

CAD 모델에 기초한 기상측정

김승록*(영남대 대학원 기계공학과), 박영근*(영남대 대학원 기계공학과), 권기복*(영남대 대학원 기계공학과), 박정환(영남대 기계공학부), 고태조(영남대 기계공학부), 김희술(영남대 기계공학부), 김창일(일진 산업)

OMM (On-the-Machine Measurement) based on CAD Model

S. R. Kim (Mech. Eng., Yeungnam Univ.), Y. G. Park (Mech. Eng., Yeungnam Univ.),
K. B. Kwon (Mech. Eng., Yeungnam Univ.), J.W. Park (Mech. Eng., Yeungnam Univ.),
T. J. Ko (Mech. Eng., Yeungnam Univ.), H. S. Kim (Mech. Eng., Yeungnam Univ.),
C. I. Kim (Il-Jin Company)

ABSTRACT

In this paper, an OMM (On-the-Machine Measuring) system has been developed, which can perform measuring and inspection of sculptured surfaces of die and mold, by use of a scanning-type touch probe mounted into the spindle of a NC machine. The calibration procedures of a scanning probe (SP2-1, Renishaw) and an algorithm for measuring surface points by a ball-nosed stylus have been studied. The system has been developed based on commercial CAM software (Z-Master 2000), and tested through measuring a plastic injection molding-die. Also some experimental results of the calibration and measuring for given surface positions are analyzed to verify its accuracy and reliability.

Key Words : OMM (On the Machine Measuring)(기상 측정 시스템), CMM(Coordinate Measuring Machine), Scanning Probe(스캐닝 프로브), Probe Calibration (프로브 보정), Center shift (편심), Rotate angle (회전각)

1. 서론

최근 들어 제조분야에서 검사, 측정 및 역공학(reverse engineering)에 대한 요구가 점차 증대되고 있다. 특히 금형 제조에 있어서는 NC 가공 후 수 치적 오차의 확인을 통해 금형 수정 등의 공수를 단축 할 수 있는 방안이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 NC 가공 후 OMM(On-the-Machine Measuring) 시스템을 이용하여 기계상에서 가공물에 대해 신속하고 정확한 측정 데이터를 얻어내고, CAD 모델과의 비교검사를 통해 오차를 즉시 확인할 수 있는 시스템을 개발하였다. OMM 시스템의 경우 프로브(probe) 자체의 오차, 프로브 설치에 따른 오차, 프로브와 공작물의 접촉에 따른 오차, 공작기계의 열 변형, 가공물의 열변형 등 CMM 과 비교했을 때 많은 오차를 포함하고 있는 것도 사실이다^(2, 3, 5). 이러

한 오차에 의한 측정 정밀도 문제를 해결하기 위해 OMM 시스템의 측정오차 원인 중 프로브 측정오차 원인 및 보정에 관한 연구도 함께 수행하였다. 본 논문과 관련하여 기존의 연구를 살펴보면, 프로브 오차원인 보정에 대해 펄스 값과 CNC skip 신호를 이용하여 프로브의 편심량을 자동측정⁽¹⁾, 기준 구를 이용한 프로브 오차 보정과 프로브 좌표계를 기계 좌표계와 일치⁽⁴⁾, 레이저 간섭계와 링 게이지를 이용하여 편심량과 길이 보정⁽⁶⁾, 포텐쇼미터를 이용한 프로브 반경보정⁽⁷⁾, CAD 데이터를 이용하여 측정면의 법선방향으로의 측정침 접근⁽⁸⁾, 미지곡면 측정 데이터를 이용한 B-spline 곡면모델링⁽⁹⁾, 센서기술을 이용한 3 차원 좌표 측정 장치구현⁽¹⁰⁾, 커스텀 매크로와 Skip 기능을 이용한 2 차원 및 3 차원 측정⁽¹¹⁾, 레이저 간섭계를 이용한 측정⁽¹²⁾ 등 여러 연구가 있다.

2. 시스템 구현

본 시스템은 Window NT 환경에서 Visual C/C++을 이용하여 개발하였으며, 상업용 CAM 시스템인 Z-Master 2000 을 기반으로 하였다 Fig.1 은 본 연구에서 구현한 측정용 모듈로서, 전체 작업흐름을 나타내고 있다. 크게 보아 프로브 보정(calibration), 측정(measuring) 및 검사(inspection) 모듈로 구성되어 있다. 그림에 나타난 모의가공, CAD 데이터 인터페이스 기능 등은 Z-Master 시스템의 내부 기능을 활용하였다. Fig 2 는 OMM 시스템의 하드웨어적 구성을 나타내며, 실험장비의 사양은 Table 1 과 같다.

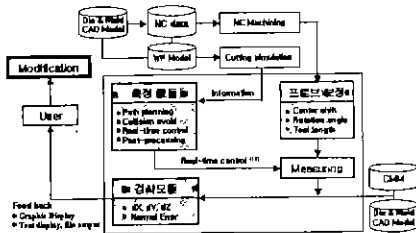


Fig. 1 Overall system flow

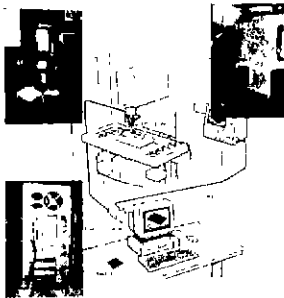


Fig. 2 HW configuration

Table 1. Specification of the apparatus

Probe spec	<ul style="list-style-type: none"> * Model: SP2-1 touch scanning probe * Type: 3 axis measurement linear & parallel motion * Measurement range: $\pm 4.5mm$ * Resolution: $1\mu m$ * Spring rate: $350g/mm \pm 20\%$
Counter board	* 4 channel counter board with LS7166 x 4
Milling mach	* Daewoo CNC Mach AV45 (FANUC 0M Controller)

3. 프로브 보정

본 연구에서 사용한 SP2-1 스캐닝 프로브는 Fig.3 과 같은 구조를 가지며, 스타일러스가 압력을 받을 경우 x, y, z 방향으로 각각 일정량의 펄스를 발생한다. Fig.3 에서 X_s, Y_s, Z_s 는 공작기계 주축에 설정된 좌표계이며, X_p, Y_p, Z_p 는 프로브 스타일러스의 좌표계를 나타낸다. 본 프로브에 대해 계산되어야 할 보정값은 크게 편심량(δ_x, δ_y :center-shift), 회

전각(α :rotation-angle), 직전 사용공구와의 길이차이(δz) 등이 있으며, 보정 과정을 통해 계산된 상기 수치는 이후 곡면 측정 과정에 사용된다.

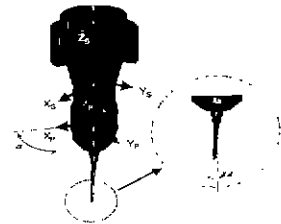


Fig. 3 Schematic diagram of the probe

보정을 위한 기준모델(reference model)은 가공물 자체가 될 수도 있으나, 본 연구에서는 적용 NC 기계상에서 별도의 기준 모델을 가공하여 사용하였다(Fig. 4-a)

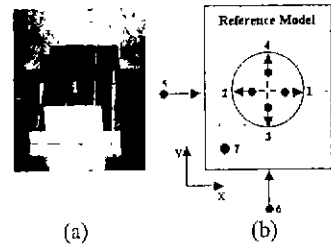


Fig. 4 Reference model for calibration

3.1 편심량 계산

NC 가공 후 절삭공구를 측정 프로브로 교체하여 발생하는 중심축의 불일치(Fig. 3)로 인한 편심량(δ_x, δ_y)은 스타일러스 볼 중심과 주축중심의 차이값이다. δ_x 의 경우, 기준모델의 구형 중심으로 프로브를 이동하여 $+X$ 및 $-X$ 방향으로 동일한 거리를 이동하여 나온 펄스값 (P_{X+} 및 P_{X-})의 차이를 이용하여 계산한다. δ_y 에 대해서도 동일한 방법으로 계산하며, 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_x &= (P_{X+} - P_{X-})/2 \\ \delta_y &= (P_{Y+} - P_{Y-})/2 \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 회전각 계산

본 연구에서 사용한 스캐닝 프로브는 X,Y,Z 3축의 자유도를 가지며, 공구를 프로브로 교체할 때 Fig. 3 에서와 같이 프로브 자체 좌표계 X,Y 축과 공작물 좌표계 X,Y 축이 일치하지 않으므로 회전각(α)을 고려하여 보정을 하도록 한다. 이러한 회전각을 계산하기 위해 기준모델의 측벽(5, 6 in Fig.4-b)에 접촉했을 때 발생하는 펄스(X_p, Y_p) 비율을 이용하며, 식 (2)는 각각 $+X$ 및 $+Y$ 방향으로 프로브를 접

축하여 얻어진 펄스 값으로 계산되는 회전각을 나타낸다. 실제 보정을 위한 회전각은 이 두 값의 평균을 이용하였다

$$\begin{aligned} \alpha_{+x} &= -\text{atan}2(-Y_p, -X_p) \\ \alpha_{+y} &= -\text{atan}2(-X_p, -Y_p) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 길이차이(δz) 계산

공작물 가공 시 사용되었던 공구와 측정을 위해 사용하는 프로브 스타일러스의 길이가 다르므로, 이에 대해서도 기준모델을 이용하여 길이차이 보정을 하도록 한다(Fig.5). 본 연구에서는 이미 알고 있는 기준모델의 최상단의 기계좌표값(Z_{MC})과, 프로브로 측정하여 얻어진 기계좌표값(Z_M)의 차이로 식 (3)과 같이 δz 를 계산한다.

$$\delta z = Z_M - Z_{MC} \quad (3)$$

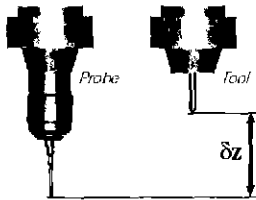


Fig. 5 Z-difference between probe and cutting tool

3.4 보정된 프로브 중심 좌표값 계산

이와 같이 프로브의 편심량, 회전각, 길이차이를 계산한 후 이들 보정량을 이용하여 실 측정 시 프로브 중심점 좌표값을 계산할 수 있다. 즉, 보정된 좌표값($X_{cal}, Y_{cal}, Z_{cal}$)은 측정 시 기계 좌표값(X_{MC}, Y_{MC}, Z_{MC})과 회전각(α), 편심량($\delta x, \delta y$), 높이차이(δz)로 구성된 행렬과 발생 펄스값(P_x, P_y, P_z)에 대한 변위량($X_{P_x}, Y_{P_y}, Z_{P_z}$)을 이용하여 식(4)와 같이 구할 수 있다.

4. 측정 및 비교검사

$$\begin{bmatrix} X_{cal} \\ Y_{cal} \\ Z_{cal} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{MC} \\ Y_{MC} \\ Z_{MC} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & -\delta x \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & -\delta y \\ 0 & 0 & 1 & -\delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{P_x} \\ Y_{P_y} \\ Z_{P_z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.1 곡면상 측정점 계산

볼 형상의 스타일러스를 이용하여 곡면상의 접촉점 계산을 위해서는 해당 곡면 점(C in Fig. 6)에서의 법선벡터(normal vector)를 알고 있어야 한다. 본 연구에서는 CAD 모델로부터 이 법선벡터를 계산하였다. 기계좌표 값($r_{MC} = [X_{MC}, Y_{MC}, Z_{MC}]^T$) 및 프로브 펄

스값(P_x, P_y, P_z)에 대한 변위량($r_P = [X_{P_x}, Y_{P_y}, Z_{P_z}]^T$)으로 계산되는 좌표값은 스타일러스 볼의 중심점 좌표값이며, 따라서 볼 반경(R) 및 법선벡터 정보를 이용하여 식 (5)와 같이, 현재 볼이 접촉한 곡면 점(M)의 좌표값($r_M = [X_M, Y_M, Z_M]^T$)을 계산한다.

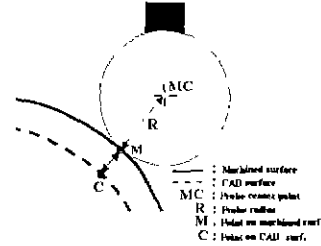


Fig. 6 Computation of a probe touch-point

$$r_M = r_{MC} + r_P - R \times (r_P / |r_P|) \quad (5)$$

4.2 프로브 경로계획

실제 측정을 위해서는 프로브의 이동 경로를 계획하여야 한다. 4.1 절에서 언급하였듯이, 스타일러스의 볼은 항상 측정점의 법선을 따라 접근하도록 하며, 측정점에 대한 접근 경로는 Fig. 7에 보이고 있다. 스타일러스의 볼이 측정점에 접촉한 후에도 약 1mm 정도의 추가 진행을 수행하여 충분한 펄스 값이 발생되도록 하였다.

측정점에 잔삭량이 존재할 경우에는 과절삭의 경우에 비해 더 많은 펄스값이 나올 것이며, 결과적으로 주어진 측정점에 대해 법선방향으로의 과절삭/미절삭 양을 계산할 수 있다.

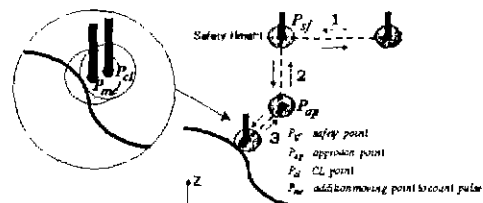


Fig. 7 Probe path-planning

5. 적용 및 실험결과

본 연구내용을 전화기 형상 모델에 적용하여 보았다. 치수는 120x100x50mm, 재료는 HSS 이며, 실험에 사용된 실험장비의 사양은 Table 1 과 같다.

사용자가 입력한 측정점에 대해 프로브 경로를 계산하고(Fig. 8 a), 측정결과를 보았다(Fig. 8 b).

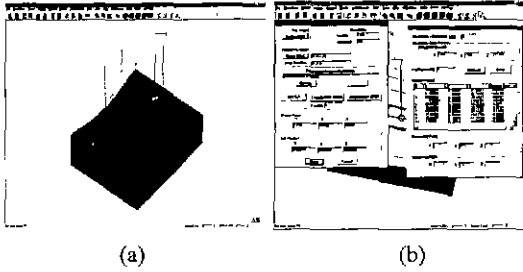


Fig. 8 a. Input points and path planning
b. Result of measuring

또한 보정 반복정밀도(repeatability) 측정을 위해 기준 모델의 동일 위치를 4 회 반복 측정하였는데, 프로브 편심량(δx , δy), 높이차이(δz)의 표준편차는 각각 $1.1 \mu m$, $0.8 \mu m$, $0.8 \mu m$ 로 나타났다. 이때 δx , δy , δz 에 대한 계산결과의 차이(최대값-최소값)는 각각 $2.7 \mu m$, $1.7 \mu m$, $2 \mu m$ 로 나타났다(Table 2).

Table 2. Repeatability of calibration

	Center Shift(X)	Center Shift(Y)	Rotation Angle(deg)	dZ
Average	-1.4011	0.2607	2.7374	-0.1020
St. dev	0.0011	0.0008	0.0709	0.0008
Max - Min	0.0027	0.0017	0.1515	0.0020

그리고, 측정 반복정밀도를 확인하기 위해 11 개의 입력점(Fig. 8a)에 대해 4 회 반복측정을 수행하였으며, 각 측정점에서의 법선방향 오차 δN (CAD 모델과 측정값의 법선방향 오차)의 평균, 표준편차 및 최대-최소값을 계산하였다. 각 측정점에 대한 표준편차는 평균 $5.2 \mu m$ 이며, $\delta N_{max} - \delta N_{min}$ 값은 약 $2 \mu m - 30 \mu m$ 범위임을 확인하였다. 또한 100mm 블록 게이지를 이용한 거리 측정(5 회 반복)을 하였을 때, 오차범위는 $2 \mu m - 6 \mu m$ 임을 확인할 수 있었다.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 OMM 측정 시스템을 이용하여 가공물의 측정을 통한 측정 데이터와 CAD 모델과의 비교검사를 통해, 가공물의 오차를 쉽게 확인할 수 있는 시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다. 또한 본 연구에서는 CAD 모델로부터 측정점의 정확한 법선벡터를 계산함으로써 프로브 반경에 의한 오차를 거의 없도록 하였다.

본 논문에서는 공구와 프로브 교환시의 체적오차에 대해서만 고려했지만, 공작기계 및 공작물의 열변형에 따른 오차해석에 관한 연구도 수행되어야 할 과제이며, CMM 측정과의 비교를 통한 정밀도 검증을 수행할 필요가 있다. 또한 개별 점에 대한 측정(PTP: Point-To-Point)뿐만 아니라, 곡면상의 연속된 경로(CP: Continuous Path)의 측정에 대해서도 구현이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 김선호, 이승우, 김인훈, "Scanning 프로브를 이용한 OMM(On The Machine Measuring)시스템 개발 및 평가", 한국정밀공학회 '96 년도 춘계학술대회논문집, pp.227~231, 1996.
2. 조명우, 이승중, 김문기, "3 차원 측정기를 이용한 자유곡면 측정시 최적의 경로 결정에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제 12 권, 제 10 호, pp.121~129, 1995.
3. 이상준, 김선호, "OMM 시스템의 측정오차 원인 분석 및 대책", 한국정밀공학회 '97 년 춘계학술대회논문집, pp.73~77, 1997.
4. 박희재, 이교일, "접촉식 프로브의 오차교정 및 보정기술", 대한기계학회논문집, 제 18 권, 제 8 호, pp.2081~2087, 1994.
5. Kunzmann, H., Treppe, E. and Waldele, F., "Concept for the Trace ability of Measurements with Coordinate Measuring Machine", *International Progress in Precision Engineering*, pp.40~50, 1993.
6. 김경돈, 정성중, "접촉식 측정 프로브를 이용한 2½차원 언더머신 측정 및 검사 시스템의 설계 및 해석" 대한기계학회논문집 A 권, 제 23 권, 제 1 호, pp.37~46, 1999.
7. H. Aoyama and M. kawai, " A New Method for Detecting the contact point between a touch probe and a surface ", *Annals of the CIRP*, Vol 38, No.1, pp.517~520. 1989.
8. Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R. and Kroneberg, M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Surface Patch Databases", *Annals of the CIRP*, Vol. 33, No.1, pp.347~350, 1984.
9. 남우선, 정성중, "자유곡면의 언더머신 측정 및 검사를 위한 시스템 설계", 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 12 호, pp.81~88, 1998.
10. 김현철, "기상 3 차원 측정기술을 이용한 공작기계 적용시험에 관한 연구", 한국공작기계학회 2000 년 춘계학술대회 논문집 pp. 653~658, 2000.
11. 이승우, "기상측정 시스템 개발", 산업공학, 제 11 권, 11 호, pp199~205, 1998.
12. 강효식, "펠스지령법에 의한 머시닝센터상의 3 차원 형상정보 수집", 한국정밀공학회 '95 년도 춘계학술대회논문집, pp396~399, 1995.
13. 이현직, "역공학을 위한 센서 융합을 통한 실물형상의 효율적 모델링", 영남대학교 기계공학과 석사학위논문, 1999.