

4채널 원통형 정전용량 변위센서의 자동·정밀 검보정

김종혁*, 김일해+, 박만진**, 장동영***, 한동철****, 백영종*****

Automatic and precise calibration of 4-channel cylindrical capacitive displacement sensor

Kim Jong-Hyuk*, Kim, Il-Hae+, Park, Man-Jin**, Jang, Dong-Young***, Han, Dong-Chul****, Bak, Young-Jong*****

Abstract

General purpose of cylindrical capacitive displacement sensor(CCS) is measuring run-out motion and deflection of rotor. If CCS has narrow sensing range, its sensitivity coefficients must be calibrated precisely. And x, y component of CCS output can be coupled.

In this research, CCS calibration procedure is automated with automatic calibration program and PC-controlled stage. And, coupled-terms of CCS signals were removed and the errors between measured position and mapped CCS signal were reduced obviously by sensitivity matrix that linearly

Key Words : Cylindrical capacitive displacement sensor(CCS; 원통형 정전용량 변위센서), CCS calibration(CCS 검보정), Linear transformation(선형변환), Least square(최소자승법), Sensitivity matrix(민감도 행렬), Calibration error(검보정 오차)

1. 서론

원통형 정전용량 변위센서 (Cylindrical capacitive displacement sensor; CCS)는 회전체의 회전 정밀도나 회전체에 외력이 가해졌을 때 회전체 중심의 변위를 측정하는데 사용된다. 특히 공작기계 주축의 주축 변위 및 회전정밀도를 측정[1]하거나 자기베어링으로 지지되는 주축의 진

동을 제어[2]하는데 주로 사용된다.

센서를 제작할 때, 센서가 사용되는 주축의 변위 변동폭에 맞게 센서의 측정범위와 분해능을 조정하여야 한다. 자기베어링으로 지지되는 주축은 정지 시 보조베어링으로 지지되어 있다가 구동 시 주축을 부상시켜야 하기 때문에 주축 중심의 변위가 수십~수백 μm 정도로 상대적으로 매우 크다. 그러나 대부분의 공작기계 주축은 구름베어링으

* 발표자, 서울대학교 기계항공공학부 (slim@amed.snu.ac.kr)
주소: 151-744 서울시 관악구 신림9동 산 56-1 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
+ 샘시스(주)
++ 서울대학교 기계항공공학부
+++ 서울산업대학교 산업정보시스템공학과
++++ 서울대학교 기계항공공학부
+++++ 성광정기(주)

로 지지되어 있고 주축의 강성이 크기 때문에 주축 중심의 변위 변동 폭이 수 μm 에 불과하다. 그러므로 자기베어링 제어에 사용되는 보다 변위 측정범위를 작게 제작하여야 하며 동시에 센서의 민감도를 높일 필요가 있다.

그러나 변위 측정 범위가 작아지면 센서의 검보정 과정에서 측정범위가 작을 때 보다 상대적으로 오차가 발생할 확률이 커지며, 측정 대상을 정밀하게 이동시켜가며 검보정을 수행하기가 어려워진다. 그리고 변위센서의 제작 시 발생할 수 있는 가공 오차, 설치 오차 등의 오차의 원인들이 센서 출력에 미치는 영향이 측정범위가 클 때 보다 상대적으로 커진다. 이로 인해 센서의 제작 과정에서 센서 검보정이 차지하는 시간이 길어지고, CCS를 상용화하여 생산할 때 생산성에 나쁜 영향을 끼칠 수 있다.

본 논문에서는 원통형 정전용량 변위센서의 생산성 향상을 위하여 검보정과정을 자동화 하였으며, 앞에서 열거한 오차들을 제거할 수 있게 하기 위해 정밀하게 검보정하여, 보다 정확하게 CCS 신호로부터 회전체의 중심변위를 계산할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 원통형 정전용량 변위센서

일반적으로 회전체의 표면 형상오차를 배제하고 순수한 회전 정밀도를 측정하는 방법으로는 마스터 바(master bar)나 마스터 볼(master ball)을 장착한 후 분해능이 매우 높은 변위센서를 이용하여 측정하는 방법이 주로 사용된다. 그러나 이러한 방법은 설치와 유지에 많은 비용이 필요할 뿐만 아니라, 측정된 신호로부터 형상오차를 제거하기 위한 신호 처리가 매우 복잡하여 실용적이지 못하다.

4-채널 원통형 정전용량 변위센서(cylindrical capacitive sensor; CCS)는 센서면이 회전체의 원주면을 따라 모두 4 조각의 등간격으로 이루어져 있어, 센서면이 넓기 때문에 평균화 효과로 인하여 표면 형상오차를 효과적으로 제거할 수 있다.

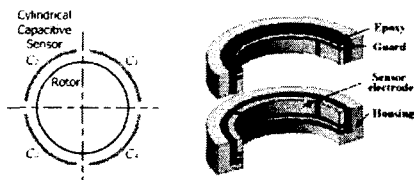


Fig.1 Schematics of Cylindrical Capacitive Sensor

4-채널 원통형 정전용량 변위센서는 작동 원리는 각각의 센서에서 측정된 값을 증폭한 후 간단한 연산을 통하여 x, y 방향의 출력진입을 얻게 된다.

3. 원통형 정전용량 변위센서의 검보정

3.1 실험장치

먼저 검보정의 대상이 되는 원통형 정전용량 변위센서는 Denford 사의 BT-30 머시닝센터용으로 제작된 센서이다. 주축의 외경은 68mm이며 센서와 주축의 반경방향 틈새는 150 μm 으로 제작하였다. 또한 검보정을 위하여 주축의 외경과 동일한 측정대상을 제작하였다.

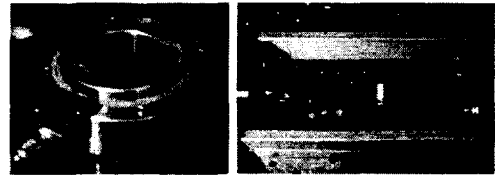


Fig. 2 Picture of CCS and CCS amplifier

일반적으로 센서의 출력전압과 측정물 변위간의 상호관계, 즉 센서의 민감도를 검보정할 때 변위를 측정하기 위해서는, 기준이 되는 별도의 분해능이 높은 변위센서를 이용하는 방법과 눈금이 표시되어 있는 XY-스테이지를 이용하는 방법이 있다. 그러나 별도의 변위 센서-특히 같은 정전용량형의 변위 센서-를 이용하면 센서를 구동하는 각각의 스위칭 볼타지 시로 다른 센서를 증폭하는 역할을 하여, 측정 대상이 정지해 있을 때에도 전기적인 run-out을 발생시켜 측정이 불가능해진다. Fig. 3은 같은 측정 대상에 원통형 정전용량 변위센서와 LION사의 상용 정전용량 변위센서를 같이 부착시켰을 때의 상호 간섭이 일어나는 그림이다. 특히 LION 변위센서는 80 μm 의 신호 변동이 생긴다.

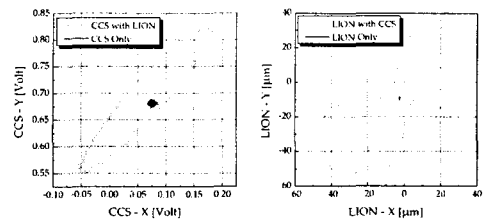


Fig. 3 Interference between CCS and LION sensor

이러한 이유로 일반적인 경우에 CCS를 검보정할 때는 눈금이 표시되어 있는 XY-스테이지를 이용하게 된다. 그러나 측정범위가 아주 작을 때는 스테이지의 정밀도가 매우 높지 않으면 정확한 변위를 측정할 수 없으며 이는 오차의 원인이 된다. 그러므로 높은 정밀도의 스테이지를 사용하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 PC를 통해 제어가 가능한 위치정밀도 0.1 μm 의 Newport사의 2축 Precision compact linear stage, VP-25XA를 이용하였다. 이 스테이지의 사양은 아래 표에 명시하였다.

Travel Range [mm]	25
Resolution [μm]	0.1
Bi-directional Repeatability [μm]	0.2
Maximum Speed [mm/s]	25
Pitch, Yaw [μrad]	100

또한 검보정 시 소요되는 시간을 단축하기 위하여 Agilent VEE Pro 6.0으로 프로그램을 작성해서 CCS신호 및 스테이지의 위치 좌표의 데이터 획득과 스테이지의 위치 제어를 하여 CCS의 검보정 과정을 자동화하였다.

실험 장치는 아래 그림과 같이 구성하였다.

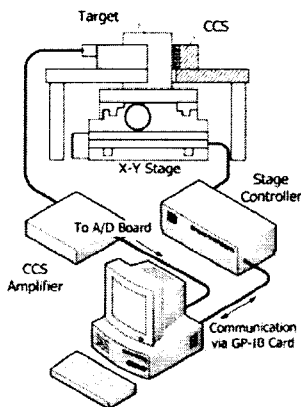


Fig. 4 Schematic of CCS calibration experiment setup

CCS로부터의 데이터 획득은 Data Translation사의 A/D - D/A board인 DT3016을 사용하였으며, 스테이지 컨트롤

러와의 통신에는 Agilent GP-IB를 사용하였다.

3.2 CCS 출력과 측정대상의 위치 측정

원통형 정전용량 변위센서의 출력과 측정대상의 위치 좌표의 측정은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 측정 대상을 CCS의 출력이 0이 나오는 지점-즉 CCS의 중심으로 이동하는 과정과, 나머지 과정은 CCS의 출력이 원하는 값이 나오도록 스테이지를 일정한 간격으로 이동하여 그 때의 센서 출력값과 측정대상의 위치 좌표를 측정, 기록하는 과정이다. 이러한 과정을 다음 Flow chart에 나타내었다.

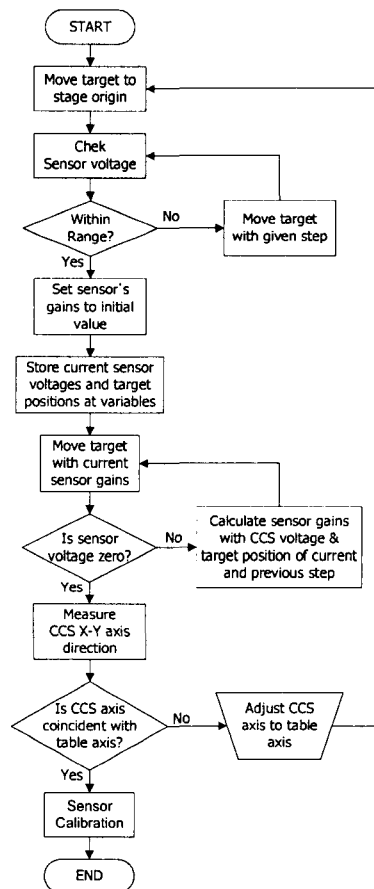


Fig. 5 Procedure of measuring CCS output and table position

CCS의 측정 범위 내에서 선형성을 향상시키기 위해서는,

CCS와 측정 대상이 물리적으로 동심을 이루고 있을 때의 CCS 출력이 x, y 성분 모두 0이 나오도록 CCS 앰프의 오프셋을 설정하여야 한다. 또한 CCS 검보정의 모든 과정이 센서 출력의 원점(0V, 0V)을 중심으로 이루어져야 하므로 측정 대상을 센서의 중심에 위치시켜야 한다. 자동으로 측정 대상을 센서의 중심에 이동시키는 과정은 다음과 같다.

먼저 측정대상의 위치가 센서의 측정 범위 안으로 들어올 때 까지 스테이지를 일정한 변위로 센서의 각 방향 신호의 반대 방향으로 이동시킨다. 센서의 측정범위 안으로 측정 대상이 들어오면 다음 식을 이용하여 스테이지의 이동 단계마다 센서의 민감도를 조정해 가면서 센서의 출력이 0이 나오도록 이동시킨다.

$$K_x^i = \frac{|x^i - x^{i-1}|}{|V_x^i - V_x^{i-1}|}, \quad K_y^i = \frac{|y^i - y^{i-1}|}{|V_y^i - V_y^{i-1}|} \quad (1)$$

$$d_x^i = -K_x^{i-1} V_x^i, \quad d_y^i = -K_y^{i-1} V_y^i \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

여기서,

- V : sensor output [V]
- x, y : target(table) position [μm]
- K : temporary sensor sensitivity [$\mu\text{m}/\text{V}$]
- i : i-th movement step
- d : displacement of target [μm]

다음 그림은 위 과정 중에 측정된 센서 출력 및 스테이지의 위치를 나타낸 것이다.

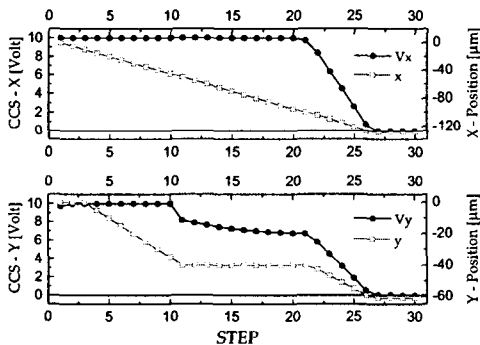


Fig. 6 CCS output and stage position during moving to the center of CCS

측정대상을 CCS의 원점으로 이동하는 과정에서 측정되어 임시로 사용된 CCS 각 방향의 민감도는 다음 단계에서 센서의 출력이 원하는 값이 되도록 스테이지를 이동하는데 사용된다.

우선, 센서의 측정 범위 전체에 해당하는 $\pm 8\text{V}$ 범위에서 2V간격으로 CCS의 신호와 그 때의 측정대상의 위치를 측정하였다.

또한, 측정 대상이 4 조각의 센서면 중 어느 한 쪽에 가까울 때 CCS의 특성 및 오차를 알아보기 위하여, CCS의 원점을 중심으로 $\pm 4\text{V}$ 범위에서 x, y 각 방향으로 1V 간격마다 측정을 하였으며, CCS 출력이 이루는 평면 중 각각 제 1, 2, 3, 4분면에서 1V 간격으로 CCS의 출력과 스테이지의 위치를 측정하였다.

3.3 CCS 출력 신호 검보정

다음 그래프 Fig. 7은 CCS 출력의 원점을 중심으로 x, y 각각의 방향으로 CCS 측정영역 전체($\pm 9\text{V}$)내에서 1V의 간격으로 CCS신호를 측정한 것이다. 여기서 스테이지는 y좌표를 변화시켜가며 x방향으로만 이동하여 CCS 신호를 측정한 결과이다.

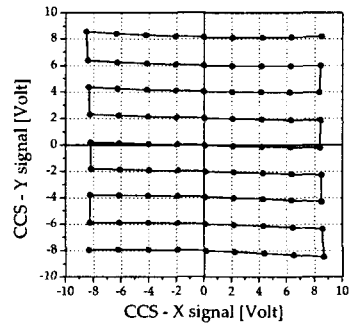


Fig. 7 Measured CCS signal between $\pm 9\text{V}$ range

지금까지의 선행연구에 의하면, CCS의 각 4조각 센서면의 감도가 같고, CCS의 가공오차, 설치오차 등이 없다고 가정하였을 때, CCS의 출력은 x축 및 y축에 대칭 형태를 이루고 있어야 하며 CCS 신호의 x축과 y축은 90도를 이루고 있어야 한다[4].

그러나 실제의 경우에는 여러 가지의 오차원인들에 의하여 위의 그림에서 볼 수 있듯이 스테이지가 순수하게 x방향으로만 이동할 때 CCS의 y방향신호가 변화하는 등 CCS

의 x 신호와 y 신호가 서로 간섭(coupled)이 되어 있는 것을 볼 수 있고, 이러한 경우에는 x 성분과 y 성분이 서로 독립적이지 못하여 CCS 신호의 x 성분과 x 축 변위, CCS y 성분과 y 축 변위에 대해 개별적으로 보상하여서는 정밀한 측정대상의 위치를 알 수가 없게 된다.

이러한 오차를 보정하기 위하여 측정대상의 위치와 CCS 신호의 관계를 일차변환으로 모델링하였다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{KV} + \mathbf{C} \quad (2)$$

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix}$$

여기서,

\mathbf{X} : target position [μm]

\mathbf{K} : sensor's sensitivity matrix [$\mu\text{m}/\text{V}$]

\mathbf{V} : sensor output [V]

\mathbf{C} : offset [μm]

측정된 CCS 각 성분의 출력과 측정대상의 위치 데이터로부터 다음과 같은 오차를 정의하고 $\sum |e_i|^2$ 를 최소화하는 민감도 행렬을 구하였다.

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{V}_i + \mathbf{C}_i + \mathbf{e}_i$$

$$\mathbf{e}_i = \begin{Bmatrix} e_{xi} \\ e_{yi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} C_x \\ C_y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

위에서 얻은 민감도 행렬을 이용하여 측정된 CCS 출력 데이터로부터 측정대상의 위치를 얻는 검증정을 실시한 후 실측된 측정대상의 위치와 비교하여 나타내었다.

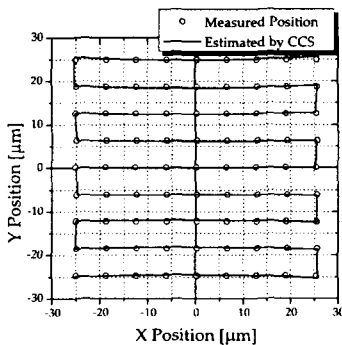


Fig. 8 Estimated position by CCS and measured position through the whole CCS's range

앞에서 정의한 민감도 행렬을 사용하여 CCS 신호를 선형 변환한 결과, CCS 신호를 측정하였을 때 나타났던 x, y 신호들 간의 간섭이 사라진 것을 볼 수 있으며, 실측된 측정대상의 위치와의 오차도 거의 없는 것을 알 수 있다.

아래 그림의 (a)는 민감도 행렬을 사용하지 않고 x, y 신호들을 서로 독립된 민감도를 사용하여 보정한 경우에 대한 각 지점에서의 오차를 나타낸 것이며, (b)는 앞에서 구한 민감도 행렬을 사용하여 선형변환을 한 후의 각 점에서의 오차를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 선형변환을 하여 간섭을 보정한 경우가 전체 영역에서 고르게 오차가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

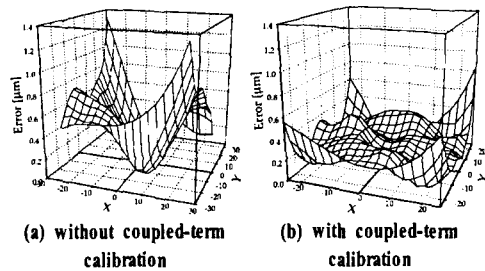


Fig. 9 Calibrated CCS signal errors at the position of target

Table 2 Average error through CCS whole range

	(a)	(b)
average error [μm]	0.23	0.48
standard dev. [μm]	0.14	0.26

표 3은 CCS 측정영역 전체 구간에 대한 민감도 행렬의 원소들의 값을 나타낸 것이다.

Table 3 Sensitivity coefficients through whole range [$\mu\text{m}/\text{V}$]

K_{xx}	K_{xy}	K_{yx}	K_{yy}
3.02	3.34E-2	8.09E-2	3.05

대부분 CCS를 사용할 때 측정 범위 전체를 모두 사용하는 경우는 매우 드물다. 센서 설치시의 편의와 측정 대상 회전체의 운전영역이 갑작스럽게 변화할 때를 대비하여, 주로 CCS의 측정영역을 회전체의 흔들림(ron-out)의 크기 또는 운전영역의 크기의 5배~15배 사이로 튜닝하게 된다. 그러므로 운전영역이 갑작스럽게 변화하지 않는다면, 실제로

CCS의 측정 범위 중 한 부분만을 주로 사용하게 된다.

그래서 측정 범위 전체에 대해서 뿐만 아니라 측정 범위를 여러 구역으로 나누어 검보정을 실시하여 각 영역에 대한 민감도 행렬들을 각각 구하였다.

- 영역 0 : $-4 \leq V_x \leq 4, -4 \leq V_y \leq 4$ [Volt]
- 영역 1 : $4 \leq V_x \leq 8, 4 \leq V_y \leq 8$ [Volt]
- 영역 2 : $-8 \leq V_x \leq -4, 4 \leq V_y \leq 8$ [Volt]
- 영역 3 : $-8 \leq V_x \leq -4, -8 \leq V_y \leq -4$ [Volt]
- 영역 4 : $4 \leq V_x \leq 8, -8 \leq V_y \leq -4$ [Volt]

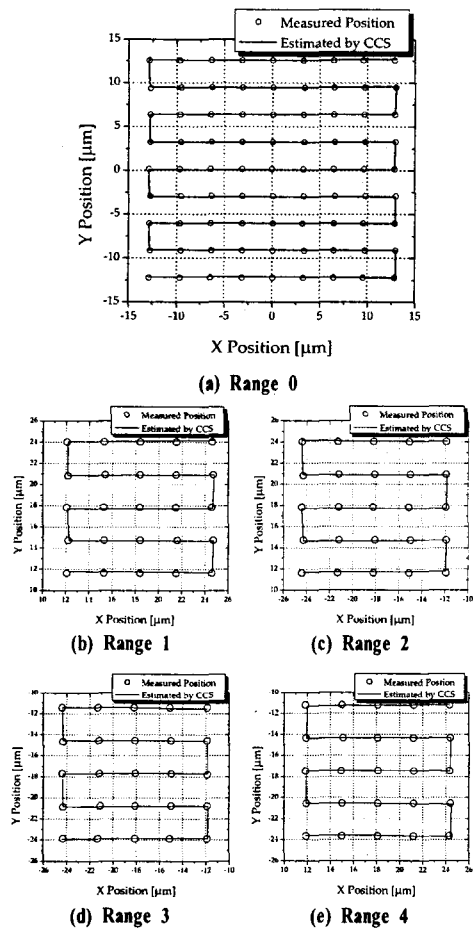


Fig. 10 Estimated position by CCS calibration

Table 4 Average error through the each ranges [μm]

	Average error	Standard Dev.
Range 1	0.10	0.06
Range 2	0.10	0.05
Range 3	0.10	0.03
Range 4	0.06	0.03
Range 5	0.07	0.05

이 경우에 대해서도 검보정으로 예측한 위치와 실측한 위치가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 측정대상을 구동하는 스테이지의 위치정밀도가 $0.1\mu\text{m}$ 인 것을 감안하면, CCS로 측정된 위치의 오차가 무시할 만한 수준인 것을 알 수 있다. 아래의 표는 각각의 영역에 대한 검보정계수이다.

Table 5 Sensitivity coefficients through each ranges [$\mu\text{m}/\text{V}$]

	K_{xx}	K_{xy}	K_{yx}	K_{yy}
Range 0	3.07	2.27E-2	8.52E-2	3.10
Range 1	3.00	-7.53E-2	-8.17E-3	2.97
Range 2	2.98	8.93E-2	1.66E-1	3.00
Range 3	2.97	-5.20E-2	1.89E-2	2.98
Range 4	3.00	1.01E-1	1.76E-1	2.97

또한 전체 영역에 대해 검보정한 결과보다 오차가 거의 절반 수준으로 감소한 것을 알 수 있는데, 이러한 이유는 전체영역에 대해 검보정을 수행할 때 측정대상이 센서면에 근접하면 비선형 효과가 커져서 센서면 근처에서는 측정 신호가 오차가 커지기 때문이다. 이러한 오차는 선형변환이 아닌 이차변환을 하여 보정을 하면 줄일 수 있을 것이라 생각된다.

즉, 센서 측정가능 영역 중 일부분만을 사용한다면 구간 별로 구한 민감도 행렬을 사용하면 크게 오차를 줄일 수 있을 것이며, 부득이 센서 영역 전체 구간을 사용한다면, 제어 등과 같이 센서의 계측 시간이 중요한 곳에서는 이차변환을 사용하고, 측정시간은 중요하지 않고 정밀도가 중요한 곳에서는 이차변환을 사용하면 오차를 줄일 수 있을 것이라 고려된다.

4. 결 론

원통형 정전용량 변위센서(CCS)의 검보정 과정을 자동화하여 검보정에 소요되는 시간을 크게 줄이고, 정밀 상태 이치를 사용하여 정밀도를 향상시켰다.

또한, CCS 신호의 각 성분들 사이의 간섭을 제거하기 위해 일차변환을 통해 CCS 신호를 검보정하였으며, 이 결과 신호 성분들 사이의 간섭이 제거되었다.

CCS 측정 범위 전체에 걸쳐 검보정을 실시하였을 경우에는 센서면에 가까워지면 신호가 얼그러져 오차가 크게 발생한다는 것을 확인하였으며, 이러한 오차는 일차변환이 아닌 이차변환을 통하여 보정이 가능할 것으로 생각된다.

그러나, 이차변환을 하면 계산시간 등의 부담이 증가하므로, 보통의 경우에는 측정 대상이 되는 회전체의 운전영역에 해당되는 구간에 대해 검보정된 개수를 사용하면 계산시간이 오차를 크게 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) I.H. Kim, "A study on in-process measurement of spindle vibration and cutting state using a cylindrical capacitive displacement sensor", Thesis of Ph. D in Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2001
- (2) H.J. Ahn, "A Study on System Identification and Vibration Control of the AMB Spindle for High Speed Precision Machining using Cylindrical Capacitive Sensors", Thesis of Ph. D in Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, .2002
- (3) H.J. Ahn, S. Jeon and D.C. Han "Error Analysis of the Cylindrical Capacitive Sensor for AMB Spindles" ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 1, March, pp.102-107, 2000
- (4) H.J. Ahn, D.C. Han, and I.S. Hwang, "A built-in bearing sensor to measure the shaft motion of a small rotary compressor for air conditioning", Tribology International, Vol. 36(8), pp 561 - 72, Aug 2003.