

# 스캐닝 프로브를 이용한 미지의 자유곡면 점군 획득에 관한 연구

권기복\*, 김재현\*, 이정근\*, 박정환\*\*, 고태조#

## Digitization of Unknown Sculptured Surface Using a Scanning Probe

Ki Bok Kwon\*, Jae Hyun Kim\*, Jung Geun Lee\*, Jung Whan Park\*\*, Tae Jo Ko#

### ABSTRACT

This paper describes a method for digitizing the compound surfaces which are comprised of several unknown feature shapes such as base surface, and draft wall. From the reverse engineering's point of view, the main step is to digitize or gather three-dimensional points on an object rapidly and precisely. As well known, the non-contact digitizing apparatus using a laser or structured light can rapidly obtain a great bulk of digitized points, while the touch or scanning probe gives higher accuracy by directly contacting its stylus onto the part surface. By combining those two methods, unknown features can be digitized efficiently. The paper proposes a digitizing methodology using the approximated surface model obtained from laser-scanned data, followed by the use of a scanning probe. Each surface boundary curve and the confining area is investigated to select the most suitable digitizing path topology, which is similar to generating NC tool-paths. The methodology was tested with a simple physical model whose shape is comprised of a base surface, draft walls and cavity volumes.

**Key Words** : Reverse Engineering(역공학), Digitization(점군획득), Laser-scanned Data(레이저 스캔 데이터), Probe Path(프로브 경로), Scanning Probe(스캐닝 프로브)

### 1. 서론

역공학(reverse engineering)은 CAD 데이터가 없는 실물형상의 CAD 모델을 제작하는 과정이다. 이를 위해서는 실물형상을 일정한 간격으로 샘플링하여 연속적인(discrete) 점들의 좌표를 획득하는 측정 과정이 선행되어야 한다. 이러한 일련의 점군(cloud of points data) 좌표를 획득하는 방법에는 기계적인 프로브를 측정물에 직접 접촉하여 측정하는 접촉식과 빛, 음향, 자기장 등을 이용하는 비접촉식 방법으로 나누어진다.

비접촉식 측정의 경우 측정 속도는 빠르지만 측

정 정밀도가 접촉식에 비해 상대적으로 낮으며 데이터의 분석 과정에 어려움이 있다. 반면 접촉식을 이용하는 측정 방식은 비접촉식에 비해 상대적으로 정확하고 반복 측정이 가능하지만 측정시간이 오래 걸리고 프로브 반지름 보정이 어렵다는 문제를 가지고 있다.<sup>1-3</sup>

접촉식 프로브를 이용한 측정 데이터 획득에 관한 기존의 연구를 살펴보면, XY 평면상에 일정한 간격의 격자를 형성하고 프로브를 각 격자점의 상공으로 이동시킨 후 하강하면서 대상물과 접촉하는 순간의 격자점의 높이를 자동적으로 획득하는 연구<sup>5</sup>, CAD 데이터 베이스로 설계된 곡면을 측정할 때

\* 접수일: 2002년 11월 1일; 게재승인일: 2004년 2월 20일  
\* 영남대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 영남대학교 기계공학부  
# 교신저자, 영남대학교 기계공학부  
E-mail: tjko@yu.ac.kr Tel:(053)810-2576

실 공간상이 아닌 매개변수 공간상에서 일정 간격의 격자를 형성하여 격자점을 측정하는 연구<sup>6</sup>, 베지어(Bezier) 곡면으로 주어진 자유곡면에 대해 측정대상을 다수의 구역으로 분할하고, 각 구역의 평균곡률(mean curvature)을 계산하여 구역내의 측정점의 밀도를 변화시켜 자유곡면의 곡률을 고려한 연구<sup>7</sup>, B-Spline 형태로 주어지는 매개변수 곡면을 다수의 구역으로 나눈 후 각각의 구역에서 수직곡률을 계산하여 수직곡률이 큰 부분에 측정점이 집중되도록 측정점을 배열하는 연구<sup>8</sup> 등이 있다.

이러한 연구들은 터치 트리거(touch trigger) 방식의 프로브를 이용한 반면, 본 연구에서처럼 고정도의 스캐닝 프로브를 활용한 경우도 찾아볼 수 있다.<sup>9-12</sup>

본 연구에서는 효과적인 형상 역공학을 위한 방법으로 비접촉식의 신속한 측정 방식과 접촉식의 정확하고 반복측정이 가능한 장점을 접목하여, 점군 데이터를 효과적으로 수집하는 방법에 대해 설명하고자 한다. 즉, 비접촉식으로 측정된 측정점을 이용하여 거친 CAD 모델을 만들고, 이를 바탕으로 곡면 경계곡선을 추출한 다음 각각의 곡면의 특징을 기준으로 측정경로를 지정한 후 접촉식 측정으로 정확한 측정점을 획득하는 방법에 관한 연구이다. 특히 본 연구에서는 정밀측정을 위한 프로브 경로의 생성에 관하여 다루고자 한다.

Fig. 1은 본 연구에서 다루고자 하는 연구의 범위 및 내용을 보여주고 있다.

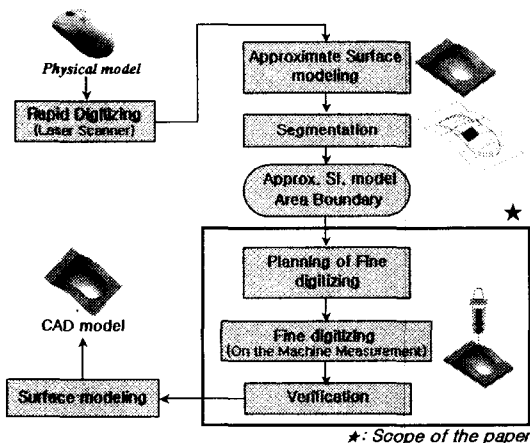


Fig. 1 Schematic view of the reverse engineering system

## 2. 시스템 구성 및 사양

본 측정 시스템의 소프트웨어는 Windows NT 환경에서 Visual C++를 이용하여 개발하였으며, 기존 상업용 CAM 시스템인 Z-Master<sup>13</sup>의 내부 기능을 활용하였다. 본 시스템은 크게 프로브 보정 모듈, 측정 및 검사 모듈로 이루어진다.

프로브 보정 모듈은 측정용 프로브를 측정기에 장착할 때 발생하는 편심(center shift), 스캐닝 프로브 내부 좌표축과 기계 좌표축의 어긋남(tilting), 프로브가 피삭재에 접촉 후 단위 이송 당 펄스량에 대한 보정 작업을 수행한다. 프로브 오차 및 보정에 관한 자세한 내용은 기존 연구<sup>14</sup>를 참고할 수 있다. 본 연구에서는 측정기로서 NC공작기계를 이용하였다.

측정 모듈은 프로브의 측정 경로계획(path planning) 및 측정장비의 파손 방지를 위한 비정상적인 프로브의 신호처리 등을 다루며, 검사 모듈은 계산된 프로브 측정점과 곡면 모델간의 비교 검사 역할을 담당한다. 프로브의 측정 경로를 위한 데이터는 Z-Master CAM 시스템에서 CL데이터를 만들기 위한 내부기능을 활용하였다. 프로브는 Renishaw 사의 SP2-1 접촉식 스캐닝 프로브를 사용하였으며(Fig. 2-a), 시스템의 하드웨어적 구성은 Fig. 2-b에 나타내었다. 프로브 및 공작 기계 사양은 Table 1과 같다.

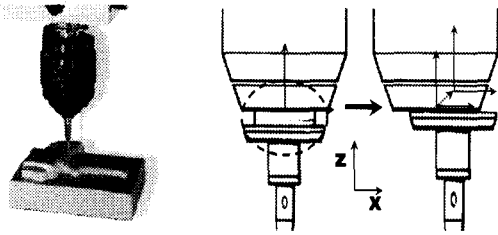
Table 1 Hardware specifications

Probe	Model	SP2-1 touch scanning probe (Renishaw, UK)
	Type	3-axis measurement Liner & parallel motion
	Measuring	± 4.5mm
	Resolution	1µm
	Spring rate	350 g/mm ± 20%
NC M/C	DAEWOO CNC AV45 (FANUC 0M)	

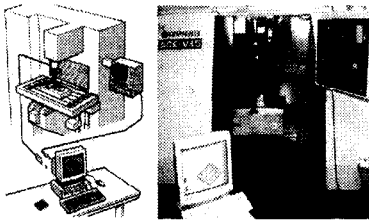
## 3. 측정 및 검사

### 3.1 측정 경로 생성을 위한 영역화

비접촉식으로 측정된 데이터에 대해 접촉식으로 측정하고자 하거나 또는 역설계를 위한 보다 정

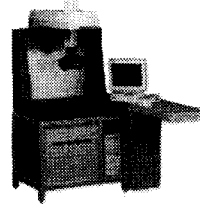


(a) SP2-1 scanning probe

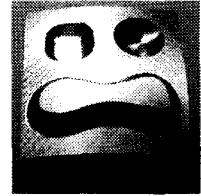


(b) System configuration

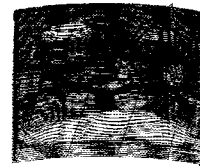
Fig. 2 Hardware configuration



(a) Surveyor 1200



(b) Physical model



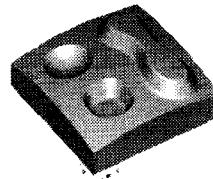
(c) Digitized points

Fig. 3 Experimental environment and digitized example

확한 수치 데이터가 필요하다고 판단되는 영역에 대한 접촉식 정밀 측정을 수행하기 위해서는 우선 접촉식 측정 영역을 구분해 줄 수 있는 영역 경계 곡선의 추출과 특징의 파악, 그리고 프로브 이동 경로를 생성하기 위한 CL 데이터(프로브 볼 중심점)를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 정보를 얻어내기 위하여, 비접촉식 레이저 스캐너로 획득한 점군 데이터로부터 근사 CAD 모델을 만들어 활용하도록 하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 레이저 스캐너(Surveyor 1200)와 실물모델(50mm\*50mm)을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3(c)는 레이저 스캐너를 이용하여 측정된 점군 데이터를 나타낸다. 레이저 스캐너를 통해 획득한 점군 데이터를 이용하여 생성하는 근사 CAD 모델의 수학적 모델은 z-map을 사용하였다. Z-map은 알려진 바와 같이 자료구조가 간단하고, 오프셋팅이나 블렌딩등의 곡면 조각이 매우 편리하다는 장점을 가지고 있어<sup>15</sup> 영역경계곡선 추출작업(영역화) 작업 등을 단순하게 처리할 수 있도록 도와준다. 본 연구에서 영역화(segmentation) 작업은 기존 연구<sup>16,17</sup>를 활용하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 입력으로 들어오는 근사 z-map 모델과 계산된 영역 경계 곡선을 보여주고



(a) Z-map model



(b) Area boundary curve

Fig. 4 Prerequisite information

있다. 여기에서는 경사면을 갖는 볼록부, 경사면을 갖는 오목부, 오목한 반구에 대한 경계곡선이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 측정 경로형태 선택

본 연구에서 측정경로형태(measuring path topology)란 일반적으로 절삭이론에서 말하는 가공 경로 형태(tool path topology)와 유사하며, 프로브의 측정 경로를 어떤 형태로 정할 것인가를 결정하는 것이다. 역공학에서 측정경로는 절삭가공에서 가공 경로와 마찬가지로 해당 영역의 형상을 가장 잘 표현할 수 있는 것이 좋다고 보았을 때, 본 연구에서

는 기존 연구<sup>18</sup>를 이용하여 Table 2와 같이 정리하였다. 즉, 곡면의 특징형상을 바다, 벽, 체적, 띠로 나누고 여기에 따라서 각각의 측정 프로브 경로 형태를 연속적인 직선형태, 방사상 형태, 윤곽형태, 띠형태로 나누게 한다. 이를 이용하여 실제 측정물을 대상으로 한 특징형상을 나누어본 예를 Fig. 5에 보이고 있다.

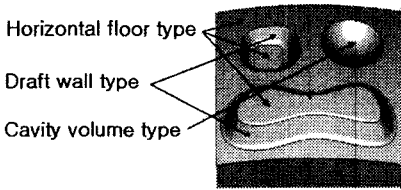


Fig. 5 Typical scanning features

Table 2 Overall mapping relationships between scanning feature and probe path topology<sup>18</sup>

Type	Feature	Topology
Floor type	slant floor horizontal floor compound floor	Serial-pattern
Wall type	vertical wall draft wall cavity wall core wall	Radial-pattern
Volume type	cavity-volume shoulder-volume	Contour-pattern
Strip type	fillet round groove	Strip-pattern

### 3.3 측정 경로 생성 및 측정

측정 영역에 대해 측정물의 형태를 가장 이상적으로 표현할 수 있다고 판단되는 측정 경로 형태가 결정되면, 프로브의 측정 경로를 생성하고 실 측정을 실시한다. 참고로 본 연구에서 사용하는 프로브 스타일러스는  $\phi 6mm$  볼 형태이며, 별도의 반경 보정이 없는 프로브 중심점 데이터를 측정 데이터로 얻는다. 따라서 실제 측정 데이터 좌표값은 이론적으로 형상면의 볼 읍셋(읍셋량 =  $3mm$ ) 곡면과 일치하게 된다.

한편 스타일러스 볼 중심이 놓이는 측정 경로는, 근사 z-map 모델(3.1절)을 기준으로  $\phi 5mm$  볼 엔드밀에 대한 CL(cutter location) 데이터를 계산하

여 생성하였다. 여기서 스타일러스 볼 반경과의 차이가  $0.5mm$ 임을 알 수 있는데, 이 차이로 인하여 프로브 스타일러스는 일정량의 압력이 공작물에 가해지는 (즉 일정량의 펄스가 발생하는) 상태로 연속적인 측정을 수행하게 되는 것이다. 예를 들어 프로브가 xy 평면에 위치할 경우, z 방향으로 발생하는 사전이동 펄스(pre-travel pulse)는 약 500이다 (반지름 차이 =  $0.5mm$ ,  $1000pulse/mm$ ).

Fig. 6은 부드러운 기반곡면(base) 특징형상에 대한 연속적인 측정경로의 예를 보여주고 있다. 측정경로를 따라가면서 발생하는 펄스값을 이용하여 프로브 볼 중심점 좌표값을 계산하는 과정은 별도 기존 연구<sup>14</sup>를 참고하도록 한다.

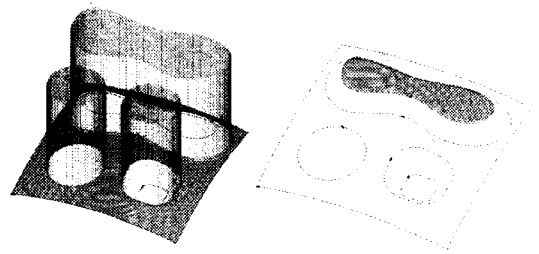


Fig. 6 Measuring path for floor features

## 4. 적용사례

Fig. 7은 Z-Master의 사용자 인터페이스를 보여주고 있다. 본 연구에서는 측정결과의 검증을 위하여, CAD 모델링 및 NC 가공을 통하여 실물 측정모델을 별도로 제작하였다. 이는 측정 후 실제 측정 데이터와 CAD 모델과의 정확한 비교를 위함이다.

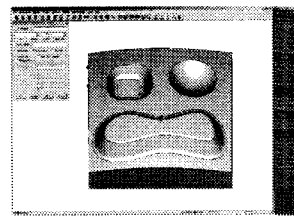


Fig. 7 Z-Master CAM system

### 4.1 측정 모델

본 연구에서는 우선 베이스 면, 드래프트 각

(draft angle)이 30° 인 볼록한 자유곡면, 드래프트 각이 30° 인 캐비티(cavity) 형상 그리고 오목한 원호형상을 포함하는 모델을 만들었다. 상용 CAD/CAM 시스템에서 모델링 한 후 NC 가공데이터를 만들었다. 형상 치수는 50×50×25mm이며 가공소재는 연강(SS41)이다. Fig. 8은 본 모델의 형상, 기계 가공 및 일련의 측정 과정을 보여주고 있다. 가공된 평가를 위한 모델은 비접촉식 측정기로부터 Fig. 3과 같이 측정된 후 영역화를 수행한다. 그 후 측정경로 형태 결정을 통하여 측정을 수행하게 된다.

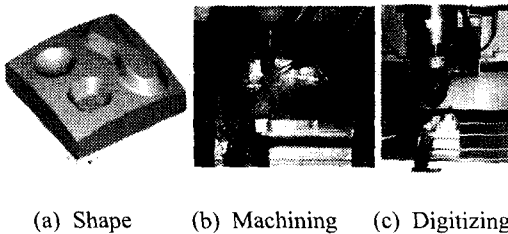


Fig. 8 Example model construction & digitizing

#### 4.2 측정 데이터 획득 및 측정 오차

본 연구에서 적용한 실물모델은 앞서 3.2절의 Fig. 5에서도 보았듯이 3가지 특징형상(horizontal floor, draft wall, cavity volume)으로 구성되어 있으며, Fig. 9에 보이듯이 모두 6개의 영역으로 구분하였다.

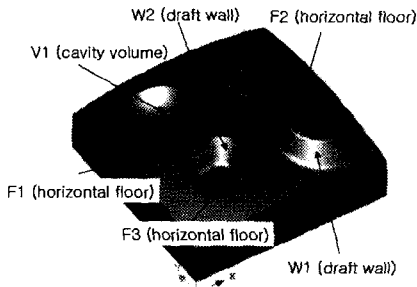


Fig. 9 Scanning areas

이후 각 영역에 대한 연속적인 측정을 통하여 계산된 측정 데이터를 Fig. 10에 나타내었다. 이때 영역별 특징형상에 따라 선정한 측정경로 형식(topology)은 Table 4에 나타내었다. Fig. 10에 보이

는 측정 데이터는 3.3절에서 언급하였듯이  $\phi 6mm$  스타일러스 볼의 중심점 좌표이며, Table 2을 기준으로 분류한 개별 특징형상 영역별로 분리 측정하였다. 본 예에서는 모두 6개의 영역으로 구분되어 있으며, 이중 F1 및 F2 영역에 대한 실측정 경로는 3.3절의 Fig. 6에 나타내었다.

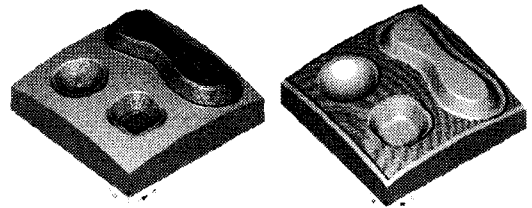


Fig. 10 Digitized points data

측정 정보를 요약하면 Table 3와 같다. 즉, 각각 6곳의 특징형상에 대해 측정점을 주사할 경로방식을 각각 선정한 후 점간 간격에 따라서 다량의 점들을 스캐닝하였다. 이 측정 점군을 이용하여 측정의 정밀도를 구해보면 Table 4와 같다.

Table 3 Measuring path data Information

Area	Feature Type	Point Number	Point interval
F1	Horizontal Floor	6865	> 0.2mm
F2	Horizontal Floor	2823	> 0.1mm
F3	Horizontal Floor	146	> 1.0mm
V1	Cavity Volume	7645	> 0.05mm
W1	Draft Wall	17010	> 0.05mm
W2	Draft Wall	5408	> 0.1mm

Table 4 Experiment result

Area	Feature Type	Path Topology	Error (mm)	
			Average	Range
F1	Horizontal Floor	Serial	0.04989	0.031~0.122
F2	Horizontal Floor	Serial	0.01319	0.009~0.027
F3	Horizontal Floor	Serial	0.10694	0.103~0.112
V1	Cavity Volume	Contour	0.01705	0.015~0.057
W1	Draft Wall	Contour	0.00548	0.002~0.094
W2	Draft Wall	Contour	0.00709	0.004~0.157

Table 4에서 오차(error)는 Fig. 11에서처럼 측정점 좌표값과 CAD 모델의 읍셋 곡면간의 차이를 의미한다. 부연하면, 실 측정을 통해 획득한 접촉식 프로브 중심점( $P_{measure}$ )과 공작물 상의 접촉점( $P_{contact}$ )에서 프로브 반지름만큼 읍셋한 곡면상의 점( $P_{offset}$ ) 사이의 차이이고( $dN$ ), 프로브 센터점을 중심으로 프로브 반경만큼의 영역박스(MBox)를 만들고, 읍셋모델의 grid point와 프로브 센터점의 최소거리를 예러로 간주하였다. CAD 모델의 읍셋 곡면은 z-map 구조를 활용하여 생성하였다.

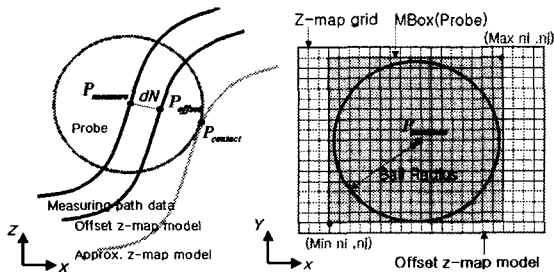


Fig. 11 Error verification method

Table 4에서 측정오차는 수평면 F1 및 F3에서 큰 오차값을 갖는 것을 제외하고는 비교적 높은 정밀도로 측정이 가능함을 보인다. 여기에서 오차의 원인으로서는 NC 가공시 기계 체적오차, 열변형, 공작물 체결에 따른 탄성변형, 그리고 프로브 보정 오차 및 측정 오차 등이 있으며, 이러한 오차 분석에 대해서는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

### 5. 결론 및 토의

본 연구는 비접촉식 측정과 접촉식 측정의 장점을 살리는 복합적 측정에서 접촉식 스캐닝 측정방법에 관한 내용을 다루었다.

본 연구와 관련된 선행연구로, CAD 모델이 없는 실물에 대해 측정 속도가 빠른 비접촉식 측정으로 다량의 측정 데이터를 획득한 후 이로부터 근사 곡면 모델을 구축하고 영역화 등의 작업으로 영역별 경계곡선을 얻는 연구를 수행하였으며<sup>16,17</sup>, 본 연구의 입력으로 활용하였다. 본 연구에서는 개별 영역에 대해 형상 특성에 적합한 측정 경로로 접촉식 측정을 수행함으로써 보다 정밀한 측정 데이터

를 획득하도록 하였다.

본 연구와 관련하여, 측정 오차 분석을 통한 개선, 반경보정을 이용한 프로브 접촉점 좌표값 계산, 영역경계곡선 내의 형상에 대한 자동형상 인식 등의 보완연구가 필요하다고 사료된다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2000-00291)의 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. Song, C. K., "Autonomous digitization of unknown free-form surfaces by triangular polyhedral approximation," Ph.D. Thesis, KAIST, 1996.
2. Kim, S. H. and Kim, D. H., "On-the-Machine Measurement System," J. of KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 9-18, 2001.
3. Chen, L.C. and Lin, G.C.I., "An integrated reverse engineering approach to reconstructing free-form surfaces," CIMS, Vol. 10, pp. 49-60, 1997.
4. Tamas Varady, "Reverse engineering of geometric models - an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
5. Song, C. K., Kim, S. W. and Park, J., "Automatic measurement of 3-dimensional profile of free-formed surfaces by using touch-trigger probes," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers(in Korea), Vol. 17, No. 2, pp. 407-415, 1993.
6. 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.
7. Cho, M. W., "Flexible inspection system using CAD database and vision guided coordinate machine," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago, IL, 1992.
8. Pahk, H. J., Kim, Y. H., Hong, Y. S. and Kim, S. G., "Development of computer-aided inspection

- system with CMM for integrated mold manufacturing," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 557-560, 1993.
9. Kim, S. H. and Kim, I. H., "The Development and Evaluation of OMM(On the Machine Measuring) System Using Scanning Probe," *J. of KSPE*, Vol. 13, No. 10, pp. 71-77, 1996.
  10. Kim, S. H., Lee, S. J. and Kim, O. H., "The Analysis of Measuring Error in OMM System," *J. of KSPE*, Vol. 15, No. 5, pp. 34-42, 1998.
  11. Ko, T. J., Kim, H. S. and Lee, H. G., "Reverse Engineering by effective digitizing with Sensor Fusion," *J. of KSPE Conference*, Vol. 1, pp. 419-422 1999.
  12. Lee, S. J., Kim, S. H. and Kim, O. H., "The OMM System for Machined Form and Surface Roughness Measurement Concerned with Volumetric Error," *J. of KSPE*, Vol. 17, No. 5, pp. 232-240, 2000.
  13. CubicTek, Z-Master Reference Manual, 2002.
  14. Park, J. W. and Ko, T. J., "OMN system based on CAD model," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 6, pp. 37-42, 2001.
  15. Park, J. W., Chung, Y. C. and Choi, B. K., "Precision Shape Modeling by Z-Map Model," *J. of KSPE*, Vol. 15, No. 11, pp. 180-188, 1998.
  16. Park, J. W., Kim, B. H. and Choi, B. K., "Pencil Curve Tracing via Virtual Digitizing," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 2, No. 4, pp. 253-266, 1997.
  17. Kim, J. H., "A study on the z-map generation & segmentation in reverse engineering by cloud-of-points data," MS Thesis, Yeungnam University, 2002.
  18. Choi, Byoung K., Jerard, Robert B., *Sculptured surface machining*, Kluwer Academic Publishers, pp. 58-64, 1999.