

초소형 공작기계 적용을 고려한 광학식 3 축 공구원점 센서 모델링 및 실험에 관한 연구

Study on Modeling and Experiment of Optical Three Axis Tool-Origin Sensor for Applications of Micro Machine-Tools

신우철^{1,✉}, 이현화², 노승국¹, 박종권¹, 노명규³
Woo-Cheol Shin^{1,✉}, Hyeon-Hwa Lee², Seung-Kook Ro¹, Jong-Kweon Park¹ and Myounggyu Noh³

1 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials)

2 KAIST 기계공학과 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, KAIST)

3 충남대학교 메카트로닉스 공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam Univ.)

✉ Corresponding author: swc1@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7194

Manuscript received: 2009.1.12 / Accepted: 2009.3.17

One of the traditional optical methods to monitor a tool is a CCD sensor-based vision system which captures an aspect of the tool in real time. In the case using the CCD sensor, specific lens-modules are necessary to monitor the tool with higher resolution than its pixel size, and a micro-processor is required to attain desired data from captured images. Thus these additional devices make the entire measurement system complex. Another method is to use a pair of an optical source and a detector per measuring axis. Since the method is based on the intensity modulation, the structure of the measurement system is simpler than the CCD sensor-based vision system. However, in the case measuring the three dimensional position of the tool, it is difficult to apply to micro machine-tools because there may not be space to integrate three pairs of an optical source and a detector. In this paper, in order to develop a tool-origin measurement system which is employed in micro machine-tools, the improved method to measure a tool origin in x, y and z axes is introduced. The method is based on the intensity modulation and employs one pair of an optical source radiating divergent beams and a quadrant photodiode to detect a three dimensional position of the tool. This paper presents the measurement models of the proposed tool-origin sensor. The models were verified experimentally. The verification results show that the proposed method is possible and the induced models are available for design.

Key Words: Micro Machine-tool (초소형 공작기계), Tool-origin(공구원점), Optical Tool-origin Sensor (광학식 공구원점 센서), Intensity Modulation (광강도 변조).

1. 서론

공구원점측정은 셋업된 공구의 가공점과 공작물의 특정 기준점 사이의 상대좌표를 구하는 것을

말한다. 엔드밀링 가공이나 EDM 가공 등에 있어서 원하는 가공형상을 정확한 위치에 정밀한 크기로 가공하기 위해서는 정밀한 공구원점측정이 선행되어야 한다.¹ 특히 초소형 공작기계에 의한 마이크

로 부품가공의 경우 작업자의 감각에 의존하는 것이 거의 불가능할 뿐만 아니라 기존의 측정장비를 적용하는 데에도 구조상 제한요소가 많다. 또한 다품종 생산 가공공정 시 공구원점측정에 적지 않은 시간이 소요되기 때문에 생산성 향상 측면에서도 빠르고 정확한 공구원점측정이 절실히 필요한 실정이다.

이와 관련하여 현재 상용되는 측정시스템으로서 CNC 머시닝센터 용 자동공구셋터(auto tool setter)가 있다.²⁻⁵ 주로 주축에 셋팅된 공구의 길이와 직경 측정을 목적으로 하고 있으며 접촉식 프로브를 이용하는 방식과 광학식 비전시스템을 이용하는 방식으로 크게 구분된다. 접촉식 프로브를 이용하는 경우 측정이 쉽고 저가형 제품이 있어 널리 사용되고 있다. 그러나 접촉에 의한 마모가 존재하고 초소형 공구 측정 시 측정압에 의한 변형오차가 발생할 수 있다.⁶ CCD 센서를 기반으로 한 비전시스템의 경우 초소형 공구를 대상으로 회전상태에도 측정이 가능할 뿐만 아니라 공구마모 상태도 모니터링할 수 있다.⁷ 그러나 CCD 센서 픽셀크기 이하의 분해능을 얻기 위해서는 광학렌즈를 이용한 이미지 확대가 필요하다.⁸ 이때 측정영역이 상대적으로 축소되기 때문에 원하는 위치를 모니터링하기 위해서 이송스테이지를 통해 카메라 위치가 세밀하게 조정될 필요가 있다. 또한 획득된 이미지로부터 원하는 위치정보를 얻기 위해서는 이미지처리가 필요하다. 이를 위해서 별도의 마이크로프로세서와 관련된 주변장치가 필요하게 된다.⁹ 결과적으로 이러한 광학렌즈모듈, 이송스테이지 그리고 마이크로프로세서는 전체 측정시스템 구성을 크고 복잡하게 하여 초소형 동작기계 적용을 어렵게 만드는 요소가 된다. 또 다른 광학식 측정방식으로서 한 쌍의 광원과 광검출소자를 이용하는 방법이 있다.¹⁰ 이 방법은 비접촉 측정방식으로서 비전시스템 방식에 비해 구성이 간소한 장점이 있다. 그러나 지금까지는 시스템 구조 및 방법상 3차원 측정은 불가능 했다.

본 연구는 초소형공작기계에 적용 가능한 소형 3 축 공구원점 측정시스템 개발을 궁극적인 목적으로 두고 있다. 본 논문은 광강도변조 방식을 기반으로 한 쌍의 광원과 광검출기를 이용하여 공작물에 대한 공구의 X, Y, Z 위치 좌표를 얻을 수 있는 측정 메커니즘을 제안하고 있다. 구체적으로 측정시스템의 기본구조를 소개하고 광기하학에 근거하여 각 축의 수학적 측정모델을 유도하였다.

그리고 실제로 측정시스템을 구성하여 직경 1mm의 원통 핀을 측정대상으로 측정모델을 실험적으로 검증하고 유용성을 확인하였다.

2. 측정 시스템

2.1 기본 구조

본 논문에서 제안한 광학식 공구원점 센서의 적용 개념을 Fig. 1 에 도식적으로 보여주고 있다. 공작물의 특정 기준점 O 에 대한 공구의 끝단 기준점 T 사이의 3 차원 위치좌표를 얻기 위하여 센서를 공작물 위에 셋업한다. 이때 센서의 측정기준 S 와 공작물 기준점 O 사이의 위치좌표 P(X, Y, Z)는 알고 있는 값으로 일정하게 셋업될 수 있음을 전제한다. 따라서 공구의 끝점 T 와 센서의 측정기준 S 사이의 거리 p(x, y, z)를 측정함으로써 공구원점에 대한 3차원 좌표를 얻을 수 있다.

본 논문은 공구원점 측정시스템 개발을 위한 일차적인 단계로서 광센서에 의한 p(x, y, z)측정에 초점을 맞추었다. 따라서 광센서를 공작물 위에 일정한 위치로 셋업하는 방법에 대해서는 추후에 시스템 설계단계에서 다루고자 한다. 더불어 본 논문에서는 원통형 공구 형상만을 다루고 있는데 이는 EDM 의 원통 전극에 해당하는 경우로서 다양한 형상의 엔드밀 공구에 대한 적용은 추후 연구에서 다루고자 한다.

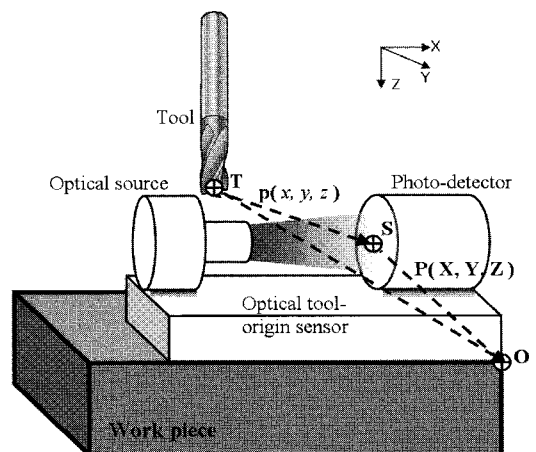


Fig. 1 Configuration of optical tool-origin sensor

2.2 측정 원리

한 쌍의 광원과 광검출소자로 공구위치의 3 차원 좌표를 얻기 위해서는 광원의 빔은 일정한 확

산각을 지닌 방사형태이여 하고 광검출소자는 4 분할 포토다이오드로서 각 분할요소마다 독립적인 신호처리회로가 구성되어야 한다.

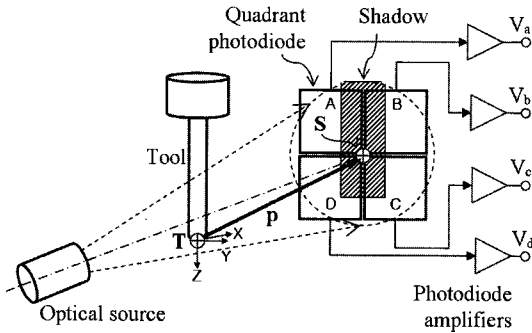


Fig. 2 Basic structure and principle of optical tool-origin sensor

Fig. 2 는 4 분할 포토다이오드와 확산빔을 출력하는 광원으로 구성되는 공구원점 센서의 기본구성 및 원리를 나타내고 있다. 센서의 측정기준점 S 는 4 분할 포토다이오드의 중심으로 정한다. 광원의 광축이 이 기준점 S 를 수직으로 지나도록 광원과 포토다이오드를 정렬한다. 공구의 기준점 T 는 공구의 끝단면 중심점으로서 측정원점이 된다. 광원에서 포토다이오드 감광부로 확산 방사빔이 일정하게 조사될 때 둘 사이에 위치한 공구의 그림자 상이 감광부에 맺히게 된다. 이 그림자의 크기와 위치는 공구의 x, y, z 방향 위치에 따라 변하게 되므로 포토다이오드의 4 분할요소 A, B, C, D 에서 각각 해당 그림자 영역을 제외한 광전면(photoelectric surface) 크기에 비례하는 광량을 검출하여 공구의 위치를 유추할 수 있다.

2.2.1 X 축 방향과 Y 축 방향 측정모델

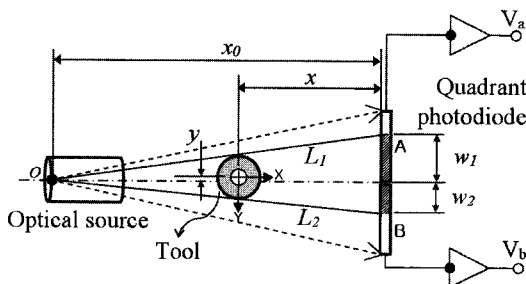


Fig. 3 Geometrical model for measurement of tool-origin in directions of x-axis and y-axis

Fig. 3 은 공구의 x 축 방향과 y 축 방향 위치에 따라 포토다이오드 감광부에 맺히는 그림자의 크기와 위치를 나타내는 기하학적 모델을 보여주고 있다. 공구의 x, y 방향 위치에 따른 공구 그림자의 크기와 위치 변화는 그림에서 볼 수 있듯이 포토다이오드 A 요소에 맺히는 그림자의 폭 w1 과 B 요소에 맺히는 그림자의 폭 w2 로 각각 나타난다.

Fig. 3 에서 L1 은 광원중심에서 공구단면원에 접하면서 요소 A 에 맺히는 그림자 경계를 나타내는 직선이고 L2 는 동일한 조건에서 요소 B 에 맺히는 그림자 경계를 나타내는 직선이다. 따라서 공구의 x, y 위치에 의해 L1 과 L2 의 기울기가 변함으로써 w1 과 w2 의 크기가 결정되고 각각 신호처리회로를 통해 Va 와 Vb 의 신호로 출력된다. Fig. 2 에서 나타냈듯이 포토다이오드 요소 A 와 요소 B 에서 공구 그림자의 z 방향 변화는 없다. 따라서 광전면과 출력신호 사이의 관계는 다음식과 같다. 여기서 k 는 포토다이오드의 광이득과 신호처리회로의 증폭이득의 곱에 해당하는 비례상수이고 l 은 정사각형의 포토다이오드 요소 한 변의 길이이다.

$$\begin{aligned} V_a &= k(l^2 - l w_1) \\ V_b &= k(l^2 - l w_2) \end{aligned} \tag{1}$$

직선 L1 과 L2 이 공구단면원과 접할 조건식을 통해 x, y 좌표에 따른 그림자 w1 과 w2 의 관계를 정리하면 다음과 같다. 여기서 r 은 공구의 반경을 의미한다.

$$\begin{aligned} y + \frac{w_1}{x_0}x &= w_1 - \frac{r\sqrt{x_0^2 + w_1^2}}{x_0} \\ y - \frac{w_2}{x_0}x &= \frac{r\sqrt{x_0^2 + w_2^2}}{x_0} - w_2 \end{aligned} \tag{2}$$

위 연립방정식의 해로서 x, y 방향 위치 모델식을 다음과 같이 각각 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= x_0 - \frac{r}{w_1 + w_2} \left(\sqrt{x_0^2 + w_1^2} + \sqrt{x_0^2 + w_2^2} \right) \\ y &= \frac{r}{x_0(w_1 + w_2)} \left(w_1 \sqrt{x_0^2 + w_2^2} - w_2 \sqrt{x_0^2 + w_1^2} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

정리하면 포토다이오드 A, B 요소의 출력 Va 와 Vb 로부터 식(1)을 통해 각 영역 내 그림자 폭

w_1 과 w_2 를 유추하고 식(3)에 대입하여 공구의 x, y 방향 위치를 파악할 수 있다.

2.2.2 Z 축 방향 측정모델

Fig. 4 는 공구의 z 축 방향에 따라 포토다이오드 감광부에 맺히는 그림자의 크기와 위치를 나타내는 기하학적 모델을 보여주고 있다. 공구의 z 방향 위치는 그림자의 길이방향 변화를 가져오므로 다음식과 같이 포토다이오드 C 요소와 D 요소에 맺히는 그림자의 높이 h 와 각 포토다이오드의 출력신호의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_c &= k(l^2 - h w_2) \\ V_d &= k(l^2 - h w_1) \end{aligned} \quad (4)$$

위 두 식으로부터 그림자의 높이 h 를 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{l}{w_1 + w_2} \left(2l^2 - \frac{V_c + V_d}{k} \right) \quad (5)$$

그 다음 Fig. 4 에 나타난 기하학적 관계에 의해 아래식과 같이 h 로 부터 z 크기를 유추할 수 있다.

$$z = \frac{h(x_0 - r - x)}{x_0} \quad (6)$$

식(5,6)에서 공구의 z 방향 위치검출은 포토다이오드 A, B 요소들 통해 w_1 과 w_2 의 크기와 그때의 x 위치 검출이 선행되어야 함을 알 수 있다.

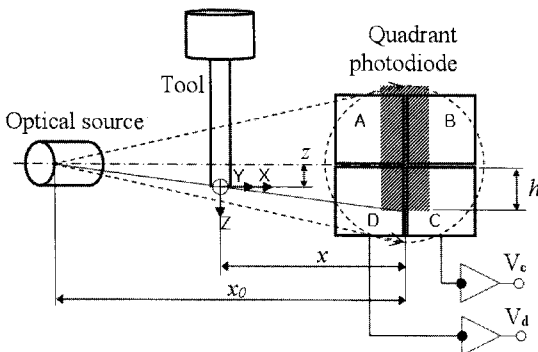


Fig. 4 Geometrical model for measurement of tool-origin in direction of z-axis

광원으로 라인빔이 적용된 경우는 라인빔의 길이방향으로만 확산되고 폭방향으로는 일정한 평행빔 형태를 지니고 있다. 이 경우 라인빔의 폭방향이 공구의 z 방향으로 설정되어 식(6) 대신 다음식의 관계가 성립된다.

$$z = h \quad (7)$$

정리하면 포토다이오드 출력 V_c 와 V_d 로부터 식(5)를 통해 그림자 높이 h 를 유추하고 식(6) 또는 식(7)에 대입하여 공구의 z 방향 위치를 파악할 수 있다.

3. 검증 실험

3.1 실험장치

Fig. 5 는 본 연구에서 제안한 측정법을 실험적으로 검증하기 위하여 구성한 실험장치를 보여주고 있다. 적용된 포토다이오드는 Hamamatsu 사의 S4349 모델로서 4 분할 포토다이오드의 각 분할 요소는 정사각형이고 한 변의 길이는 1.45mm 이고 660nm 파장 빛에 대한 광이득은 0.42A/W 이다. 광원은 Lanics 사의 레이저다이오드모듈로서 최대 광출력은 11mW 이고 파장은 660nm 이며 출력되는 빔은 45° 퍼짐각을 갖는 라인빔이다. 측정대상은 직경 1mm 의 초경편을 적용하였다.

포토다이오드의 측정중심을 광원의 광축이 수직하게 지나도록 레이저다이오드모듈을 3 축 고니오미터 스테이지에 장착하고 포토다이오드를 3 축

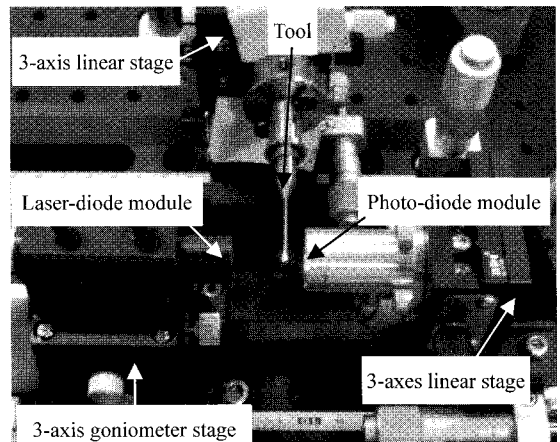


Fig. 5 Experimental setup for verifying optical tool-origin sensor

직선이송 스테이지에 장착하여 정렬하였다. 측정 공구는 별도의 3 축 직선이송 스테이지에 장착하여 공구의 3 축 위치이송을 구현하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

측정공구를 정밀 이송스테이지를 통해 각 축방향으로 일정 간격 이송하였을 때 센서의 출력신호를 측정하여 감도곡선을 얻었다. 그리고 유도된 측정모델을 통하여 공구위치에 따른 광전면의 면적크기 변화 특성을 해석하여 비교 검토하였다.

3.2.1 x 축

Fig. 6 은 X 축 방향 공구의 변위에 따른 센서의 출력신호 측정결과와 포토다이오드 광전면적 변화에 대한 이론적 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 X 축 변위가 11.2mm 인 부근부터 공구의 그림자가 포토다이오드의 감광면을 전부 가리는 영역이 시작되어 센서 출력값은 자체의 바이어스 전압인 2.5V 로 일정하게 유지되고 광전면적은 존재하지 않는다. 변위 11.2mm 이하 변위감지 영역에서는 X 축 변위에 따른 센서 출력신호변화와 모델식의 광전면적 변화경향이 거의 유사함을 볼 수 있다. 오차는 X 축 변위가 커질수록 증가하여 변위 10.4mm 부근에서 최대 11% 오차율을 보였다. 오차원인은 공구의 측면에 의한 빛의 회절현상(diffraction)으로 판단된다.¹⁰ 회절의 영향은 그림자 경계부근에 나타나며 공구와 감광면 사이가 멀어질수록 커진다. 또한 변위가 커질수록 그림자도 커짐으로써 감광영역의 바깥영역에 그림자의 경계부분 범에 의해 광전면이 형성되어 회절 영향은 보다 크게 나타난다. 유도된 모델에서는 회절현상이 고려되지 않았으므로 이 영역에서 실험값보다 이론값이 크게 된다. 그러나 본 연구는 마이크로 공작기계에서 사용되는 마이크로 공구를 대상으로 하고 있기 때문에 1mm 정도의 측정구간이 필요 할 것으로 예상된다. 따라서 오차가 큰 영역에서 비선형성도 큰 것을 감안할 때 이 영역을 제외한 나머지 영역을 고려하여 센서 설계가 충분히 가능할 것으로 판단된다.

3.2.2 y 축

Fig. 7 은 Y 축 방향 공구의 변위에 따른 센서의 출력신호 측정결과와 포토다이오드 광전면적 변화에 대한 이론적 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 식(3)을 통해서 알 수 있듯이 Y 축 방향 공구

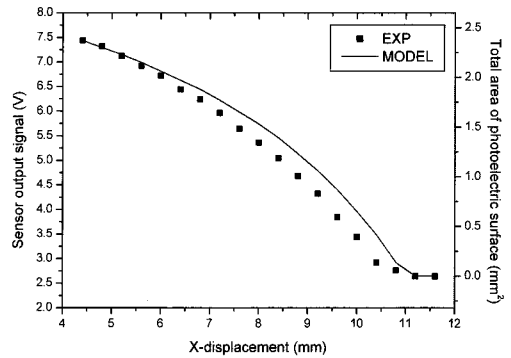


Fig. 6 Comparison between experimental results and theoretical results for X-direction

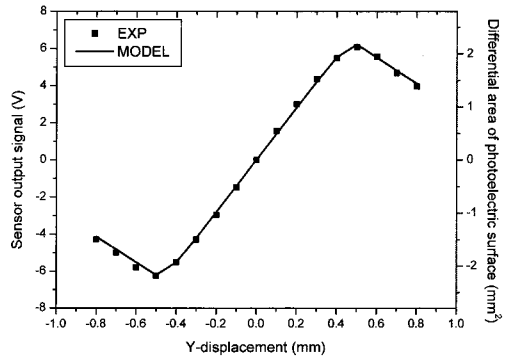


Fig. 7 Comparison between experimental results and theoretical results for Y-direction

변위측정은 감광영역 분할요소 A 와 B 의 차동신호형태를 띄고 있다. 그래프에서 변위가 제로인 점은 두 신호의 차가 제로인 점이고 두 분할요소의 광전면적의 크기가 동일한 경우로서 공구의 중심축과 두 분할요소 경계선이 일치한 경우이다. 그리고 이 제로점을 기준으로 대각선 대칭형상이 실험결과와 해석결과에서 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 측정영역은 제로점을 기준으로 좌우의 선형구간이 된다.

3.2.3 z 축

Fig. 8 은 Z 축 방향 공구의 변위에 따른 센서의 출력신호 측정결과와 포토다이오드 광전면적 변화에 대한 이론적 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. Z 축 변위 0mm 이하 영역은 공구의 그림자가 감광영역에 미치지 않은 상태로 최대 센서출력신호와 전 영역이 광전면이 되어 일정하게 나타난다. 반대로 Z 축 변위가 1.45mm 이상부터는 공구의 그

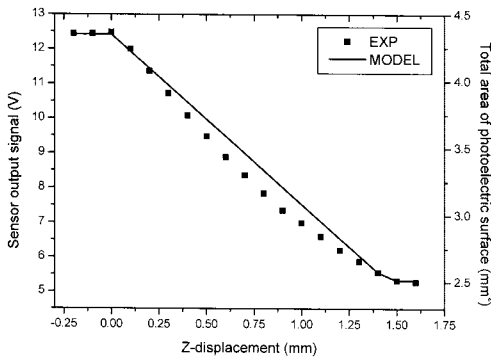


Fig. 8 Comparison between experimental results and theoretical results for Z-direction

립자가 길이방향으로 감광영역 Z 방향을 전부 가린 영역으로서 변위에 따른 신호와 광전면 변화를 보이지 않는다. 따라서 위 두 영역의 사이 구간 1.45mm 이 Z 축 측정영역이 되며 이 크기는 포토다이오드 한 분할요소의 한 변의 길이이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 완전한 선형성을 보이는 해석결과에 비해 실험결과는 약간의 비선형특성을 보임으로써 오차가 발행하였다. 이 오차원인은 측정 시 공구 끝단 모서리에서의 회절현상에 의한 것으로 사료된다. 최대 오차는 Z 축 변위 0.88mm에서 발생하며 오차율은 10%으로 평가 되었다. 결과적으로 실험결과와 해석결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 소형 공구원점 측정시스템 개발을 궁극적인 목적으로 두고 하나의 광원과 하나의 광검출기를 통해 공구원점의 x, y, z 좌표값을 얻을 수 있는 측정 메커니즘을 소개하였다. 특히 원통형 공구를 측정대상으로 3 축의 변위검출 모델식을 유도하였고 실험적으로 검증하였다. 검증결과로서 각 축의 측정결과와 해석결과가 거의 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 결과적으로 제안된 측정구조와 측정법이 목적에 맞게 실현 가능하고 유도된 모델식이 센서 설계 및 제작 시 유용할 것으로 판단된다.

향후 연구로서 여러 가지 형상을 지닌 엔드밀 공구에 대한 원점측정방법을 수행할 계획이다. 본 측정법은 비접촉 방식이므로 회전상태의 공구에도 동일하게 적용 가능하다. 이 경우 공구 날 형상에 대한 일정한 파형을 지닌 출력신호를 획득하게 되

고 이 결과를 적절하게 신호처리하여 공구 중심축 끝단의 위치를 유추하고자 한다.

후 기

이 논문은 2006 년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-351-D00003).

참고문헌

- Hong, D., Kim, D., Jung, K. and Kim, K., "Precision Metrology Frame for Micro/Meso-Scaled Machine Tool," Proc. of KSPE Autumn Conf., pp. 541-542, 2006.
- MARPOSS Co. Ltd., <http://www.marposs.co.kr>.
- Metrol Co. Ltd., <http://toolsensor.com>.
- BIG DAISHOWA SEIKI Co. Ltd., <http://www.big-daishowa.co.kr>.
- RENISHAW Co. <http://www.renishaw.com>.
- Lee, E. S., Lee, C. H. and Kim, S. C., "Machining Accuracy Improvement by Automatic Tool Setting and On Machine Verification," Proc. of ISMTII, pp. 293-296, 2007.
- Naruse, T., Ohmori, H., Uehara, Y., Watanabe, Y., Katahira, K., Mizutani, M., Andou, K. and Sasaki, C., "Advanced Consistent On-machine Detecting, Sensing, Imaging, Monitoring, Control, Feedback on Tooling and Machining for Milli to Micro-scaled Phenomenon Analysis," Proc. of ISMTII, pp. 297-300, 2007.
- Bono, M. J. and Kroll, J. J., "Tool Setting on a B-axis Rotary Table of a Precision Lathe," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 11, pp. 1261-1267, 2008.
- Choi, Y. J. and Chung, S. C., "Monitoring of Micro-Drill Wear by Using the Machine Vision System," J. of KSME, Vol. 30, No. 6, pp. 713-721, 2006.
- Lim, H. S., Son, S. M., Wong, Y. S. and Rahman, M., "Development and Evaluation of an On-machine Optical Measurement Device," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 10, pp. 1556-1562, 2007.