한국 CAD/CAM 학회 논문집
제 4권 제 3호 1999년 9월 pp. 173-179

학술논문

역공학을 위한 측정점의 영역화

양민양*, 이응기**

Segmentation of Measured Point Data for Reverse Engineering

Min-yang Yang* and Eung-ki Lee**

ABSTRACT

In reverse engineering, when a shape containing multi-patched surfaces is digitized, the boundaries of these surfaces should be detected. The objective of this paper is to introduce a computationally efficient segmentation technique for extracting edges, and partitioning the 3D measuring point data based on the location of the boundaries. The procedure begins with the identification of the edge points. An automatic edge-based approach is developed on the basis of local geometry. A parametric quadric surface approximation method is used to estimate the local surface curvature properties. The least-square approximation scheme minimizes the sum of the squares of the actual Euclidean distance between the neighborhood data points and the parametric quadric surface. The surface curvatures and the principal directions are computed from the locally approximated surfaces. Edge points are identified as the curvature extremes, and zero-crossings, which are found from the estimated surface curvatures. After edge points are identified, edge-neighborhood chain-coding algorithm is used for forming boundary curves. The original point set is then broken down into subsets, which meet along the boundaries, by scan line algorithm. All point data are applied to each boundary loops to partition the points to different regions. Experimental results are presented to verify the developed methods.

Key words : Reverse Engineering, Segmentation, Parametric Quadric Surface, Principal Direction

1. 서 론

제품의 형상이 다양해짐에 따라 자유 곡면을 갖는 제품의 효율적인 생산은 현대 산업의 매우 중요한 과제가 되었다. 자유 곡면을 포함하고 있는 형상의 모델링을 위하여 컴퓨터 원용 설계(Computer-Aided Des-ign; CAD)가 널리 사용되고 있으나, 많은 제품은 여러 가지 이유로 실제 모델로부터 형상을 측정하여 형상 모델을 재구성하는 역공학(Reverse Engineering)이 이용되고 있다[1].

역공학의 첫 과정은 실제 모델로 형상을 측정하여 측정 데이터를 얻는 것이다. 경계를 포함하는 형상이 측정되었을 때 형상 모델링을 위하여 경계를 검출하고, 그 경계에 따라 측정 데이터를 분할한 후 각 영역별로 곡면을 재구성하는 것이 요구된다[2-4].

*종신회원, 한국과학기술원 기계공학과
**한국과학기술원 기계공학과

형상의 경계를 검출하기 위한 기존의 연구들은 면 기반 방법(face-based method)과 경계 기반 방법(edge-based method)으로 대별될 수 있다[5-9].

면 기반 방법은 각 점이 주변의 점들과 특성이 같은 지를 비교하여 영역을 확장하면서 곡면을 생성하는 방법이다. 면 기반 방법은 기본 도형으로 이루어진 형상에 적합한 방법으로 자유 곡면이 포함된 형상에의 적용은 바람직하지 않다.

경계 기반 방법은 경계 인식(edge detection)과 연결(linking)의 두 단계로 이루어진다. 즉, 형상에 포함된 경계를 찾고, 불연속적인 경계점들을 연결하여 연속된 경계 곡선을 생성한다. 경계 기반 방법에서 측정 데이터로부터 경계점들을 검출하기 위한 방법들로 경계 연산자 방법(edge operator method), 경계 영역 방법(edge region technique), 그리고 곡률 변화를 이용 한 방법 등이 있다. 경계 연산자 방법은 오차가 포함된 데이터에 대하여 효과적이지 못하기 때

문에 측 정점의 영역화에는 잘 사용되지 않는다[5,9]. 경계 영역 방법은 경계의 주변으로 경계선을 확장 시키는 방법이다[10]. 등고선(equi-depth contour)을 형성하여 선의 변화로 경계를 판단하며, 등고선과 평행한 경계의 검출은 곤란하다.

형상의 경계는 일반적으로 곡률 반경이 작은 부분으로 곡률의 국부적인 변화를 이용하여 형상 경계를 추출하는 방법이 사용된다. 측정 데이터로부터 곡률을 추정하기 위하여 Fan은 미분 기하학을 이용하였다[11]. 곡률 계산을 위하여 1차 미분과 2차 미분이 사용 되며, 이는 오차가 포함되어 있는 데이터의 경우 오차의 영향을 받게 된다. 측정에서 포함된 오차의 영향을 감소시키기 위하여 측정 데이터를 필터링하는 경우 측정 데이터를 왜곡시키며, 경계를 무디게 하는 경향이 있고, 형상 경계의 검출에 장애가 되기도 한다.

오차가 포함되어 있는 측정 데이터로부터 곡률을 효과적으로 추정하기 위하여 Darboux 프레임을 국부적으로 근사 시킴으로써 곡률을 추정하는 방법이 사용된다[4,6]. Darboux 프레임을 국부적으로 근사 시키기 위하여 주변의 측정점들로부터 법선 벡터를 근사 시키고, 근사된 법선 벡터를 축으로 하여 주변의 점들을 좌표 변환한 후에 최소 자승법을 이용하여 Darboux 프레임의 계수를 계산한다. Darboux 프레임은 2회의 근사 과정으로 오차가 축적된다. 오차를 감소시키기 위하여 Ferrie는 주위의 결과를 반영하며 반복 계산하였다[6]. 그러나 반복 계산으로 계산 시간이 증가하게 된다.

본 연구에서는 보다 효율적인 곡률 추정을 위하여 최소 자승법을 이용한 2차 매개 변수 곡면의 국부적인 근사를 이용한다. 추정된 국부 곡률로부터 형상 경계의 검출을 위하여 주곡률 방향(principal curvature direction)으로 곡률이 극값을 갖거나 곡률의 부호가 변화하는 점을 경계로 인식한다. 인식된 경계점들을 연속된 경계 곡선이 되도록 연결하고, 각 경계 곡선에 대하여 경계의 내부와 외부를 판별하여 측정점을 영역별로 분할한다.

2. 형상 경계 검출

2.1 경계의 곡률 변화

형상의 경계를 인식하기 위하여 곡률 변화의 특성을 이용한다. 형상 경계의 단면에서 곡률 변화 양상을 그림 1에 도시하였다. 단이 있는 경계에서는 곡률의 부호가 변화하며, 경계의 양편에 부호가 다른 첨점의 극값이 존재한다(Fig. 1(a)) 경사면이 만나는 경계이거나 곡면과 경사면이 만나는 경계에서는 곡률이 극값을 갖는다(Fig. 1(b, c)) 오목 곡면과 볼록 곡면이 만나는 경계에서의 곡률은 부호가 변화하며 양편에 다른 부호의 첨점의 극값을 갖는다(Fig. 1(d)).

3차원 형상에서 경계점을 인식하기 위하여 주곡률 방향으로 곡률을 비교한다. 주곡률 방향에서 곡률의 부호가 변화하거나 곡률이 극값을 갖는 경우 형상 경계점으로 인식한다.

2.2 곡률 추정

형상 경계를 검출하기 위하여 곡면의 곡률을 추정하여야 한다. 본 연구에서는 보다 간략한 근사 과정으로 곡률을 추정할 수 있도록 2차 매개 변수 곡면을 이용하였다. 2차 매개 변수 곡면은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}(u, v) = \sum_{j=0}^{2}\sum_{i=0}^{2} \mathbf{Q}_{ij} u^i v^j \tag{1}$$

식 (1)을 행렬식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\hat{\mathbf{r}}(u,v) = [1 \; u \; u^2]\mathbf{Q}\begin{bmatrix}1\\ u\\ v^2\end{bmatrix} \tag{2}$$

행렬 $\mathbf{Q}$는 $\mathbf{Q}_{ij}$를 원소로 하는 3×3행렬이다. 곡면과 행렬 r는 다음과 Q같은 요소로 구성된다.

$$\mathbf{r}(u, v)=(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$
$$\mathbf{Q}=\{\mathbf{Q}_{ij}\}=(\mathbf{a}_{ij}, \mathbf{b}_{ij}, \mathbf{c}_{ij}) \tag{3}$$

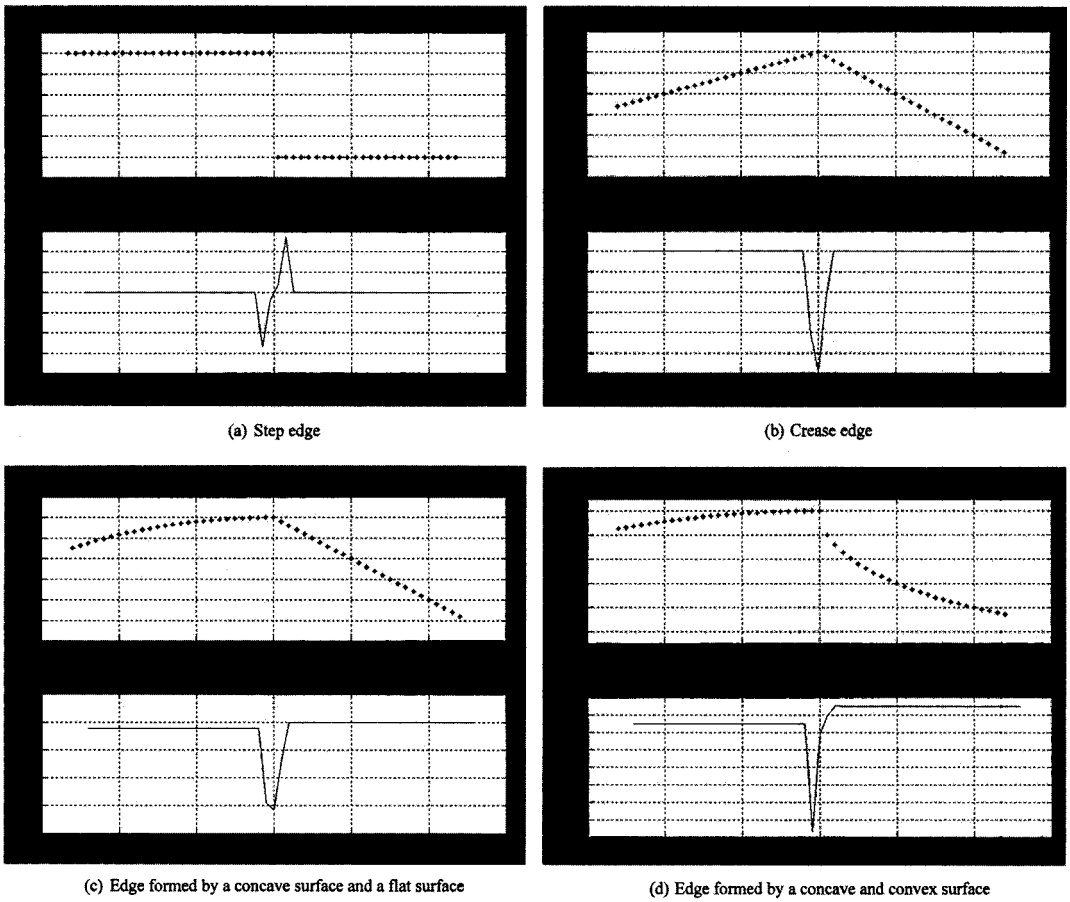
N+1개의 측정점 $\mathbf{P}_l(x_l, y_l, z_l)$, l=0, ..., N이 주어지면, 상응하는 매개 변수는(u_l, v_l)이 되며, 곡면 근사를 위하여 N>8의 점 데이터가 필요하다. 국부 근사를 위하여 주변의 점들을 이용한다. 최소 자승법을 적용하기 위하여 식 (4)와 같은 행렬을 도입한다.

$$\mathbf{W}=(u^0v^0, u^0v^1, u^0v^2, u^1v^0, u^1v^2,..., u^2v^2)^{\mathrm{T}}$$
$$\mathbf{a}=(a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{10}, a_{11},..., a_{22})^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

행렬 b,c도 같은 방법으로 정의 된다. 식 (4)의 행렬을 이용하여 식 (1)의 곡면을 식 (5)와 같이 표현한다.

$$x=\mathbf{W}^{\mathrm{T}}\mathbf{a}$$
$$y=\mathbf{W}^{\mathrm{T}}\mathbf{b}$$
$$x=\mathbf{W}^{\mathrm{T}}\mathbf{c} \tag{5}$$

측정점을 식 (6)과 같이 표현하고, 식 (5)의 매개변



(a) Step edge (b) Crease edge

(c) Edge formed by a concave surface and a flat surface (d) Edge formed by a concave and convex surface

Fig. 1. Behavior of surface curvature.

수 행렬을 식 (7)과 같이 표현하면, 오차 벡터를 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{Z}=(\mathbf{Z}_x,\ \mathbf{Z}_y,\ \mathbf{Z}_z)$$

$$\mathbf{Z}_x=\begin{bmatrix}x_0\\x_1\\\vdots\\x_N\end{bmatrix},\ \mathbf{Z}_y=\begin{bmatrix}y_0\\y_1\\\vdots\\y_N\end{bmatrix},\ \mathbf{Z}_z=\begin{bmatrix}z_0\\z_1\\\vdots\\z_N\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}\mathbf{W}_0^T\\\mathbf{W}_1^T\\\vdots\\\mathbf{W}_N^T\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{E}=\mathbf{Z}-\mathbf{MQ} \tag{8}$$

만일 매개 변수가 $\mathbf{Q}=\mathbf{Q}+\mathbf{V}$와 같이 변화한다면, 오차 벡터는 $\mathbf{E}=\mathbf{E}-\mathbf{MV}$이 된다. $\mathbf{M}^T\mathbf{E}=0$이라고 가정하면, 오차 벡터는 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\|\tilde{\mathbf{E}}\|^2&=\tilde{\mathbf{E}}^T\tilde{\mathbf{E}}\\&=\mathbf{E}^T\mathbf{E}-\mathbf{V}^T\mathbf{M}^T\mathbf{E}-\mathbf{E}^T\mathbf{M}\mathbf{V}+\mathbf{V}^T\mathbf{M}^T\mathbf{M}\mathbf{V}\\&=\mathbf{E}^T\mathbf{E}+\mathbf{V}^T\mathbf{M}^T\mathbf{M}\mathbf{V}\\&=\mathbf{E}^T\mathbf{E}+(\mathbf{M}\mathbf{V})^T\mathbf{M}\mathbf{V}\end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서 $\mathbf{V}\neq\mathbf{0}$이라면 $\mathbf{E}\neq\mathbf{E}$인 모든 경우에 대하여 $\|\tilde{\mathbf{E}}\|^2>\|\mathbf{E}\|^2$ 이다. 즉, $\mathbf{E}$는 최소 오차이고, 계수 벡터 $\mathbf{Q}$는 오차를 최소화하는 곡면의 계수가 된다. 식 (10)과 같이 계수 벡터 $\mathbf{Q}$을 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned}&\mathbf{M}^T\mathbf{M}\mathbf{Q}=\mathbf{M}^T\mathbf{Z}\\&\mathbf{Q}=(\mathbf{M}^T\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^T\mathbf{Z}\end{aligned} \tag{10}$$

$\|\tilde{\mathbf{E}}\|^2$는 식 11과 같이 측정점 $\mathbf{P}_i$과 근사된 매개 변수 곡면의 Euclidean 거리 제곱의 합이다(Fig. 2(a)) Darboux 프레임은 법선 벡터 방향과 평행한 방향으로의 오차를 최소로 하는 곡면이다(Fig. 2(b)) Fig. 3은 임의의 자유 곡면에 2차 매개 변수 곡면을 국부적으로 형성한 예이다.

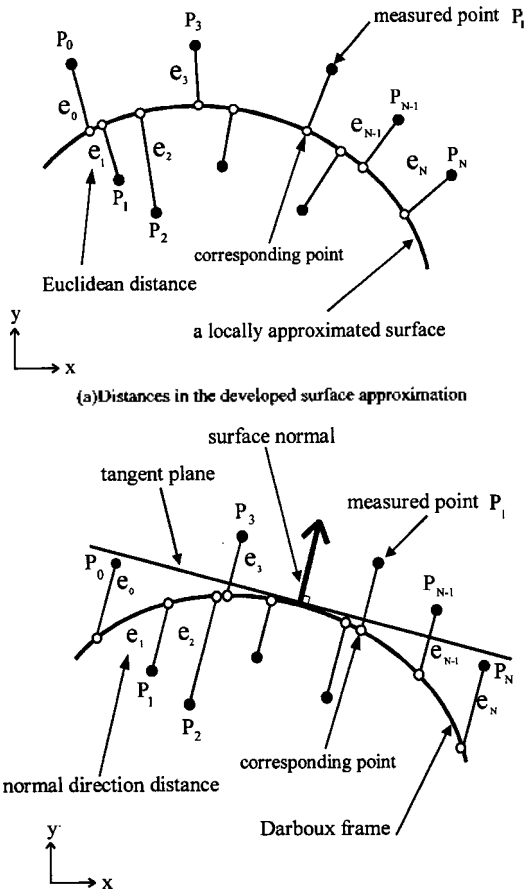


Fig. 2. Distances between measuring points and an approximated surface.

$$\|\tilde{\mathbf{E}}\|^2=\sum_{i=0}^{N} e_i^2 \tag{11}$$

매개 변수 곡면에서 $\dot{\mathbf{u}}$ 방향으로의 κ_n곡률 는 식 (12)와 같이 구할 수 있다[12].

$$\kappa_n=\frac{\dot{\mathbf{u}}^T\mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}}{\dot{\mathbf{u}}^T\mathbf{G}\dot{\mathbf{u}}} \tag{12}$$

식 (12)의 행렬 G와 D는 식 (13)과 같다.

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}\mathbf{r}_u\cdot\mathbf{r}_u & \mathbf{r}_u\cdot\mathbf{r}_v\\ \mathbf{r}_u\cdot\mathbf{r}_v & \mathbf{r}_v\cdot\mathbf{r}_v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}g_{11} & g_{12}\\ g_{21} & g_{22}\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix}\mathbf{r}_{uu}\cdot\mathbf{n} & \mathbf{r}_{uv}\cdot\mathbf{n}\\ \mathbf{r}_{uv}\cdot\mathbf{n} & \mathbf{r}_{vv}\cdot\mathbf{n}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}d_{11} & d_{12}\\ d_{21} & d_{22}\end{bmatrix} \tag{13}$$

주곡률과 주곡률 방향을 각각 κ_{n1}, κ_{n2}, $\dot{\mathbf{u}}_1$, 그리고 $\dot{\mathbf{u}}_2$ 라 하면, 식 (12)의 극값이므로, 식 (12)를 미분하여 식 (14)를 얻을 수 있다.

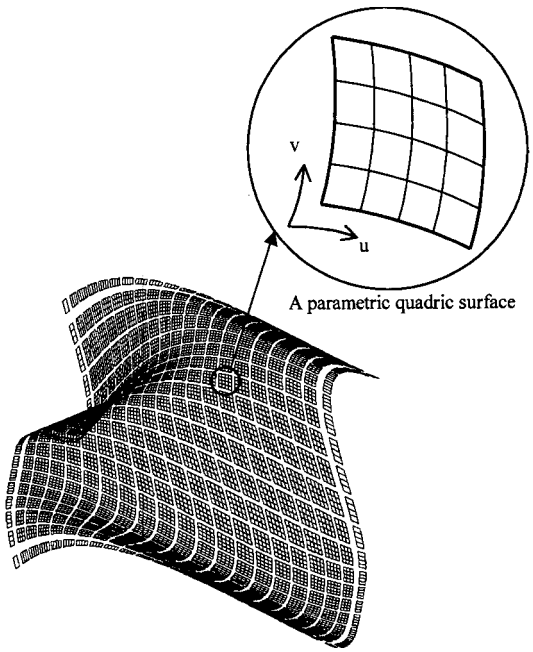


Fig. 3. Locally approximated parametric quadric surface (20(20).

$$(\mathbf{D}-\kappa_n\mathbf{G})\dot{\mathbf{u}}=0 \tag{14}$$

식 (14)는 식 (15)와 같이 표현할 수 있으며,

$$\begin{aligned}(d_{11}-\kappa_n g_{11})\dot{u}+(d_{12}-\kappa_n g_{12})\dot{v}&=0\\ (d_{21}-\kappa_n g_{21})\dot{u}+(d_{22}-\kappa_n g_{22})\dot{v}&=0\end{aligned} \tag{15}$$

식 (15)에서 $\dot{u}$ 와 $\dot{v}$ 을 소거하여 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$|\mathbf{G}|\kappa_n^2-(g_{11}d_{22}+d_{11}g_{22}-2g_{12}d_{12})\kappa_n+|\mathbf{D}|=0 \tag{16}$$

식 (16)의 두 근이 주곡률 κ_{n1}과 κ_{n2}이며, 주곡률 κ_{n1}과 κ_{n2}을 식 (15)에 대입함으로써, 주곡률 방향 $\dot{\mathbf{u}}_1$ and $\dot{\mathbf{u}}_2$ 을 구할 수 있다.

경계점을 인식하기 위하여 주곡률 방향에서 곡률의 부호가 변화하거나 곡률이 극값을 갖는 경우 형상 경계점으로 인식한다. 이 방법을 38801개의 측정 점으로 구성된 형상에 적용하여 보았다. 대상 형상은 수개의 기본 도형과 자유 곡면이 Boolean 연산으로 구성되어 있고, 각종 경계를 포함한다(Fig. 4).

측정 데이터 전체에 대하여 주곡률과 방향을 계산하고 비교하는 것은 많은 시간이 소요되므로, Milroy는 주곡률 방향의 비교 곡률을 추정하기 위하여 주변의 곡률을 보간하였다[4]. 하지만, 보간을 이용한 곡률 추정 방법은 곡률의 값을 왜곡시키는 경향이 있다.

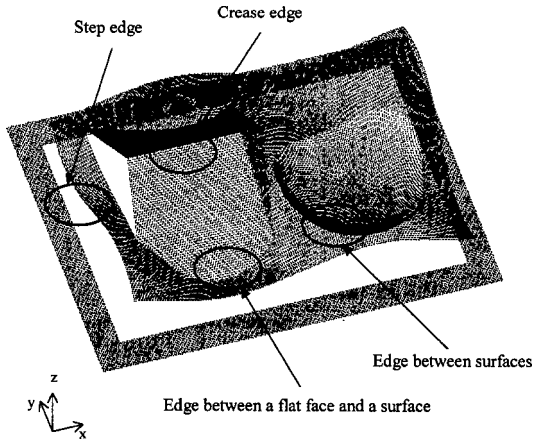


Fig. 4. Sampled object.

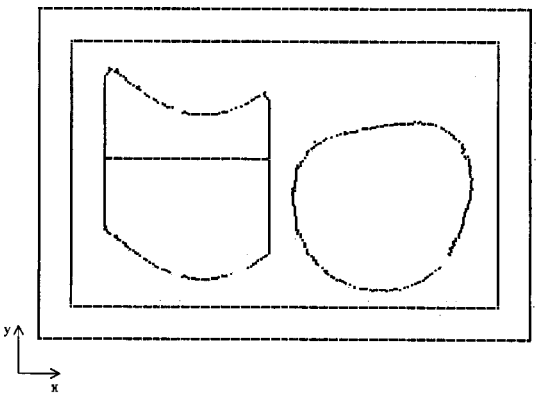


Fig. 5. dentified edge points.

형상 경계는 곡률 반경이 작은 부분으로 날카로운 모서리라 할지라도 추상적인 의미의 모서리일 뿐 곡률 반경이 매우 작은 부분이라 할 수 있다. 본 연구에서는 곡률 반경이 한계값 이하인 영역에 대하여만 곡률 비교를 수행함으로써 경계 추출에 소요되는 시간을 단축하였다. 검출된 형상 경계가 Fig. 5에 도시 되어 있다.

2.3 경계 곡선 생성

일반적으로 형상은 기능적 또는 감성적인 곡면으로 구성되어 있다. 경계는 곡면간의 경계선이나 트림(trim)선으로, Fig. 5와 같은 불연속의 경계점들을 연결(linking)함으로써 얻을 수 있다. 인식된 측정점은 이웃하는 측정점과 연결되며, 이 과정은 경계가 분기되는 곳이나 끝점까지 계속된다.

몇 개의 경계선들이 연결되어 곡면을 둘러싸는 폐곡선의 경계가 형성된다. 이웃하는 경계선들간의 연결

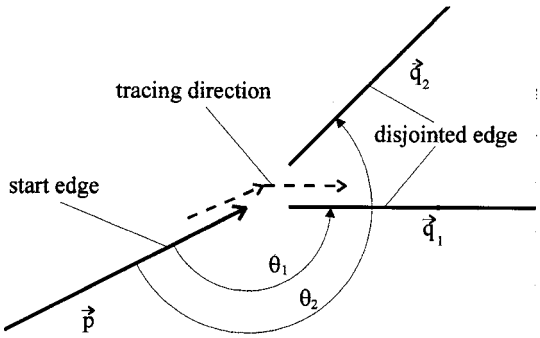
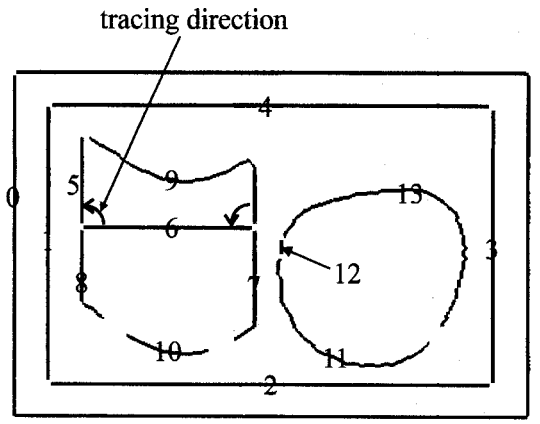


Fig. 6. Connection to the most CW edge.

은 진행 방향에 대하여 최소의 각을 갖는 경계선으로 연결된다. 경계선 사이의 각은 식 (17)을 이용하여 계산한다.

$$\theta = cos^{-1}\left(\frac{\vec{p}\cdot\vec{q}}{|\vec{p}||\vec{q}|}\right) \tag{17}$$

Fig. 6에서 경계선을 따라 $\vec{p}$ 방향으로 연결을 진행하고 있을 때 $\theta_1<\theta_2$ 이므로, $\vec{q}_2$ 인 경계선이 $\vec{p}$ 경계선에 연결된다. 연결된 후 진행 방향이 $\vec{q}_1$ 방향으로



(a)Disconnected edge curve

No.	No. of disjointed edges	Connection order of the edge curves
1	1	0
2	4	1-2-3-4
3	4	6-7-10-8
4	3	9-6-5
5	3	11-13-12

(b) Connection order of the edge curves

Fig. 7. Building closed boundary loops on the sampled model.

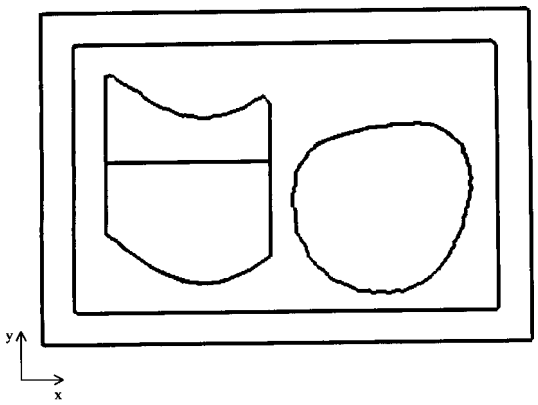


Fig. 8. Closed boundaries.

되어 폐곡선의 경계선이 완성될 때까지 이 과정을 반복한다.

이러한 방법으로 Fig. 4의 형상에 대하여 적용하면 Fig. 7과 같은 순서로 경계가 연결되며, 그 결과 Fig. 8과 같은 폐곡선의 경계선을 얻을 수 있다.

3. 측정점의 영역화

영역화는 경계를 기준으로 영역별로 측정점을 분할하는 것으로, 각 측정점이 경계의 내부에 존재하는지 또는 외부에 존재하는 지를 판단하기 위하여 탐색선(scan line) 알고리즘을 사용하였다[13]. 이 방법은 판단하고자 하는 측정점을 기점으로 하고 x 방향으로 음의 무한대에 이르는 탐색선을 생성하고, 이 탐색선과 경계선 간의 교점의 수를 세어 측정점이 경계 내부에 포함되어 있는지를 판단하는 것이다. 교점의 수가 홀수 개라면 Fig. 9(a)와 같이 측정점은 경계의 내부에 위치하고 있는 것으로 판단하며, 반대로 교점의 수가 짝수 개라면 Fig. 9(b)와 같이 경계의 외부에 위치하고 있는 것으로 판단한다.

측정점을 영역별로 분할하기 위하여 모든 측정 데이터를 각 경계선에 대하여 탐색선 알고리즘으로 포함 여부를 판단한다. 그 결과 분할된 측정점의 분포가 Fig. 10에 도시되어 있다. Fig. 10은 육안으로 분할된 결과를 확인할 수 있도록 각 영역에 따라 다른 색으로 측정점을 도시하였다.

영역화된 측정 데이터에 대하여 영역 별로 곡면을 재구성함으로써 형상 모델을 얻을 수 있다.

4. 결 론

국부 곡률 특성을 이용한 측정점의 영역화 방안을

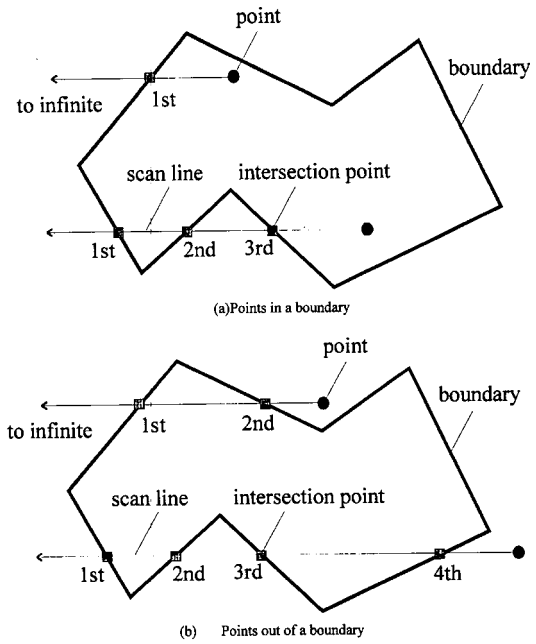
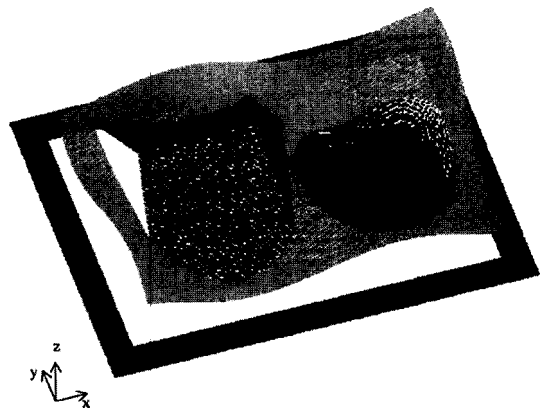


Fig. 9. Scan line algorithm.



Fi int data.

제시하였다.

국부적인 주곡률과 주곡률 방향을 구하기 위하여 2차 매개 변수 곡면 근사를 이용하였다.

2차 매개 변수 곡면의 근사에서 Euclidean 거리를 오차로 사용함으로써 기존의 방법보다 정밀하고 효율적으로 곡률을 추정할 수 있었다. 곡률의 거동으로부터 곡면의 경계를 검출할 수 있었다.

제시된 방법으로 측정점에 대하여 경계를 검출하고, 영역별로 측정점을 분할 하였다. 영역별로 분할된 측정점들은 각 영역에 따라 곡면을 재구성함으로써 형상 모델을 생성할 수 있다.

Nomenclature

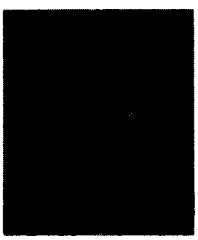
a, b, c	: 계수 행렬
D	: 2차 기본(fundamental) 행렬
d_{ij}	: 행렬 의 원소
E, $\tilde{\mathbf{E}}$	: 오차 벡터
e	: 거리
G	: 1차 기본(fundamental) 행렬
g_{ij}	: 행렬의 원소
κ_n	: 곡률(normal curvature)
κ_{n1}, κ_{n2}	: 최대 및 최소 주곡률
M	: 매개 변수 행렬
N	: 측정점의 수
n	: 단위 법선 벡터
P	: 측정점
$\vec{p}$, $\vec{q}$	: 방향 벡터
Q, $\tilde{\mathbf{Q}}$	: 계수 벡터
θ	: 경계 사이의 각
r	: 매개 변수 곡면
$\mathbf{r}_u$, $\mathbf{r}_v$	: 곡면 **r**의 1차 미분
$\mathbf{r}_{uu}$, $\mathbf{r}_{vv}$, $\mathbf{r}_{uv}$	: 곡면 **r**의 2차 미분
u, v	: 곡면의 매개 변수
$\dot{u}, \dot{v}$	: 매개 변수의 1차 미분
$\dot{\mathbf{u}}$	$=[\dot{u}, \dot{v}]^T$
$\mathbf{u}_1$, $\mathbf{u}_2$,	: 최대 및 최소 주곡률 방향
V	: 가변 계수 벡터
W	: 곡면의 매개 변수 행렬
x, y, z	: 점의 좌표
Z	: 측정 데이터의 행렬식 표현

참고문헌

1. Song, C.K. and Kim, S.W., "Reverse Engineering: Autonomous Digitization of free-Formed Surfaces on a CNC Coordinate Measuring Machine", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, No. 7, pp. 1041-1051, 1997.
2. Richard Hoffman and Anil K Jain, "Segmentation and Classification of Range Images", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-9, No. 5, pp. 608-620, 1987.
3. Milroy, M.J., Bradley, C., Vickers, G.W. and Weir, D.J., "G^1 continuity of B-spline surface patches in reverse engineering", *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 6, pp. 471-478, 1995.
4. Milroy, M.J., Bradley, C. and Vickers, G.W., " Segmentation of a wrap-around model using an active contour", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 299-320, 1997.
5. Sarkar, B. and Menq, C.H., "Smooth-surface approximation and reverse engineering", *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 9, pp. 623-628, 1991.
6. Franke, P., Ferrie, Jean Lagarde and Peter Whaite, "Darboux Frames, Snakes, and Super-Quadrics: Geometry from the Bottom Up", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence*, Vol. 15, No. 8, pp. 771-784, 1993.
7. Saeid Motavalli and Bopaya Bidanda, "Modular Software Development for Digitizing Systems Data Anaylsis in Reverse Engineering Applications: case of Concentric Rotational Part", *Computers ind. Engng*, Vol. 26, No. 2, pp. 395-410, 1994.
8. Xin Chen and Francis Schmitt, "Surface modelling of range data by constrained triangulation", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 8, pp. 632-645, 1994.
9. QingJin Peng and Martin Loftus, "A new approach to reverse engineering based on vision information", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 38, No. 8, pp. 881-899, 1998.
10. Wani, M.A. and Batchelor, B.G., "Edge-Region-Based Segmentation of Range Images", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 3, pp. 314-319, 1994.
11. Ting-Jun Fan, Gerard Medioni and Ramakant Nevatia, "Segmented Descriptions of 3-D Surfaces", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 6, pp. 527-538, 1987.
12. Faux, I.D., Pratt, M.J., *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood Limited, England, 1979.
13. Minyang Yang and Eungki Lee, "NC verification for wire-EDM using an R-map", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 733-740, 1996.

양 민 양

1977년 서울대학교 학사
1977~1983년 KIST 연구원
1982년 서울대학교 석사
1986년 MIT박사
1987년~현재 한국과학기술원 교수
1991~1992년 TU Berlin 객원교수(Visiting Prof.)
1997~1998년 UC Berkeley 객원교수(Visiting Prof.)
관심분야: 정밀가공, 초정밀 가공, CAD/CAM, Open Architecture PC NC.



이 응 기

1992년 연세대학교 학사
1994년 한국과학기술원 석사
1994년~현재 한국과학기술원 박사과정
관심분야: CAD/CAM, reverse engineering 고속 가공