역공학에서의 측정점의 분할에 의한 B-spline 곡면의 재생성

허성민* · 김호찬* · 이석희†

(2001 년 4 월 6 일 접수, 2002 년 8 월 19 일 심사완료)

B-spline Surface Reconstruction in Reverse Engineering by Segmentation of Measured Point Data

Sung-Min Hur, Ho-Chan Kim and Seok-Hee Lee

Key Words : Reverse Engineering(역공학), Laser Scanner(레이저 스캐너), Triangular Net(삼각형망) Segmentation(분할), RP(급속조형), STL(에스티엘), B-spline Fitting(비-스플라인근사)

Abstract

A laser scanner is widely used for a device for acquiring point data in reverse engineering. It is more efficient to generate a surface automatically from the line-typed data than scattered data of points clouds. In the case of a compound model, it is hard to represent all the scanned data into one surface maintaining its original line characteristics. In this paper, a method is presented to generate a surface by the segmentation of measured point data. After forming triangular net, the segmentation is done by the user input such as the angle between triangles, the number of facets to be considered as small segment, and the angle for combining small segment. B-spline fitting is implemented to the point data in each segment. The surface generation through segmentation shows a reliable result when it is applied to the models with curvature deviation regions. An useful algorithm for surface reconstruction is developed and verified by applying an practical model and shows a good tools for reverse engineering in design modification.

1. 서 론

전통적인 관점에서의 생산은 디자인에서 설계 과정을 거쳐 실제 제작하는 과정을 의미한다. 이에 반해서 역공학(reverse engineering)을 이용한 생산은 존재하는 물체에 대해서 디지타이저를 이용하여 기하학적 데이터를 얻고 다시 CAD/CAM 에서 이용할 수 있는 데이터를 생성하여 제작하는 과정을 의미한다. 이는 사용자의 개성, 심미적인 디자인, 다품종 소량 생산 등 시대적인 요구에 따라 설계과정에서 적극적으로 고려한 것이다.

측정 대상물에 대해 CMM, 레이저스캐너, CT 등을 이용하여 형상 데이터를 추출하고 모델링 과정을 거쳐서 CAM 장비에서 시제품을 생산하는 것이 일반적인 역공학의 실행 과정이다.

생성된 CAM 데이터는 제품 생산에 이용되며, 생산된 시제품은 설계 오류를 검사하고 설계 변경을 위해 사용된다.

역공학을 위해서 제품의 형상 데이터의 획득이 중요한데, 현재 측정속도의 증가와 정도의 향상에 의하여 레이저 스캐너가 많이 이용되고 있는 실정이다. 또한, 점 데이터가 라인 형식으로 측정되기 때문에 단면 곡선을 이용해서 곡면을 생성하기에 용이하다. 그러나 복합 곡면으로 이루어진 측정물에 대한 측정점을 하나의 곡면으로 표현하는 것은 모델링 오차, 다수의 조정점 발생과 같은 문제점을 가진다. 따라서 자연스러운 곡면 생성이 가능하고 컴퓨터에서 연산하기에 적절한 조정점을 갖도록 여러 개의 영역안에 측정점을 나누는 것을 측정점의 분할(segmentation)이라고 한다.

측정점의 분할에 대한 관련연구는 크게 선

* 부산대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소
E-mail : sehlee@pnu.edu
TEL : (051)510-1476 FAX : (051)514-0685

(edge) 기반의 분할과 면(face) 기반의 분할로서 나눌 수 있다. Milroy[1] 등은 wrap-around 형태의 와이어 프레임 모델에 대해서 jump, crease, smooth 의 선의 유형을 정의하고 선의 끝점을 찾아서 영역을 나누는 방법에 대해서 연구하였다. Yang[2] 등은 경계의 곡률 변화를 통해서 경계를 인식하고 경계 곡선을 생성시켰으며, 탐색선 알고리즘을 이용해서 측정점의 경계 내· 외부 유무를 판별함으로써 측정점을 분할하였다. Liu[3] 등은 여러 개의 층을 가진 CT 윤곽 데이터로부터 seed contour 를 지정하고 이웃 층으로 옮겨가면서 점점 seed를 성장시켜서 영역을 확장시키는 방법에 대해서 연구하였으며 작업자가 직접 seed contour를 지정해야 하며 반자동적으로 작업이 이루어지는 단점이 있다. Sarkar[4] 등은 복합 곡면으로부터 얻어진 측정점으로부터 경계를 얻어내고 영역을 구분한 다음 각 영역에 대해서 최소자승법을 통한 에러를 중심으로 B-spline 곡면으로 피팅하는 방법에 대해서 연구하였다. Kruth[5] 등은 CMM 장비를 이용해서 측정된 비정규적으로 분포된 점군으로부터 생성된 여러 개의 곡면을 경계 조건에 의해 합침으로써 완성된 곡면을 생성하는 방법에 대해 연구하였다. Peng[6] 등은 비젼 시스템에서 얻어진 정보를 이용하여 형상의 기하학적 데이터를 추출하고 CNC 를 위한 가공경로를 생성하여 가공하는 시스템을 제안하였다. Cho[7] 등은 비젼시스템을 통한 기하학적 경계 추출과 CMM 에서 얻어진 데이터에 의해 생성된 B-spline 면을 결합하여 면생성을 하는 방법을 연구하였다.

측정물로부터 곡면 생성 방법 및 곡면 품질 향상에 대한 관련연구는 다음과 같다.

Piegl[8] 등은 NURBS 곡면 생성에 있어서 단면 곡선에 적합성을 부여하는 알고리즘을 제안하였고, 근사 (approximation) 과정에서 공차에 의해 많은 수의 조정점이 발생하는 문제를 해결하는 연구를 하였다.

Tamas[9] 등은 접촉식과 비접촉식 장비에 있어서 데이터 획득에 대한 전반적인 사항 및 데이터 획득시 발생하는 실제적인 문제 및 원인에 대해 기술하였으며, 자유 곡면에 대한 영역화 및 곡면 피팅을 비롯해서 B-Rep 모델 생성에 대한 연구를 수행하였다. Werner[10] 등은 CMM 장비를 이용해서 데이터를 획득하고 곡면을 IGES 포맷으로 생성한 후 CAD/CAM 시스템에서 가공하는 방법에 대해 연구하였다. Park[11] 등은 닫힌 형태의 단면 곡선에 대해서 닫힌 B-spline 곡선을 생성시키고 적합화 과정을 수행하고 공통 매듭값 생성을 통한 로프트 곡면 생성에 대한 연구를 하였다.

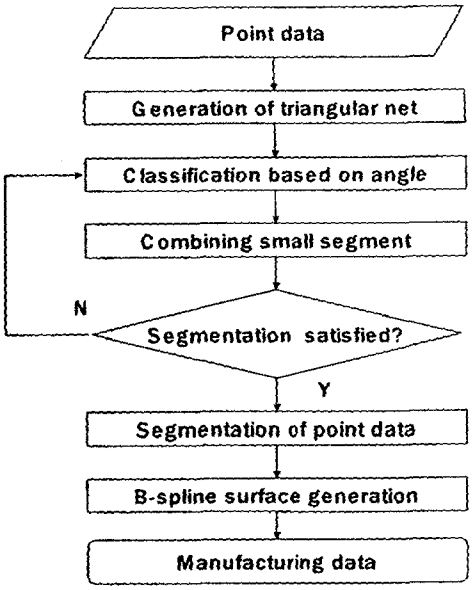


Fig. 1 Overall flowchart

본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 점 데이터의 삼각화 과정을 거쳐서 각 삼각형의 법선 벡터를 기반으로 측정점을 효율적으로 분할하고 B-spline 곡면을 생성하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 삼각형망 생성

레이저 스캐너에서 측정된 점은 max-min angle criterion[12] 을 이용하여 한 선분의 점으로부터 다른 선분의 인접한 점을 연결하는 과정을 반복하면 STL 파일을 생성할 수 있는 삼각형망을 구성한다. Fig. 2 에서 ∠bdc 가 ∠bac 보다 작으므로 (b)에 의한 삼각형 분할을 한다.

2.2 측정점의 세그먼트 그룹 선택

레이저 스캐너에 의한 측정점을 인접한 삼각형 간의 각도에 의해 세그먼트 그룹을 만드는 과정은 다음과 같다.

첫째, 한 삼각형과 주어진 각도 이내의 인접한 삼각형을 동일한 그룹으로 선택한다. Fig. 3 과 같은 경우, 기준 삼각형 T0 와 인접한 삼각형 T3, T6 T10 과의 각도 차이를 계산한다. 이 때, 두 삼각형의 법선벡터 편차가 크지 않으면 이들 삼각형이 부드럽게 이어져 있음을 의미한다.

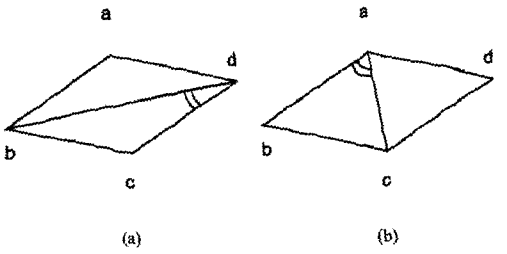


Fig. 2 Max-min angle criterion

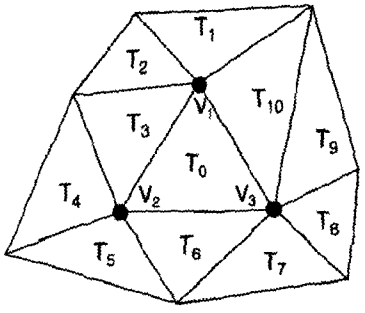


Fig. 3 Selection of triangles for triangulation

삼각형간의 각도는 법선 벡터의 편차로서 표현될 수 있는데, 기준 삼각형과 검사 삼각형간의 법선 벡터의 x, y, z 방향 편차를 dx, dy, dz 라고 하면 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} dx &= Normal[base].x - Normal[check].x \\ dy &= Normal[base].y - Normal[check].y \\ dz &= Normal[base].z - Normal[check].z \end{aligned} \tag{1}$$

그룹으로 허용되는 삼각형간의 각도의 차이(rad)는 사용자의 입력에 의해 정해지며, 계산 속도 향상을 위해 Fig. 4 에서처럼 두 단위법선벡터 사이의 각도(θ)가 작은 경우에 편차는 호의 길이(ℓ)에 대응됨을 이용하여 식 (2)의 조건으로 그룹 허용 여부를 판단한다.[13]

$$\theta^2 < (dx^2 + dy^2 + dz^2) \tag{2}$$

식 (2)는 θ 가 커질 경우에 호의 길이(ℓ)와 $\sqrt{dx^2+dy^2+dz^2}$ 와의 오차가 커지지만 생성된 삼각형망으로부터 삼각형의 법선 벡터를 이용하여

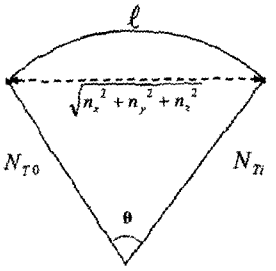


Fig. 4 Normal deviation

삼각형간의 각도를 쉽게 계산할 수 있다. 그리고 θ 가 15 도 이상일 경우에는 세그먼트 그룹으로서의 의미가 없기 때문에 적은 오차로서 계산 속도의 향상을 얻을 수 있다.

둘째, 동일한 그룹으로 선택된 삼각형에 대해서 이상의 과정을 반복한다. 이 때 새로운 삼각형 중 이미 타그룹에 속한 삼각형은 검사대상에서 제외시키며, 각도 차이의 비교에 의해 동일 그룹에 새롭게 추가할 수 있는 삼각형이 없어질 때까지 재귀호출을 반복한다.

Fig. 3 에서 기준 삼각형 T0 에 대해 인접한 삼각형 중에서 T3 만이 동일 그룹으로 설정되면, T3 의 인접 삼각형 중에서 이미 그룹에 속한 T0 를 제외한 T2, T4 에 대해 그룹 포함 여부를 판단하며, 이 과정을 반복한다.

Fig. 3 의 경우, 삼각형 T0 이후 T1 에 대해서 첫째와 둘째 과정을 반복하여 T10 까지 반복하며, 그림에 표시되지 않은 영역에 대해서도 더 이상의 새로운 삼각형이 그룹에 포함되지 않을 때까지 이상의 과정을 반복한다.

이상의 방법에 의해서 각도에 의한 측정점의 분할이 가능하나, 한 그룹에 얼마나 많은 측정점이 속할지는 알 수 없다. 실제 연산에 있어서 이 점을 고려하지 않으면 무수히 많은 측정점에 의해서 stack overflow 가 발생한다. 따라서 프로그램 스택(stack)을 이용하지 않고 크기가 조절 가능한 스택 구조를 사용한다.

스택은 추상적 자료 구조로서 *제일 나중에* 들어간 것이 먼저 나오는 LIFO (Last In First Out) 구조를 가지고 있으며, 스택의 상단에 값을 집어넣는 푸쉬(push) 동작과 스택에서 하나 빼내는 팝(pop) 동작으로 Fig. 5 와 같이 조작한다.

스택이 꽉 차서 더 이상 자료를 푸쉬할 수 없는 경우인데도 푸쉬를 하면 스택이 넘치게 되는 것을 스택 *overflow* 라고 하는데, 스택의 용량을 초과할 경우 스택의 크기를 재설정한다.

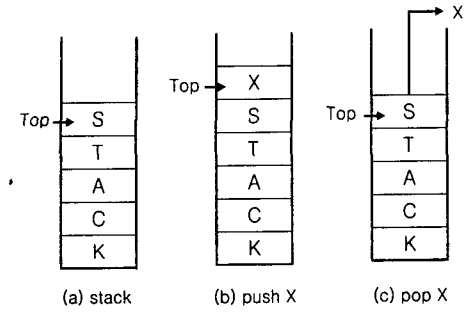


Fig. 5 Stack structure and operation

같은 그룹 ID 를 가진 삼각형의 번호를 스택에 저장하고 각 그룹 ID 를 부여하며, 나머지 삼각형도 각 그룹에 속한 스택에 저장한다.

2.3 적은 수의 세그먼트의 결합

레이저 스캐너의 특성상 측정 데이터는 노이즈를 포함한다. 따라서 각도에 의한 측정점의 분할은 측정 데이터의 노이즈가 심한 부분에서 다른 세그먼트 그룹으로 분리된다. 이 부분에서는 노이즈의 영향에 의해 삼각형간의 법선 벡터의 편차가 커져 적은 수의 삼각형으로 구성된 많은 세그먼트 그룹에 생기며, 사용자는 세그먼트 그룹으로 생성되기에 적절하지 않은 삼각형의 수를 생성된 세그먼트 그룹으로부터 판단하여 규정한다.

따라서 규정된 수 이하로 구성된 세그먼트 그룹은 인접한 그룹과의 각도 차이가 일정 범위 이내에서 가장 완만한 그룹을 찾아 그룹의 ID 를 통합시키며 그 과정은 다음과 같다.

첫째, 일정 수 이하로 구성된 세그먼트 그룹에 대해서 구성 삼각형이 그 그룹의 구성원이 아닌 다른 인접한 삼각형과 이루는 각도는 식 (1)을 이용하여 삼각형간의 법선 벡터의 편차로 표현한다. 이 때 다른 세그먼트 그룹과 합쳐질 기준이 되는 구성 삼각형의 수는 사용자 입력에 의해 정해진다.

둘째, 각 구성 삼각형이 그 그룹의 구성원이 아닌 다른 인접한 삼각형과 이루는 각도 중에서 최소값을 가진 인접 삼각형의 그룹 ID 를 구하고, 그 그룹에 합친다. 이 때 구해진 최소각에 대해서 사용자의 입력에 의한 허용각으로 그룹간의 결합을 제한할 수도 있고, 노이즈가 많이 포함된 스캔 데이터의 경우에는 허용각을 크게 하여 그룹간의 결합을 원할히 한다.

셋째, 이상의 과정을 반복하고 삭제된 그룹을 제외시키고 세그먼트 그룹의 ID 를 새로 정리한다.

2.4 측정점의 분할과 경계 검출

측정점의 분할은 그룹 ID 에 따른 각 그룹에 속한 삼각형의 꼭지점을 구분하여 측정점을 분할한다. 원할한 측정점의 분할 확인을 위해서 경계검출이 필요하다. 모든 라인에 대해서 각 라인이 공유하는 두 삼각형의 그룹 ID 를 검사하여 다른 그룹인 경우에는 경계 라인으로서 표시하고 가시화함으로써 사용자의 요구에 적합한 측정점의 분할을 확인한다.

3. B-spline 곡면 생성

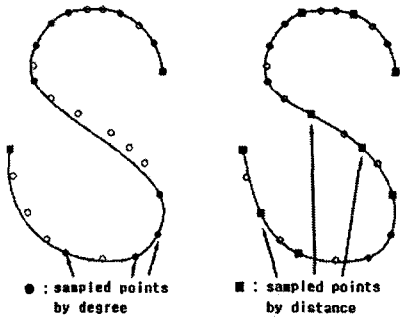
분할된 그룹 각각에 대하여 곡면을 생성하는 방법은 다음과 같다.

3.1 점데이터의 적합화

레이저 스캐너로부터 얻어진 데이터는 많은 양의 점들을 포함하고 있으며 레이저 광원의 산란, 혹은 측정물의 품질에 의해 발생하는 노이즈도 포함하고 있다. 따라서 입력 데이터로 이용하기 이전에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 측정점의 적합화 과정이 필요하다. 측정점의 적합화 과정은 노이즈 제거, 레이저 스캐너의 진행방향에 수직인 축방향에 대해서 스캔 간격마다 하나의 연결된 폴리라인을 생성하고 꼬인 점열(polygonal chain)[14,16]의 검색 및 제거, 그리고 형상을 잘 반영할 수 있게 샘플링(sampling)하는 것이다. 정도를 중심으로 샘플링하기 위해서는 형상을 특징적으로 나타내는 점(이하 특징점)들을 추출해야 한다. 특징점들은 이웃한 폴리라인이 이루는 각도 및 점간의 거리와 밀접한 관계를 가진다. 즉, 이웃점과 이루어지는 각도의 변화량이 큰 부분의 점들을 특징점이라고 할 수 있다. 그리고 단순한 각도의 변화량만 변수로 생각하면 Fig. 6 과 같은 문제점이 발생한다. 즉 적당한 간격이 보장되지 않으면 전체 곡선의 parameterization 에 영향을 끼치게 된다.

3.2 적합화된 곡면 생성

B-spline 곡선은 매개 변수 곡선 및 곡면을 표현하는데 많이 이용되는 함수로서 식 (3)과 같이 표현되며, i 번째 p 차 표준화된 B-spline 의 basis 함수는 식 (4)와 같이 정의된다. p 차 B-spline 곡선 C(u)는 식 (3)과 같이 B-spline 함수들의 선형 조합으로 표현되므로 입력점(Q_k), 매개변수($\overline{u_k}$), knot 값 ($U=\{u_0,u_1,\ldots,u_{n+p},u_{n+p+1}\}$)이 주어진다면 조정점을 구할 수 있다.



(a) (b)

Fig. 6 Fitting process
((a): Fitting considering angle,
(b): Fitting considering angle and distance)

입력점으로부터 매개변수를 구하는 방법에는 uniform, chord length, centripetal method 가 있는데 본 논문에서는 식 (5)와 같은 chord length method 를 이용하며, knot 값은 매개변수들의 평균으로서 식 (6)과 같이 구해진다.

*(p-1 × q-1)*차로 이루어진 B-spline 곡면은 식 (7)과 같이 B-spline 곡선들로 이루어진다. 공통 knot 벡터는 각 단면 곡선의 knot 의 개수를 일치시키고 식 (8)과 같이 평균을 취함으로써 얻어진다.

$$C(u)=\sum_{i=0}^{n}N_{i,p}(u)P_i \quad (a\le u\le b) \tag{3}$$

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

$$N_{i,0}(u)=\begin{cases}1, & if\ \ u_i\le u\le u_{i+1}\\ 0, & otherwise\end{cases} \tag{4}$$

$$d=\sum_{k=1}^{n}|Q_k-Q_{k-1}|$$

$$\bar{u}_0=0,\ \ \bar{u}_n=1 \tag{5}$$

$$\bar{u}_k=\bar{u}_{k-1}+\frac{|Q_k-Q_{k-1}|}{d}\quad (1\le k\le n-1)$$

$$u_i=0 \qquad (0\le i\le p)$$

$$u_i=1 \qquad (n+1\le i\le n+p+1) \tag{6}$$

$$u_{i+p}=\frac{1}{p}\sum_{i=j}^{j+p-1}\bar{u}_i \qquad (1\le j\le n-p)$$

$$S(u,v)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}P_{i,j}N_{i,p}(u)M_{j,q}(v) \tag{7}$$

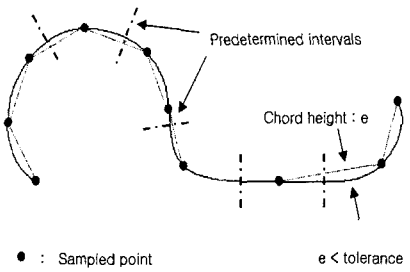


Fig. 7 Sampled points according to chord height

$$(u_{common})_i=\frac{1}{n+1}\sum_{k=0}^{n}(u_i)_k \quad (0\le i\le m+p+1)$$

$$(v_{common})_j=\frac{1}{m+1}\sum_{l=0}^{m}(v_j)_l \quad (0\le j\le n+q+1) \tag{8}$$

적합화된 점열로부터 각 라인의 특징점을 모두 지날 수 있는 입력곡선을 B-spline 곡선 보간을 통해서 생성한다. 이 입력 곡선은 적합화 과정을 거쳐서 로프트 곡면을 생성하기 위한 B-spline 단면 곡선을 생성하는 준비곡선으로 사용된다. 이 과정은 입력 곡선을 샘플링함과 동시에 최종적으로 모든 단면 곡선에 대해서 공통 knot 벡터와 공통 차수를 가져야 한다.[11,15,16]

샘플링 방법에는 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 Fig. 7 과 같이 chord height 에 따라 점을 샘플링하였다. Chord height 가 주어진 허용오차 이내가 되도록 점을 샘플링한다. 또한 B-spline 곡선의 매개변수 값을 등분하여 나누어진 구간마다 하나의 점 이상을 가지게 함으로써 곡선의 parameterization 을 좋게 하여 균일화된 조정점을 얻을 수 있게 한다.

각 단면 곡선은 로프트 곡면을 생성시키기 위해서 차수와 knot 벡터를 일치시켜야 한다. 차수는 *u, v* 방향에 대해서 모두 3 차로 하였다. 공통 knot 벡터를 구하기 위해서 Fig. 8 과 같이 knot 삽입 및 제거를 통해서 knot 의 간격 및 개수를 일치시키고 식 (8)과 같이 같은 위치의 knot 값들을 모두 더해 평균을 취함으로써 공통 knot 벡터를 구한다.

4. 적용예 및 고찰

본 논문에서는 측정점 분할의 이론을 여러 모델에서 검증하였고, Visual C++ 6.0, OpenGL 을 사용하여 효율적인 측정점 분할과 면생성이 가능한

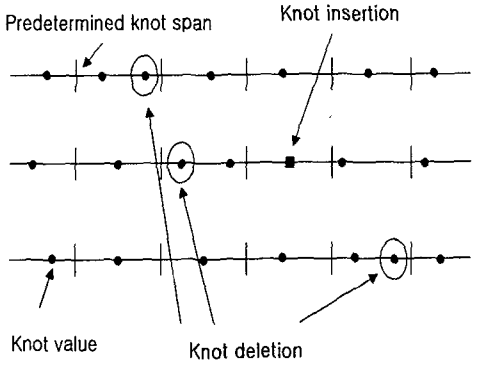


Fig. 8 Knot insertion and deletion

소프트웨어를 개발하였다.

Fig. 9(a)는 CAD 시스템에서 모델링된 체스말 pawn 의 STL 파일을 나타내며, Fig. 9 (b)는 점의 분할을 위한 삼각형간의 각도를 7.5 도 이하로 설정하였을 때 생성된 세그먼트 그룹의 경계를 나타내었다. Fig. 9(c), (d)는 측정점의 분할을 위한 삼각형간의 각도는 7.5 도, 50 개 이하의 삼각형으로 구성된 그룹은 주위 삼각형과 15 도 이내에 있는 최소 그룹과 결합하는 사용자 입력 조건으로 실행하였을 때의 세그먼트 그룹을 색깔로서 구분하였고, 세그먼트 그룹의 경계를 나타낸다. Fig. 10(a)는 레이저 스캐너로부터 측정된 얼굴 모델의 스캔 데이터이며, Fig. 10(b)는 측정된 모든 데이터를 이용하여 생성된 STL 파일을 나타낸다. 측정점의 분할을 위한 삼각형간의 각도는 7.5 도, 100 개 이하의 삼각형으로 구성된 그룹은 주위 삼각형과 15 도 이내에 있는 최소 그룹과 결합하는 사용자 입력 조건으로 실행하였다. Fig. 10(c), (d)는 생성된 세그먼트 그룹과 그 세그먼트 그룹의 경계를 각각 나타낸다. Fig. 10(e)는 생성된 세그먼트 그룹에 의해 분할된 점의 분포를 나타낸다.

Table 1 은 측정점 분할을 위한 삼각형간의 각도 설정에 의해 생성된 세그먼트 그룹의 개수와 적은 수의 세그먼트를 주위의 세그먼트 그룹에 결합하여 최종적으로 생성된 세그먼트 그룹의 개수를 비교한 것이다.

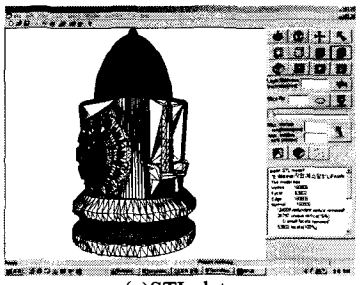
Pawn 모델은 비교적 경계가 분명한 형상이며 분할 과정에서 노이즈가 없는 STL 데이터를 이용함으로써 명확한 세그먼트 경계를 얻을 수 있다. Fig. 9(b)와 같이 각도만에 의한 분할은 경계 부위에서 적은 수의 삼각형으로 구성된 세그먼트를 많이 생성한다. 이와 같은 세그먼트는 분할의 효율과 모델링 과정에서의 편리를 위해서 주위의 세그먼트와 결합되면 Fig. 9(d)와 같이 좋은 분할 결과를 얻을 수 있다. Table 1 의 결과에서처럼 pawn 모델은 삼각형간의 각도 조건의 변화에 대해서 일정 수 이하로 구성된 삼각형으로 구성된 세그먼트 조건과 다른 세그먼트와 결합하는 최소 각도 조건이 변화하지 않고도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 이는 CAD 시스템에서 모델링된 STL 모델의 삼각형이 균일하게 분포하고 측정시 포함하는 노이즈의 영향이 없기 때문이다.

얼굴 모델은 전체적으로 자유 곡면으로 구성되어 있으며 분할 과정에서 레이저 스캐너에서 측정된 데이터를 사용하므로, pawn 모델과 같은 명확한 경계는 구하기 어렵다. 머리, 이마, 눈, 코, 입의 경계가 분할된 Fig. 10(e)는 시행착오를 거쳐 선정된 분할 조건에 의해 비교적 좋은 분할 결과를 보여준다. 이는 찰흙(clay)으로 생성된 모델 자체에서 머리, 이마, 눈, 코, 입 등의 경계가 주변 부위와 명확히 분리되지 않았고, 그 경계 주위에서 레이저 스캐너의 측정에 의한 노이즈의 영향이 크기 때문이다. Table 1 의 결과에서처럼 삼각형간의 각도 조건의 변화에 따라 다른 조건들이 영향을 많이 받게 되는데, 이는 경계 주위에서 생성된 적은 수의 삼각형으로 구성된 세그먼트가 분할 조건에 따라 경계 주위의 어느 세그먼트와 결합하는가에 따라 전체 분할의 결과가 영향을 많이 받기 때문이다.

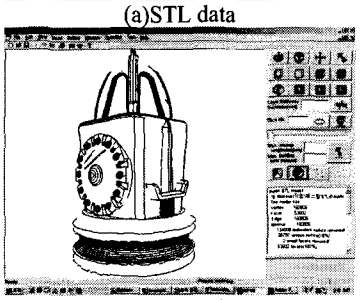
이상의 측정점 분할의 결과를 Fig. 11, 12(a)와 같은 점 데이터를 가진 두 모델에 적용하여 B-spline 곡면을 생성하였다. Fig. 11(a)는 CAD 시스템에서 모델링한 모델의 단면데이터를 점으로 표시한 것이며, Fig. 12(a)는 측정물의 스캔 데이터를 점으로 표시한 것이다. Fig. 11(b)는 측정점의 분할을 위한 삼각형간의 각도는 7 도, 60 개 이하의 삼각형으로 구성된 그룹은 주위 삼각형과 15 도 이내에 있는 최소 그룹과 결합하는 사용자 입력 조건으로 실행하여 생성된 세그먼트 그룹의 경계와 점의 분포를 나타낸다. Fig. 12(b)는 측정점의 분할을 위한 삼각형간의 각도는 7.5 도, 25 개 이하의 삼각형으로 구성된 그룹은 주위 삼각형과 15 도 이내에 있는 최소 그룹과 결합하는 사용자 입력 조건으로 실행하여 생성된 세그먼트 그룹의 경계를 나타낸다. Fig. 11(c), 12(c)는 전체 점 데이터에 대하여 B-spline 곡면으로 피팅한 것이고, Fig. 11(d), 12(d)는 점 데이터의 분할에 의하여 생성된 세그먼트 그룹의 각각에 대하여 B-spline 곡면으로 피팅한 것이다. Table 2 와 Fig. 11(e), 12(e), 11(f), 12(f)는 SDRC 사의 Surfacer 에서 점 데이터와 B-spline 곡면 데이터의 오차를 비교한 것이다.

Fig. 11(c)-(f), 12(c)-(f)의 결과에서 분할된 세그먼

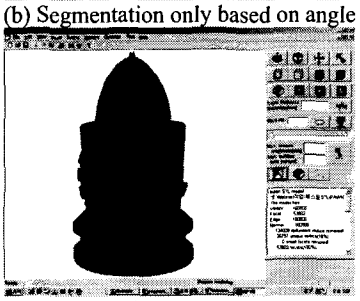
트를 이용하여 생성된 면은 세그먼트의 생성없이 생성된 면과 비교하면 평균 오차의 차이가 최대 오차에 비해서 차이가 상대적으로 크지 않다. 그러나 측정점의 분할 없이 생성된 B-spline 곡면은 데이터의 곡률이 크게 변하는 부분에서 오차가 크게 발생하며, 측정점의 분할에 의해 생성된 세그먼트에 대하여 B-spline 곡면을 각각 생성하여 최대오차를 줄일 수 있다. Fig. 11(e), 12(e)의 오차 비교에서 대부분의 오차는 점 데이터의 분할시에 각 세그먼트의 경계 주위에 집중되어 있음을 알 수 있다.



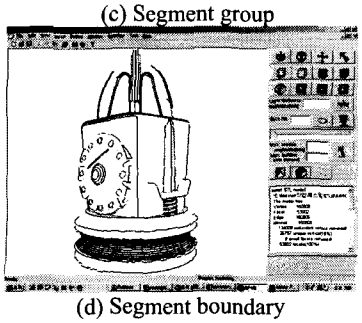
(a)STL data



(b) Segmentation only based on angle

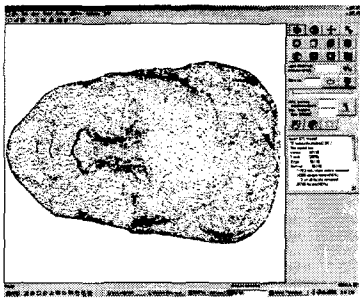


(c) Segment group

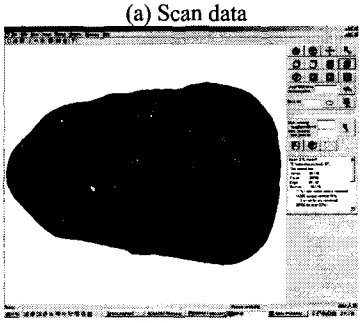


(d) Segment boundary

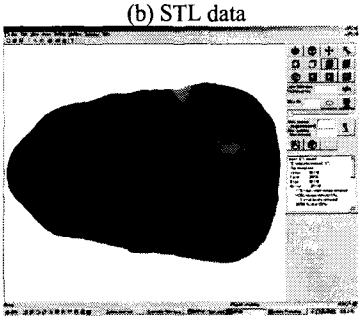
Fig. 9 Pawn model segmentation



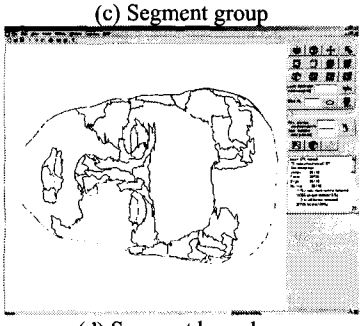
(a) Scan data



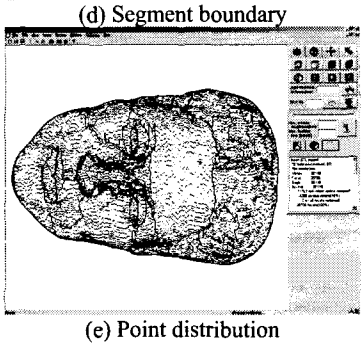
(b) STL data



(c) Segment group

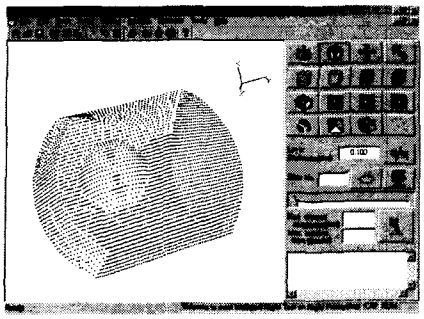


(d) Segment boundary

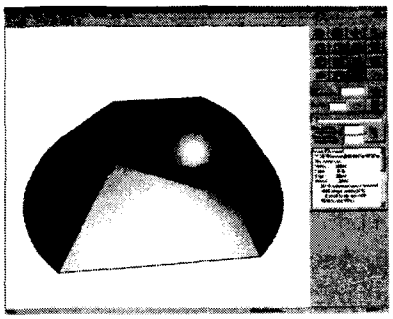


(e) Point distribution

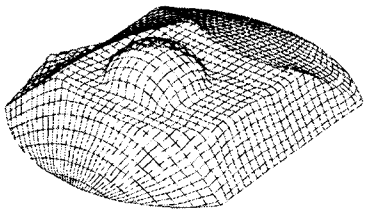
Fig. 10 Face model segmentation



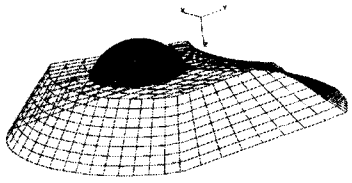
(a) Point data



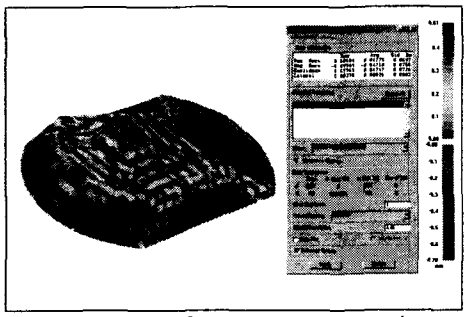
(b) Segmentation



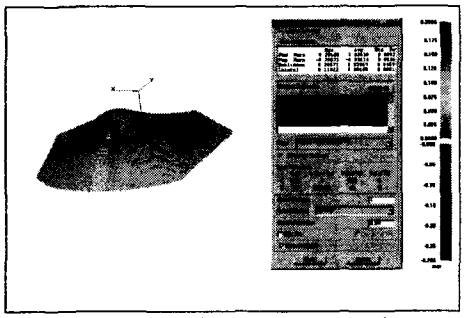
(c) Surface without segmentation



(d) Surface with segmentation



(e) Error on surface without segmentation



(f) Error on surface with segmentation

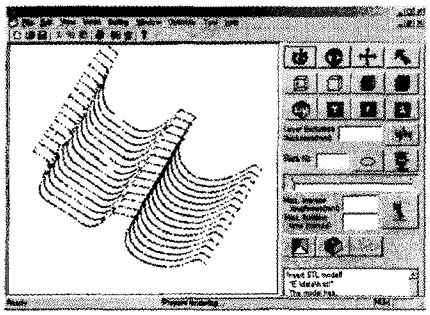
Fig. 11 Surface generation with segmentation

Table 1 Comparison of segmentation result

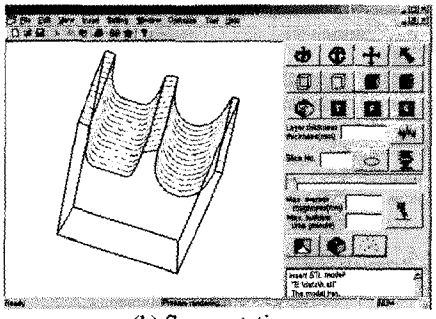
	No. of facet	Angle for selecting segment	No. of segment based on angle	No. of facets for combining segment	Angle for combining segment	No. of segment after combination
Pawn model	53602	5	3048	50	15	131
		7.5	1794			116
		10	1226			97
Face model	28706	7	3884	100	15	55
		8	3275	50	10	78

Table 2 Comparison of error

	Segmentation	Maximum (+) error	Average (+) error	Maximum (-) error	Average (-) error
Model in Fig. 11	without segmentation	0.507	0.047	-0.699	-0.047
	with segmentation	0.206	0.026	-0.285	-0.031
Model in Fig. 12	without segmentation	0.308	0.043	-0.339	-0.045
	with segmentation	0.199	0.039	-0.226	-0.034



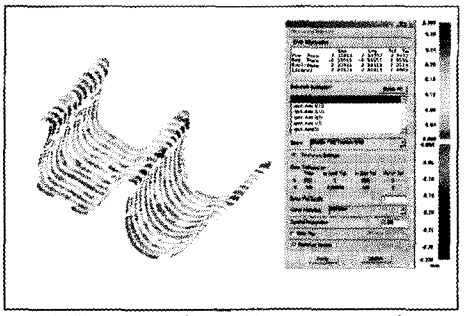
(a) Point data



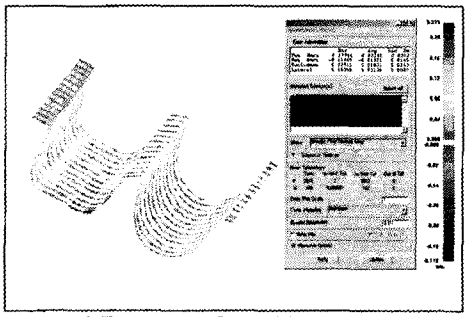
(b) Segmentation

(c) Surface without segmentation

(d) Surface with segmentation



(e) Error on surface without segmentation



(f) Error on surface with segmentation

Fig. 12 Surface generation with segmentation

그리고 Fig. 11(f), 12(f)의 오차 비교에서 오차가 전체적으로 고르게 분포하여 최대오차를 줄임을 알 수 있다.

세그먼트를 이용하지 않고 하나의 곡면으로 생성된 모델은 평균 오차의 감소를 위해서 다수의 조정점의 설정이 필요하며 경계 부근에서의 정도가 떨어지므로 복합 곡면의 생성에 부적합함을 알 수 있다. 세그먼트를 이용하여 생성된 곡면은 각 세그먼트의 조정점을 작게 설정하면서도 전체적인 평균 오차와 세그먼트 경계 부근에서의 최대 오차를 감소시키므로 복합 곡선 생성에 유용하며 자동화된 공정에 기여할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 레이저 스캐너로부터 측정된 다수의 점 데이터로부터 측정점을 분할하고 B-spline 곡면을 생성하는 소프트웨어를 개발하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측정점 분할 시 세그먼트 그룹으로 허용되는 삼각형간의 각도, 적은 수의 점으로 구성된 세그먼트가 주위 세그먼트 그룹과 결합하는 허용 각도, 허용 수량을 사용자 입력에 의해 결정함으로써, 사용자의 요구와 필요성에 적합한 측정점의 분할이 가능하다.

(2) 입력된 점 데이터로부터 삼각형망을 구성하고 인접한 삼각형과의 각도의 편차는 삼각형간의 법선 벡터의 차이로서 표현하였다. 삼각형간의 각도에 의한 선택으로 곡률이 변화하는 부분을 찾으므로 경계를 찾는데 더욱 적합하다.

(3) 생성된 세그먼트 그룹을 통해서 각 그룹의 경계를 명확히 구분할 수 있고, 각 그룹을 구성하는 B-spline 곡면을 정확히 생성한다. 이는 측정점의 분할없이 생성된 B-spline 곡면보다 데이터의 곡률이 크게 변하는 부분에서 오차를 줄일 수 있다.

(4) 이는 작업자의 수작업에 의한 면 생성 과정에서 발생할 수 있는 모델링 오차와 시간을 줄이고, RP 제품의 정도 향상을 통해 자동화된 공정에 기여할 수 있다.

참고문헌

(1) Milroy, M. J., Bradley, C. and Vickers, G. W., 1997, "Segmentation of a Wrap-Around Model using an Active Contour," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 299～320.

(2) Yang, M. and Lee, E., 1999, "Segmentation of Measured Point Data using a Parametric Quadric Surface Approximation," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 449～457.

(3) Liu, S. and Ma, W., 1999, "Seed-Growing Segmentation of 3-D Surfaces from CT-Contour Data," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 517～536.

(4) Sarkar, B. and Menq, C. H., 1991, "Smooth-Surface Approximation and Reverse Engineering," *Computer-Aided Design*, Vol. 23 No. 9, pp. 623～628.

(5) Kruth, J. P. and Kerstens, A., 1998, "Reverse Engineering Modelling of Free-Form Surfaces from Point Clouds Subject to Boundary Conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 120～127.

(6) Peng, Q. and Loftus, M., 1998, "A new approach to Reverse Engineering Based on Vision Information," *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 38, pp. 881～899.

(7) Cho, M., Seo, T., Kim, J. and Kwon, O., 2000, "Reverse Engineering of Compound Surfaces using Boundary Detection Method," *KSME international Journal*, Vol. 14, No. 10, pp. 1104～1113.

(8) Piegl, L. and Tiller, W., 1996, "Algorithm for Approximate NURBS Skinning," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 699～706.

(9) Varady, T., Martin, R. R., and Cox, J., 1997, "Reverse Engineering of Geometric Models - an Introduction," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255～268.

(10) Werner, A., Skalski, K., Piszczatowski, S., Swieszkowski, W. and Lechniak, Z., 1998, "Reverse Engineering of Free-Form Surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 128～132.

(11) Park, H., Kim, K., 1996, "Smooth Surface Approximation to Serial Cross-Sections," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 12, pp. 995～1005.

(12) Choi, B. K., Shin, H. Y., Yoon, Y. I. and Lee, J. W., 1998, "Triangulation of Scattered Data in 3D Space," *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 5, pp. 239～248.

(13) Sung-Min Hu, Ho-Chan Kim and Seok-Hee Lee, 2001, "Point Data Reduction in Reverse Engineering by Delaunay Triangulation," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 8, pp. 1246～1252.

(14) Sang-C. Park, Hayong Shin and Byoung K. Choi, 1999, "An efficient polygonal chain intersection algorithm," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 4, No. 3, pp. 190～199.

(15) Piegl, L. and Tiller, W., 1997, The NURBS Book, 2nd Edition, Springer.

(16) Sung-Min Hur, Jae-Won Choi and Seok-Hee Lee, 2001, "Study on Application of Reverse Engineering by Generation of the Free-Form Surface," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 300～304.