

정전용량센서를 이용한 소형공작기계의 기하학적 오차측정

권성환*(경북대 대학원 기계공학과), 이재하(경북대 대학원 기계공학과), 리우위(경북대 대학원 기계공학과), 임창범(경북대 학부 기계공학과), 양승한(경북대 기계공학과)

Measurement of Geometric Errors in a Miniaturized Machine Tool Using Capacitance Sensors

S. H. Kweon(Mech. Eng. Dept., KNU), J. H. Lee(Mech. Eng. Dept., KNU), Y. Liu(Mech. Eng. Dept., KNU), C. B. Lim(Mech. Eng. Dept., KNU), S. H. Yang(Mech. Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

Many studies have been carried out to produce 3D features in the size range between $10_{\mu m}$ ~ $10,000_{\mu m}$, called Meso-scale. If these miniaturized systems have high relative accuracy and good volumetric utilization, it is possible to manufacture more complex and accurate shapes with various materials as well as there are advantages of reducing energy, space and resources. Due to imperfect components and misalignment in assembly, it is necessary to assess the accuracy of the miniaturized system itself to obtain high relative accuracy. Laser interferometers are widely used to measure geometric errors called as quasi-static errors. For miniaturized system, however, it is difficult to install the required accessories such as optics and the measuring range is limited because of the size of the system and also this method is very expensive. Moreover, it is impossible to measure each error component simultaneously. A new system to measure simultaneously multiple geometric errors is proposed using capacitance sensors. Each error was measured using capacitance sensors and a measurement algorithm was mathematically derived. The experiments show that the proposed measurement system can be used effectively to assess the accuracy of miniaturized system at a low cost.

Key Words : Error measurement(오차측정), Miniaturized machine tool(소형공작기계), Capacitance sensor(정전용량센서), Geometric error(기하학적 오차), Meso scale(메조 스케일)

1. 서론

1980년대 이후 반도체 제조 공정에 기반을 둔 멤스(MEMS) 기술은 마이크로 부품에 대한 관심을 끌고 있다. 최근 마이크로 가공공정에 대한 많은 연구들이 수행되었다.^{1,2} 기계가공에 있어서의 이점은 (1) 생산성, 효율성, 유연성 및 표면 거칠기 향상 (2) 철을 포함한 다양한 재료의 이용 등이다. 다양한 마이크로-기계가공공정을 이용하여 마이크로, 메조 크기의 부품을 생산할 수 있더라도 모든 3D형상이나 매우 복잡한 요소들을 생산하는 것은 쉽지 않고 재료 또한 한정적이다.³ 소형생산시스템은 에너지 사용의 감소와 공간 및 자원의 절약, 그리고 소형화의 장점들을 가지고 있다.⁴ 그러나 소형생산시스템의 정확도에 대한 측정은 거의 이루어지지 않았

다.

오차측정시스템 중에서 레이저 간섭계는 널리 사용되지만 한 번의 설치로 한 개의 오차요소만이 측정 가능하고 광학계를 정렬하고 설치하는데 어려움이 많다.^{5,6} 따라서 적은 시간과 노력을 가지고 시스템의 정확도를 측정하기 위해, 본 연구에서는 소형가공시스템의 기하학적 오차평가를 위한 새로운 다자유도 측정시스템을 제안하였다. 이 측정시스템은 5개의 정전용량센서를 사용하여 한 축의 움직임에 따른 5개의 오차요소를 동시에 측정 가능하다.⁷ 비접촉 정전용량센서를 이용한 측정알고리즘은 2장에 제시하였으며 제시한 방법을 이용한 측정실험결과를 3장에 제시하였다.

2. 정전용량센서를 이용한 기하학적 오차측정 시스템

2.1 측정시스템의 구조

본 연구는 정전용량센서를 이용하여 3축 소형공작기계에서 기하학적 오차를 평가하기 위한 측정시스템을 제안하였다. 제안한 측정시스템은 Fig. 1과 같이 기준볼 위쪽에 3개의 센서와 기준볼 옆에 2개의 센서로 구성된다.

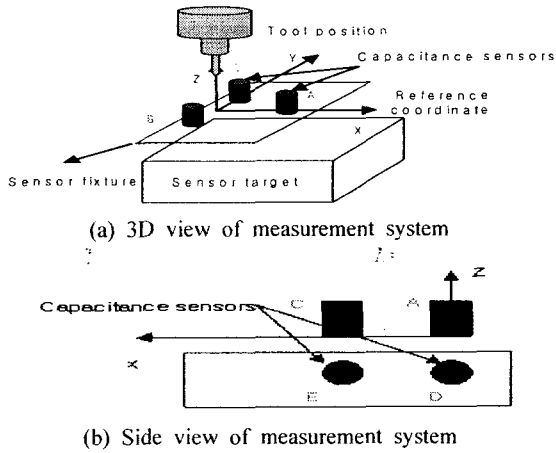


Fig. 1 Structure of measurement system

2.2 오차요소들을 얻기 위한 수학적 접근

균질변환행렬을 사용하여 스테이지 위의 모든 이동된 점의 좌표를 얻을 수 있다. 센서의 Z축 초기위치 z_0 을 0으로 두고 X축으로 d 만큼 이동한 z_1 에 관련된 식을 풀면 다음과 같다.

$$z_1 = \frac{1}{1 + \varepsilon_{zx}^2} (-\delta_{zx} + \delta_{yx}\varepsilon_{xx} - d\varepsilon_{yx} - \delta_{xx}\varepsilon_{yx} - d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} - \delta_{xx}\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} - \delta_{yx}\varepsilon_{yx}\varepsilon_{zx} - \delta_{zx}\varepsilon_{zx}^2 + \varepsilon_{yx}x_1 + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx}x_1 - \varepsilon_{xx}y_1 + \varepsilon_{yx}\varepsilon_{zx}y_1) \quad (1)$$

식 (1)에서 Z축으로의 2개의 각도 오차의 곱은 값이 매우 작으므로 이 영향은 무시할 수 있다. 그러므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z_1 = \delta_{zx} + d\varepsilon_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} - \varepsilon_{yx}x_1 + \varepsilon_{xx}y_1 \quad (2)$$

센서 A의 좌표를 $(L, 0)$ 로 두면 센서 A에서 측정된 값 z_1^A 는 다음과 같다.

$$z_1^A = \delta_{zx} + d\varepsilon_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} - \varepsilon_{yx}L \quad (3)$$

여기서 센서와 기준 좌표 원점 간의 거리를 L 이라 하자. 센서 B의 값과 센서 C에서 측정된 값은 다음과 같다.

$$z_1^B = \delta_{zx} + d\varepsilon_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} - \varepsilon_{xx}L \quad (4)$$

$$z_1^C = \delta_{zx} + d\varepsilon_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xx}L \quad (5)$$

그러므로 z_1^0 의 값은 다음과 같다.

$$z_1^O = \frac{z_1^B + z_1^C}{2} = \delta_{zx} + d\varepsilon_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} \quad (6)$$

균질변환행렬을 이용하여 측면센서 D, E의 값으로 바꾸면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_1^D = \delta_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yx} - d\varepsilon_{zx} \quad (7)$$

$$y_1^E = \delta_{yx} + d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yx} - d\varepsilon_{zx} + \varepsilon_{zx}L_s \quad (8)$$

여기서 측면센서 간의 거리는 L_s 이다. 롤(Roll)오차 ε_{xx} 와 피치(error)오차 ε_{yx} 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{(z_1^C - z_1^B)}{2L} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{yx} = \frac{(y_1^E - y_1^D)}{L_s} \quad (10)$$

z_1^0 을 사용하여 수직 진각도오차 δ_{zx} 와 요(yaw)오차 ε_{zx} 는 다음과 같다.

$$\delta_{zx} = z_1^O - d\varepsilon_{yx} - d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zx} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{(y_1^E - y_1^D)}{L_s} \quad (12)$$

마지막으로 수평 진각도오차 δ_{yx} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_{yx} = y_1^D + d\varepsilon_{zx} - d\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yx} \quad (13)$$

2.3 직각도오차

직각도오차는 각 센서로부터 측정된 값과 사용된 기준물의 실제 각도를 이용하여 구할 수 있다.

$$S_{xy} = \left(\frac{\pi}{2} - \phi_{\text{target}}\right) + \theta_x + \theta_y \quad (14)$$

여기서 θ_x 와 θ_y 는 기준좌표계와 평균직선 사이의 각도이고 ϕ_{target} 는 기준물의 가장자리 각도이다.

3. 실험 및 결과

Table 1은 소형 시스템의 규격을 나타내며 측정 방법은 다음과 같다. 기준물을 바이스에 고정시키고 하나의 축을 선택한 다음 센서와 기준물의 간격을 조절한다. 주어진 경로로 이동하면서 센서로부터 데이터를 얻는다. 위 과정을 다른 두 축에도 반복적으로 수행한다.

Table 1 Specification of a miniaturized machine tool

	Stages		
	X axis	Y axis	Z axis
Stroke[mm]	70	70	100
Load capacity[Kgf]	20	20	9
Size of stages[mm]	120? 20	120? 20	80? 60
Weight[Kg]	2.5	2.5	2.8
Resolution[μm]	0.1		
Max. Speed[mm/s]	10		
Driving/Control	Step motor, Micro-stepping Closed loop control		
Feedback device	Linear encoder with 50μm resolution		

Fig. 2, 3, 4은 제안한 알고리즘을 이용하여 계산한 오차요소들을 보여준다. 실험값으로부터 XY 기준좌표축에 대한 평균직선은 -0.00027rad 의 각도를 발생한다. CMM 측정에 의해 기준물의 가장자리의 비-직각도는 0.000168rad 이었다. 결과적으로, X축과 Y축 사이의 직각도오차는 $S_{xy} = 0.00027 + 0.000168 = 0.000438\text{rad}$ 이다.

마찬가지로, YZ평면과 XZ평면의 직각도오차도 계산할 수 있다.

Table 2는 실험결과를 나타낸다. 다른 축에 비해 Z축의 오차값이 작은 것은 적용하중이 없기 때문이다. X축의 경우 기준물의 하중에 의해 수직 진격도 오차와 피치오차가 크게 발생한다. 기존의 스테이지와 유사하게 모든 축에 대한 롤오차는 매우 작다. 소형 스테이지의 규격에 의하면 각도오차는 0.0001rad 이내이고, 병진오차는 하중이 없는 경우 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 이내이다. 이것은 Z축의 이동 결과와 유사하다.

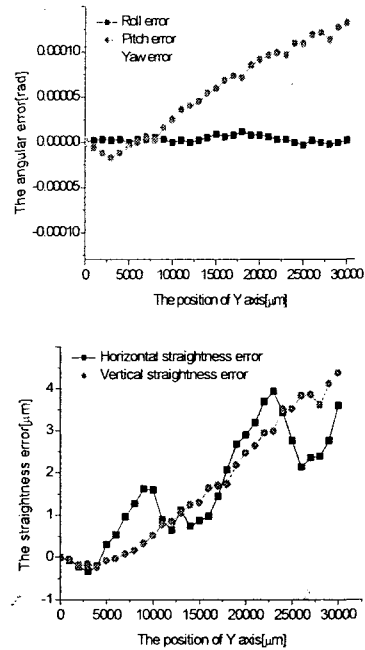


Fig. 2 The profile of error components along Y axis

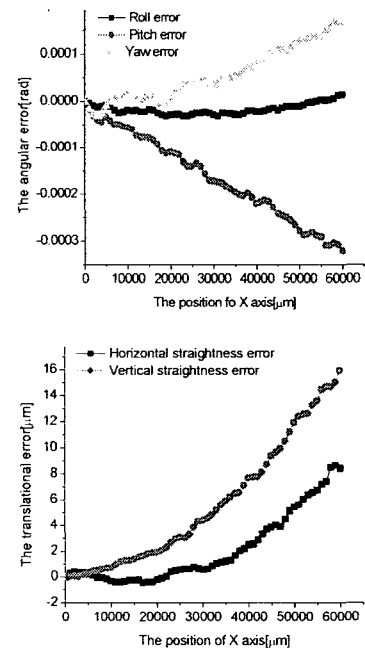


Fig. 3 The profile of error components along X axis

Table 2 The summary of the results

	Maximum value of error					
	Roll[rad]	Pitch[rad]	Yaw[rad]	Straightness error[μm]		Squareness error[rad]
				Horizontal	Vertical	
X axis	-0.000031	-0.000321	0.000167	8.65	15.92	$S_{xy}=0.0004$
Y axis	0.000012	0.000132	-0.000118	3.94	4.37	$S_{yz}=0.0003$
Z axis	0.000048	0.000051	0.000078	5.25	-3.95	$S_{xz}=0.0003$

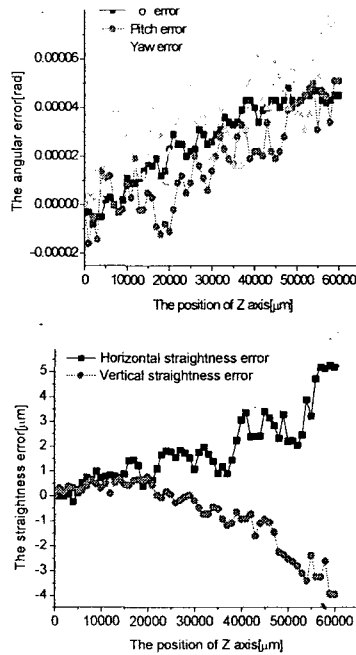


Fig. 4 The profile of error components along Z axis

4. 결론

- 1) 본 연구에서 기하학적 오차측정시스템은 비접촉 정전용량센서를 사용하여 병진오차요소와 회전오차요소를 측정하였다.
- 2) 모든 오차요소는 균질변환행렬을 이용하여 쉽게 계산할 수 있다. 또한 제안한 측정시스템을 이용하여 한 축에 대한 5개의 오차요소를 동시에 측정가능하다.
- 3) 3축 공작기계에서 21개의 오차요소 중 선형변위 오차를 제외한 18의 오차요소는 현재 측정시스템을 사용하여 측정하였다. 가장 큰 병진오차는 하중으로 인해 X축의 움직임을 따라 나타났다.
- 4) 제안한 측정시스템은 레이저 간섭계와 같은 비싼 측정장치를 사용하지 않고 효율적으로 측정할 수 있다. 이 측정시스템은 설치와 정렬이 쉽기 때문에 소형공작기계 등의 소형시스템의 측정, 평가

및 보정에 쉽게 사용할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지역대학우수과학자 (R05-2004-000-10281-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Bao, M., and Wnag, W., "Future of microelectromechanical systems(MEMS)," Sensors and Actuators A:Physical, Vo. 56, Issues 1-2, p135-141, 1996.
2. Rahman, M., Senthil Kumar, A., and Prakash, J.R.S., "Micro milling of pure copper," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 116, p39-43, 2001.
3. Friedrich, Craig R., and Vasile, Michael J., "Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures," Journal of microelectromechanical systems, Vol. 5, No. 1, 1996.
4. Yuichi Ishikawa and Tokio Kitahara, "Present and future of micromechatronics," International symposium on micromechatronics and human science, p13-20, 1997.
5. Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou, Shen Hwa Chiou, "Geometric error calibration of multi-axis machines using as auto-alignment laser interferometer", Precision Engineering 23 (4), 243-252, 1999
6. Guiquan Chen, Jingxia Yuan, Jun Ni, "A displacement measurement approach for machine geometric error assessment", 41 (1), 149-161, 2001
7. J. H. Lee, Y. Liu, S. Yang, A multi degree of freedom measurement system for determining geometric errors in a miniaturized machine tool, 4th International Workshop on Micro-factories, Shanghai, 44-49, 2004