

## 다중센서를 이용한 자유곡면의 역공학

윤길상\*, 조명우\*\*

### Reverse Engineering of Unknown Free-formed Surface using Multi-sensor

Gil Sang Yoon\* and Myeong-Woo Cho\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, an efficient reverse engineering method for free-formed surfaces is proposed based on the integration of a repetitive digitizing method and vision system. In recent reverse engineering process, the equi-interval digitization method is being used since the surface information is not known. If more accurate results are required, the number of measuring point should be increased appropriately. Thus, such measuring process tends to result in too dense data including useless information, and cause excessive measuring time. This problem can be improved by applying repetitive digitizing method and image process technique, which is proposed in this paper. The proposed methods are validated through appropriate simulation and experiments.

**Key Words** : Reverse Engineering (역공학), Free-formed surface (자유곡면), Image process (영상처리)

#### 1. 서론

현재 자동차, 가전제품을 비롯한 다양한 분야에서 자유곡면의 활용도는 날로 증대하고 있다. 설계 데이터가 없는 자유곡면의 가공데이터를 구축하기 위해서는 일련의 역공학(reverse engineering) 과정을 수행하여야 하는데, 대부분 비접촉식 장비인 Vision system, 슬릿광이나 접촉식 장비인 CMM (3 차원 좌표측정기, coordinate measuring machine)을 이용하여 자유곡면의 형상정보를 습득해서 CAD 데이터를 복원한다. 비접촉식 장비인 경우 현재 정밀도 면에서 많은 향상을 보이며 사용이 증대되고 있지만, 기존에 보급된 3 차원 좌표측정기를 이용한 형상복원 방법도 여전히 이용되고 있다. 본 연구에서는 접촉식 3 차원 좌표 측정기와 영상장

비를 효율적으로 이용하여 측정시간을 줄이면서 정밀도를 향상시키는 방법을 구현하고자 하였다. 기존의 3 차원 좌표측정기에서 얻은 샘플링 데이터는 일반적으로 x-, y- 방향에 일정한 간격을 두고 측정하는 등간격(equi-interval) 측정방식이 여전히 사용되고 있다. 등간격 측정방식은 측정 대상물의 형상을 고려할 수 없어 높은 정밀도가 요구되는 경우, 측정점은 곡면 재구성에 불필요한 점들을 포함한 조밀한 형태를 가지게 되며, 이러한 불필요한 측정점이 결국 측정시간을 증가시키는 요인으로 작용하게 된다. 최근의 3 차원 좌표측정기는 임의의 자유곡면에 대한 자율적인 측정방식을 도입하고 있지만, 이것은 측정점과 인접 측정점과의 상호관계에 의한 방식으로 자유곡면의 형상에 대한 측정점의 위치나 수의 결정을 효과적으

2002년 1월 14일 접수

\* 인하대학교 기계공학부 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학부

로 수행하는 데 있어서는 한계가 있으며, 초기 형상의 일반 형상정보(대상물의 크기, z 방향의 높이 정보)를 사용자가 직접 입력해 주어야 한다<sup>[1,2,4-7]</sup>. 이러한 단점을 보완하고자, 본 연구에서는 측정 대상물의 형상을 고려하여, 측정점의 수와 위치를 능동적으로 조절할 수 있는 자율적인 측정 알고리즘을 제시하였다. 우선 비전 시스템을 이용하여 대상물의 기본적인 형상정보 즉, 초기의 측정영역과 프로브의 측정경로를 결정하였다. 또한 미지의 3 차원 형상에 대한 측정점의 위치와 측정점의 수를 곡면 분할 방법을 통하여 능률적으로 결정할 수 있는 알고리즘을 수행하여 이를 검증하기 위한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

## 2. 초기 형상정보의 추출

3 차원 좌표측정기는 대상물의 측정영역(x-, y-)을 결정한다. 이는 자동측정을 위한 측정영역 정하는 것으로 사용자가 수작업을 하는 것이 대부분이다. 그리고 프로브가 측정점과 측정점을 이동하기 위해서는 z- 방향의 대상물의 높이 정보가 필요하다. 그러나 미지의 곡면의 경우 z- 방향의 정보가 없기 때문에 프로브의 경로를 결정하는 데 있어, 일반 사용자는 대상물의 z- 방향의 최대값에 일정한 값을 감한 값을 주는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 측정영역을 수작업을 결정하는 것과 대상물의 형상을 고려한 z- 방향의 프로브의 이동 경로를 비전 시스템을 사용하여 결정하였다. 이런 방법은 대상물이 미지의 곡면이라 하더라도 형상을 일정량 고려된 프로브의 경로를 결정할 수 있었다. Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위한 3 차원 측정기에 비전 시스템을 적용한 시스템을 나타낸 것이다. z- 방향에 설치되어 있는 CCD 1은 Table. 1에서 보는 것과 같이 측정영역(x-, y-)을 결정하기 위한 것으로 형상의 중심과 모서리의 데이터를 추출할 수 있다. 이는 측정작업 초기의 측정 영역을 사용자가 결정하는 것을 보완하는 효과를 얻음과 동시에 본 연구에서 제안한 자율 측정 알고리즘을 적용하기 위한 기본적인 형상 데이터로 이용된다. CCD 2는 대상물을 한 측면에서 영상처리 작업을 수행한 것으로, 대상물의 형상을 일정량 고려한 프로브의 측정경로를 결정하기 위한 것이다. 이는 미지의 대상물의 경우를 대비한 시스템 구조이다. 영상장비를 이용하여 경계 데이터를 얻기

위해서는 한 화상 안에서 명암도가 불연속적으로 나타내는 영역간의 경계를 추출하고, noise 제거, 세션화 작업을 거친 후에 카메라의 보정 인자를 통하여 이미지 좌표에서 실제 좌표로 변환, 미지의 대상물의 일반적인 형상 정보와 프로브의 이동 경로를 결정하였다. 미지의 대상물의 측정 위치와 측정점의 개수 결정하기 위한 자율측정 알고리즘을 적용하기 위해 영상장비를 이용하여 얻은 x-, y- 방향 측정영역 데이터와 프로브의 이동경로를 결정하였다.

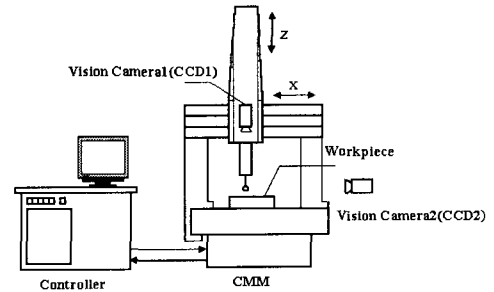


Fig. 1 Vision system for boundary information extraction

Table 1 Image processing steps

Original Image (CCD1)	Edge Image	Measured object size
Original Image (CCD2)	Edge Image	Measured probe path generation

## 3. 자율측정 알고리즘

기존의 미지의 대상물에 대해 x-, y- 방향의 등간격 측정방식의 샘플링 데이터는 대상곡면을 측정할 때 측정 데이터는 형상이 급변하는 곳에서는 측정점의 부족현상이 발생할 수 있으며, 완만한 곡면에서는 샘플링 데이터의 과잉현상이 발생할 수 있는 단점을 내재하고 있다. 이런 현상은 측정시

간에 영향을 미칠 뿐더러, 불필요하게 많은 측정 데이터는 곡면을 재구성하는 데 있어서 상당한 어려움으로 작용할 수 있다. 이것은 대상곡면에 대해 효과적으로 측정점을 분포시키지 못해서 발생하는 것으로 본 연구에서는 측정 작업을 수행할 때 측정 영역을 분할, 측정점의 위치와 수가 대상곡면을 역공학할 수 행하기 위해 적합한 수준으로 결정할 수 있다. 그리고 사용자의 대상곡면에 대해 정밀도를 향상시키고자 할 때는 정밀도에 관련된 변수를 조절하여 이를 변화시킬 수 있으며, 이는 직접적으로 측정점의 증가로 나타나게 된다.

### 3.1 입력변수

본 자율측정 알고리즘은 Fig. 2 와 같이 PC 와 3 차원 좌표측정기(CMM)간의 상호 통신이 가능하게 구성되어 있으며, 대상 자유곡면을 자율적으로 측정하기 위해서는 미지곡면의 크기( $X_{start}$ ,  $Y_{start}$ ,  $X_{end}$ ,  $Y_{end}$ )와 분할곡면의 정밀도( $\sigma$ ) 두 개의 입력 변수가 필요하다. 입력 변수 중 미지곡면의 크기는 영상 장비를 이용하여 자율적으로 검출된다. 이는 자율측정을 위한 측정영역을 결정하는 것이며, 분할곡면의 정밀도는 전체 대상곡면에 대한 정밀도를 결정하는 변수로 측정점 수를 결정하거나, 대상곡면의 재구성에 있어서도 중요한 변수로 작용한다. 만약 분할곡면의 정밀도를 향상시키면 본 알고리즘에서는 측정점 수를 증가시키며, 대상곡면에 재구성에서도 전체적인 오차를 줄일 수 있다. 정밀도 변수를 제어함으로써 측정점의 수를 조절할 수 있는 기능을 부여하여 대상곡면에 대해 능동적으로 대처할 수 있다.

### 3.2 B-spline 분할곡면을 이용한 측정점 결정

Fig. 3 과 같이 영상기술을 이용하여 대상곡면 형상에 관련된 측정점 4 개와 분할정도를 결정하는 정밀도 변수를 사용자가 결정하면 자율 측정 작업을 수행할 수 있다. 자율 측정 알고리즘은 곡면을 재구성할 곡면 분할점 5 개의 추가적으로 측정작업을 수행하여 전체 곡면 9 개의 점으로 구성하며, 분할 영역은 4 개로 구성된다. 이것은 B-spline 보간 곡면을 구현하기 위한 최소 측정점 수와도 일치하며, 이 측정점들로 B-spline 보간을 이용하여 분할곡면을 생성한다. 분할곡면은 자율측정 알고리즘에서는 측정점 결정과 측정점을 재구성하는데 이용되지만, 이 곡면들을 전체 대상곡면

을 재구성하는데 직접적으로 이용되지는 않는다. Fig. 3 은 4 개의 영역이 사용자가 입력한 정밀도에 만족하지 않으면, 각 영역을 계속적으로 분할 하는 과정을 그림으로 도시한 것이다. 분할여부를 결정하기 위해 기준은 사용자가 정밀도 변수를 결정하지만, 각 영역을 비교하기 위해서는 분할된 곡면을 B-spline 을 이용하여 각각 재구성하여 이의

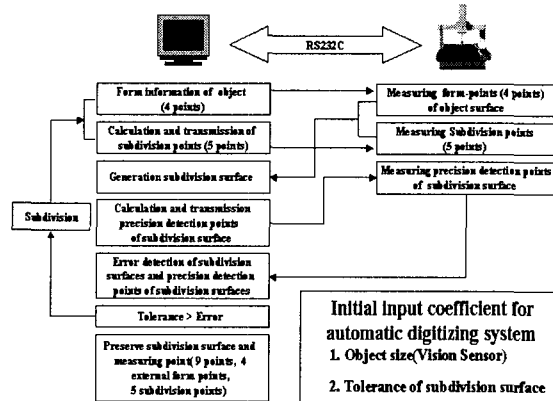


Fig. 2 Proposed automatic digitizing algorithm

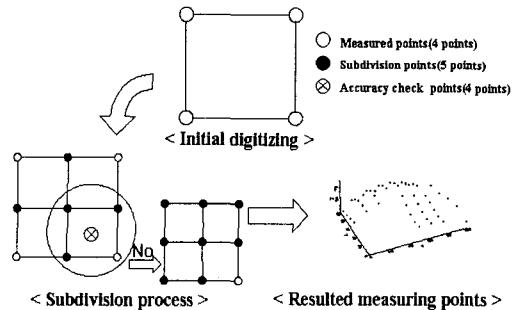


Fig. 3 Proposed digitizing process for unknown free-formed surface

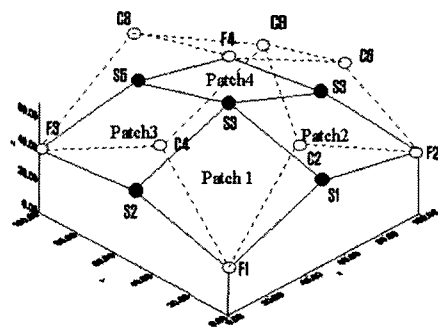


Fig. 4 Divided patches and points

중심점의 데이터와 중심점과 동일한 x-, y- 을 직접 측정하여 이를 비교한 데이터가 사용자가 입력한 정밀도를 만족하지 못할 경우 분할 작업을 지속적으로 수행한다. 분할과 측정작업을 반복적으로 수행함으로써 모든 분할곡면이 최종적으로 허용오차를 만족하였을 때, 대상곡면에 대한 측정점의 수와 위치를 결정할 수 있다.

분할곡면을 측정한 점과 재구성한 분할곡면과의 오차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Error}(e_i) = |A_i(x, y, z) - S_i(x, y, z)|$$

점 A 는 분할곡면의 정밀도를 위해 직접 측정된 점이며, S 점은 B-spline 보간을 이용하여 구한 점이다. Fig. 4 에 분할곡면의 정밀도를 위한 측정점(S3)을 도시화하였다. 분할 곡면을 결정하는 것은 재구성된 영역의 한 점과 재구성한 영역중에 실제 측정한 하나의 점과 비교하여 사용자가 입력한 정밀도와 만족 여부를 판단하여 추가 분할을 결정한다. 또한 분할곡면의 정밀도를 검출하는 점들은 분할곡면 생성 단계에서 곡면 미분 함수를 이용하여 법선방향만큼 반경 보정 작업을 수행하였다. 그러나 자동측정 알고리즘에 의해 결정된 측정점들은 대상곡면의 x-, y- 방향에 대하여 등간격 형태를 갖지 않아, 전체 곡면을 보간 작업을 수행하기 위해서 인위적인 측정점의 재구성 작업을 수행하였다.

### 3.3 측정점 재구성

제시한 알고리즘을 이용하여 얻은 측정점의 분포는 Fig. 3 의 최종 측정점 군과 같은 형태로 구성된다. 이와 같은 불규칙한 형태는 전체 곡면에 대해 보간 작업을 수행하기 어렵고, 재구성된 분할 곡면들은 상위 분할 조정점(control points)들의 영향을 받기 때문에 G<sup>1</sup> 연속 조건을 만족시키기 못해, 각 패치를 이용하여 연결조건을 충족시키기 어렵다. 이러한 이유로 측정점 군을 곡면을 표현하기 용이하게 수정하는 방법을 이용하였다.

측정점 군의 수정은 제시한 방식으로 측정된 점 군과 허용오차를 만족하는 분할곡면의 데이터를 이용하여, 전체 곡면의 보간 작업을 위한 측정점 군의 재구성 작업을 수행하였다.

Fig. 5 의 자동측정 알고리즘을 이용하여 얻은 불규칙한 측정점 군을 Fig. 6 와 같이 전체 곡면에 대한 측정 정보를 x-, y- 방향에 규칙적인 형태로

재조정하였으며, 추가된 점 군은 B-spline 보간을 이용하여 분할과정에서 허용오차를 만족하는 분할 곡면상의 점들을 기존의 측정점의 최소 x-, y- 간격에 맞추어 획득한 점들이다. 영역분할 측정에 의해 얻은 측정점들은 그대로 사용하였으며, 격자 모양에서 비어있는 점군을 분할곡면에서 획득함으로써 대상곡면의 보간에 용이한 형태로 재구성할 수 있었다.

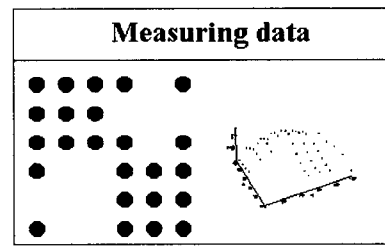
분할곡면을 수식으로 표현하면 다음과 같으며, n 은 분할 횟수를 나타낸 것이다.

- 측정점(measuring points)을 이용한 조정점(control points) 구성

$$\begin{bmatrix} F_3 & S_3 & F_4 \\ S_2 & S_3 & S_4 \\ F_1 & S_1 & F_2 \end{bmatrix}_n \Rightarrow \begin{bmatrix} C_7 & C_8 & C_9 \\ C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix}_n$$

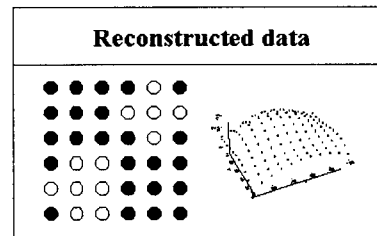
곡면 형상크기 정보 점([F<sub>1</sub>]<sub>n</sub>~[F<sub>4</sub>]<sub>n</sub>)  
 곡면 분할 점([S<sub>1</sub>]<sub>n</sub>~[S<sub>5</sub>]<sub>n</sub>)

위의 각 곡면의 조정점은 측정점을 이용하여 구성하였고, 이를 이용해 재구성한 곡면은 앞에서 제시한 B-spline 보간을 이용하여 구할 수 있다 또한 재분할여부를 결정하는 측정점의 위치는 다음과 같다.



● Measuring points using proposed method

Fig. 5 Measured points using proposed method



○ Additional points

Fig. 6 Reconstructed data

• Accuracy check points(A)

$$A_{x1} = ([F_1]_x + \frac{[F_1]_x + [F_4]_x}{4})_n$$

$$A_{x2} = ([F_1]_x + \frac{3([F_1]_x + [F_4]_x)}{4})_n$$

$$A_{y1} = ([F_1]_y + \frac{[F_1]_y + [F_4]_y}{4})_n$$

$$A_{y2} = ([F_1]_y + \frac{3([F_1]_y + [F_4]_y)}{4})_n$$

4. 곡면 재구성

4.1 B-spline Interpolation(보간)

본 연구에서는 재구성된 점군을 B-spline 보간을 통하여 전체곡면을 구성하였으며, 일반적인 비주기적(non-periodic) B-spline 곡면은 다음과 같이 정의된다.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)P_{i,j}$$

$$0 \leq u \leq n - p + 2, \quad 0 \leq v \leq m - q + 2 \quad \text{---- (1)}$$

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

여기에서  $P_{i,j}$  : control points  
 p, q: order value of u,v direction  
 n, m: number of control points u,v(-1)

측정점을 위의 곡면의 식을 이용하여 centripetal method 에 의해 조정점을 구하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

• Centripetal method :

$$d = \sum_{k=1}^n \sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|} \quad u_0 = 0, \quad u_n = 1$$

$$u_k = u_{k-1} + \frac{\sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|}}{d}, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad \text{---- (2)}$$

$$u_k = \frac{1}{m+1} \sum_{l=0}^m u_k, \quad k = 0, \dots, n$$

측정된 점을 모두 지나는 곡면의 식은 다음과 같이 정의된다.

$$Q_{k,l} = S(u_k, v_l)$$

$$= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u_k)(N_{j,q}(v_l)P_{i,j})$$

$$= \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_k)R_{i,l} \quad \text{----- (3)}$$

$$R_{i,l} = \sum_{j=0}^m N_{j,q}(v_l)P_{i,j}$$

$N_{i,p}(u)$ ,  $N_{j,q}(v)$ 의 역함수를 구하면 새로운 조정점들을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 조정점들을 이용해 Offset Surface 을 생성하고, 측정 프로브의 측정 오차를 보정하여 새롭게 생성된 전체 곡면의 오차를 효율적으로 줄일 수 있다. Fig. 7 에 B-spline 보간을 이용한 곡면 재구성 과정을 나타내었다.

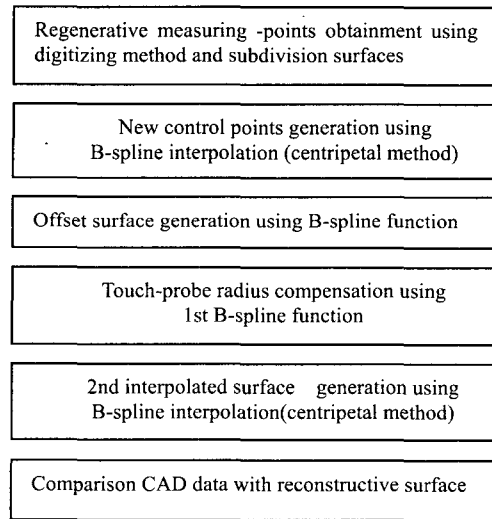


Fig. 7 Surface-reconstruction procedure using B-spline interpolation

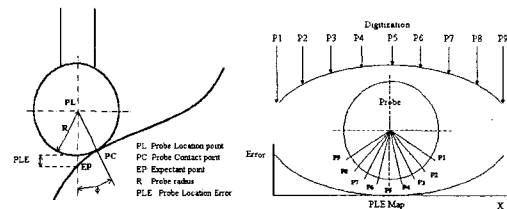


Fig. 8 Probe radius error

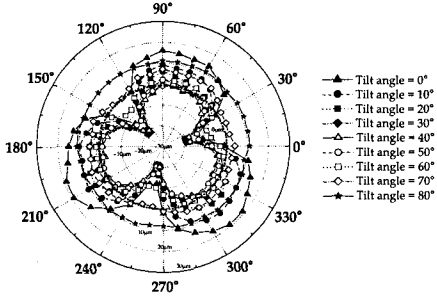


Fig. 9 Pre-travel variation according to tilt and roll angles

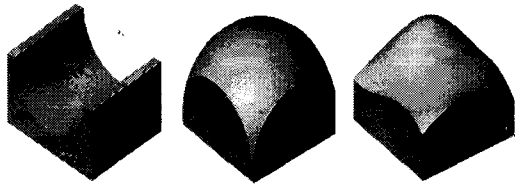


Fig. 10 Object Surfaces

#### 4.2 프로브 오차의 보정

일반적인 측정작업의 경우 CAD 데이터가 주어지므로 측정용 프로브는 오차를 최소화하기 위하여 곡면의 법선방향으로 접근하여 측정작업을 수행한다. 그러나 역공학의 경우에는 대상곡면의 데이터가 주어지지 않으므로 프로브의 인식점과 실제 접촉하는 점과의 차이가 발생하며, 이는 곡면 구성에 있어서 상당부분 오차로 작용한다. 이러한 오차의 양은 Fig. 8 에 나타낸 바와 같이 측정점의 기울기에 따라서 변하게 되므로 적절한 방법을 통하여 보정하여야 한다. 본 연구에서는 곡면의 식으로부터 법선 벡터를 구하고, 프로브의 반경만큼 이동시켜 실제 접촉점의 좌표를 구하였다<sup>[8]</sup>.

### 5. Simulation & 실험

본 연구에서 제시한 방법의 효율성을 검증하기 위하여, Fig. 10 과 같이 대상곡면을 선정하여 제시한 방법에 의하여 시뮬레이션과 실험을 하였다. 이때 대상곡면에 대한 분할곡면의 허용오차는 0.1mm 로 하였다

#### 5.1 Simulation

Fig. 10 에 나타낸 곡면들을 대상으로 자동측정

방식에 의해 측정작업을 시뮬레이션하였고, 측정점의 위치와 완성곡면은 Fig. 11 에 그림으로 도시하였다. 자유곡면의 응용여부를 검증하기 위해 실린더와 부분반구에 대해 시뮬레이션을 일차적으로 수행하였으며, 이들은 시뮬레이션 결과, 곡면의 디지털이징에서 많은 측정오차가 발생 하는 부분에 측정점군이 집중되는 것으로 나타나, 자유곡면의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 자유곡면을 포함한 대상 곡면들의 시뮬레이션 결과는 Table 2 와 같다. 결과에서 보는 바와 같이 자유곡면의 경우 현재 일반적으로 사용되고 있는 x-, y- 등간격 측정방식에 비하여, 본 연구에서 제시한 방법으로 측정작업을 수행했을 경우, 유사한 오차 한도 내에서 측정점의 수를 약 37% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 측정시간 또한 이에 비례하여 줄어들었다.

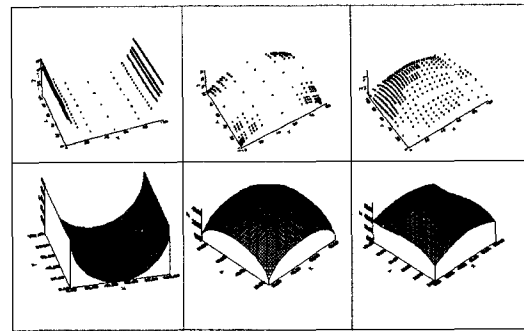


Fig. 11 Measuring points locations and reconstructed surfaces using proposed method

Table 2 Simulation results

surface	content	Measuring points	RMS error(mm)
	cylinder	153	0.00801
	Partial hemisphere	196	0.01134
Free-formed surface	Equi-interval Measuring	625	0.019034
	Proposed method	535	0.02026

#### 5.2 대상곡면 가공 및 측정장비

대상곡면에 대한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실제 대상곡면을 가공하여 본 알고리즘을 이용, 측정작업을 수행하였다. 모든 가공은 현대 vertical CNC machining center HiMac-100에서 가공하였으며, 공작물의 재질은 MC (Methylene

Chloride)로 하였다. 가공오차를 줄이기 위하여 황삭과 정삭을 수행하였고, 정삭은 2 날  $\phi 10$  볼 엔드 밀을 사용하였다. 허용가공오차는 0.1mm 이다. 측정장비는 Zeiss 사의 MC550 CMM 으로 반복 정밀도는 3  $\mu\text{m}$ 이며, 최대오차는 0.5  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 PC 와 CMM 과의 상호통신은 RS232C 를 이용하여 통신 프로그램을 Visual C++로 자체 제작하였다. Fig. 12 는 실질적인 실험을 위한 대상곡면의 가공과 측정장비를 도시화하였다.

### 5.3 실험결과

시뮬레이션을 수행하여 알고리즘의 효율성을 검증하였고, 이를 적용하여 3 가지 형상에 대하여 측정하였다. Fig. 13 은 3 차원 측정결과를 도시화한 것이다. 실린더와 부분 반구의 경우에는 측정점의 수와 위치가 시뮬레이션 결과와 같게 나타났으며, 자유곡면의 경우에는 다소 측정점이 증가함을 알 수 있었다. 이는 가공공정의 가공오차와 측정 당시의 측정 오차가 다소 포함되어 분할곡면의 분할 과정에 영향을 주어 상대적으로 측정점 수가 증가한 것으로 사료된다. Table. 3 은 실험데이터를 이용하여 곡면을 재구성한 결과를 나타내었다. 곡면구성에서의 RMS 오차가 다소 시뮬레이션 결과와 차이를 보이는 것은 실제 가공물에 가공오차와 대상물을 측정 할 때 생기는 오차가 여전히 곡면 구성에 작용하는 것으로 보인다. 또한 PC 와 CMM 과의 상호 통신에 있어서 시간적인 간격이 발생할 수도 있으나, 분할곡면의 생성할 때 B-spline 보간에 있어서 최소 조정점을 사용하였기 때문에 이러한 현상은 관찰할 수 없었다. 자유곡면을 대상으로 실험한 결과, 측정점 수를 기존의 등간격 측정 방식에 비하여 본 연구에서 제시한 알고리즘을 사용하였을 경우 약 15% 정도를 줄일 수 있었으며, 이에 상응하는 측정시간 또한 줄일 수 있었다. 또한 가공오차와 측정시 측정오차를 줄일 수 있다면, 효율성은 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다

### 6. 결론

본 연구는 미지의 자유곡면의 역공학에 있어서 영상처리 기술과 자율 측정 알고리즘을 이용하여 효율적인 측정점 수와 위치를 결정하는 방법을 제안하였고, 측정경로를 결정함으로써 측정 이동거리와 측정시간을 단축시켰다. 또한 기존의 등간

격 측정이 가지고 있는 측정점 수의 증가 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 방법이라고 사료되며, 일련의 시뮬레이션과 실험을 통하여 이의 타당성을 입증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

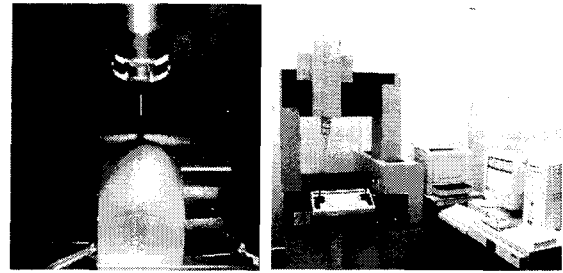


Fig. 12 Machining process and CMM using automatic digitizing system

Table 3 Experimental results

surface	content	Measuring points	RMS error(mm)
Cylinder		153	0.0001
Partial hemisphere		196	0.00013
Free-formed surface	Equi-interval Measuring	625	0.003356
	Proposed Method	396	0.003265



Fig. 13 Measuring results using proposed automatic digitizing system

- (1) 설계 데이터를 알지 못하는 자유곡면의 역공학시 대상곡면의 본 논문에서 제시한 영상 처리 기술과 곡면분할 알고리즘을 이용하여, 일반적으로 3 차원 측정기에서 사용되는 등간격 측정을 이용한 측정점 수에 비해 동일한 오차 범위 내에서 제시한 방법으로 수행할 경우 측정점 수를 대폭 감소시킬 수 있다.
- (2) 접촉식 측정장비를 이용할 경우, 프로브의 범선 방향과 프로빙 오차를 보정하여, 보다 정확한 측정작업을 수행하였다.

- (3) 미지의 곡면의 측정시 프로브의 이동경로를 영상처리 기술과 병합하여 측정에 소요되는 시간을 최대한 단축시켰다.

### 후 기

본 연구는 인하대학교 2001 년도 교내 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과의 일부입니다.

### 참고문헌

1. C. K. Song, S. W. Kim, "Autonomous digitization of Free-form surface on a CNC coordinate measuring machine," *Int. J. Machine Tools Manufacture*, Vol. 37, No. 7, pp. 1041-1051. 1997.
2. J. H. Cho, "Integrated computer-aided manufacturing system for Multi-patch sculptured surfaces," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago, 1995.
3. Les Piegl, Wayne Tiller, "The NURBS book," Springer, 1995.
4. M. W. Cho, "Flexible Inspection System Using CAD Database and Vision Guided Coordinate Measuring Machine," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago, 1993.
5. M. W. Cho, K. Kim, "New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine," *International Journal of production research*, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444, 1995.
6. Rida T. Farouk, "On integrating lines of curvature," *Computer aided geometric design*, Vol. 15, pp. 187-192, 1998.
7. 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.
8. 남우선, 정성중, "3 차원 자유곡면 언더머신 측정 및 검사 시스템 개발, " 97 년 추계학술대회 논문집, pp. 911-914, 1997.
9. 장동고, 김광수, "3 차원 측정 데이터의 그래프 리 곡면으로의 근사," 98 년 CAD/CAM 학술발표 논문집, pp. 368-374, 1998.