

## 역공학에서 Z-map을 이용한 특징형상 탐색 및 영역화

김재현\*, 신양호\*, 박정환\*\*, 고태조\*\*, 유우식\*\*\*

### Feature Recognition and Segmentation via Z-map in Reverse Engineering

Jae Hyun Kim\*, Yang Ho Shin\*, Jung Whan Park\*\*, Tae Jo Ko\*\*, Woo Sik Yoo\*\*\*

#### ABSTRACT

The paper presents a feature recognition and segmentation method for surface approximation in reverse engineering. Efficient digitizing plays an important role in constructing a computational surface model from a physical part-surface without its CAD model on hand. Depending on its measuring source (e.g., touch probe or structured light), each digitizing method has its own strengths and weaknesses in terms of speed and accuracy. The final goal of the research focuses on an integration of two different digitizing methods: measuring by the structured light and that by the touch probe. Gathering bulk of digitized points (i.e., cloud-of-points) by use of a laser scanning system, we construct a coarse surface model directly from the cloud-of-points, followed by the segmentation process where we utilize the z-map filleting & differencing to trace out feature boundary curves. The feature boundary curves and the approximate surface model could be inputs to further digitizing by a scanning touch probe. Finally, more accurate measuring points within the boundary curves can be obtained to construct a finer surface model.

**Key Words** : Reverse Engineering (역공학), Z-map (지-맵), Feature (특징형상), Segmentation (영역화)

#### 1. 서론

최근 복잡한 자유곡면 형상을 갖는 제품을 제조하기 위해, 실물모형으로부터 기하학적인 형상정보를 추출하여 실물을 재생산하는 과정인 역공학(reverse engineering)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[1-6]</sup>. 효과적인 역공학을 위해서는 신속하고 정확하게 실물 모형에 대한 점 데이터 획득이 이루어져야 하며, 점 데이터 획득 방법으로는 적용 센서의 종류에 따라 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다<sup>[7-11]</sup>.

일반적으로 접촉식은 비접촉식에 비해 측정 속도가 느린 반면 측정 정밀도는 더 좋으며, 비접촉식은 이와 반대이다<sup>[15]</sup>. 특히 역공학을 목적으로 측정할 때는 많은 점 데이터를 획득해야 하는데, 접촉식은 비접촉식에 비해 정밀한 측정은 가능할지 몰라도 많은 작업자의 개입이 필요하여 비능률적이다<sup>[15]</sup>. 이러한 관점에서 3차원 측정기나 디지털링머신 등에서 물체의 측정시 신속한 측정, 측정 자동화 및 CAD 모델링에 관한 연구가 필요하다고 보겠다. 이와 관련하여 비전 등의 비접촉식 측정에 의한 검사 또는 곡면 생성에 대해서도 다양한 연구를

2002년 5월 3일 접수

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

\*\*\* 인천대학교 산업공학과

를 찾을 수 있으며<sup>[12-14]</sup>, 비접촉식과 접촉식 센서의 융합을 이용한 연구도 활발하게 진행되고 있다<sup>[15-16]</sup>.

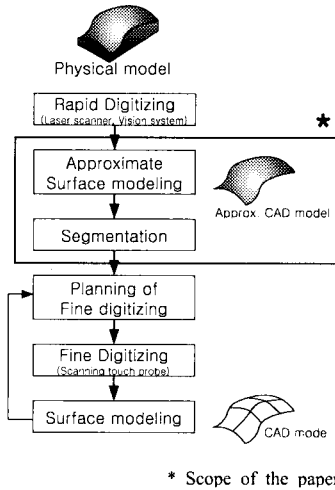


Fig. 1 Overall procedures and scope of the paper

한편, Fig. 1은 역공학 중에서 센서융합 방식에 의해 실물 모형으로부터 CAD 모델을 구축하기 위한 하나의 과정을 보이고 있다. 이 과정은 우선 레이저 스캐너 또는 비전 시스템 등의 비접촉식 측정기를 이용하여 실물 모형으로부터 다량의 3차원 측정 데이터를 획득하여 근사 곡면 모델을 구축한 후, 정밀 측정을 위한 영역을 구분하고(segmentation), 각 영역에 대해 접촉식 정밀 측정을 수행함으로써 곡면 CAD 모델을 생성하는 일련의 절차로 구성된다. 따라서 특징형상을 탐색한 후 영역화를 시키는 것은 정밀한 측정점의 획득에 있어서 가장 중요한 부분이다.

본 연구에서는 Fig. 1의 과정에서 비접촉식 측정 장비로부터 얻어진 3차원 점군 데이터(cloud-of-points data)를 이용하여 근사곡면(z-map)을 생성하고, 정밀한 접촉식 측정을 위한 영역화 작업에 관한 내용을 다루고 있다. 2장에서는 근사곡면 구축 과정을 살펴보고, 3장에서는 영역화 작업을 위해 특징형상을 구분하여 정의하고 특징형상의 경계를 탐색하여 영역 경계곡선을 추출하는 과정을 다루고 있다.

## 2. 근사 곡면 생성

### 2.1 Z-map 모델

대량의 점군 데이터로부터 직접 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 등의 매개변수형 곡면(parametric surface) 모델<sup>[20]</sup>을 얻어내는 것이 쉽지 않기 때문에, 본 연구에서는 근사 곡면모델로서 z-map을 선택하였다. Z-map은 알려진 바와 같이 자료구조가 간단하고, 오프셋팅(offsetting)이나 블렌딩(blending)등의 곡면 조작이 매우 편리하다는 장점을 가지고 있다<sup>[21-22]</sup>. 이러한 장점은 3장에서 설명하는 영역화 작업을 단순하게 처리할 수 있도록 도와준다.

Fig. 2는 z-map의 자료구조를 보이고 있다. 그림에서 보듯이 xy 평면상에 일정한 간격(grid-interval)으로 격자점(grid-point)을 정의하고, 각 격자점에서의 곡면 높이값을 저장하는 형식이다.

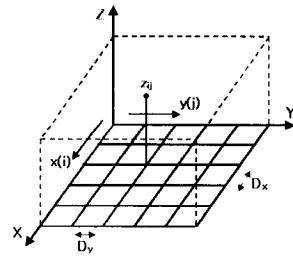


Fig. 2 Z-map model

### 2.2 Z-map 구축

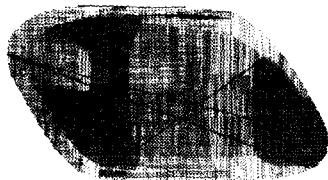
본 연구에서는 상용 3차원 레이저 스캐너 SURVEYOU 1200(Laser Design Inc., USA)을 이용하여 대량의 점군 데이터를 획득하고, 이를 근사 곡면모델 생성을 위한 입력 데이터로 사용하였다.

Fig. 3은 육조에 대해서, 본 장비에서 획득한 점군 데이터의 예를 보이고 있다.

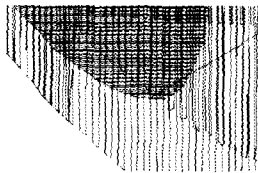


Fig. 3 Sample of the cloud-of-points data

본 점군 데이터는 Fig. 4에서 보듯이, 연속된 3차원 점열(point sequence)로 구성되고 zig-zag 패턴을 가진다. 또한 일부 영역에 대해서는 추가적인 측정을 수행함으로써 영역별 측정 데이터가 혼재되어 있는 경우도 있다. 이러한 형태의 점군 데이터를 이용하여 z-map 격자점 높이값을 계산하기 위해서는, 개별 측정 경로(path)를 분리하여 적절하게 활용할 필요가 있다.



(a) Overall view



(b) Magnified view (partial)

Fig. 4 Example of cloud-of-points data

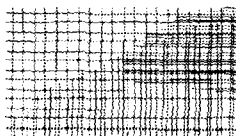
본 연구에서는 각 측정 점(point)을 연결하는 선분간의 꺾임 각도를 이용하여 zig-zag 패턴으로 연결된 경로를 개별 경로로 Fig. 5(a)에서 Fig. 5(b)처럼 분리하였다. Fig. 5(c)는 처리한 경로의 예를 나타낸다.



(a) Input linked paths



(b) Processed paths

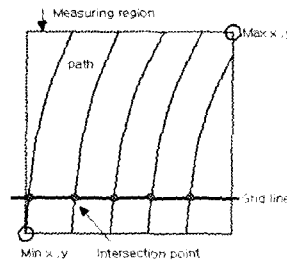


(c) Example of the processed paths

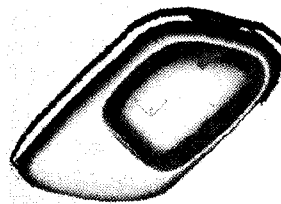
Fig. 5 Processing of input paths

입력 점군 데이터를 개별 경로로 분리하는 작업을 마치면, 순차적인 경로 집합을 이용하여 z-map 격자점 높이값을 계산하는 과정을 거친다. 일반적으로, 두 개의 연속된 경로 곡선으로 삼각형 망을 구성하여 각 삼각형에 포함되는 격자점 높이값을 계산하는 방식이 가능하지만, 본 연구에서는 삼각화 과정이 없는 별도의 계산방식을 적용하였다.

우선 연속된 N개의 경로에 대해, xy 평면에서 보았을 때 이 경로들과 만나는 각도가 더 큰 격자방향(x 또는 y)을 정한다. Fig. 6-(a)의 경우는 x 방향이다. 다음으로 이 격자방향과 평행한 z-map 격자선분(grid-line)에 대해, 주어진 경로와 교차하는 지점(intersection point)의 높이값을 모두 계산한다. 이후 이 격자선분 위에 놓이는 z-map 격자점 높이값은 앞서 계산된 격자선분 높이값들의 선형보간으로 구하도록 하였다. Fig. 6-(b)는 Fig. 4에 보인 입력데이터를 이용하여 구축한 z-map 모델의 예를 보이고 있다.



(a) Z-value update from the N-paths



(b) Example of the z-map model

Fig. 6 Z-map construction

### 3. 영역화 작업

#### 3.1 특징형상 및 영역경계의 정의

많은 경우 급형 형상 등의 산업용 곡면 모델은 다수의 단위곡면으로 구성되는 복합곡면(compound

surface)으로 이루어지며, 주요 형상 간 경계 부위는 대체로 연접곡면(blend)<sup>[20]</sup> 또는 꺾인 모서리(sharp edge)로 구성된다고 할 수 있겠다. 일반적으로 연접곡면은 위상학적 측면에서 'edge-blend' 및 'corner-blend'로 나누어 생각할 수 있는데 본 연구에서는 일차적으로 'edge-blend'만을 대상으로 한다. 또한 연접반경이 일정한 'constant-radius blend'와 연접반경이 변화하는 'variable-radius blend'에 있어서는 전자의 경우만을 고려하기로 한다.

Fig. 7은 전형적인 꺾인 모서리 및 연접곡면의 예를 보이고 있는데, 연접곡면의 경우 오목한 경우를 필렛(fillet), 볼록한 경우를 라운드(round)로 칭하기도 한다.

본 연구에서는 연접곡면 및 꺾인 모서리를 특징형상(feature)으로 정의하고 영역화 작업(segmentation)을 수행하고자 한다. 즉 형상곡면에서 상기 특징형상을 파악하고, 특징형상의 경계(영역경계)를 추출하고자 한다. 특징형상을 다시 정리하면 다음과 같다.

- 오목한 꺾인 모서리 (concave sharp-edge) (Fig. 7(a))
- 볼록한 꺾인 모서리 (convex sharp-edge) (Fig. 7(b))
- 볼록한 연접 곡면 (convex blend) (Fig. 7(c))
- 오목한 연접 곡면 (concave blend) (Fig. 7(d))

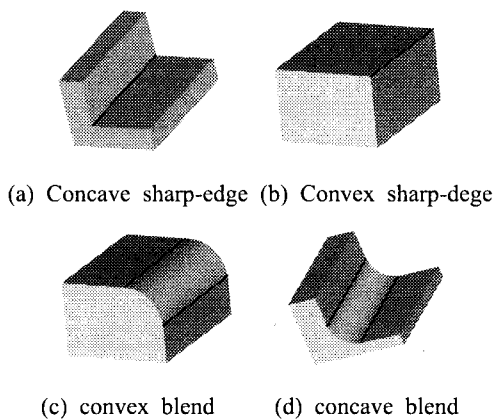


Fig. 7 Features and feature-boundary curves

### 3.2 특징형상 영역 탐색 및 경계곡선 추출

#### 3.2.1 꺾인 모서리 특징형상

본 연구에서 형상곡면 모델은 2절에서 생성한

z-map이며, 이와 같은 z-map 모델로부터 오목한 꺾인 모서리를 탐색하는 문제는 저자에 의해 수행된 기존 연구<sup>[22]</sup>를 활용하였다.

우선 형상곡면에서 오목한 꺾인 모서리 존재 여부를 파악하는 과정을 살펴보자. 본 연구에서는 읍셋팅 및 블렌딩 작업이 간편한 z-map의 장점을 활용한 mark-map(M-map)을 구축함으로써 본 특징형상 존재를 알 수 있도록 하였다. M-map을 구축하는 과정을 Fig. 8에 보이고 있다.

부연 설명하면, 먼저 형상곡면 z-map에 대해 미소량  $\rho$ 로 필렛팅을 수행한 z-map을 계산하고(F z-map), 본 필렛 z-map과 형상곡면 z-map간의 차이(difference)를 계산한 z-map을 D z-map이라 하자. 그러면, 오목한 꺾인 모서리 또는 반경이  $\rho$ 보다 작은 오목한 연접곡면 영역에서 D z-map의 높이값  $Z_{ij} = 0$ 이 아닌 값을 가지며, 기타 부위는 모두 0의 값을 가지게 된다. 따라서 D z-map의 높이값 정보로부터 다음과 같이 최종적으로 M-map의 각 격자점 정보를 저장하도록 한다. 즉,

If  $Z_{ij}$  of D z-map  $> \epsilon$ , then  $M_{ij} = 1$   
Else  $M_{ij} = 0$ .

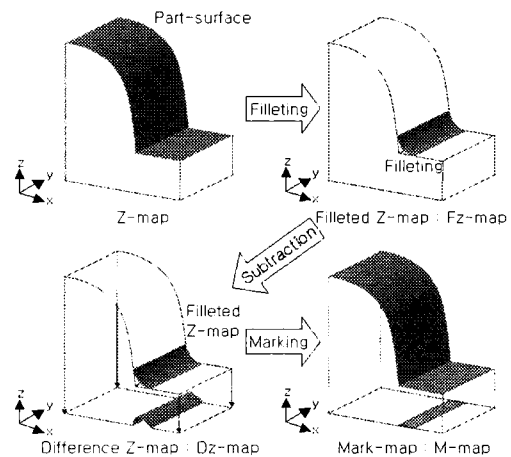


Fig. 8 Steps for generating M-map of concave sharp-edge

본 연구의 경우  $\rho=3v$ ( $v$ : 격자간격)로 주었으며, 이후 오목한 꺾인 모서리 추출은 M-map을 이용하게 된다. 오목한 꺾인 모서리 격자점을 연속된 점열 곡선으로 추출하는 과정은 별도 연구<sup>[22]</sup>를 참조하면 된다. 이상의 과정을 정리하면 다음과 같다.

**Procedure Get\_Sharp\_Edge\_Curves (Z → C)**

1. Input: z-map Z;
2.  $R_f = \rho$  ;
3. F z-map ← Filletting(Z,  $R_f$ );
4. D z-map ← Difference(F-Z);
5. Construct M-map;
6. Trace sharp-edge points via M-map;
7. Return sharp-edge curves C;

다음으로 '블록한' 꺾인 모서리를 탐색하는 문제를 살펴보면, 이는 형상곡면 z-map에 대해 인버팅 변환을 적용함으로써 쉽게 해결된다. 즉 인버팅 변환을 통해 '블록' 형상은 '오목' 형상으로 변화하게 되므로, 앞서의 과정을 동일하게 되풀이 적용할 수 있다.

**3.2.2 연접곡면 특징형상**

연접곡면 특징형상에 대해서도 3.2.1절과 유사한 알고리즘을 적용할 수 있다. Fig. 8에서 형상곡면 z-map상에 오목한 꺾인 모서리 대신에 반경이 R인 오목한 연접곡면이 있을 경우, 반경  $\rho = R + \rho$  로 두고 본 과정을 수행하면 연접곡면 영역을 나타내는 M-map을 얻을 수 있다 ( $\rho = R$ 로 두면 D z-map의 모든  $Z_{ij}=0$ 이다). Fig. 9에 이 과정을 보이고 있다.

블록한 연접곡면에 대해서도 인버팅 변환을 통해 동일한 과정을 거쳐 영역 탐색을 수행할 수 있으며, 영역경계곡선은 M-map에서  $M_{ij}=0$  및  $M_{ij}=1$ 인 격자 점을 연속적으로 추적하여 점열곡선으로 얻을 수 있다. 이상의 과정을 정리하면 다음과 같다.

**Procedure Get\_Blend\_Bndry\_Curves (Z, R → C)**

1. Input: z-map Z, blending radius R;
2.  $R_f = R + \rho$  ;
3. F z-map ← Filletting(Z,  $R_f$ );
4. D z-map ← Difference(F-Z);
5. Construct M-map;
6. Trace boundary curves via M-map;
7. Return boundary curves C;

**3.2.3 영역경계의 개선**

연접곡면 특징형상의 경우 본 알고리즘을 적용하였을 때 얻어지는 영역경계는 실제 연접곡면 경계와는 약간의 차이가 있게 된다. Fig. 10에서와 같이 연접반경 R인 연접곡면의 2차원 단면에서 본 알고리즘을 적용한 경우를 보면, 실제 경계점과 M-map의 경계점간의 거리는  $\rho \tan(\theta/2)$  만큼 차이가 있음을 알

수 있다.

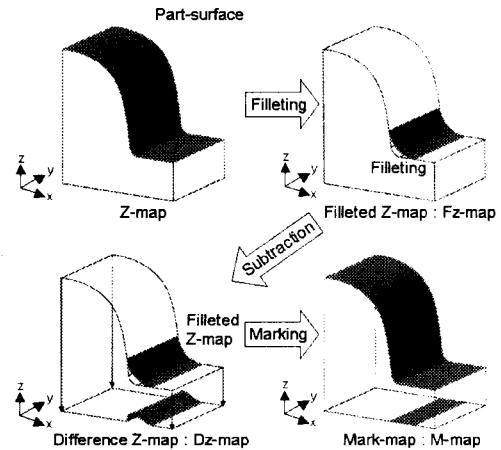


Fig. 9 Steps for generating M-map of concave blend

따라서 보다 세밀한 영역경계를 추출하기 위해서는 M-map으로 추출한 경계곡선을  $\rho \tan(\theta/2)$  만큼 수정하여야 한다.

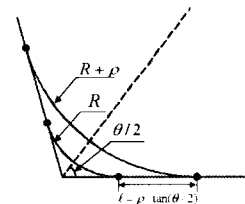


Fig. 10 Gap between true feature boundary and marked feature boundary

**3.3 다양한 연접반경에 대한 적용**

본 절에서는 실제 형상에 대해 3.2절의 특징형상 경계추출 알고리즘을 적용하는 전체적인 과정을 살펴보도록 한다. 실제 제품 형상의 경우 많은 모서리 연접곡면(edge-blend)이 존재하고 각 연접곡면의 연접반경(blending radius) 또한 다양하다. 게다가 측정데이터를 취득한 실물의 CAD 모델이 존재하지 않을 경우 각각의 연접반경을 미리 알기는 매우 어려운 일이다. 만약 추출하고자 하는 연접곡면의 연접반경을 안다면 3.2.2절의 단위 과정(Get\_Blend\_Bndry\_Curves)을 통하여 간단하게 영역경계를 추출할 수 있다. 따라서, 꺾인 모서리 곡선을 제외한 연접곡면 경계곡선 추출을 위해서는 상기 단위 과정

을 활용한 별도의 추출과정이 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 연접반경 범위 내에서 순차적으로 연접곡면 영역경계를 추출해 나가는 방식을 고려하였다.

주어진 입력데이터는 형상 z-map, 최소 연접반경  $R_{min}$  및 최대 연접반경  $R_{max}$ 라 하자. 먼저  $R_1=R_{min}$ 에 대해 모든 영역경계곡선 집합  $\{C^i; i=1, \dots, m\}$ 을 추출한다. 다음으로  $R_2=R_1+r$  ( $r$ 은 step)에 대해 모든 경계곡선  $\{C^k; k=1, \dots, n\}$ 을 추출하고, 이때 만든 mark-map을  $M^2=\{M^2_k; k=1, \dots, n\}$ 라 하자. 여기서  $M^2_k$ 는 개별 연접곡면으로 형성된 국소 특징영역을 의미한다. 이제 각각의  $M^2_k$ 가 앞서 추출한 개별 경계곡선  $C^i$ 를 포함하는지를 검사한다. 만약  $M^2_k$ 가 포함하는  $C^i$ 가 존재한다면, 곡선  $C^k$ 를 버리도록 한다. 즉  $M^2_k$ 에 해당하는 연접반경은  $R_2$  보다는  $R_1$ 에 가깝다고 판단하기 때문이다. 본 과정은 다음과 같이 정리할 수 있겠다.

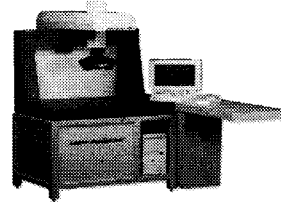
**Procedure Get\_All\_Feature\_Bndry\_Curves** ( $Z, R_{min}, R_{max} \rightarrow C$ )

1. Input: z-map  $Z$ , minimum blending radius  $R_{min}$ , maximum blending radius  $R_{max}$  ;
2. Get\_Sharp\_Edge\_Curves  $\rightarrow j=0, \{C\}^j$  ;
3. For  $R = R_{min}$  to  $R_{max}$ , step =  $r$  do {
  - $j = j+1$  ;
  - Get\_Blend\_Bndry\_Curves( $R$ )  $\rightarrow \{C\}^j, M^j$  ;
  - For all  $M_k$  in  $M^j$  do {
  - If  $M_k \supset C^{j-1}$ , then remove  $C^j_k$  from  $\{C\}^j$  ;
  - }
4. Return all feature boundary curves  $C$ ;

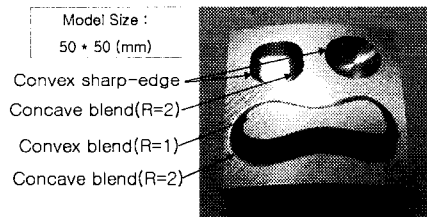
#### 4. 적용 사례

본 연구에서는 Fig. 11-(a)에 보인 Surveyou 1200 레이저 스캐너를 사용하여 3차원 측정 데이터를 획득하였으며, Fig. 11-(b)에 측정에 사용된 테스트 모델을 보이고 있다.

Fig. 12는 측정 데이터 및 z-map 모델을 보이고 있다. 본 연구에서는 z-map 격자점 간격 $v$ 를 0.1로 두었다.



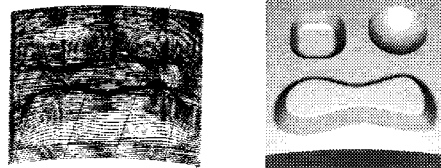
(a) Surveyou 1200 (Laser Design Inc.)



(b) Physical model

Fig. 11 Experimental environment

본 모델에 대해 쥐인 모서리 특징형상을 추출한 곡선을 Fig. 13에 보이고 있으며, 연접곡면 특징형상 경계곡선을 추출한 결과를 Fig. 14에 보이고 있다.



(a) Scanned 3D data (b) Part-surface z-map

Fig. 12 Digitized data and z-map model

Fig. 13 Sharp-edge feature curves

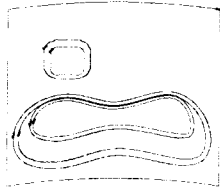


Fig. 14 Blend feature boundary curves

### 5. 결론 및 토론

본 연구에서는 비접촉식 측정기에 의해 대량으로 획득한 점군 데이터를 이용하여 z-map에 의한 근사 곡면을 구축한 후, 이로부터 특징형상의 영역 경계곡선을 추출하는 과정을 살펴보았다. 이와같은 영역 경계곡선은 센서융합 측정시 정밀 접촉식 측정을 위한 영역곡선(area 및 island)으로 사용할수 있다.

본 연구에서는 모두 4가지 특징형상—오목(불록)하게 꺾인 모서리 및 오목(불록)한 연접곡면—을 고려하였으며, 이러한 특징형상 부위 추출을 위하여 F z-map(fillet z-map) 및 D z-map(difference z-map)을 활용하였다. 특히 z-map은 읍셋팅이나 인버팅 등의 곡면 조작이 매우 간단하고 계산의 강건성(robustness)이 좋기 때문에 이와 같은 알고리즘을 적용하기에 적절한 곡면 모델로 사료된다. 다만 형상표현의 제약, 메모리 등의 단점이 있기에 상용 CAM 시스템에서 적용할 경우에는 별도의 보조 모델을 채용하여 정밀도 및 메모리 문제를 해결하기도 한다<sup>[21]</sup>.

본문에서 언급한 정확한 영역경계 추출을 위한 개선 노력(3.2.3절), 다양한 연접반경에 대한 실제 적용(3.3절), 그리고 가변반경 연접곡면 추출 등에 대해서는 심도있는 연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 2000-2-30400-002-3)지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. L. Chen and G. Lin, "An integrated reverse engineering approach to reconstruction free-form surfaces," *Computer Integrated Manufacturing Systems*,

Vol. 10, No. 1, pp. 49-60, 1997.

2. A. Lin, S. Lin and T. Fang, "Automated sequence arrangement of 3D point data for surface fitting in reverse engineering," *Computers in industry*, Vol. 35, pp. 149-173, 1998.

3. Q. Peng and M. Loftus, "A new approach to reverse engineering based on vision information," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 881-899, 1998.

4. A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Swieszkowski and Z. Lechniak, "Reverse engineering of free-form surface," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128-132, 1998.

5. S. W. Kim, Y. B. Choi and J. T. Oh, "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moiré topography," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 389-401, 1999.

6. 이현직, 고태조, 김희술, "점 데이터의 Rational B-spline 근사를 통한 역공학," *한국정밀공학회지*, 제16권, 제5호, pp. 160-168, 1999.

7. W. T. Estler, S. D. Phillips, B. Borchardt, T. Hopp, C. Witzgall, M. Levenson, K. Eberhardt, M. McClain, Y. Shen, and X. Zhang, "Error compensation for CMM touch trigger probes," *Precision Engineering*, Vol. 19, pp. 85-97, 1996.

8. 김선호, 김인훈, "Scanning Probe를 이용한 OMM (On the Machine) 시스템 개발 및 평가," *한국정밀공학회지*, 제13권, 제10호, pp. 71-77, 1996.

9. J. J. J. Dirckx, W. F. Decraemer, and G. Dielis, "Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from moire topograms," *Applied Optics*, Vol. 27, No. 6, pp. 1164-1169, 1988.

10. Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita, "Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-Ray Projections," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-4, No. 6, pp. 641-646, 1982.

11. 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM 시스템에서의 측정오차 해석," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제5호, pp. 34-42, 1998.

12. Y. Takeuchi, H. Shimizu and I. Mukai, "Automatic

- measurement of 3-Dimensional coordinate measuring machine by means of CAD and image data," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 565-568, 1990.
13. M. W. Cho, M. K. Kim and K. Kim, "Flexible inspection system based on a vision guided coordinate measuring machine," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.
14. 최이배, "영사식 다중 슬릿빔 토폴로그래피를 이용한 사람 얼굴의 삼차원 형상측정시스템 개발," 공학석사학위논문, 한국과학기술원, 1993 .
15. 박영근, 고태조, 김희술, "역공학에서 센서융합에 의한 효율적인 데이터 획득," *한국정밀공학회지*, Vol. 18, No. 9, pp. 61-70, 2001.
16. 이현직, 고태조, 김희술, "센서 융합을 통한 효과적인 디지털이징에 의한 역공학," *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 419-422, 1999.
17. 양민양, 이용기, "역공학을 위한 측정점의 영역화," *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, Vol 4. No. 3, pp. 173-179, 1999.
18. B. Sarkar and C-H Menq "Smooth-surface approximation and reverse engineering," *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 9, pp. 623-628, 1991.
19. M. A. Wani and B. G. Batchelor, "Edge-Region-based Segmentation of Range Images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 3, pp. 314-319, 1994.
20. B. K. Choi, *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1991.
21. 박정환, 정연찬, 최병규, "Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제11호, pp. 180-188, 1998.
22. 박정환, 김보현, 최병규, "가상 측정을 통한 펜슬 곡선 추출," *한국 CAD/CAM 학회 논문집*, 제2권, 제4호, pp. 253-266, 1997.