한국정밀공학회지 제18권 제6호 (2001년 6월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 6, June 2001.

◆특집◆ 기상측정

CAD 모델에 기초한 기상측정 시스템

박정환*, 고태조*

OMM system based on CAD model

Jung Whan Park*, Tae Jo Ko*

Key Words : OMM(기상측정), CAD model(캐드 모델), Scanning Probe(스캐닝 프로브)

1. 서론

금형 등의 다품종 소량생산품의 경우는 대량생산 라인의 경우와 달리 전용 측정 및 검사 공정을 두기가 쉽지 아니하므로 유연성이 높은 3차원 측정기 (CMM)를 설치하여 운용하는 것이 일반적인 측정· 검사 방식이라 할 수 있다[1]. 그러나, CMM의 경우 운용 비용 및 설치, 측정 시간 측면에서 비경제적일 수 있으며, 측정을 위한 가공물 이동시간은 생산성 저하 요인이 되고 있다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 OMM (On the Machine Measuring)에 관한 연구가 진행되어 왔으며[4-11], 일부 상용 시스템도 찾아볼 수 있다[12].

일반적으로 실물 형상에 대한 3차원 측정의 목적은 크게 검사(inspection) 또는 역공학(reverse engineering)으로 구분할 수 있겠다. 역공학의 경우 대개는 실물의 CAD 모델이 존재하지 않거나 혹은 CAD 모델이 있다 하더라도 수차례 수정 등에 의해 실물과의 차이가 심할 경우 측정데이터로부터 적당한 방식으로 곡면 CAD 모델을 생성하는 측면이 강조된다. 반면 검사의 경우에는 기지의 모델과 측정데이터를 비교하는 과정이 중요시 된다고 하겠다.

* 영남대학교 기계공학부
Tel. 053-810-3524, 810-2576, Fax. 053-813-3703
Email jwpark@yu.ac.kr, tjko@yu.ac.kr

특히 설계 곡면과 실제 가공 곡면의 차이에 대한 검사 과정이 중요하다고 할 수 있는데, 현재 컴퓨터 모의가공(cutting simulation)[13] 등의 소프트웨어적인 검사만으로는 실 가공 결과의 검증에 한계를 가진다.

3차원 좌표값의 측정 방식은 크게 접촉식과 비접촉식, 하이브리드 방식으로 구분되며, 접촉식의 경우 타치 트리거 프로브(touch trigger probe) 또는 스캐닝 프로브(scanning probe)를 이용할 수 있다. 또한 비접촉식에서는 CCD 카메라 등의 비젼 시스템 및 레이저 스캐너 등을 활용하는 것이 일반적이다. 하이브리드 방식은 일반적으로 비젼 시스템을 이용하여 전체 형상을 파악한 후 접촉식 프로브로 정밀한 측정을 수행하는 방식이다[14-16]. 접촉식 측정에 국한하여 살펴본다면 PTP(point-to-point) 측정에서는 대개 touch trigger 프로브를 사용하며, CP(continuous path) 측정의 경우는 scanning 프로브를 사용하고 있다. 경우에 따라서는 스캐닝 프로브를 이용하여 PTP 및 CP 측정에 활용한 예도 찾을 수 있다[3].

이상의 측정 목적 및 측정 방식을 놓고 볼 때, OMM은 저렴한 비용으로 대부분의 경우에 적용이 가능하다고 볼 수 있다. 특히 설계곡면(CAD 모델)으로부터 NC 가공데이터를 생성하여 공작기계에서 가공을 수행한 후 기상(機上)에서 즉시 측정 및 검

사를 수행함으로써 가공 오류를 확인할 수 있다는 장점을 가진다.

3차원 측정에서 측정 오차 또한 관심을 가져야 하는 부분인데, OMM의 경우는 특히 공작기계의 작업환경, 체적오차, 열변형, 공작물 체결에 따른 탄성변형, 그리고 프로브 오차 등이 고려해야 할 주요 오차이다[1]. 이러한 오차 보정에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있으며[2,8,9,11,17-20], 본 논문에서는 다루지 않기로 한다.

여기에서는 형상 CAD 모델을 기반으로 접촉식 프로브를 이용한 곡면 점 측정을 중심으로 관련 연구를 살펴보기로 한다. 우선 CAD 모델, 특히 매개변수형 곡면 (parametric surface) 기반의 측정에 대한 연구는 1980년대 초반부터 이루어져 왔다[21]. Duffie *et al*은 단일 곡면 patch를 곡면 법선 벡터 방향으로 프로브를 접근하는 방식을 제안하였다. 반면 Kawabe *et al*의 경우는 CMM에서 프로브 중심점 데이터로부터 근사한 곡면 모델에서 NC 가공데이터를 생성하는 연구를 수행하였다[22]. 매개변수형 곡면이 아닌 CAD 모델을 사용한 연구로는 z-map[14], Z-Layer[15], 벡터모델[10] 등이 있으며, 일반적으로는 매개변수형 곡면 모델을 사용하였다[5,7,23].

이러한 연구들이 타치 트리거 프로브를 적용한 데 반해, 일부 연구에서는 스캐닝 프로브를 활용한 경우도 있다[2,3,16]. 일반적으로 스캐닝 프로브는 CP 측정에 사용하는 것으로 인식되어 온 것이 사실이나, 관련 연구결과를 살펴보면 PTP 측정에도 현실적인 활용이 가능한 것으로 사료된다.

본 논문에서는, NC 가공 후 가공면에 대한 수치적 검사를 목적으로 CAD 모델을 기반으로 SP2-1 스캐닝 프로브를 이용한 PTP 측정· 검사 시스템에 관하여 살펴보기로 한다. 2절에서 전반적인 시스템 구성을 살펴보고, 프로브 보정(3절), 측정점 계산(4절), 측정 테스트(5절)에 관해 설명하고자 한다.

2. 시스템 구성

본 시스템의 소프트웨어는 Windows NT 환경에서 Visual C++를 이용하여 개발하였으며, 기존 상업용 CAM 시스템인 Z-Master 2000의 내부 기능을 활용하였다. Fig. 1은 본 시스템의 전반적인 정보 흐름을 보여주고 있다. 본 시스템은 크게 프로브 보정, 측정 및 검사 모듈로 이루어진다.

프로브 보정 모듈은 NC 가공 후 공구를 프로브로 교체할 때 발생하는 편심(center shift), 스캐닝 프로브 내부 좌표축과 기계 좌표축의 어긋남(tilting)에 대한 보정 작업을 수행한다. 측정 모듈은 사용자 입력점 처리, 프로브 경로계획(path planning) 및 충돌검사(collision check), 실시간 NC 컨트롤 등을 다루며, 검사 모듈은 측정점과 CAD 곡면과의 오차를 나타내는 역할을 담당한다. 충돌검사에서는 Z-Master 2000 시스템의 모의가공 기능을 활용하여 가능한 실 가공곡면과 일치하는 형상을 대상으로 삼을 수 있도록 하였다.

시스템의 하드웨어적 구성은 Fig. 2에 나타내었으며, 프로브는 Renishaw사 SP2-1 접촉식 스캐닝 프로브를 사용하였다. 프로브 및 공작 기계 사양은 Table 1과 같다.

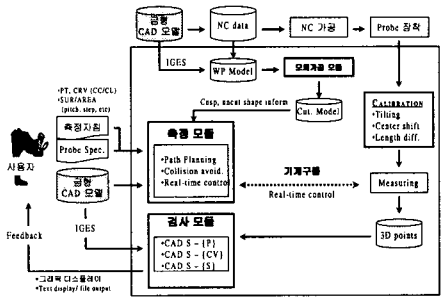


Fig. 1 Overall information flow

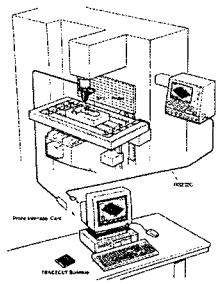


Fig. 2 Hardware configuration

Table 1 Hardware specification

Probe	Model: SP2-1 touch scanning probe (Renishaw, UK) Type: 3-axis measurement, linear & parallel motion Measuring range: ± 4.5mm Resolution: 1㎛ Spring rate: 350g/mm± 20%
Milling MC	Daewoo CNC AV45 (FANUC 0M)

3. 프로브 보정

본 시스템에서 사용하는 SP2-1 스캐닝 프로브는 3축 탄성 변위기구를 가지면서 프로브 스타일러스에 압력이 가해지면 프로브 변위좌표계(Xp,Yp,Zp)의 변위량에 해당하는 펄스를 발생한다(Fig.3). 이때 Xs,Ys,Zs는 공작기계 좌표계이며, 측정점 계산을 위해서는 이 두 좌표계의 변위축을 기계적 또는 수학적으로 일치시켜야 한다. 일반적으로 프로브 변위 좌표축 Xp,Yp와 공작기계 좌표축 Xs,Ys를 손으로 일치시키는 것은 용이하지 않다. 본 논문에서는 좌표축 Xp와 Xs의 어긋남을 틸팅각 α 로 정의하고 이를 수학적으로 보정할 수 있도록 하였다.

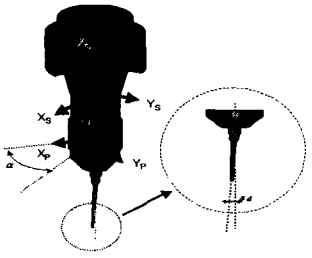
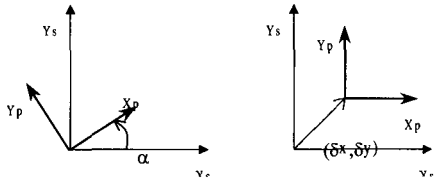


Fig. 3 Structure of SP2-1 scanning probe

또한 NC 가공 후 절삭공구를 프로브로 교체하였을 때 발생하는 프로브 편심량(δ_x,δ_y)에 대해서도 적절한 방법으로 계산하여 측정시 이를 감안하도록 하였다. 여기서 공구와 프로브 길이차이(δ_z)는 별도의 방법으로 보정하도록 한다. 따라서 측정에 필요한 프로브 보정은 틸팅각 α , 편심량 δ_x,δ_y 및 길이차이 δ_z를 계산하는 작업이 되겠다. Fig. 4에 틸팅각 및 편심량의 의미를 다시 보이고 있으며, 여기서 기계좌표계 원점은 스핀들 중심축으로 정의한다.



(a) Tilt-angle (b) Center-shift

Fig. 4 Tilt-angle and center-shift.

각 보정을 수행하기 위해서는 기준위치(reference position)가 있어야 하는 바, 별도의 기준블록(reference block)을 활용하는 방식[3]과 가공물 기준면을 활용하는 방식이 있을 수 있다. 여기에서는 기준블록을 사용하는 방식으로 설명하고자 하며, Fig. 5에 기준블록의 예를 보이고 있다. 블록 내부에는 중심점의 기계좌표값을 알고 있는 구멍(hole)이 있다.

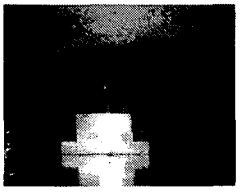


Fig. 5 Reference block for probe calibration

■ 틸팅각 계산

틸팅각은 프로브 스타일러스를 Xs 또는 Ys에 평행하게 밀었을 때 발생하는 프로브 펄스량으로부터 계산이 가능하다. 이때 기준블록의 측벽을 활용할 수 있으며, 식 (1)은 +Xs 및 +Ys방향으로 기계스핀들을 이동하여 프로브가 접촉된 상태에서 발생한 펄스량 Px, Py가 주어질 때 틸팅각을 계산하는 식이다.

$$\alpha_{Xs+} = -atan2(-Py,-Px) \qquad (1\text{-a})$$

$$\alpha_{Ys+} = -atan2(-Px,-Py) \qquad (1\text{-b})$$

본 시스템에서는 ± Xs, ± Ys 네 방향에 대한 틸팅각도를 평균하여 사용하도록 하였다.

■ 편심량 계산

편심량(δ_x,δ_y)은 일반적으로 중심좌표를 알고 있는 구멍의 내경 또는 외경을 측정하여 측정된 중심좌표와 실 좌표간의 차이라고 볼 수 있다. 기준블록 내부에 이미 기계좌표값을 알고있는 구멍의 내측면의 3점을 측정하여 중심점 좌표를 계산하는 방법, 또는 공작물의 XY 가공 기준면을 측정하여 이로부터 δ_x, δ_y를 각각 계산하는 방법 모두 가능하다.

■ 길이차이 보정량

가공에 사용한 공구와 프로브의 길이차이(δ_z)

는 Fig. 6과 같이 정의한다. 일반적으로 사용하는 상용 hight presetter의 경우 상당한 압력을 가해야 하는데, 실험 결과 본 스캐닝 프로브에 대해서는 적절하지 않은 방법으로 사료된다. 따라서 높이값을 알고 있는 공작물의 기준평면을 측정하여 길이 차이를 보정하도록 하였다.

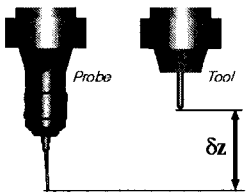


Fig. 6 Length difference

4. 측정 및 검사

4.1 프로브 접촉점 및 가공오차

본 시스템에서는 지름 6㎜ 볼 형상의 프로브를 사용하고 있다. 4장에서 설명한 각종 보정량을 고려하여 촉압에 의해 발생된 펄스 카운트 [Nx,Ny,Nz]로부터 식 (2)를 이용하여 접촉후 이동한 프로브의 3차원 변위량 **dP** = $[dX,dY,dZ]^T$를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & -\delta_x \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & -\delta_y \\ 0 & 0 & 1 & -\delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu Nx \\ \mu Ny \\ \mu Nz \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 μ = probe resolution (0.001㎜).

또한 측정시 기계좌표 $\mathbf{P_M} = [Xm,Ym,Zm]^T$이 주어지면, 프로브 중심점 **C**는 식 (3)으로 계산된다.

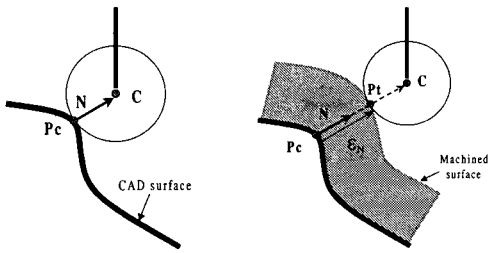
$$\mathbf{C} = \mathbf{P_M} + \mathbf{dP} \quad (3)$$

이제 프로브 접촉점 좌표값을 계산하려면 프로브는 CAD 곡면상의 측정 대상점 {**Pc**,**N**: *position & unit normal*}의 법선벡터(**N**) 방향으로 접근해야 한다. 이상적으로 가공이 완료되었다면(exact machining), 법선방향으로 접근하는 프로브는 Fig. 7-a와 같이 **Pc**에 접촉할 것이고 이때 프로브 접촉점 **Pt**는 식 (4)로 계산된다.

$$\mathbf{Pt} = \mathbf{C} - r\mathbf{N} \quad (4)$$

여기서 r = probe radius.

그러나 일반적으로 가공 곡면은 CAD 곡면과의 차이가 존재하므로 접촉점 **Pt**와 측정 대상점 **Pc**의 법선방향 거리차이가 나타난다. Fig. 7-b는 미절삭 예를 보이고 있으며 이때 가공오차 ε_N은 |**Pt-Pc**|가 된다.



(a) Exact machining (b) General case

Fig. 7 Ideal probe contact status

그러나 이러한 계산은 진정한 의미의 프로브 접촉점 계산은 아님을 알 수 있다. 즉 실제 프로브 접촉점 **Pr**이 법선벡터의 연장선상에 존재하지 않는 경우에는(Fig. 8) 실제 가공오차는 계산결과와 다를 수 있고 미/과절삭 판정의 오류를 야기할 수 있다. 물론 프로브 반경이 작아질수록 이러한 오류는 줄어들것이다.

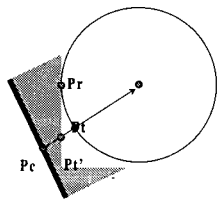


Fig. 8 Erroneous contact point computation

4.2 측정경로계획

측정대상 점은 사용자에 의해 지정된다. 사용자는 (x,y) 좌표를 입력하도록 하거나 곡선 또는 곡면을 지정하여 측정대상 점을 선택할 수도 있다. 매개변수형 곡면상에서 측정대상 점의 좌표값과 법선벡터를 계산한 후, 프로브 이동 경로를 만든다.

우선 프로브 중심점은 항상 측정대상 점의 법선벡터 방향으로 접근하도록 하며 계산된 프로브 중심점에 도착한 후 일정한 거리를 더 진행함으로써

충분한 펄스량을 얻도록 하였다. 매 측정대상 점의 측정 후에는 다음 측정점으로 이동하며 프로브 이동경로는 Z-Master 2000 시스템의 충돌검사 기능을 이용하여 안전한 이동을 도모하였다.

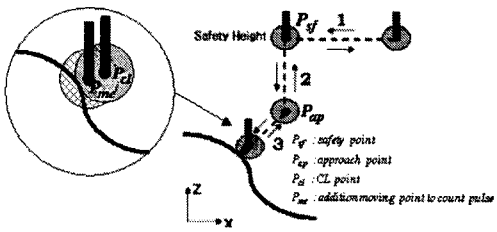


Fig. 9 Probe path-planning

5 측정 테스트

5.1 게이지 측정 실험

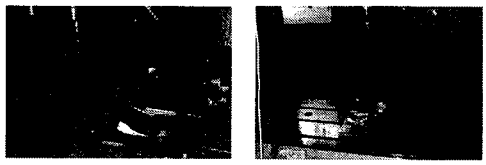
프로브 측정 정밀도를 알아보기 위하여 스텝 게이지, 링 게이지, 볼 게이지를 이용하여 거리, 반지름, 중심점 계산을 반복 수행하였다. 스텝 게이지의 경우 +X 방향으로 총 500㎜를 100㎜ 간격으로 3회 측정하였을 때 반복오차는 최대 2㎛/500㎜로 나타났으며, -X의 경우는 최대 1㎛/500㎜로 나타났다. 또한 500㎜에 대한 측정오차는 최대 15㎛으로 계산되었다. 이는 적용 공작기계의 체적오차가 다소 큰 이유 때문인 것으로 사료된다.

내측 반지름이 24.994㎜인 링 게이지에 대해서는 내부의 측면 3점을 측정하여 내경을 계산하는 실험을 4회 실시 하였는데, 반복오차는 최대 1㎛, 반지름에 대한 측정오차는 최대 8㎛으로 계산되었다.

마지막으로 반경 15.869㎜ 볼 게이지의 경우는 다소 큰 오차를 보이는데, 반지름에 대한 반복오차는 최대 2㎛, 측정오차는 최대 15㎛으로 나타났다.

5.2 가공형상 측정 사례

형상 치수 120× 100× 50㎜로서 자유곡면을 포함하는 전화기 CAD 모델을 이용하여 NC 공작기계에서 가공 후 측정 테스트를 실시하였다(Fig.10). Fig. 11은 CAD 모델 및 측정 경로를 보여주고 있으며, Fig. 12에는 프로브 보정 및 측정결과가 나타나 있다. 여기에서는 11개 측정대상 점에 대해 각각 4회 반복 측정을 수행하였는데, 반복정밀도는 최대 5㎛으로 나타났으며, CMM에서의 측정은 수행하지 않았다.



(a) NC machining (b) Digitizing

Fig. 10 NC machining and digitizing

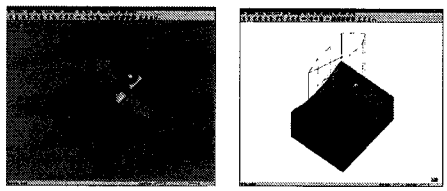


Fig. 11 CAD model and probe path

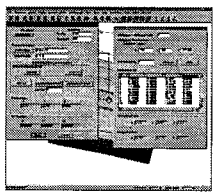


Fig. 12 Calibration and inspection result

6. 결론 및 토론

본 논문에서는 스캐닝 프로브를 이용한 OMM 시스템 구현에 관해 살펴보았으며, 본 시스템은 CAD 모델을 직접적으로 활용하는 방식을 취하고 있다. 현재로서는 측정실험을 실시한 공작기계의 체적오차가 다소 크기 때문에(최소 15㎛ 이상), 본 시스템의 측정 정밀도는 일차적으로 만족할 만 한 것으로 사료된다. 추후 다른 NC 공작기계에서 추가적인 실험이 계속 수행되어야 하며, 다만 반복정밀도는 프로브 분해성능에 견주어 볼 때 문제가 없는 것으로 보여진다.

일반적으로 PTP 측정의 경우 접촉식 트리거 방식의 프로브를 사용한 연구가 많음을 알 수 있다. 또한 PTP 측정에 있어서 이러한 프로브가 가격, 정밀도 측면에서 다양한 장점을 가지는 것도 사실이다. 한편으로는 스캐닝 프로브를 적용할 경우, PTP 측정 이외에 CP 측정을 통한 역공학으로의 접근이

비교적 용이하다는 큰 장점이 있음은 간과할 수 없는 사실이다.

참고문헌

1. Owen, J. V., "CMMs on the shop floor," Manufacturing Engineering, April, pp. 66-70, 1991.
2. 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM 시스템에서의 측정오차 해석," 한국정밀공학회지, 제15권, 제5호, pp. 34-42, 1998.
3. 김선호, 김인훈, "Scanning probe를 이용한 OMM 시스템 개발 및 평가," 한국정밀공학회지, 제13권, 제10호, pp. 71-77, 1996.
4. 김경돈, 정성종, "접촉식 측정 프로브를 이용한 2½ 차원 온더머신 측정 및 검사 시스템의 설계 및 해석," 대한기계학회논문집, 제23권, 제1호, pp. 37-46, 1999.
5. 남우선, 정성종, "자유곡면의 온더머신 측정 및 검사를 위한 시스템 설계," 한국정밀공학회지, 제15권, 제12호, pp. 81-88, 1998.
6. 이승우, "기상측정 시스템 개발," 산업공학, 제11권, 제11호, pp. 199-205, 1998.
7. 남우선, 정성종, "온더머신 고속 고정도 자유곡면 측정 및 검사시스템에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제22권, 제12호, pp. 2114-2125, 1998.
8. 김현철, 신은호, 윤헌구, 고해주, "기상 3차원 측정기술을 이용한 공작기계 적용시험에 관한 연구," 한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집, pp. 653-658, 2000.
9. 조명우, 이세희, 서태일, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement: I. 측정오차 모델링," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 172-181, 1999.
10. 조명우, 김진섭, 서태일, 조재형, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement: II. 측정계획 수립," 한국정밀공학회지, 제16권, 제12호, pp. 109-118, 1999.
11. 이상준, 김선호, 김옥현, "기계 체적오차가 고려된 가공형상-거칠기 측정 OMM 시스템," 한국정밀공학회지, 제17권 제5호, pp. 232-240, 2000.
12. Shima, A., "高速 デジタイジング機能お容易に實現する FANUC RENSCAN 400," 機械と工具, pp. 64-68, 2月, 2001.
13. Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Sculptured surface machining: theory and applications," Kluwer, 1998.
14. Takeuchi, Y., Shimizu, H. and Mukai I., "Automatic measurement of 3-dimensional Coordinate Measuring Machine by means of CAD and image data," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 565-568, 1990.
15. Cho, M., Kim, M. and Kim, K., "Flexible inspection system based on a vision guided coordinate measuring machine," International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.
16. 고태조, 김희술, 이현직, "센서 융합을 통한 효과적인 디지타이징에 의한 역공학," 한국정밀공학회추계학술대회논문집, 1999.
17. 박희재, 이교일, "접촉식 프로브의 오차 교정 및 보정기술," 대한기계학회논문집, 제18권, 제8호, pp. 2081-2987, 1994.
18. 이석원, 박희재, 주종남, "CNC 공작기계 선형피치오차의 최적 보정알고리즘을 구현하는 자동측정 및 보정 시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제15권, 제1호, pp. 69-77, 1998.
19. 문준희, 박희재, 주종남, "기구볼바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술 개발," 한국정밀공학회지, 제13권, 제6호, pp. 114-121, 1996.
20. 이세희, 서태일, 조명우, "볼바 시스템을 이용한 기상측정오차 보정," 한국공작기계학회논문집, 제10권, 제2호, pp. 56-63, 2001.
21. 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, pp. 347-350, 1984.
22. Kawabe, S., Kumura, F. and Sata, T., "Generation of NC commands for sculptured surface machining from 3-Coordinate measuring data," Annals of the CIRP, Vol. 29, pp. 369-372, 1980.
23. Menq, C., Yau H. and Lai G, "Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 2, pp. 268-278, 1992.