

자유 곡면 생성을 통한 역공학 적용에 관한 연구

허성민*, 최재원*, 이석희**

Study on Application of Reverse Engineering by Generation of the Free-Form Surface

Sung-Min Hur*, Jae-Won Choi* and Seok-Hee Lee**

ABSTRACT

Reverse engineering has been widely used for the shape reconstruction of an object without CAD data and the measurement of clay or wood models for the development of new products. To generate a surface from measured points by a laser scanner, typical steps include the scanning of a clay or wood model, the generation of compatible input curves, the generation of a surface and manufacturing data like G code or STL file.

A laser scanner has a great potential to get geometrical data of a model for its fast measuring speed and higher precision. The data from a laser scanner are composed of many line stripes of points including small spikes and noise. A new approach using automated surface generating algorithm is introduced to deal with problems during reverse engineering process. And the input data and the generated surface are represented in IGES format, thus can be supplied to other CAD/CAM software without any data manipulation.

Key Words : Reverse Engineering(역공학), B-Spline Curve and Surface(B-Spline 곡선 및 곡면), Input Curve(입력 곡선), Polygonal Chain(점열 다각형), Laser Scanner(레이저 스캐너), IGES(Initial Graphics Exchange Specification)

1. 서론

역공학(Reverse Engineering)이란 CAD 데이터가 존재하지 않는 기존의 형상이나 클레이(clay) 혹은 나무, 석고 등으로 제작되어진 측정물에 대하여 3차원 디지털타이저(digitizer)를 이용하여 기하학적인 좌표(geometrical coordinate)를 측정한 뒤 가공을 위한 CAD 데이터를 생성하는 기법이다.⁽¹⁾⁽⁸⁾ 실제 산업현장에서는 제품 계획에서부터 생산까지의 과정

을 획기적으로 단축시키는 것이 현대 산업 사회의 치열한 경쟁에서 도태되지 않기 위해서 무엇보다도 중요하다. 역공학은 시작품 혹은 기존 제품에서 곧바로 3차원 데이터를 생성할 수 있을 뿐 아니라 제품의 수정에 있어서도 빠른 데이터 수정이 가능하기 때문에, 실제 산업 현장에서 생산 공정을 효율적으로 단축시켜주는 수단으로 사용된다.

역공학의 일련의 작업은 3차원 데이터의 측정으로부터 시작된다. 3차원 데이터 측정기구로서

2000년 10월 30일 접수

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

레이저 스캐너(Laser Scanner), CMM(Coordinate Measuring Machine), CT(Computer Tomography) 등이 있는데 근래에 들어서는 비접촉식 측정기구인 레이저 스캐너가 많이 이용되고 있다. 레이저 스캐너는 측정속도가 빠르고 정도가 우수할 뿐만 아니라 스캐너의 측정 방식에 따라서 점 데이터가 라인 형식으로 측정되어지기 때문에 단면 곡선을 이용해서 곡면을 생성시킬 경우에 매우 용이하다. 이런 장점에 반해 노이즈를 포함한 측정 데이터의 양이 많기 때문에 형상을 잘 나타내면서 원활한 데이터 처리 작업을 할 수 있을 정도의 점들로 샘플링을 해야 하는 추가 작업이 필요하다. 또한 측정물이 함몰 부위를 가지거나 센서가 측정물에 가려질 경우에는 측정이 이루어지지 않게 된다. 그리고 레이저 스캐너의 구조적인 특성상 완전히 연결된 폴리라인(polyline)이 생성되지 않는 경우도 있으며 여러 면을 측정할 경우에는 각각의 측정면들의 지역 좌표계(local coordinate)를 하나의 좌표계로 통합하는 정합(registration) 작업이 필요하게 된다⁽⁹⁾.

본 논문에서는 비교적 자유 형상을 가지면서 정합 작업이 필요 없는, 즉 한 방향에서 측정이 가능한 측정물로부터 레이저 스캐너를 이용하여 점을 획득하고 단면 곡선을 생성시키고 그 곡선을 로프트(loft)시킴으로써 최종적으로 곡면을 신속하고 효율적으로 생성시키는 방법을 제시하고자 한다.

단면 곡선을 생성시키기 위한 입력 곡선은 데이터의 적합성(compatibility)을 유지시키기 위해서 사용자의 수작업을 요구하므로 효율적으로 입력 곡선을 생성시키는 적합화 알고리즘을 제시한다.

또한 생성된 곡면과 측정물과의 비교 및 검증을 위해서 상용 소프트웨어를 이용해서 가공 데이터, 즉 NC(Numerical Controlled) 장치의 공구 경로인 G code와 패속 조형(Rapid Prototype) 장치의 기본 포맷인 STL 파일을 생성하고 실제 가공을 수행한다. 측정된 데이터는 IGES(Initial Graphics Exchange Specification) 포맷으로 입력, 저장되며 결과적으로 생성되는 곡면도 IGES 포맷으로 나타내어진다.

2. 관련 연구

역공학에 대한 연구는 측정물로부터 데이터를 획득하는 장비와 곡면 생성 방법 및 곡면의 품질 향상에 대해서 다양한 연구가 진행되고 있다.

Piegl⁽¹⁾ 등은 측정점으로부터 NURBS 곡면을 생

성하는데 있어서 보간(interpolation) 방식과 근사(approximation) 방식에 대해 연구하였으며, 특히 단면 곡선(cross-sectional curve)의 적합성 부여에 대한 알고리즘을 제시하였다. Tamas⁽²⁾ 등은 접촉식과 비접촉식 장비에 있어서 데이터 획득에 대한 전반적인 방법에 대해 기술하였으며 데이터 획득시 발생하는 실제적인 문제들을 규명하였다. Werner⁽³⁾ 등은 CMM 장비를 이용해서 데이터를 획득하고 곡면을 IGES 포맷으로 생성한 후 CAD/CAM 시스템에서 가공하는 방법에 대해 연구하였다. Kruth⁽⁴⁾ 등은 CMM 장비를 이용해서 측정된 비정규적으로 분포된 점군으로부터 생성된 여러 개의 곡면을 경계조건에 의해 합침으로써 완성된 곡면을 생성하는 방법에 대해 연구하였다. Gu⁽⁵⁾ 등은 신경망 기법을 이용해서 훼손된 일부분의 데이터를 복구하는 방법에 대해 연구하였다. Park⁽⁶⁾ 등은 CT 이미지로부터 얻은 점데이터를 바탕으로 적합화된 곡선 및 곡면을 생성하는 기법에 대해 연구하였다. Liu⁽⁷⁾ 등은 CT 이미지로부터 경계곡선을 얻어내고 곡면을 생성하는 방법에 대해서 연구하였다. 이관행⁽⁸⁾ 등은 기준 입력 데이터의 감소를 통해서 빠르게 슬라이스 데이터를 생성하여 RP 파트를 제작하는 방법에 대해서 연구하였다.

3. 본론

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 LDI 사의 레이저 스캐너인 Surveyor 1200에서의 측정 장면과 X, Y, Z축 방향을 나타내며, Fig. 2는 본 논문의 전체적인 흐름을 나타낸다.

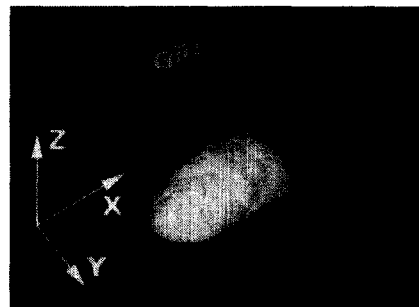


Fig. 1 Laser scanning and X,Y,Z axes

3.1 측정된 점데이터의 적합화

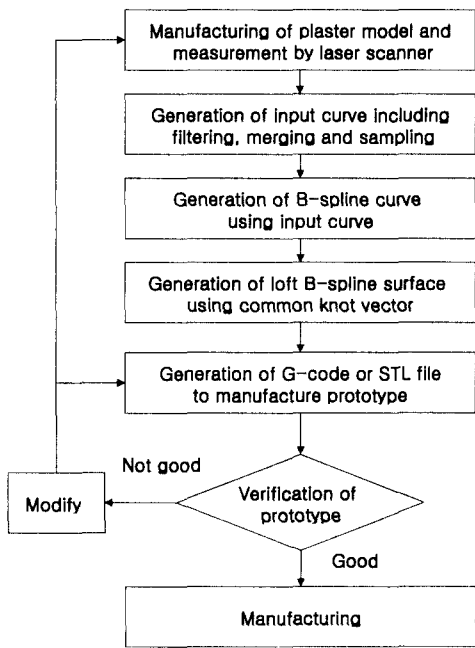


Fig. 2 Overall flowchart

본 논문에서 정의한 측정점의 적합화 과정은 노이즈 제거, 적정 개수의 점의 추출 및 Fig. 1과 같이 레이저 스캐너의 진행방향에 수직인 축인 Y축(이하 Y축) 방향에 대해서 스캔 간격마다 하나의 연결된 폴리라인을 생성하고 꼬인 점열(polygonal chain)의 검색 및 제거, 그리고 형상을 잘 반영할 수 있는 적당한 개수의 점을 샘플링(sampling)하는 것이다.

3.1.1 전처리

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 노이즈를 제거하고 적당한 개수의 점을 가지도록 filtering되어져야 하며 여러 개의 스캔라인이 연결될 수 있도록 merging이 되어져야 한다. 또한 점데이터를 부드럽게 하기 위해서 smoothing 작업이 필요하다. 이러한 전처리 과정은 매우 까다로운 작업으로 사용자의 필요에 따라 수작업으로 이루어진다. 노이즈 제거,

filtering, merging 및 smoothing 작업은 레이저 스캐너 시스템의 전용 소프트웨어인 DataSculpt에서 사용자의 필요에 맞게 직접 수행한다⁹⁾.

3.1.2 연결된 폴리라인 생성

Y축 방향으로 연결된 폴리라인의 생성은 측정시 측정 간격을 조정함으로써 Fig. 3과 같이 각각의 측정 라인이 Y축 방향으로 같은 위치에 놓이게 할 수 있다. 이는 단면 곡선을 생성해서 곡면을 로프트하는데 있어서 매우 중요한 작업이 된다.

X, Y, Z의 3축을 가진 Cartesian 형식의 레이저 스캐너의 특성상 한 라인으로 측정할 수 없는 측정물은 Fig. 3과 같은 부분에서 점데이터가 연결되지 않는다. 전체 폴리라인에 대해 Y축 방향으로 스캔 간격마다 하나의 연결된 폴리라인을 생성하기 위해서, Y축 방향으로 같은 위치에 있는 폴리라인을 검색하고 하나의 폴리라인으로 합친 후 다시 저장함으로써 수작업에 의한 폴리라인의 연결을 줄인다.

Y축상 여러 개의 폴리라인이 있을 경우 점데이터가 중첩이 될 경우가 발생한다. Fig. 3과 같이 중첩이 되지 않을 경우는 단순히 순차적으로 점을 연결해서 하나의 폴리라인을 생성하면 되지만 Fig. 4와 같은 경우에는 중첩되는 부분을 모두 반영해야 되므로 Fig. 5와 같은 병합 작업이 필요하다.

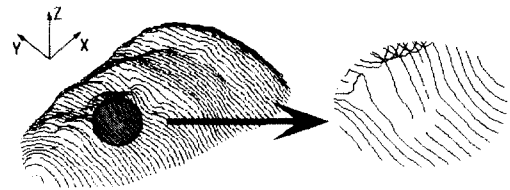


Fig. 3 Polylines which are not perfectly merged

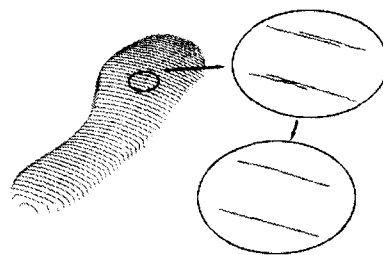


Fig. 4 Overlapped polylines

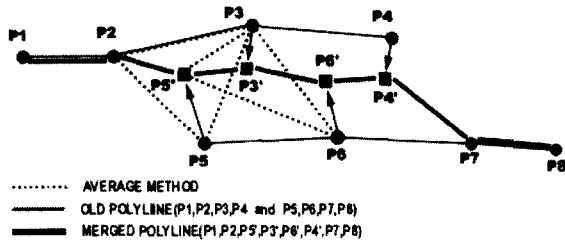


Fig. 5 Merge algorithm

Fig. 5에서 두 개의 중첩된 폴리라인을 하나의 폴리라인으로 연결하기 위해서 왼쪽에서부터 처음으로 중첩되는 점 P5를 점선으로 이루어진 삼각형 P2, P3, P5의 중점 P5'로 이동시키고 다음 점인 P3도 마찬가지로 P5', P3, P6의 중점 P3'로 이동시키는 작업을 P4까지 수행함으로써 하나의 폴리라인(P1, P2, P5', P3', P6', P4', P7, P8)을 생성할 수 있다.

이 작업은 비교적 많은 양의 점데이터가 존재할 때 가능하다. 점데이터의 개수가 작을 경우는 기하학적 특성을 반영하는 모서리 등의 형상이 왜곡될 가능성이 크기 때문이다. 본 논문에서 사용된 점데이터의 개수는 하나의 폴리라인 당 대략 수백개 정도로서 기하학적 특성을 잃지 않을 만큼 충분하다.

3.1.3 꼬인 점열의 검색 및 제거

꼬인 점열은 면모델링에 있어서 영향을 미친다. 꼬인 점열을 포함하고 있는 곡선이 이웃곡선과 연결될 때 꼬인 부위의 점의 위치 및 파라메타가 이웃곡선과 심한 차이가 있으므로 매끄럽게 로프트되지 않아 위글(wiggle)이 발생하게 된다.

꼬인 점열을 찾는 방법은 YZ평면에 점열을 투영시킨 다음 점열의 순서대로 검색해 나가면서 각 점의 y좌표 값이 가장 큰 값을 가지는 점과 가장 작은 값을 가지는 점 사이에 몇 개의 변곡 구간이 존재하느냐에 따라 꼬인 점의 유무를 판별할 수 있다⁽¹⁰⁾. 변곡 구간이란 y좌표 값이 증가하다가 감소하는 구간이나 감소하다가 증가하는 구간을 일컫는다. 꼬인 점열을 찾은 다음 꼬인 부분을 이루고 있는 점들의 상호 관계를 중심으로 제거해야 될 점을 판단한다.

실제 측정시 이러한 꼬인 점열은 사용자의 조작 미숙이나 측정물의 표면이 깨끗하지 못할 경우에

많이 발생하며 면이 끝나는 부분에서 많이 발생하게 된다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 실제 측정시 발생된 꼬인 점을 나타내는 것으로, 보통 면의 끝부분에서 많이 발생되는데 다른 점들보다 끝점(Pn)의 위치가 비정상적으로 돌출되거나 꼬이는 경우를 나타낸다.

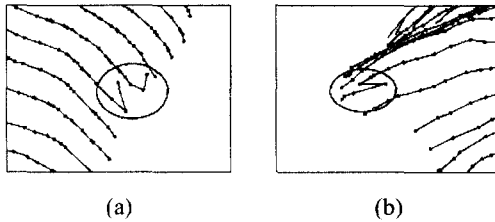


Fig. 6 Intersected polygonal chain on scan data

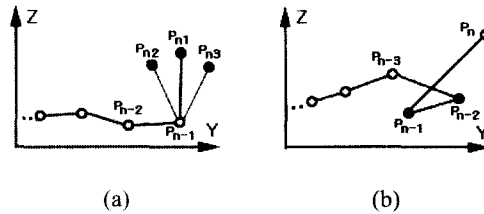


Fig. 7 Cases of intersected polygonal chain

Fig. 7은 꼬인 점에 의한 데이터의 분포를 일반적인 형태로 정의한 것으로, 면을 생성하고 있는 폴리라인의 중간 부분에서 발생할 빈도는 끝 부분에서 발생할 빈도보다 매우 적으므로 본 논문에서는 끝 부분에서만 Fig. 7의 (a), (b)가 발생한다고 가정한다.

Fig. 7의 (a)에서 Pn1은 이전 점과의 각도가 거의 직각에 가까운 경우이고 Pn2는 예각, Pn3는 둔각인 경우이다. 예각과 직각인 경우에는 꼬인 점으로 간주하고 제거시킨다. 그러나 둔각일 경우 일정 각도보다 작은 경우에 제거시켜야 할 것이다. 위의 세 가지 경우는 이웃점들 사이의 각도의 변화로써 식 (1)과 같이 판단할 수 있다. γ 는 상수값으로서 경험적으로 3정도의 값을 이용한다. 폴리라인의 양 끝 부분의 3개씩의 점부터 검색해서 식 (1)을 만족하면 Pn을 저장하고 식 (1)을 만족하지 않을 때까지

지 계속 검색한다. 검색이 완료되면 저장된 점들을 지우고 폴리라인을 다시 생성시킨다.

Fig. 7의 (b)의 경우는 이웃하는 점들의 y 좌표값의 증감으로서 식 (2)와 같이 판단할 수 있다. 즉, 식 (2)에서처럼 이웃하는 폴리라인의 y 좌표값의 차가 서로 반대 부호를 가질 경우 변곡 구간으로 판단하고 변곡 구간이 존재하지 않을 때까지의 꼬인 점열을 제거한다.

$$|\alpha_{n-2} - \alpha_{n-1}| \leq \gamma |\alpha_{n-1} - \alpha_n| \quad (1)$$

(α_n : degree of n th)

$$(y_n - y_{n-1}) \cdot (y_{n-1} - y_{n-2}) < 0 \quad (2)$$

(y_n : y coordinate value of n th)

3.1.4 특징점 샘플링

입력 곡선을 생성시키기 위해서 적당한 개수의 점을 가지면서 형상을 잘 반영할 수 있는 폴리라인을 생성시켜야 한다. 입력 곡선은 B-Spline 곡선을 생성시키기 위한 준비 곡선으로서, 점의 개수가 많더라도 실제 형상을 잘 나타낼 수 있는 점들로 이루어져야 하므로 샘플링시 점의 개수보다는 정도를 기준으로 추출한다.

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. 10과 같은 문제점이 발생한다. 즉, 적당한 간격이 보장되지 않으면 전체 곡선의 parameterization에 영향을 끼치게 된다.

Fig. 8은 샘플링되어야 할 초기 데이터를 나타내며 Fig. 9는 샘플링을 수행하지 않고 모든 점을 상대로 fitting한 것을 나타낸다. Fig. 10은 각도가 상대적으로 작은 특징점만을 샘플링한 것이며 Fig. 11은 각도 및 거리를 변수로 샘플링한 것을 나타낸다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11은 샘플링된 점을 입력 데이터라고 가정하고 입력 곡선을 생성시킨 것도 동시에 나타내고 있다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 각도 및 거리를 변수로 샘플링해야 실제 형상을 잘

반영한다.



Fig. 8 Data to be sampled



Fig. 9 Fitting using all data

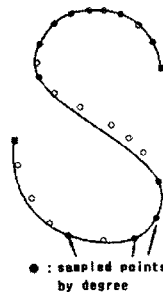


Fig. 10 Fitting with angle



Fig. 11 Fitting with angle and distance

3.2 적합화된 단면 곡선의 생성

전술한 방법으로 정렬된 점열을 이용해서 입력 곡선을 생성해야 된다. 입력 곡선은 B-Spline 곡선이며 Fig. 11과 같이 각 라인의 특징점을 모두 지날 수 있는 보간을 통해서 생성된다. 생성된 입력 곡선에 대해서 적합화 과정을 거치게 되면 로프트 곡면을 생성하기 위한 단면 곡선이 생성된다. 이 과정은 입력 곡선을 적당한 양의 점으로 샘플링함과 동시에 일정한 간격마다 1개의 knot을 가지도록 knot 삽입 및 제거를 필요로 하며 최종적으로 모든 단면 곡선에 대해서 공통 knot 벡터와 공통 차수를 가져야 한다.

3.2.1 B-Spline 곡선 및 곡면

B-spline 곡선은 국소 변형(local modification)이 가능하고 불균일한 매듭값(knot vector)을 통해서 형

상을 잘 나타낼 수 있어 자유 곡선을 생성시키는 방법으로 많이 사용되며 식 (3)과 같이 표현된다. B-Spline 곡선은 매개 변수 곡선 및 곡면을 표현하는데 많이 이용되는 함수로써 i 번째 p 차 표준화된 B-Spline의 basis 함수는 식 (4)와 같이 정의된다^{(11),(12)}.

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

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

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

p 차 B-Spline 곡선 $C(u)$ 는 식(3)과 같이 B-Spline 함수들의 linear combination으로 표현되므로 입력점 (Q_k), 매개변수 (\bar{u}_k), knot값 ($U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+p}, u_{n+p+1}\}$)이 주어진다면 조정점 (P_k)을 구할 수 있다. 우선 입력점으로부터 매개변수를 구하는 방법에는 uniform, chord length, centripetal method가 있는데 본 논문에서는 식 (5)와 같은 chord length method를 이용한다. 이 방법은 입력점의 분포에 따라서 매개변수가 달라지므로 uniform method를 통해 매개변수를 정하는 것보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. Knot값은 매개변수들의 평균으로서 식 (6)과 같이 구해진다.

$(p-1 \times q-1)$ 차로 이루어진 B-Spline 곡면은 식 (7)과 같이 B-Spline 곡선들로 이루어진다.

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

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

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d} \quad 1 \leq k \leq n-1 \quad (5)$$

$$u_i = 0 \quad (0 \leq i \leq p)$$

$$u_i = 1 \quad (n+1 \leq i \leq n+p+1)$$

$$u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} u_i \quad (1 \leq j \leq n-p) \quad (6)$$

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

3.2.2 단면 곡선 생성

B-Spline으로 된 입력 곡선은 단순히 샘플링된 점들을 보간한 것이다. 따라서 샘플링된 점의 개수 만큼의 비교적 많은 조정점을 포함하고 있으며 각 곡선의 차수(degree)도 다르다. 이러한 입력 곡선을 다시 샘플링함으로써 조정점의 개수를 줄일 수 있으며 또한 일정 구간마다 하나의 점 이상을 가지게 함으로써 곡선의 parameterization을 좋게 하여 균일화된 조정점을 얻을 수 있다. 이러한 샘플링 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중 본 논문에서는 chord height와 curvature에 따라서 샘플링하는 방법을 이용하였다. Fig. 12는 chord height에 따라 점을 샘플링하는 것을 나타내고 있다. chord height가 주어진 허용오차 이내가 되도록 점을 샘플링하면 된다. curvature는 입력곡선이 B-Spline 곡선의 형태를 띠고 있기 때문에 식 (8)과 같이 곡선의 미분식으로 구할 수 있다. 식 (9)는 B-Spline basis 함수의 미분식을 나타내고 있다.

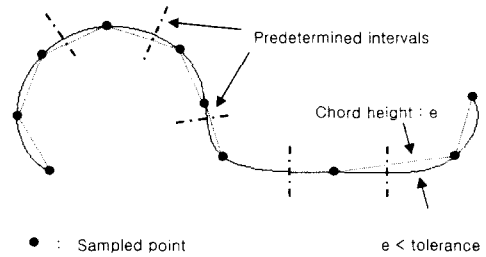


Fig. 12 sampled points considering chord height

$$C^{(k)}(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}^{(k)}(u)P_i \quad (8)$$

$$N_{i,p}^{(k)}(u) = p \left(\frac{N_{i,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p}-u_i} - \frac{N_{i+1,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} \right) \quad (9)$$

3.2.3 단면 곡선의 적합화

각 단면 곡선은 로프트 곡면을 생성시키기 위해서 차수와 knot 벡터를 일치시켜야 한다^{(6),(11)}. 차수는 u, v 방향에 대해서 모두 4차로 하였다. 공통 knot 벡터를 구하기 위해서 각 단면 곡선에서 같은 위치의 매개변수를 평균해서 식 (6)과 같이 공통 knot 벡터를 구할 수도 있으나^{(1),(6)} 본 논문에서는

적합화 과정을 거친 단면 곡선, 곡면의 와이어 프레임, 곡면의 shading 형상, surfacer를 이용한 측정물과 생성 곡면과의 오차를 나타낸다.

Fig. 21~Fig. 26은 얼굴 모형에 대한 스캔라인, 적합화 과정을 거친 단면 곡선, 곡면의 와이어 프레임, 곡면의 shading 형상, surfacer를 이용한 측정물과 생성 곡면과의 오차를 나타낸다.

Fig. 27은 생성된 곡면을 바탕으로 NC 장치 및 패속 조형 장치를 이용해서 가공한 시작품(prototype)과 실제 측정물을 비교한 것이며, Table 1은 두 개의 측정물에 대해서 곡면의 생성 과정과 중간 결과를 요약해서 나타낸다.

생성 곡면의 오차를 surfacer를 이용해서 생성된 곡면을 측정 데이터와 비교해 본 결과 실제 현장 작업자에 의해 경험적으로 허용되는 평균 모델링 오차 (0.05mm~0.1mm)와 유사한 0.04mm, 0.07mm로 나왔으며 곡률이 많이 변하는 부분에서 최대 오차가 발생하였다. 또한 곡면의 끝부분에서의 오차가 상대적으로 크게 발생하였는데, 이는 폴리라인의 시작점 및 끝점의 위치가 이웃 폴리라인과 상대적으로 비균일하게 분포되었기 때문이다.

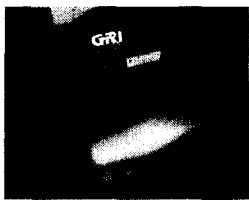


Fig. 15 Foot model



Fig. 16 Scanline



Fig. 17 Compatible cross-section curve

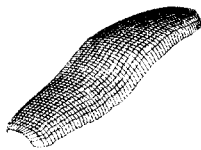


Fig. 18 Wireframe of generated surface

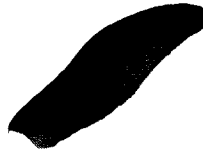


Fig. 19 Shaded image of generated surface

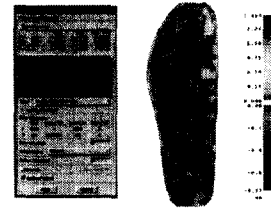


Fig. 20 Comparison of error using Surfacer



Fig. 21 Face model



Fig. 22 Scanline



Fig. 23 Compatible cross-section curve



Fig. 24 Wireframe of generated surface



Fig. 25 Shaded image of generated surface

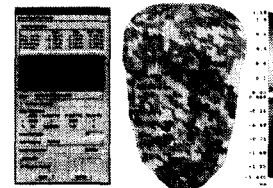


Fig. 26 Comparison of error using Surfacer

Table 1 Overall process and result

단계	측정사항 (단위)	foot	face
측정 단계	측정 장비	surveyor 1200	
	측정물 크기 (가로×세로×높이)	100×280 ×40mm	150×240 ×45mm
	측정 간격(mm)	4	3
	측정점(개)	100254	185499
	폴리라인(개)	757	1021
측정점의 적합화 단계	전처리된 점(개)	9483	15441
	전처리된 폴리라인(개)	80	111
	연결된 폴리라인(개)	11	18
	제거된 폴리라인(개)	1	15
	꼬인 점열(개)	2	3
	샘플링(개)	3144	5673
단면 곡선 및 곡면 생성 단계	단면곡선(개)	68	78
	u방향 오더	4	4
	v방향 오더	4	4
	조정점(u×v)	16×68	30×78
에리울 (mm)	평균오차(+)	0.0404	0.0706
	평균오차(-)	-0.0347	-0.0748
	최고오차(+)	0.5782	0.8036
	최고오차(-)	-0.5327	-0.9712

5. 결론

본 논문에서는 비교적 복잡하면서 자유 형상을 갖는 측정물로부터 레이저 스캐너를 이용하여 점 데이터를 획득하고 곡면을 생성하는 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

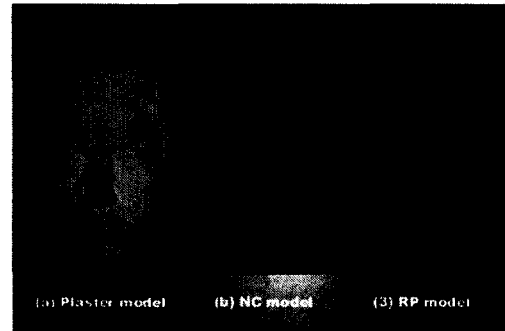


Fig. 27 Comparison of prototypes

1. 역공학 기법을 이용한 자동 곡면 생성 알고리즘을 개발하였다. 생성된 곡면은 실제 현장 작업자에 의해 경험적으로 허용되는 모델링 오차와 비교해 볼 때 비교적 정도가 높으면서 품질이 우수한 곡면이다.

2. 수작업을 필요로 하는 점데이터의 적합화 작업에 대해서 측정 데이터를 바탕으로 자동적인 곡면 생성이 가능하였다.

3. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용하면 레이저 스캐너를 통해 얻어진 점데이터로부터 가공 데이터 생성을 통한 조형물 제작의 자동화가 가능하다.

참고문헌

1. Les Piegl and Wayne Tiller, "Algorithm for approximate NURBS skinning," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 9, pp. 699~706, 1996.
2. Tamas Varady, Ralph R Martin and Jordan Cox, "Reverse engineering of geometric models - an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255~268, 1997.
3. A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Swieszkowski and Z. Lechniak, "Reverse engineering of free-form surfaces," Journal of Materials Processing Technology Vol. 76, pp. 128~132, 1998.
4. J. P. Kruth, A. Kerstens, "Reverse engineering modelling of free-form surfaces from point clouds subject to boundary conditions," Journal of

- Materials Processing Technology, Vol. 76, pp. 120~127, 1998.
5. P. Gu and X. Yan, "Neural network approach to the reconstruction of freeform surfaces for reverse engineering," Computer-Aided Design, Vol. 27, No. 1, pp. 59~64, 1995.
 6. H. Park, K. Kim, "Smooth surface approximation to serial cross-sections," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 12, pp. 995~1005, 1996.
 7. S. Liu and W. Ma, "Seed-growing segmentation of 3-D surfaces from CT-contour data," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 517~536, 1999.
 8. 우혁제, 이관행, "리버스 엔지니어링으로 생성된 데이터를 이용한 폐속 조형 기술 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제1호, pp. 95~107, 1999.
 9. DataSculpt SCAN Manual, Laser Design Inc.
 10. 박상천, 신하용, 최병규, "점열 곡선의 꼬임을 효율적으로 찾는 알고리즘," 한국 CAD/CAM 학회논문집, 제4권, 제3호, pp. 190~199, 1999.
 11. Les Piegl and Wayne Tiller, The NURBS Book, 2nd Edition, Springer, 1997.
 12. Kun-Woo Lee, Principles of CAD/CAM/CAE System, Addison-Wesley, 1999.
 13. U.S. Product Data Association, INITIAL GRAPHICS EXCHANGE SPECIFICATION US PRO IPO-100-1996, 1996.