

3 분력 힘 센서를 이용한 CMM 용 접촉식 프로브의 개발에 관한 연구

송광석*, 권기환#, 박재준*, 조남규**

A Study of Development for Contact CMM Probe using Three-Component Force Sensor

Kwang Seok Song*, Ki Hwan Kwon#, Jae Jun Park* and Nahm Gyo Cho**

ABSTRACT

A new mechanical probe for 3-D feature measurement on coordinate measuring machines (CMMs) is presented. The probe is composed of the contact stylus and the three-component force sensor. With the stylus mounted on the force sensor, the probe can not only measure 3-D features, but also detect contact force acting on the stylus tip. Furthermore, the probing direction and the actual contact position can be determined by the relationship among three components of contact force to be detected. In this paper, transformation matrix representing the relationship between the external force acting on the stylus tip and the output voltages of measurement gauges is derived and calibrated. The prototype of probe is developed and its availability is investigated through the experimental setup for calibration test of the probe. A series of experimental results show that the proposed probe can be an effective means of improving the accuracy of touch probing on CMM.

Key Words : Coordinate measuring machine (CMM, 3 차원 좌표 측정기), Three-component force sensor (3 분력 힘 센서), Contact probe (접촉식 프로브)

1. 서론

물체의 형상을 빠르고 정확하게 측정하여 3 차원의 형상정보를 얻는 장비로, 가공된 부품의 치수검사와 도면이 없는 부품의 역설계에 주로 사용되고 있는 CMM 은 최근 고정밀화, 자동화에 의해 다수의 측정 대상을 보다 정확하면서도 쉽고 빠르게 측정할 수 있도록 발전하고 있다. CMM 에 사

용되는 센서로는 3 점 볼의 접점신호를 이용한 터치 트리거 프로브(Touch trigger probe), LVDT 를 이용한 스캐닝 프로브(Scanning probe) 그리고 비접촉식에 사용되는 레이저 변위센서, CCD 카메라 등이 있으며, 3 차원 형상을 결정하기 위한 측정점의 획득은 주로 터치 트리거 볼 프로브가 사용되고 있다. 이러한 볼 프로브 트리거 방식은 크게 3 가지의 문제점을 갖고 있다. 첫째, 3 개의 기계적인 점

접수일: 2003 년 3 월 6 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일

* 한양대 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 한양대 대학원 정밀기계공학과

Email: pmslab@dreamwiz.com, Tel: (031) 418-0748

** 한양대 기계공학과

점이 120 도의 각도로 설치되어 있으므로 측정물에 스타일러스(stylus)가 접촉하는 방향에 따라 다른 측정력이 작용하여 측정결과가 삼각형 모양으로 왜곡되는 현상이 발생하는 단점이 있다. 둘째, 측정점 결정을 위한 스위칭 신호의 발생위치와 이 신호에 의한 정지명령에 따라 실제로 프로브가 정지된 위치간의 차이에 의한 pre-travel 오차가 발생한다. 마지막으로, 접촉 스타일러스 선단에서의 실제 접촉점을 측정할 수 없고, 스타일러스의 작동 중심위치만 측정이 가능하여 측정점 왜곡현상이 발생한다. 이러한 터치 트리거 프로브의 문제점 해결을 위한 연구들이 국내외에서 수행 되었다^{1,6}. Tyler Estler^{1,2} 등은 pre-travel 오차를 감소시키기 위해 프로브 로빙(probe lobing)현상의 기계적 모델링에 의한 이론적 분석 방법을 제시했으며, Rene Mayer³ 등은 마이크로미터와 고성능 비디오 카메라를 이용한 프로브 측정 실험장치를 통해 얻은 데이터들을 이용하여 pre-travel 현상으로부터 발생하는 3 차원적 오차의 보정을 위한 실험적 모델을 제시하였다. 이러한 연구들에 의해 삼각형 형상의 왜곡(lobing effect)과 pre-travel 오차의 문제를 어느 정도 해결하였다고는 하나, 3 차원 형상을 갖는 대상물들의 측정 데이터를 보정하기 위해서는 다량의 측정 데이터를 필요로 하여 측정 시간과 데이터량을 고려할 때 효과적이지 못할 뿐만 아니라, 보정 결과도 불완전한 실정이다. 또한, 김선호⁴, 이세희⁵ 등과 Liag⁶, Xiong⁷ 등은 역설계에 적용하기 위해 프로브 반경에 의한 데이터 측정 오차 보정법을 제시하였다. 그들은 스타일러스 중심위치 측정에 의한 접촉점 왜곡현상을 보정하는 방법으로 측정점의 수를 늘려 보간에 의한 실제 접촉위치 추정법을 제시하고 있으나, 이 방법 역시 근본적인 해결책이 못되며 적용상의 많은 문제점을 안고 있다. 이와 같은 배경으로부터 본 논문에서는 3 점 접점의 측정력 차이로 인하여 발생하는 측정데이터의 왜곡과 pre-travel 오차 발생을 피함과 동시에 접촉점 위치를 직접 검출할 수 있도록 3 축 힘 센서에 볼 프로브를 장착하여 스타일러스 선단에 가해지는 외력의 크기와 방향을 측정하고, 그로부터 접촉점의 위치를 추정하는 새로운 방식의 CMM 프로브를 개발하였다.

2. 프로브의 구조 및 원리

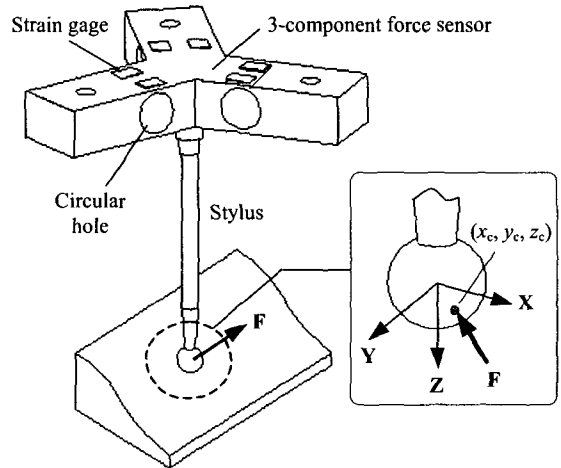


Fig. 1 Schematic of the proposed CMM probe

기존의 터치 트리거 방식의 문제점들을 해결하기 위한 여러 방식의 CMM 프로브 개발들이 보고되고 있으나, 구조가 복잡하여 실제 사용에는 문제가 있다⁸⁻¹⁰. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 단순하면서 사용하기 쉬운 구조가 검토되었다. 3 방향의 힘을 측정하기 위해 3 각 다리구조를 채택하였으며, 힘 감지부 요소에는 원통형 구멍을 적용하였다. 감지부의 원통형 구멍 구조는 가공 및 소형화가 용이하고 변형을 변화가 완만하여 힘 측정오차가 센서부착지점의 오차에 덜 민감한 특성을 갖는다. 이러한 구조를 갖는 힘 센서의 중앙부에 스타일러스를 부착하며, 스타일러스의 재질은 접촉력에 의한 변형이 없도록 고강도의 티타늄(Titanium)으로 되어 있다.

Fig. 1 에서 보이는 바와 같이, 스타일러스와 측정 대상물의 접촉에 의한 측정력은 3 각 다리구조를 구성하는 각각의 힘 감지부에 변형을 발생시키고 부착된 스트레인 게이지의 출력전압들과 변환행렬을 사용하여 스타일러스 선단에 작용하는 접촉력의 방향과 크기의 파악이 가능하다. 측정된 접촉력 \mathbf{F} 의 각 방향 성분을 $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$ 라고 할 때, 접촉점 $\mathbf{P}_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ 는 식(1)과 같이 계산된다.

$$x_c = \frac{F_x}{\|\mathbf{F}\|} r, y_c = \frac{F_y}{\|\mathbf{F}\|} r, z_c = \frac{F_z}{\|\mathbf{F}\|} r \quad (1)$$

이러한 프로브의 측정 방식은 종래의 CMM 프

로브와 달리, 프로브가 정지한 위치에서 외력을 측정하고, 프로브 팁(tip)에 작용하는 3 차원의 힘의 성분을 추정하여 프로브 팁과 시료의 접촉면과의 법선 벡터를 직접적으로 얻어내어 기존의 프로브보다 정밀하고 분해능이 높은 측정점의 정보를 획득할 수 있게 된다. 결과적으로, 기존의 3 점 지지 터치 트리거 방식이 갖는 삼각형 형상의 왜곡이나 Pre-travel 오차 발생의 문제 해결이 가능하게 되는 것이다.

3. 힘 감지부의 이론해석

원 구멍이 있는 3 각 다리 형 힘감지부의 설계 및 힘과 변형률과의 관계 도출하기 위해 힘 감지부의 이론해석이 수행된다. Fig. 2 와 같은 힘 감지부에 수평력과 수직력이 작용할 때, 원 구멍 부분의 외팔보 외부표면에 발생하는 변형률은 다음과 같은 3 가지 경우로 나누어 해석할 수 있다. Fig. 2 에서 b 는 변형부의 폭, t 는 원의 중심에서 윗면까지의 거리, L 은 원 구멍의 직경이다.

3.1 수평력(F_x or F_y)만 고려한 경우

수평력에 의해 발생하는 모멘트가 그대로 원통형 변형부에 작용하므로 Fig. 3 과 같이 나타낼 수 있다. 반력에 대한 응력값은 다음과 같다.

$$\sigma_o(x) = -\frac{6M_o}{bt(x)^2} \quad (2)$$

표면 응력에 대한 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_o(x) = -\frac{6M_o}{Ebt(x)^2} \quad (3)$$

3.2 수직력(F_z)만 고려한 경우

수직력에 의해 발생하는 모멘트와 반력의 상태를 Fig.4 에 보인다. 모멘트 M 은 자유단의 변형각이 없기 때문에 고정단에서 발생하는 반력 모멘트의 1/2 이 된다. $t(x)/2$ 는 중립축에서 표면까지의 거리이다. 원통형 구멍이 있는 부분을 제외한 다른 부분에서의 변형은 무시할 수 있을 정도라고 하면, 거리가 x 인 지점에서의 반력은 식(4)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} t(x) &= t - \sqrt{(Lx - x^2)} \\ M(x) &= \frac{f(2x - L)}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

최대 응력은 표면에서 발생하며 표면에 대한 응력은 식(5)와 같다.

$$\sigma_o(x) = \frac{3f(2x - L)}{bt(x)^2} \quad (5)$$

또한, 표면 응력에 대한 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_o(x) = \frac{3f(2x - L)}{Ebt(x)^2} \quad (6)$$

3.3 수평력, 수직력 모두 고려한 경우

수평력과 수직력이 동시에 작용할 경우의 변형율은 변형이 작다는 가정하에서 중첩의 원리를 적용하여 구할 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_o(x) = \frac{3(f(2x - L) - 2M_o)}{Ebt(x)^2} \quad (7)$$

본 연구의 설계에서는 충분한 변형이 가능하며 자중과 프로브의 무게를 지탱할 수 있도록 재료는 알루미늄 7075($E = 72\text{GPa}$)를 사용하고, 변형부의 두께 $2t$ 는 6.5mm 로 하였으며, 폭 b 와 원형 구멍의 직경 L 은 스트레인 게이지의 부착 면적을 고려하여 각각 10mm 와 6mm 로 하였다. Fig. 5(a) 에서 보이는 바와 같이 결정된 변수값을 이용하여 계산된 변형율은 x 가 3.5mm 일 때 최대값을 보이며, FEM 해석과 동일한 결과를 보임 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있다. 따라서, 이 위치가 힘 센서부의 감도를 최대로 할 수 있는 게이지의 부착위치로 선정되었다.

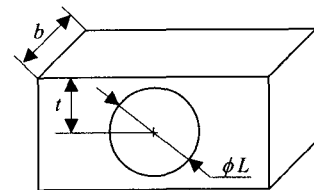


Fig. 2 Sensing part of force sensor with a circular hole structure

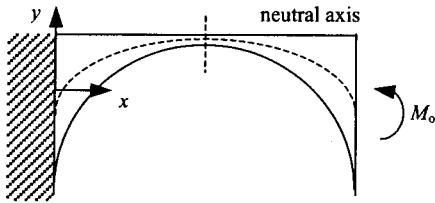


Fig. 3 Circular hole structure under the moment M_o

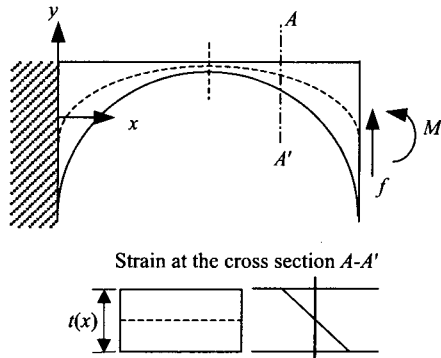


Fig. 4 Circular hole structure under the moment M and force f

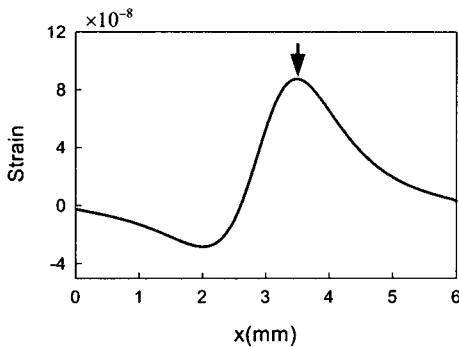


Fig. 5(a) Total strain along the x-axis

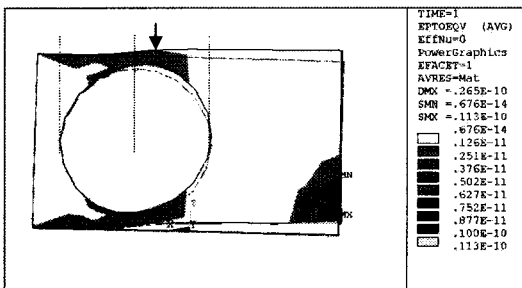


Fig. 5(b) FEM analysis result of total strain

4. 프로브의 입출력 관계 및 보정

Fig. 6 에서 보는 바와 같이 제작된 CMM 프로브의 시작품은 크게 원형 구멍을 갖는 삼각 다리 구조의 3 분력 힘센서와 접촉 스타일러스로 구성되어 있다. 접촉 스타일러스에 작용하는 접촉력 $F(F_x, F_y, F_z)$ 와 각각의 힘 감지부로부터 검출되는 출력 전압 $V(V_1, V_2, V_3)$ 의 관계는 식(8)과 같이 표현되며, 변환행렬 T 는 식(9)와 같이 주어진다.

$$V = TF \quad (8)$$

$$T = \frac{GV_{in}}{Ebt(x)^2} \begin{bmatrix} 2h \cos 80^\circ & 2h \cos 10^\circ & (2x-L) \\ 2h \cos 20^\circ & 2h \cos 70^\circ & (2x-L) \\ 2h \cos 40^\circ & 2h \cos 50^\circ & (2x-L) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, G 와 V_{in} 는 각각 Gage factor 와 스트레인 게이지 입력 전압을 나타낸다. 접촉력 F 는 식(10)에 의해 산출되어진다.

$$F = T^{-1}V \quad (10)$$

그러나, 실제 제작된 프로브는 재료의 물성, 가공 및 조립오차, 스트레인 게이지의 부착위치 선정오차 등이 발생하기 때문에 식(8)과 (9)에 주어지는 설계상의 프로브 입출력 관계를 그대로 사용할 수 없으며, 제작된 프로브의 신뢰성을 높이기 위하여 보정 작업이 요구된다. 보정에서는 설계에 의한 이론상의 출력전압 V_c 와 실제 제작된 프로브로부터 측정된 출력전압 V_m 과의 차이를 오차 dV 로 정의하고 이를 최소화시키는 방법을 사용한다. 또한, dV 는 프로브의 입출력 관계식을 각각의 설계 변수에 대하여 미분한 identification Jacobian J 와 식(11)의 관계를 갖는다.

$$dV = Jdu \quad (11)$$

여기서, u 는 5개의 설계변수를 나타내는 벡터이다. J 는 식(12)와 같이 표현된다.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial h} & \frac{\partial V}{\partial b} & \frac{\partial V}{\partial t} & \frac{\partial V}{\partial x} & \frac{\partial V}{\partial L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

보정 과정은 다음과 같이 수행될 수 있다.

- (i) Measure V_m under known input forces F
- (ii) Calculate V_c with nominal values u and F
- (iii) Calculate $dV=V_m-V_c$
- (iv) Check if $\|dV\| < \epsilon$ stop otherwise compute identification Jacobian J
- (v) Compute $du=(J^T J)^{-1} J^T dV$
- (vi) Update $u=u+du$ and go to step (iii)

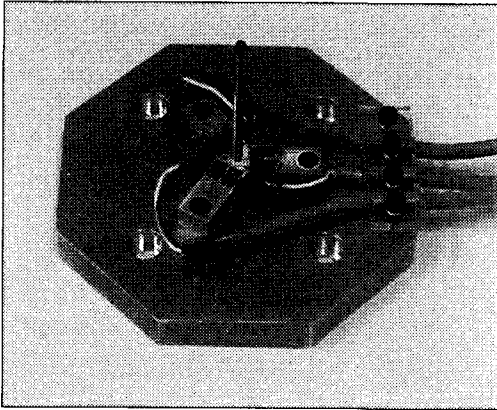


Fig. 6 Prototype of CMM probe mounted on the base

위와 같은 보정 알고리즘으로부터 각 설계치수의 보정량을 산출하였으며 보정 효과를 확인하기 위하여 접촉력과 접촉점의 추정결과를 보정전과 후에 대하여 검토되었다.

5. 측정 실험 및 결과

5.1 실험 장치 및 방법

제작된 프로브의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 7 과 같이 실험 장치를 구성하였다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이, 특별히 제작된 실험지그에 프로브를 장착시키고 스타일러스 선단에 추를 매달아 각각의 하중과 방향에 대하여 측정 실험을 수행하였다. 측정 실험에서 12 개의 스트레인 게이지를 1/4 브리지(quarter bridge)로 신호조절 증폭기에 연결하였으며 신호조절 증폭기는 Micro-Measurement 사의 System 2310 를 사용하였다. 표준추(standard mass)를 이용하여 0.098N 외력이 스타일러스 선단에 가해졌으며 2 개의 회전 테이블이 장착된 실험 지그를 이용하여 프로브의 자세를 각도 α 와 β 에 따라 변화시킴으로써 외력이 가해지는 작용점의 위치를 변화시켰다.

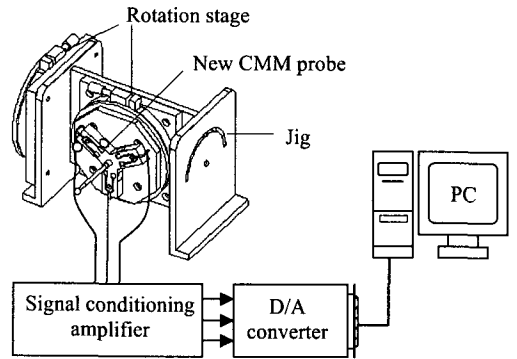
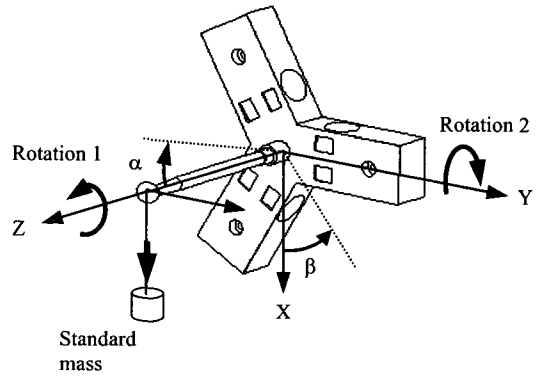


Fig. 7 Schematic diagram of a experimental setup for calibration test of the probe

5.2 프로브 보정 및 측정 결과

각도 α 가 12° 이고 각도 β 가 10° 부터 350° 의 범위에서 입력 힘 0.098N 이 주어질 때, 보정 전과 보정 후의 외력 추정결과를 Fig. 8 에서 보이고 있으며, Fig. 9 는 추정된 외력 벡터로부터 산출된 접촉점의 추정 결과를 보이고 있다. 보정 후의 외력과 접촉점 추정값이 입력힘과 이상적인 접촉점 위치에 거의 일치함을 확인할 수 있다. 여기서, 이상적인 접촉점의 위치는 표준추에 의하여 스타일러스 선단에 가해지는 기지의 3 방향의 외력성분들로부터 식(1)을 이용하여 산출된다.

스타일러스 선단에 외력이 작용할 때, 프로브의 힘센서로부터 3 방향의 외력 성분들을 측정 한 후 이들로부터 산출된 접촉점들의 추정결과를 Fig. 10 에서 보이고 있다. 그림에서 접촉점의 추정값이 이상적인 접촉점의 위치와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이상의 결과들로부터, 본 연구에서 제안된 힘센서를 이용한 CMM 프로브의 측정방식은 중

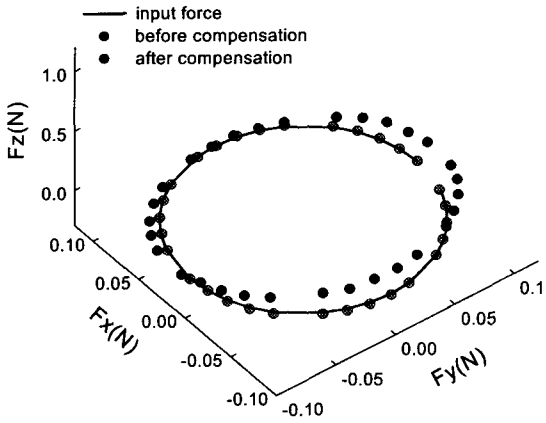


Fig. 8 Estimation result of external forces before and after compensation

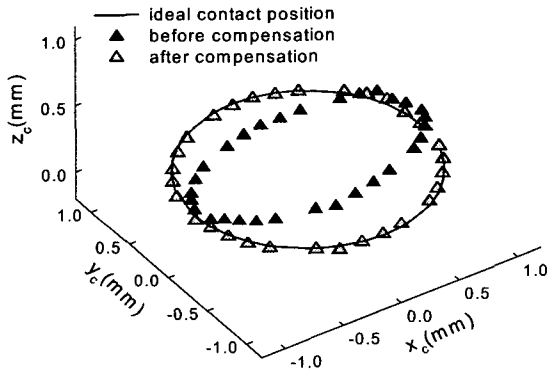


Fig. 9 Estimation result of contact points before and after compensation

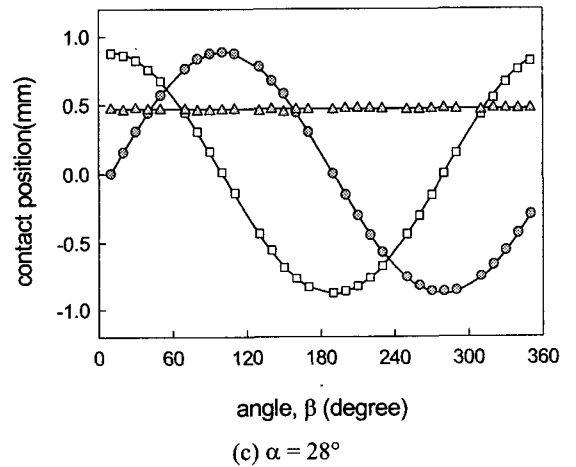
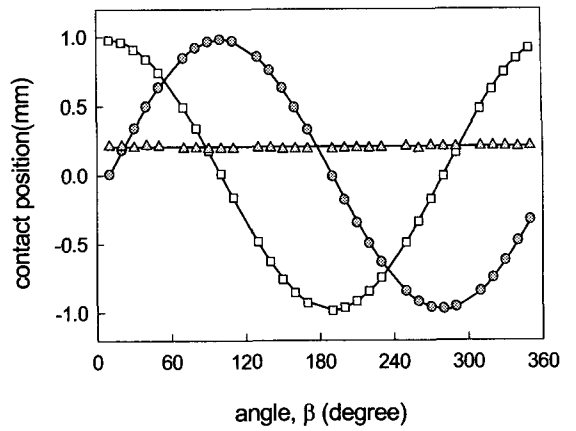
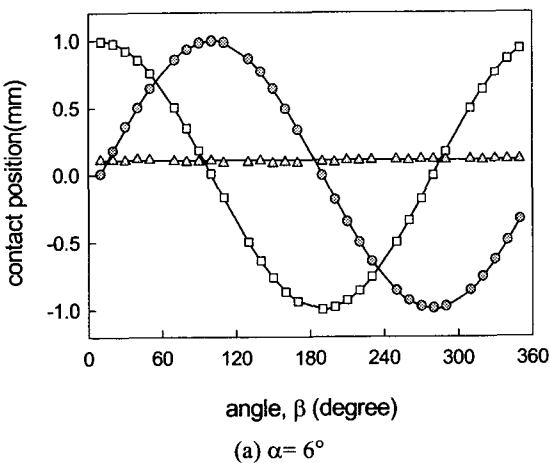


Fig. 10 Estimation results of contact positions: (a) angle $\alpha = 6^\circ$, (b) $\alpha = 12^\circ$, (c) $\alpha = 28^\circ$

래의 접촉식 트리거 프로브와 달리, 프로브가 정지한 위치에서 스타일러스 선단에 작용하는 3 방향의 힘의 성분을 추정하여 스타일러스 선단이 시료면에 접촉하는 힘의 법선 벡터를 직접적으로 얻어내고 이로부터 실제 접촉점 위치 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 3 축 힘 센서를 이용하여 측정 물체에 프로브가 접촉하는 힘을 검출하고 그로부터 접촉점 추정이 가능한 CMM 용 프로브를 제시하

였다. 제안된 프로브의 구조해석을 통해 접촉력과 출력 전압과의 관계를 나타내는 변환행렬을 유도하고 보정 알고리즘을 이용하여 보정되었다. 제작된 프로브의 성능평가를 위해 실험장치가 구성되었으며, 일련의 실험을 통해 힘 센서를 이용한 CMM 프로브의 측정방식은 종래의 접촉식 트리거 프로브와 달리 스타일러스 선단에 작용하는 접촉력의 방향과 크기를 검출하고, 이로부터 실제 접촉점 위치 추정이 가능함을 확인 하였다.

참고문헌

1. W. Tyler Estler, Phillips, S. D., Borchardt, B., Hopp, T., Witzgall, C., Levenson, M., Eberhardt, K., McClain, M., Shen, Y. and Zhang, X., "Error Compensation for CMM Touch Trigger Probes," Precision Engineering, Vol. 19, pp. 85-97, 1996.
2. W. Tyler Estler, Phillips, S. D., Borchardt, B., Hopp, T., Levenson, M., Eberhardt, K., McClain, M., Shen Y. and Zhang, X., "Practical Aspects of Touch-Trigger Probe Error Compensation," Precision Engineering, Vol. 21, Issue 1, pp. 1-17, 1997.
3. J. R. Rene Mayer, Abdeljabbar Ghazzar, Olivier Rossy, "3D Characterization, Modeling and Compensation of the Pre-travel of a Kinematic Touch Trigger Probe," Measurement, Vol. 19, No.2, pp. 83-94, 1996.
4. Kim, S. H., Lee, S. J. and Kim, O. H., "The Analysis of Measuring Error in OMM System," J. of the KSPE, Vol. 15 No. 5, pp. 34-42, 1998.
5. Lee, Se-Hee, Cho, Myeong-Woo and Seo, Tae-II, "Measurement Error Modeling for On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces," Int. J. of the KSPE, Vol. 2, No. 2, pp. 73-80, 2001.
6. Xiong, Z. H., Li, Z. X., "Error compensation of workpiece localization," IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2249-2254, 2001.
7. Shuh-Ren Liang and Alan C. Lin, "Probe-Radius Compensation for 3D Data Points in Reverse Engineering," Computers in Industry, Vol. 48, Issue 3, pp. 241-251, 2002.
8. Steven D. Bittle and Thomas R. Kurfess, "An Active Piezoelectric Probe for Precision Measurement on a CMM," Mechatronics, Vol. 7, No. 4, pp. 337-354, 1997.
9. Wim P. van Vliet, Peter H. J. Schellekens, "Development of a Fast Mechanical Probe for Coordinate Measuring Machines," Precision Engineering, Vol. 22, pp. 141-152, 1998.
10. Joao Bosco de Aquino Silva, M. Burdekin, "A Modular Space Frame for Assessing the Performance of Coordinate Measuring Machines (CMMs)," Precision Engineering, Vol. 26, pp. 37-48, 2002.