

3차원 자유곡면 온더머신 측정 및 검사 시스템의 개발

Development of On-the-Machine Measuring and Inspection System for Freeform Surfaces

남 우 선*(한양대 대학원), 정 성 중(한양대 공대)

Woo-Sun Nam(Graduate School, Hanyang Univ), Sung-Chong Chung(Hanyang Univ)

ABSTRACT

Measurement and inspection of freeform surfaces are required in reverse design process. In the case of surface measurement using a touch probe, probe radius compensation affects measuring accuracy. But current industrial practice depends upon an operator's experience to compensate for probe radius. In this paper, an on-the-machine measuring and inspection system for freeform surfaces was developed. Probe radius compensation methodology was studied via modeling of B-spline surfaces based on digitized data. The accuracy and reliability of the measurement system was confirmed through various kinds of experiments.

Key words : B-spline surface(B-spline 곡면), On-the-machine(온더머신), Probe radius compensation (측정침의 반경보정), Reverse design(역설계), Surface measurement(곡면 측정)

1. 서 론

최근, 자유곡면(freeform surface)의 설계와 가공이 자동차, 항공기 제조 및 조선, 가전, 플라스틱 제품의 생산에 널리 사용되고 있고, 역설계(reverse design)의 수요가 증대됨에 따라 생산현장에서 자유곡면에 대한 고정도 측정검사의 중요성이 증대되고 있다. 측정 및 검사공정에 있어 측정자동화의 기술은 수치제어(CNC) 장치를 장착한 좌표측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine) 및 온더머신(on-the-machine) 측정시스템⁽¹⁻³⁾의 도입으로 급속한 발전을 이루게 되었다. 그러나 이러한 측정자동화 연구의 대상은 주로 2½차원의 기본형상이 대부분이었으며 특히 자유곡면(free-form surface) 측정에 대한 연구는 상대적으로 저조한 실정이다.⁽⁴⁻⁸⁾

자유곡면을 고정도로 측정하기 위해서는 측정침의 정확한 반경보정이 이루어져야 한다. 그러나 미지곡면(mathematically unknown surface)의 경우 측정침의 반경보정이 매우 어렵기 때문에 정확한 측정이 힘들게 된다.⁽⁴⁻⁶⁾ 따라서 국내외에서 이러한 측정침의 반경보정 문제를 해결하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

곡면 측정시의 측정침의 반경보정에 관한 선행연구로써, Aoyama등⁽⁶⁾은 미지의 곡면 측정시 반경보정의 어려움을 해결하기 위해 측정침에 포텐쇼미터(potentiometer)를 장착하여 측정침 자체가 접촉점을 감지할 수 있도록 하였다. 그러나 이 방법은 포텐쇼메

터를 장착한 측정침을 사용함으로써 반경보정의 문제를 해결하는데 성공적이라 할 수 있으나 측정침 자체가 매우 고가이며, 소형으로 구현하기가 힘든 문제가 있다. Chen등⁽⁵⁾은 미지의 곡선 측정시 측정침에서의 법선 방향을 각각 Linear, Polynomial, Spline prediction method를 적용하여 추정하였고 추정된 법선벡터를 측정침의 반경보정에 이용하였다. 그러나 이 연구는 곡선측정에만 한정되었다는 단점이 있다. 그리고 Inasaki등⁽⁴⁾에 의해 제안된 방법으로써 곡면상의 측정점 부위를 삼각형으로 근사하고 근사된 삼각형의 법선방향으로 측정침의 반경보정을 수행하였다. 이 연구는 비교적 간단한 방법으로 측정침의 반경보정문제를 해결하였으나 곡면의 일부를 삼각형으로 근사화함에 따라 수반되는 오차가 단점이라 하겠다. 또, Duffie등⁽⁷⁾과 Kawabe등⁽⁸⁾은 CAD 데이터를 이용하여 측정침의 접근방향을 측정면의 법선방향으로 이용한 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구는 측정대상물이 CAD 데이터가 있을 때 매우 유용하지만 CAD 데이터가 없는 경우 측정이 곤란하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 미지곡면의 고정도 측정을 위해 측정침의 정확한 반경보정 방법을 제시하였다. 즉, 측정영역에서 측정된 16점을 이용하여 B-spline 곡면을 보간하고 보간된 B-spline 곡면을 이용하여 측정침의 반경보정을 수행하였다. 또한 이러한 일련의 과정과 온더머신 측정에 필요한 기능 등을 통합한 시스템을 구현하였으며, 여러가지의 측정사례를 통하여 제시된 방법의 정확도와 구현된 시스템의 유용성을 입증하였다.

2. B-spline 곡면을 이용한 측정점의 반경보정

미지의 곡면을 측정하고자 하는 경우, 그 곡면의 형상정보가 존재하지 않기 때문에 측정점의 접촉점에서의 법선벡터를 계산할 수 없다.⁽⁴⁻⁶⁾ 따라서 측정점의 정확한 반경보정이 어렵게 된다. 본 논문에서는 이러한 반경보정의 문제를 B-spline 곡면을 이용하여 해결하였다.

일반적인 비주기적 B-spline 곡면은 다음의 식(1)과 같이 정의되는데, 대개 u, v 에 대한 양3차(bi-cubic) 곡면을 많이 사용한다.^(10,11)

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad 0 \leq u \leq n-k+2, \quad 0 \leq v \leq m-l+2 \quad (1)$$

여기서

$P_{i,j}$: B-spline 곡면의 조정점

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}}$$

$$t_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq i < k \\ i-k+1 & k \leq i \leq n \\ n-k+2 & n < i \leq n+k \end{cases}$$

k, l : u방향, v방향의 오더(order)

양3차 곡면의 경우 $k=4, l=4$

m, n : (u, v방향으로의 조정점의 개수 - 1)

조정점이 4×4 배열인 경우 $m=3, n=3$

측정 데이터를 이용하여 B-spline 곡면 형태로 모델링하기 위해서는 역으로 측정점으로부터 곡면의 방정식을 유도해야 한다. 이런 과정을 곡면의 보간이라고 하며 일반적인 B-spline 곡면의 보간방법은 Table 1과 같다.

본 논문에서는 미지곡면상의 검사영역 크기를 [0, 6 mm]²로 설정하고 다음의 6단계 과정을 통해 정확한 측정점의 반경보정과 곡면 측정을 수행할 수 있었다.

- (1) 임의의 검사영역 [0, 6mm]²내의 4×4 배열을 가지는 16개의 균일분포점(uniform point)을 CMM이나 언더머신 측정장비로 측정한다.
- (2) 측정점의 반경 보정을 위해, 측정된 16개의 점들을 Table 1과 같은 절차를 거쳐 1st B-spline 곡면으로 보간한다.
- (3) 보간된 1st B-spline 곡면의 방정식을 이용하여 각각의 측정점에서의 법선벡터를 다음의 식(2)로 구한다.

$$n = \frac{\frac{\partial P(u_i, v_j)}{\partial u} \times \frac{\partial P(u_i, v_j)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial P(u_i, v_j)}{\partial u} \times \frac{\partial P(u_i, v_j)}{\partial v} \right|} \quad (2)$$

- (4) 각 측정점들을 식(2)에 의한 법선벡터 방향으로 측정점의 반경만큼 이동시킨다. 이동된 점들은 원래 측정하고자 하는 곡면상에 놓이게 된다.

Table 1. General interpolation process for B-spline surface

- ① Determination of order k for u , order l for v
- ② Determination of number of control points
- ③ Computation of knot value

$$t_i = 0, \quad i = 0, 1, \dots, k-1$$

$$t_i = t_{i-1} + \frac{\sum_{j=i-k}^{i-2} d_j}{\sum_{m=k}^{i+1} \sum_{n=m-k}^{m-2} d_j}, \quad i = k, k+1, \dots, n$$

$$t_i = 1, \quad i = n+1, n+2, \dots, n+k$$
- ④ Computation of blending function
- ⑤ Computation of location parameter u_p, v_q for each measured point

$$u_p = \frac{t_{p+1} + t_{p+2} + \dots + t_{p+k-1}}{k-1}, \quad p = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$v_q = \frac{t_{q+1} + t_{q+2} + \dots + t_{q+l-1}}{l-1}, \quad q = 0, 1, 2, \dots, m$$
- ⑥ For the u -directional control points, compute following m inverse matrices

$$\begin{bmatrix} N_{i,k}(u_0) & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{i,k}(u_n) & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0(v_j) \\ C_1(v_j) \\ \vdots \\ C_n(v_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{0,j} \\ Q_{1,j} \\ \vdots \\ Q_{n,j} \end{bmatrix} \quad \left| \begin{matrix} i=1, \dots, m \end{matrix} \right.$$

where

$Q_{i,j}$: Measured points

$$C_i(v_q) = \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{j,l}(v_q), \quad q = 0, 1, \dots, m$$
- ⑦ For the control points of the final surface, compute following n inverse matrices

$$\begin{bmatrix} N_{i,l}(v_0) & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{i,l}(v_m) & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i,0} \\ P_{i,1} \\ \vdots \\ P_{i,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_i(v_0) \\ C_i(v_1) \\ \vdots \\ C_i(v_m) \end{bmatrix} \quad \left| \begin{matrix} i=1, \dots, n \end{matrix} \right.$$

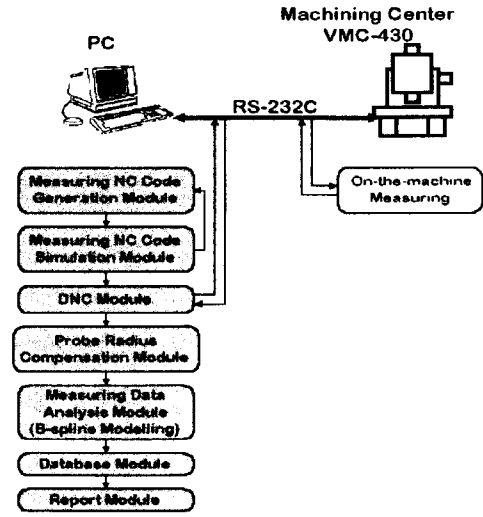


Fig.1 Flow chart of the developed system



Fig.2 On-the-machine measurement

- (5) 이동된 16점을 가지고 마찬가지로 Table 1의 절차를 통해 2nd B-spline 곡면으로 보간한다.
- (6) 보간된 2nd B-spline 곡면의 방정식을 측정하고자 하는 미지곡면의 검사모델로 사용한다.

3. 시스템의 구현

본 연구를 통해 기존의 온더머신 측정 및 검사 시스템⁽³⁾에 미지의 자유곡면에 대한 측정 및 검사 기능을 추가한 온더머신 측정 및 검사시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 C++언어로 프로그래밍 되었으며 Microsoft Windows95 및 Windows NT 시스템 환경 하에서 운용된다. 시스템은 크게 측정 NC코드 생성, 측정 NC코드 시뮬레이션, DNC, 측정데이터 해석, 해석결과 출력등의 모듈로 구성되어 있다. Fig.1은 시스템의 전체적인 작업 흐름을 보인 것이다.

4. 온더머신 측정

본 연구에서 제시된 알고리즘의 검증과 개발된 시스템의 효용성을 입증하기 위해 집축식 측정프로브를 장착한 머시닝 센터상에서 개발된 Fig.2와 같은 온더머신 측정 및 검사시스템을 이용하여 Fig.3 (a)~(d)와 같은 네가지 형상의 측정작업을 수행하였다.

시스템의 정확도를 판별하기 위해, Fig.3 (a)와 같은 직경 25mm, 진원도 0.5 μ m급인 진구를 측정대상물로

선정하였다. Fig.3 (b)~(d)는 상용CAD/CAM/CAE 통합 시스템인 I-DEAS⁽¹²⁾의 CAM기능을 이용하여 설계 및 가공하였다.

Fig.3 (b)는 cusp 높이 4 μ m, 직선보간 오차 5 μ m인 가공조건으로 베이클라이트(bakelite)를 가공하였다. (c)는 (b)와 같은 가공조건으로 금속 가공을 수행하였고, (d)는 cusp 높이 10 μ m, 직선보간 오차 5 μ m로 베이클라이트(bakelite)를 가공하였다.

Table 2는 Fig.3 (a), (b), (c)의 지정된 세 점의 x, y값에 대한 각각의 z좌표 설계치와 개발된 시스템을 이용하여 측정된 측정값을 비교하였다. (a)의 경우, 측정대상물이 진구임으로 측정결과가 매우 정확함을 알 수 있다. 이는 개발된 시스템의 알고리즘 정확도를 입증해 준다. (b)의 경우 (a)보다 측정오차가 다소 커지는 경향을 보여주고 있는데, 이는 기계가공에 의한 표면조도의 영향이 측정결과에 작용한 것이라 사려된다. 금속 가공을 거친 (c)의 경우, 곡률이 급한 (9)번 점에서 오차가 (b)의 경우보다 더 커진 결과를 보여주고 있지만 곡률변화에 따라 베이클라이트보다 금속 가공시의 공구 변형이나 마멸등이 더 커진다는 점을 감안한다면 신뢰할 수 있는 측정결과라 할 수 있다.

Fig.4는 Fig.3 (d)의 A-A'구간에 대해 2°간격으로 0°부터 40°까지 측정할 때 각도에 따른 측정오차를 보여준다. 전반적인 오차가 (a), (b), (c)의 경우에 비해, 다소 증가하였고 또한 각도에 따라 오차가

Table 2. Measuring results

Meas. Surface	Meas. point	X Coord.	Y Coord.	Reference Z Coord.	Estimated Z Coord.	Meas. Error
(a)	(1)	2.000mm	2.500mm	11.583mm	11.583mm	0 μ m
	(2)	4.000mm	4.000mm	11.146mm	11.147mm	1 μ m
	(3)	6.000mm	3.000mm	10.547mm	10.547mm	0 μ m
(b)	(4)	-60.00mm	10.000mm	26.219mm	26.221mm	2 μ m
	(5)	20.000mm	10.000mm	29.433mm	29.433mm	0 μ m
	(6)	58.227mm	-40.362mm	23.852mm	23.861mm	9 μ m
(c)	(7)	70.000mm	0.000mm	0.0mm	0.002mm	2 μ m
	(8)	41.931mm	25.888mm	-6.492mm	-6.487mm	5 μ m
	(9)	34.167mm	-6.068mm	-6.449mm	-6.424mm	25 μ m

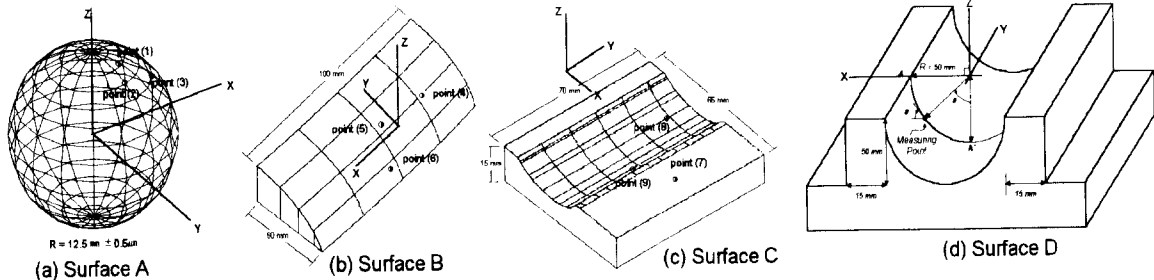


Fig.3 4 surfaces for on-the-machine measuring and inspection

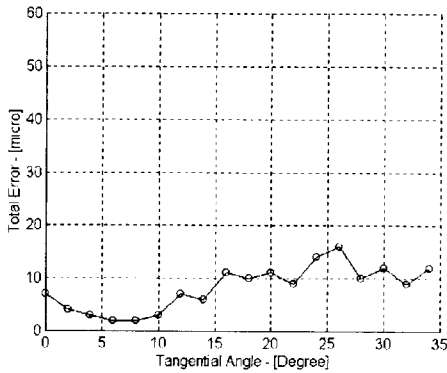


Fig.4 Tangential angle VS. Measuring Error

증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 cusp 높이의 영향과 곡률에 따른 가공시의 오차, 곡률에 따른 측정프로브의 오차, 구현된 시스템의 연산오차등이 복합되어 나타난 것으로 보인다. 이러한 여러 가지 오차요인들을 포함한다 하더라도 개발된 시스템의 정확도는 Fig.4에 나타난 것과 같이 $\pm 40^\circ$ 이내에서 $15\mu\text{m}$ 이하임을 입증할 수 있었다.

5. 결론

미지의 자유 곡면을 고정도로 측정하기 위한 측정침 반경 보정에 대한 방법론을 검토하고 시스템을 구현함으로써 다음의 결론을 얻었다.

(1) 측정침의 반경보정에 B-spline 곡면을 이용함으로써 미지곡면 측정시 정확한 반경보정이 가능함을 확인할 수 있었다.

(2) 제안된 측정침 반경보정 알고리즘과 측정작업에 필요한 기능들을 통합한 자유곡면 온더머신 측정 및 검사 시스템을 구현하였다.

(3) 여러 가지의 온더머신 측정작업을 수행함으로써 개발된 시스템을 고정도의 측정작업에 이용할 수 있음을 입증하였다.

향후, 본 연구에서 개발된 결과는 온더머신 측정장비 뿐만 아니라 좌표측정기와도 통합되어 고정도의 곡면측정에 응용될 수 있도록 DMIS Pre/Post processor의 개발 및 상용 CAD/CAM 시스템과의 연계와 역설계를 위한 IGES Translator 등의 개발이 이루어져야 하겠다.

참고 문헌

1. 박우열, 정성중, "공작기계용 자동측정 및 해석 시스템에 관한 연구", 한국정밀공학회 '93년도 추계 학술대회 논문집, pp.228-232, 1993.
2. 김승철, 정성중, "특징형상에 기초한 자동가공 및 측정시스템에 관한 연구", 한국정밀공학회 '93년도

- 추계 학술대회 논문집, pp.238-242, 1993.
3. 정성중, "공작기계상에서의 좌표측정기 기술", 서울대학교 제어계측신기술 연구센터, 제8회 CNC 콘트롤러 워크샵, pp.121-141, 1996.
4. H. Aoyama and I. Ianasaki, "Extraction of Boundary Lines between Free Form Surfaces for Construction of Computer Model", Transaction of NAMRI/SME, Vol XXV, pp.293-298, 1997.
5. Y. D. Chen, X. J. Tang, J. Ni and S. M. Wu, "Automatic Digitization of Free-form Curve by Coordinate Measuring Machines", International Journal of Production Research, Vol.32, No.11, pp.2603-2612, 1994.
6. 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.
7. N. Duffie, R. Piper and M. Kronerberg, "CAD Directed Inspection and Error analysis Using Surface Patch Database", Annals of the CIRP, Vol.31, No.1, pp.347-350, 1984.
8. S. Kawabe, etc, "Automatic Generation of NC Command for 3-D Coordinate Measuring Machines", Bulletin of the JSPE, Vol.14 pp.177-178, 1980.
9. J. A. Bosch, *Coordinate Measuring Machines and System*, M. Dekker Inc. 1995.
10. B. K. Choi, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier Science Publishing Com, 1991.
11. 이진우, *컴퓨터 그래픽과 CAD*, 영지문화사, 1997.
12. I-DEAS User Manual, SDRC Korea, 1997.