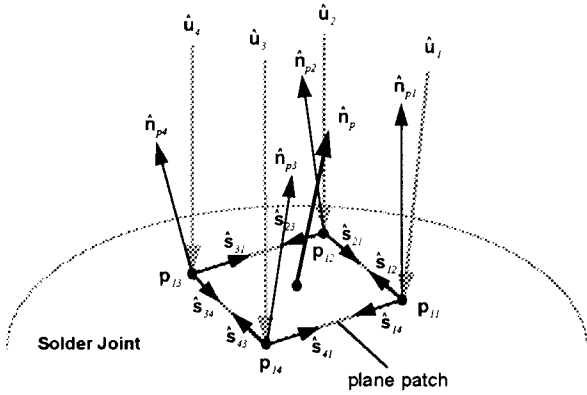


그림 4. 표면기울기를 구하기 위한 평면패치모델.

Fig. 4. Plane patch model for obtaining the surface normal near the target point of the solder joint.

평면패치의 법선벡터  $\hat{n}_{pi}$ 가 다음과 같이 구하여진다.

$$\hat{n}_{pi} = \hat{S}_{ij} \times \hat{S}_{ji} \quad (1 \leq (i, j) \leq 4) \quad (5)$$

여기서,  $\hat{S}_{ij}$ 는 점  $P_{li}$ 에서 점  $P_{lj}$ 으로의 직선벡터이다. 평균 법선벡터  $\hat{n}_p$ 는

$$z_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} z_{li}}{N_d} \quad (6)$$

구좌표계에서의 표면기울기  $\hat{n}_p$ 를 고려하고자 한다. 그리고,  $\hat{n}_p = [n_{px} \ n_{py} \ n_{pz}]^T$ 로 놓으면, 방향코사인법칙으로부터 납땜조인트의 목표 표면의 상태를 결정할 수 있는 다음과 같은 변수들을 정의할 수 있다. 기울기각 (inclination angle)  $\phi_e$ 는

$$\phi_e = \frac{\pi}{2} - \gamma = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{n_{pz}}{|\hat{n}_p|} \right) \quad (7)$$

여기서  $|\hat{n}_p|$ 는 법선벡터  $\hat{n}_p$ 의 스칼라값이다.

회전각 (rotation angle)  $\eta$ 는

$$\eta = \cos^{-1} (\bar{e}_x \cdot N(\bar{n}_{px} + \bar{n}_{py})) \quad (8)$$

여기서  $\bar{e}_x$ 는  $x$ 축방향의 단위벡터이고,  $N(\ )$ 는 ( )의 단위화한 벡터이고,  $\bar{n}_{px}$ 와  $\bar{n}_{py}$ 는 벡터  $[n_{px}, 0, 0]^T$ 와  $[0, n_{py}, 0]^T$ 를 각각 의미한다. 앞의 두 변수  $\phi_e$ 와  $\eta$ 를 사용하여, 프로브 시스템의 현자세에서의 목표 납땜조인트 표면의 상태를 예측할 수 있으며, 안정된 접촉운동을 위한 제어전략을 준비할 수 있다.

## 3. 광학 센서 설계

제안된 광학센서의 설계목적은 설계된 센서가 프로브 작업을 달성할 수 있는 적절한 측정영역을 갖도록 하는 데 있다. 이를 달성하기 위해 다음과 같은 설계순서를 소개하고자 한다.

1) 초점거리  $f_L$ , 물체에서부터 렌즈 중심까지의 거리  $z_c$ 를 선정한다. 여기서, 렌즈 중심에서 센서평면까지의 거리를 구할 수 있다.

2) 먼저 viewing angle을 구하고, Scheimpflug 조건에 의해 tilt angle을 구한다. Viewing angle이 클수록 측정범위는 좁아지지만, 센서의 측정해상도는 좋아진다. 그리고, 광학렌즈, PSD등은 다음과 같은 조건을 만족하도록 위치되어야 한다.

$$\tan \theta_{tilt} = \frac{1}{M} \tan \theta_{sep} \quad (9)$$

여기서,  $\theta_{sep}$ 는 조명각과 센서의 입사각간의 사이각이고,  $\theta_{tilt}$ 는 렌즈의 초점거리내에서의 광측정표면의 tilt angle이다. 그리고,  $M = (w_c - f_L) / w_c$ 는 렌즈의 물체확대비이며, 여기서  $w_c$ 는 렌즈중심에서 센서의 중심까지의 거리이고,  $f_L$ 는 렌즈의 초점거리이다. 이조건은 모든 측정거리내에서 초점을 맞히도록 하는데 필요조건이다.

3) Homogeneous 행렬을 이용하여 기준축  $\bar{X}$ 에 대한 센서평면축  $\bar{X}''$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{X}' = Tran(x, z_c \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_{sep})) \cdot \quad (10)$$

$$Tran(z, z_c \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{sep})) Rot(y, \frac{\pi}{2} - \theta_{sep}) \bar{X}$$

$$\bar{X}'' = Tran(x, w_c \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \theta_{tilt})) \cdot \quad (11)$$

$$Tran(z, w_c \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{tilt})) Rot(y, \frac{\pi}{2} - \theta_{tilt}) \bar{X}'$$

여기서,  $\bar{X}'$ 는 초점렌즈축을 의미한다.

4) 알고있는 두점 A와 B를 지나는 직선방정식과 3)에서 구할 수 있는 평면방정식사이의 교차축을 구하므로써 perspective coordinate를 구할 수 있다. 점 A( $x_1, y_1, z_1$ )는 레이저 광이 검출되는 점이고, 점 B( $x_2, y_2, z_2$ )는 기준축에서 렌즈의 중심을 나타낸다.

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (12)$$

- 식(11)로부터 센서평면을 나타내는 평면방정식

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (13)$$

5) 심도를 고려하여 선정된 PSD 센서의 유효크기를 나타내는 측정범위를 살펴본다.

유효 센서 크기를 선정하기 위해 관련 변수해석을 수행하였다. 일반적으로,  $\theta_{sep}$ 는 30°와 45°의 두 값이 사용된다. 전술한 바와 같이 고해상도를 얻으려면,  $\theta_{sep}$ 값이 작아야하므로, 본논문에서는 30°로 선정했다.  $f_L$ 이 감소하고,  $z_c$ 가 증가함에 따라,  $\theta_{hit}$ 는 증가한다. 본논문에서는 렌즈와 이차원 PSD 센서의 경우 기존의 상품을 이용하였다. 제안되는 센서는 콤팩트하고, 목표위치에 근접한 다른 물체와의 간섭을 피해야하므로,  $f_L = 15\text{mm}$ ,  $z_c = 45\text{mm}$ 로 선정하였다. 결과적으로,  $\theta_{hit}$ 는 45°로 결정하였다. 납땀조인트의 크기를 고려할때,  $d_h = 20\text{mm}$ ,  $d_w = 0.5\text{mm}$ 로 결정하였다. 이값들로 부터,  $s_w = 8.467$ 의 값을 얻을 수 있다. 상품들로부터 위에서 얻은 유효센서크기를 만족하는  $12 \times 12 \text{mm}^2$  크기의 PSD 센서를 찾을 수 있었다.

#### 4. 제안된 센서의 측정결과

제안된 센서의 성능을 평가하기 위해 일련의 모의실험과 실험을 수행하였다. 먼저, 측정거리  $z$ 를 1mm 간격으로 0에서 20 mm로 설정하였고, 기울기각을 0으로 고정하였다. 네개의 레이저 소스로부터 나온 광들은 측정거리 20mm내에서  $1 \times 1 \text{mm}^2$ 영역을 서로 지나가도록 설계되었다. 다른말로 하면, 측정범위는  $1 \times 1 \times 20 \text{mm}^3$ 이다. 측정 납땀의 종류는 Sn-Pb계열의 구성비 63:37을 지니고 있다.

그림 5은 기준 변위센서에 의한 거리와 식(4)를 이용하여 제안된 센서에 의해 측정된 거리사이의 평균오차를 보여주고 있다. 여기서, 기준변위센서는 Keyence LC-2220를 사용하였다. 그림 5의 결과로부터, 약  $\pm 0.3 \text{mm}$ 의 오차범위내에서 제안된 센서에 의해 거리측정이 가능함을 알 수 있다.

그림 6은 거리  $z = 5 \text{mm}$ 에서 제안된 센서의 기울기각  $\phi_e$ 의 측정실험결과를 보여주고 있다. 기울기각 측정은 5도 간격으로 0에서부터 70도각 사이에서 수행하였다. 실험으로부터, 약  $\pm 5$ 도의 오차범위내에서 65도까지 측정가능함을 알 수 있었다. 비록 납땀표면의 경면반사 성분으로 인해 측정정확도가 그리 높지는 않지만, 제안된 센서는 안정되고, 신뢰할만한 통전검사에 적합한 측정장치로서의 역할을 충분히 할 수 있다.

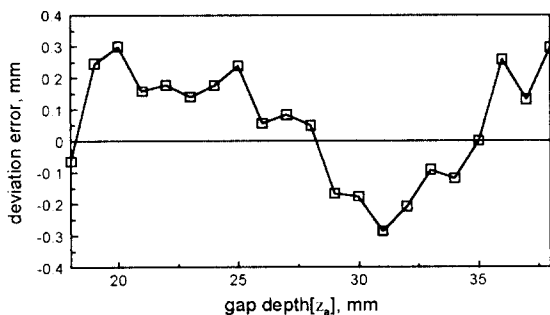


그림 5. 제안된 센서에 의한 측정거리 오차.

Fig. 5. Deviation error of the gap distance measured by the proposed sensor.

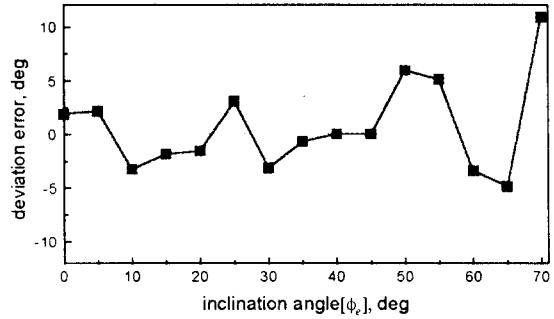


그림 6. 납땀조인트 표면에서의 기울기각 측정 결과.

Fig. 6. Experimental results for detecting an inclination angle at a surface of the solder joint.

#### 5. 결 론

인쇄회로기판의 통전검사용 프로브 시스템의 광학센서가 새롭게 설계되고, 제안되었다. 네개의 레이저광으로 구성된 광학센서는 실시간으로 다양한 위치정보를 제공할 수 있다. 즉, 프로브 팁과 접촉예상되는 납땀조인트의 표면사이의 상대거리정보, 그리고, 납땀조인트상의 접촉예상위치 부근의 기울기정보등을 제공할 수 있다. 일련의 실험을 통하여 제안된 센서의 성능을 확인하였다. 실험으로부터, 약  $\pm 0.3 \text{mm}$  정도의 오차범위내에서 상대거리를 측정할 수 있으며, 표면 기울기각은  $\pm 5$ 도의 오차범위내에서 65도까지 측정가능함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. J.H. Shim, H.S. Cho, and S. Kim, "A New Probing System for the In-Circuit Test of a PCB", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, April 22-28, Minneapolis, pp. 580-585, 1996.
2. J.H. Shim, H.S. Cho, and S. Kim, "An Actively Compliant Probing System", *IEEE Control Systems Magazine*, Feb., 1997, to appear.
3. T. Miyoshi, "Optical Axis Displacement Sensor with Cylindrical Lens Means", *United States Patents*, Patent Number: 4,897,536, 1990.
4. M. Rioux, "Three Dimensional Imaging Device", *United States Patents*, Patent Number: 4,548,504, 1987.
5. H. Aoyama, K. Yamazaki, and M. Sawabe, "Optical Sensor for Detecting a Position and an Inclination", *Proc. of the JSME Int. Conf. on Advanced Mechatronics*, Tokyo, Japan, pp. 306-311, 1993.
6. Y.K. Ryu and H.S. Cho, "A New Optical Sensing System for Obtaining 3D Shape of Specular Objects", *J. of Optical Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 1483-1495, 1996.
7. P.J. Besl, "Active, Optical Range Imaging Sensors", *Machine Vision and Applications*, pp. 127-152, 1988.