

역공학에서의 Delaunay 삼각형 분할에 의한 STL 파일 생성

김호찬* · 허성민* · 이석희†
(2001년 2월 9일 접수, 2002년 1월 30일 심사완료)

STL Generation in Reverse Engineering by Delaunay Triangulation

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

Key Words: Reverse Engineering(역공학), Delaunay Triangulation(Delaunay 삼각형 분할), Laser Scanner(레이저 스캐너), Triangular Net(삼각형망), RP(급속조형), STL(쾌속조형 파일 포맷)

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 and the generation of manufacturing data like 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. A new approach to remove point data with Delaunay triangulation is introduced to deal with problems during reverse engineering process. The selection of group of triangles to be triangulated based on the angle between triangles is used for robust and reliable implementation of Delaunay triangulation as preliminary steps. Developed software enables the user to specify the criteria for the selection of group of triangles either by the angle between triangles or the percentage of triangles reduced. The time and error for handling point data during modelling process can be reduced and thus RP models with accuracy will be helpful to automated process.

1. 서 론

역공학(Reverse Engineering)이란 CAD 데이터가 존재하지 않는 기존의 형상이나 클레이(clay) 혹은 나무, 석고 등으로 제작되어진 측정물에 대하여 3차원 디지털라이저(digitizer)를 이용하여 기하학적인 좌표를 측정한 뒤 가공을 위한 CAD 데이터

를 생성하는 기법이다.

이것은 여러 산업 분야에서 존재하는 모델이 유용하게 사용될 수 없는 경우, 기하학적 데이터가 없는 물체를 측정해서 CAD/CAM에 이용할 수 있는 기하학적 형상모델로 변화시켜 생산에 이용하는 과정이다. 또한, 실존하는 부품의 복제, 실제 제품에 기본을 둔 디자인의 수정, 닳거나 손상된 부품의 수리 등을 위하여 사용되어질 수 있고, 새로운 제품의 개발과정에서 매우 유용하게 이용되고 생산 공정을 효율적으로 단축시켜주는 수단으로 사용된다.

역공학을 위한 3차원 데이터 측정기구로서 CMM(Coordinate Measuring Machine), 레이저 스캐너(Laser Scanner), CT(Computer Tomography) 등이

* 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계 기술연구소

E-mail : sehlee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1476 FAX : (051)514-0685

있는데 근래에 들어서는 비접촉식 측정기구인 레이저 스캐너가 많이 이용되고 있다. 레이저 스캐너는 측정속도가 빠르고 정도가 우수할 뿐만 아니라 점 데이터가 라인 형식으로 측정되기 때문에 단면 곡선을 이용해서 곡면을 생성하기에 용이하다. 반면에 형상 복원에 있어서 필요 이상의 다수의 데이터가 측정되어 점 데이터의 효율적인 감소가 필요하다.

레이저 스캐너에서 측정된 데이터는 사용 목적에 따라 CNC에서 가공을 위한 면데이터 생성이 필요한 경우도 있지만, 근래에는 복잡한 형상의 부품은 RP장비를 이용하여 조형하는 경우가 많으므로 삼각형으로 구성된 STL 데이터의 생성이 요구된다.

현재 대부분의 상업용 역공학 소프트웨어는 작업자가 수작업으로 생성한 곡면을 삼각분할 하여 STL 파일을 생성한다. 또한, 대부분의 RP장비의 오차범위는 매우 작으므로 곡면 생성시에 발생한 형상 오류는 STL 데이터와 RP조형물에 그대로 전사된다. 따라서 숙련된 곡면 모델링 작업자가 필요하며, 많은 작업시간이 소요되므로, 수작업을 거치지 않는 자동화된 STL 파일의 생성이 필요하다.

2. 관련연구

Delaunay 삼각형 분할은 삼각형 분할시 전체 삼각형을 통해서 가장 작은 각을 크게 만드는 성질 때문에 STL 파일 생성시에 이용될 수 있는데, 이에 대한 알고리즘과 효율적 계산을 위한 자료 구조에 대해서 많은 연구가 있었다.^(1~3)

점데이터를 이용하여 형상을 재구성하는 과정은 크게 삼각 또는 사각 메시(mesh)를 이용하는 방법과 면(face)을 생성하는 방법으로 나눌 수 있다.

패치를 이용하는 관련연구로서 Chen^(4,5) 등은 RP 조형을 위한 최적화된 STL 데이터를 찾기 위하여 측정점의 2차원 삼각형 분할에 있어서 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 사용자의 입력에 의해 제거될 삼각형의 양을 규정하여 데이터를 감소하였다. Park⁽⁶⁾ 등은 3차원상의 점들에서 면을 생성하고 주어진 오차를 만족할 때까지 면을 수정하여 삼각 Bezier 패치로 구성된 면을 생성하는 방법을 연구하였다. Volpin⁽⁷⁾ 등은 자유 형상

에 대해서 곡률 변화 구역을 나누고 사각 패치를 채울 수 있는 경계의 검출과 energy functional에 의해서 사각패치로 자유곡면을 구성하는 방법을 연구하였다. Hamann⁽⁸⁾ 등은 세 점에서의 곡률에 근거하여 가중치를 부여하고 낮은 가중치를 가진 삼각형을 반복적으로 제거하고 재생성하여 삼각 패치를 감소시키는 방법을 제안하였고, Hoppe⁽⁹⁾ 등은 기하학적 형상과 데이터 감소와의 관계를 energy function으로 표시하였다.

면을 생성하는 관련연구로서 Piegl⁽¹⁰⁾ 등은 측정점으로부터 NURBS 곡면을 생성하는데 있어서 보간(interpolation) 방식과 근사(approximation) 방식에 대해 연구하였으며, 특히 단면 곡선(cross-sectional curve)의 적합성 부여에 대한 알고리즘을 제시하였다. Sarkar⁽¹¹⁾ 등은 복합 곡면으로부터 얻어진 측정점으로부터 경계를 얻어내고 영역을 구분한 다음 각 영역에 대해서 최소자승법을 통한 에러를 중심으로 B-Spline 곡면으로 피팅하는 방법에 대해서 연구하였다. Cho⁽¹²⁾ 등은 비전시스템을 통한 기하학적 경계 추출과 CMM에서 얻어진 데이터에 의해 생성된 B-spline 면을 결합하여 면생성을 하는 방법을 연구하였다. 허성민⁽¹⁵⁾ 등은 굴곡의 변화가 비슷한 측정점들을 1개의 대표점으로 근사함으로써 측정점의 수를 줄이는 연구를 수행하였으나 곡면으로 근사하지 않고 직접 STL파일로 사용되기에는 면이 거친 특징이 있다.

본 논문에서는 레이저 스캐너에서 측정된 데이터로부터 STL 파일을 생성하고 생성된 삼각형망의 재분할 과정을 거쳐서 데이터의 정도를 유지하면서 삼각형의 수를 효율적으로 줄이는 방법을 제시하고자 한다. 삼각형 그물 선택 각도 및 삼각형 최대 감소량, 최대 반복 횟수를 사용자 입력에 의해 규정함으로써 사용 목적에 따른 시제품에 적합한 STL 파일을 생성한다. 또한, STL 파일 생성에 유용한 Delaunay 삼각형 분할을 사용함으로써 RP 조형 과정에서 야기되는 STL 오류 검사 및 수정을 방지한다.

3. 본론

Fig. 1은 본 논문의 전체적인 흐름을 나타낸다.

3.1 삼각형망 생성

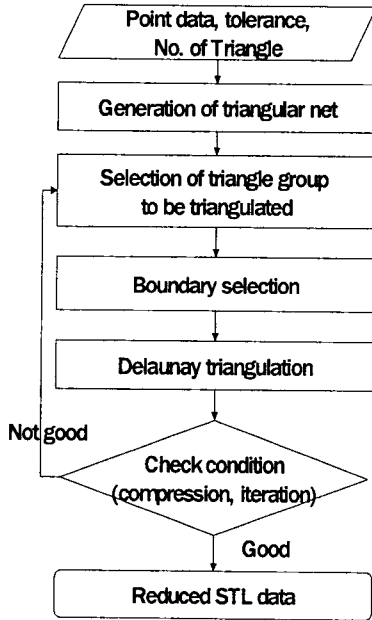


Fig. 1 Overall Flowchart

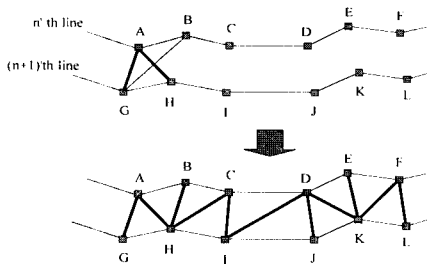


Fig. 2 Christiansen algorithm

레이저 스캐너에서 측정된 점은 Christiansen 알고리즘⁽¹³⁾을 이용하여 한 선분의 점으로부터 다른 선분의 인접한 점을 연결하는 과정을 반복하면 Fig. 2와 같이 STL 파일을 생성할 수 있는 삼각형망을 구성한다.

그러나 이 삼각형망은 필요 이상의 많은 삼각형으로 구성되어 있어서, STL파일 사이즈의 증가, 시각화 및 핸들링의 어려움, 오류 검사, 슬라이싱 및 주사경로 생성 과정에서 엄청난 계산 시간의 소요와 같은 문제점을 가지고 있다. 따라서 사용자의 입력에 의한 오차 한계나 삼각형수에 의한 제한을 고려하여 삼각형의 수를 감소시킨다.

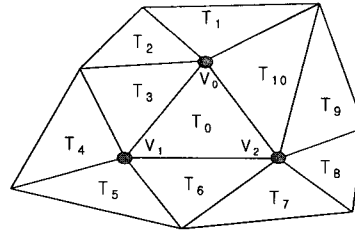


Fig. 3 Selection of triangle for triangulation

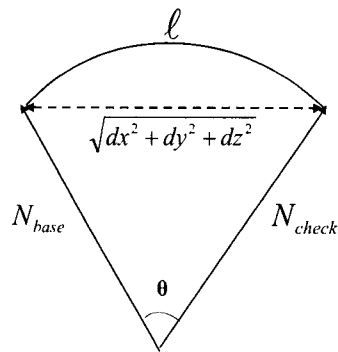


Fig. 4 Normal deviation

3.2 분할될 삼각형 그룹 선택

STL 파일을 구성한 삼각형의 수를 줄이기 위해서는 재분할될 삼각형 그룹을 선택해야 하며, 그 기준은 다음과 같다.

첫째, 삼각형의 세 정점과 공유하고 있는 다른 삼각형들이 삼각형 분할을 위한 그룹이 될 수 있는가를 판단한다. Fig. 3과 같은 경우, 삼각형 T0의 한 정점 V0와 공유하는 삼각형 T1, T2, T3, T10이 이미 다른 그룹에 속한 삼각형인가를 검사하고 다른 그룹에 속하지 않는 삼각형은 기준 삼각형과의 각도 차이를 계산한다.

삼각형간의 각도는 법선 벡터의 편차로서 표현될 수 있는데, 기준 삼각형과 검사 삼각형간의 법선 벡터의 x, y, z 방향 편차를 dx, dy, dz라고 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 θ (rad)는 사용자의 입력에 의해 정해지며, 계산 속

도 향상을 위해 Fig. 4에서처럼 두 단위법선벡터 사이의 각도(θ)가 작은 경우에 편차는 호의 길이(ℓ)에 대응됨을 이용하여 식 (2)의 조건으로 그룹 허용 여부를 판단한다.

$$\theta^2 < (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (2)$$

이상의 과정이 각 정점과 공유하는 모든 삼각형에 대해서 반복되어 만족되면, 그 정점은 주위의 삼각형과 그룹이 되는 것으로 가정하며, 주위의 삼각형과 그룹이 되는 정점이 하나도 없는 삼각형은 그룹을 만드는 대상에서 제외시킨다.

둘째, 그룹을 만들도록 분류된 삼각형에 대하여 각 정점 주위의 삼각형이 이미 다른 그룹에 속한 삼각형인가를 검사하고 기준 삼각형과의 각도 차이를 계산하여 만족하는 각 정점 주위의 삼각형은 기준 삼각형과 합쳐서 그룹을 생성하며, 이상의 과정은 모든 삼각형에 대해서 반복된다.

생성된 삼각형 그룹은 Fig. 5(a)와 같이 삼각형 T0의 각 정점 V0, V1, V2의 모든 삼각형들을 포함할 수 있고, Fig. 5(b)와 같이 정점 V1의 주위의 모든 삼각형과 정점 V0, V2 주위의 일부 삼각형만으로 구성될 수 있으며, Fig. 5(c)와 같이 삼각형 T1이 삼각형 T0에 정점만을 공유하는 경우도 있는데 이때에는 삼각형 분할을 위하여 삼각형 그룹에서 삼각형 T1을 제거한다. 삼각형 T0의 이웃한 삼각형을 찾고 이웃한 삼각형이 다시 이웃한 삼각형을 찾는 과정을 재귀호출로써 반복하면 삼각형 T1과 같이 정점만을 공유하는 삼각형을 제거할 수 있다.

3.3 경계 검출

삼각형 분할을 위해서 분할된 삼각형 그룹의 경계를 검출하는 작업이 필요하며, 그 과정은 다음과 같다.

첫째, 그룹에 속한 모든 삼각형의 half edge에 접하는 삼각형 중에서 동일 그룹에 속하는 것이 존재하지 않으면 경계를 이루는 edge로 판별한다.

둘째, half edge의 한 점을 시작점으로 잡고 경계로 판별된 edge에 대해서 다음 점을 정점으로 가지고 있는 edge를 찾아 연결한다.

셋째, 이상의 과정을 연결된 edge가 시작점으로 돌아올 때까지 순차적으로 반복한다.

Fig. 5(a), (b)와 같이 단일 루프를 이루는 폴리

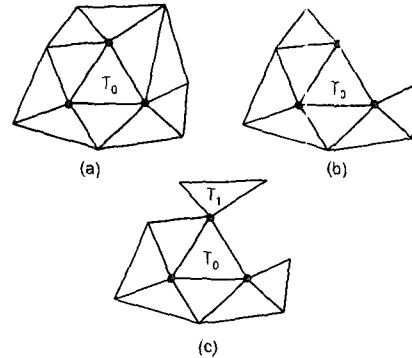


Fig. 5 Comparison of selected triangle group

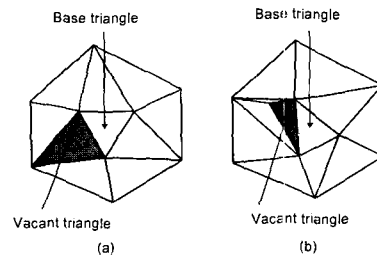


Fig. 6 Triangle group with vacant triangle

곤 형태인 경우에는 경계 검출이 용이하나, Fig. 6(a), (b)와 같이 한 루프에 다른 루프가 접하거나 포함된 경우에는 삼각형 분할 대상에서 일단 제외시키고 다음 삼각형 분할에서 분할되도록 유도한다.

3.4 Delaunay 삼각형 분할

Delaunay 삼각형 분할[1-3, 14]은 Fig. 7과 같이 임의의 세 점을 선택하여 외접원의 반지름을 구하고 이 외접원에 다른 점들이 존재하지 않도록 삼각형 분할을 하는 것이다. STL 데이터 생성과 실제 파트 조형과정을 위해서 작은 각을 가진 삼각형을 피하여야 하며, 전체 삼각형을 통해서 가장 작은 각을 크게 만드는 것이 Delaunay 삼각형 분할이다.

삼각형 분할의 효율을 비교하기 위하여 Fig. 8(a)와 같이 삼각형 그룹으로 구성된 폴리곤에 대하여 Octectomy⁽¹⁴⁾방식의 삼각형 분할(Fig. 8(b)), Delaunay 삼각형 분할(Fig. 8(c)) 결과를 비교하였다. 19개의 삼각형으로 구성된 폴리곤에 대하여 Octectomy 방식의 삼각형 분할은 9개의 삼각형으로 줄일 수 있으나, 가늘고 긴 삼각형이 발생

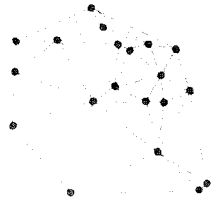


Fig. 7 Delaunay triangulation

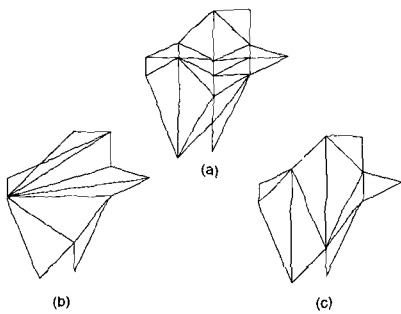


Fig. 8 Comparison of triangulation method

다. 이는 삼각형 분할시 삼각형의 모양을 고려하지 않고 삼각형의 배치 순서에 영향을 받기 때문이다. 생성된 가늘고 긴 삼각형은 RP 조형물 생성 과정에서 수치 오류를 유발하며, STL 오류 검사와 같은 부가적인 과정이 더 필요하게 되므로 STL 파일을 생성하기 위한 삼각형 분할법으로 적절하지 않다.

Delaunay 삼각형 분할은 9개의 삼각형을 유지하면서 작은 각도를 가진 삼각형을 감소시킨다. 본 논문에서의 Delaunay 삼각형 분할은 분할될 그룹으로 선택된 삼각형 그룹에 대해 적용한다. 분할될 삼각형의 그룹에 대해서 각 삼각형들의 합으로 구성된 평면의 단위법선벡터의 구성요소인 n_x , n_y , n_z 를 식 (3)과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{\sum_{i=1}^n Area_i \times n_{ix}}{\sum_{i=1}^n Area_i} \\ n_y &= \frac{\sum_{i=1}^n Area_i \times n_{iy}}{\sum_{i=1}^n Area_i} \\ n_z &= \frac{\sum_{i=1}^n Area_i \times n_{iz}}{\sum_{i=1}^n Area_i} \end{aligned} \quad (3)$$

구해진 단위법선벡터에 대해서 삼각형 그룹을 투영하여 2차원상의 Delaunay 삼각형 분할을 수

행한다. 단, 삼각형 그룹을 구성하는 삼각형의 수가 3개 이하인 경우에는 Delaunay 삼각형 분할을 하지 않는다.

4. 적용예

본 논문에서는 이상의 이론을 자유 형상을 대표할 수 있는 인족(foot) 모형, 얼굴 모형에 적용하였다. 인족 모형은 25792개의 스캔된 점 데이터를 이용하였고, 얼굴 데이터는 LDI사의 DataSculpt 프로그램에서 필터링된 14355개의 스캔된 점 데이터를 이용하였다.

레이저 스캔 데이터는 LDI사의 Surveyor 1200을 이용하여 측정하였으며, Visual C++ 6.0, OpenGL을 사용하여 효율적인 STL 파일을 생성하는 소프트웨어를 개발하였다.

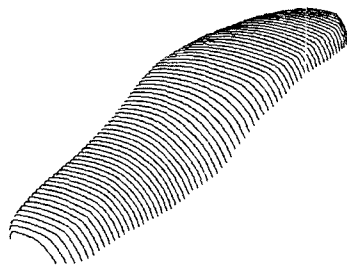
Fig. 9(a), (b)는 레이저 스캐너로부터 측정된 인족 모형과 얼굴 모형 데이터이다. Fig. 10(a), (b)는 측정된 모든 데이터를 이용하여 생성된 STL 파일을 나타낸다.

삼각형 그룹 선택을 위한 각도는 5도, 10도, 15도, 삼각형의 수는 최대 10%까지 감소, 최대 반복횟수 50번의 사용자 입력 조건으로 각각 실행하였다.

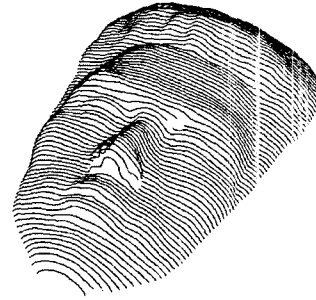
Fig. 10(c), (d)는 삼각형 그룹 선택을 위한 각도를 10도로 정하고 실행 1회에 삼각형 그룹으로 선택된 삼각형을 짙게 표시하여 남아있는 삼각형과 비교하였고 반복된 삼각형 분할의 결과, 인족 모형은 23회, 얼굴 모형은 15회 동안 반복하였다. Fig. 10(e), (f)는 삼각형 그룹 선택을 위한 각도를 5도로 정할 때 두 모델의 최종적으로 생성된 조형 가능한 STL 파일을 나타내며, Fig. 10(g), (h)는 10도, Fig. 10(i), (j)는 15도에서의 결과이다.

Fig. 11(a), (b)는 삼각형 그룹 선택을 위한 각도를 10도로 정할 때 상용 소프트웨어인 SDRC사의 Surfacr에서 레이저 스캔 데이터와 생성된 최종 STL 파일의 오차를 비교한 것이다.

Fig. 12(a), (b)는 반복 회수에 따른 삼각형 그룹에 포함된 전체 삼각형의 개수의 변화를 나타내며, Fig. 12(c), (d)는 반복 회수에 따른 두 모델의 선택된 그룹의 개수의 변화를 나타내고, Fig. 12(e), (f)는 반복 회수에 따라 최종적으로 생성된 STL 파일을 구성하는 삼각형의 개수가 수렴되어 가는 상태를 나타낸다.

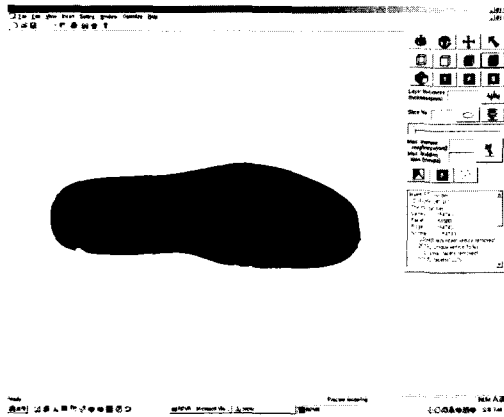


(a) Foot model

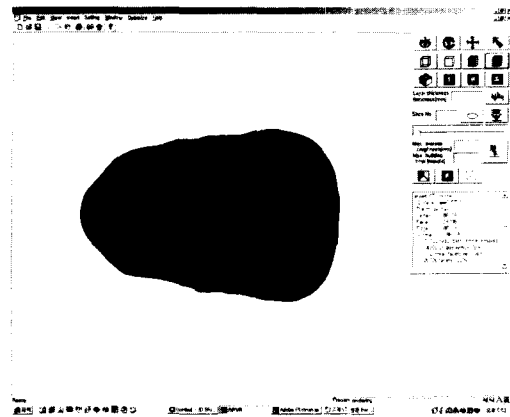


(b) Face model

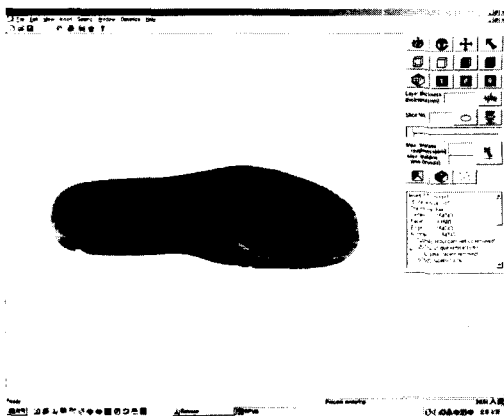
Fig. 9 Scan data from laser scanner



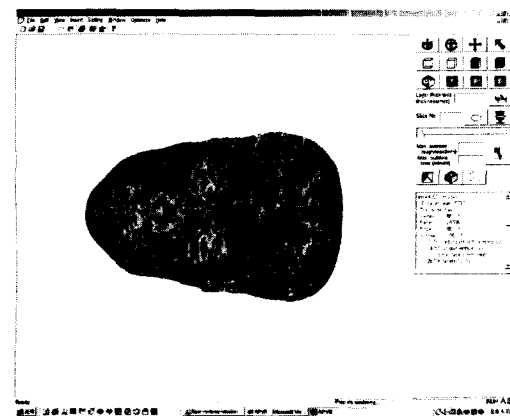
(a) Scan data of foot



(b) Scan data of face

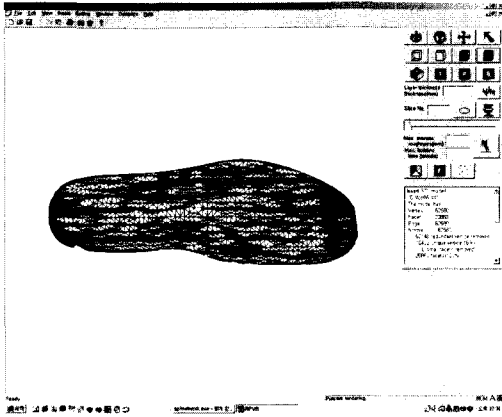


(c) Selected triangle group

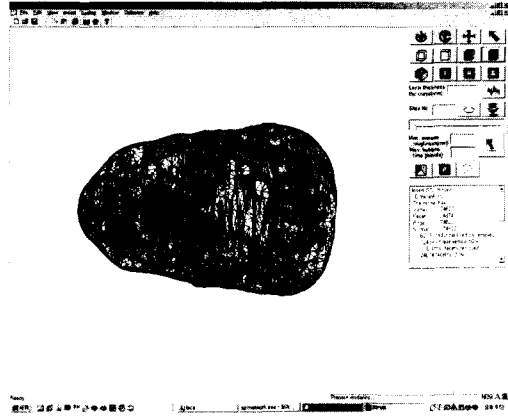


(d) Selected triangle group

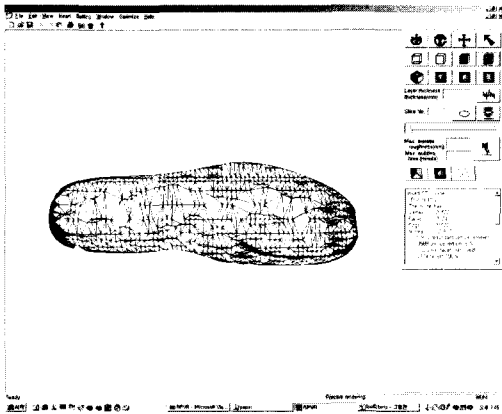
Fig. 10 Scan data reduction



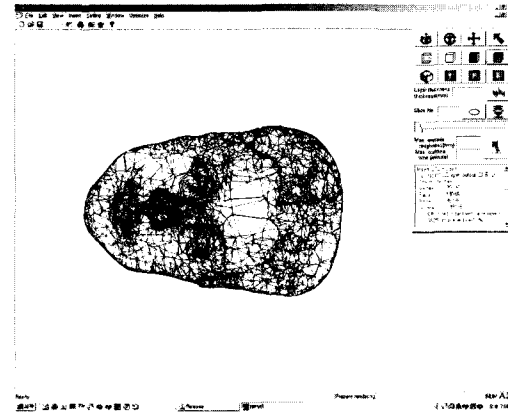
(e) 5 degree, 18 iterations, 20860 triangles



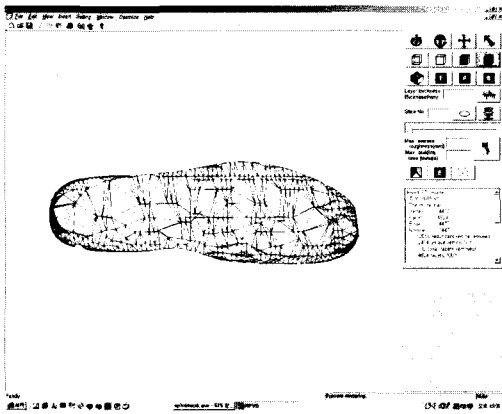
(f) 5 degree, 10 iterations, 24874 vertices



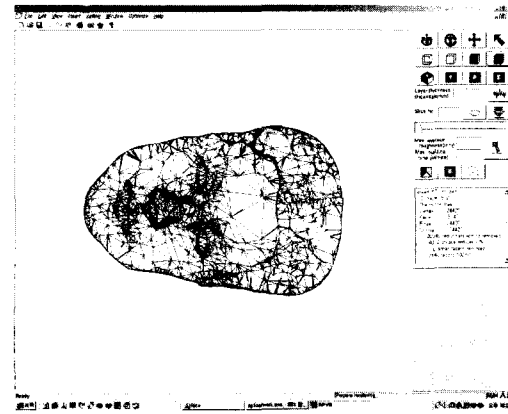
(g) 10 degree, 23 iterations, 7174 triangles



(h) 10 degree, 15 iterations, 13046 triangles

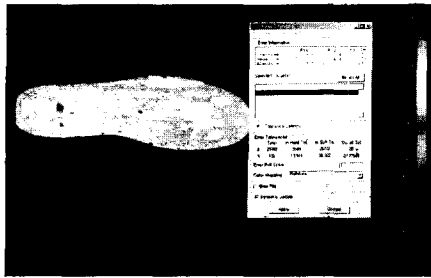


(i) 15 degree, 26 iterations, 4824 triangles

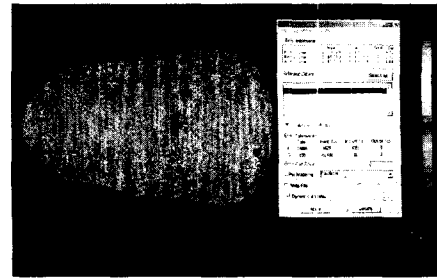


(j) 15 degree, 20 iterations, 8140 triangles

Fig. 10 (Continued)

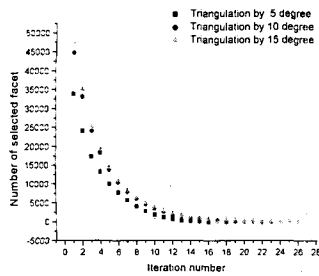


(a) 10 degree, Average error 0.110

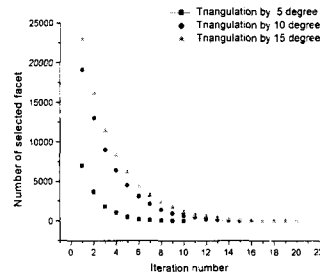


(b) 10 degree, average error 0.052

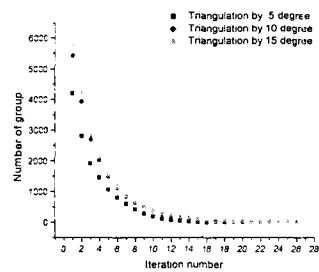
Fig. 11 Comparison of error



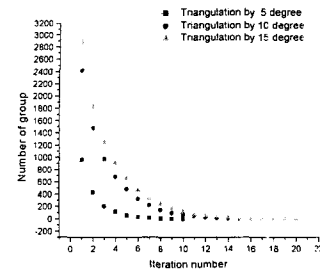
(a)



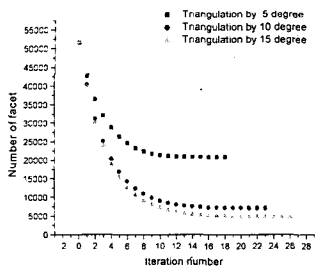
(b)



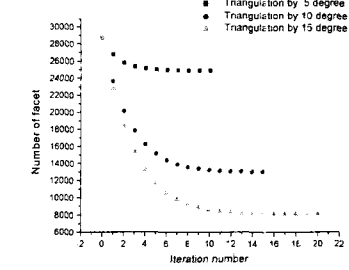
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 12 Comparison of result based on angle ((a), (b) Number of selected facets, (c), (d) Number of groups, (e), (f) Number of remained facets)

Table 1 Comparison of Delaunay triangulation result

	No. of triangles	Selected angle	iteration number	No. of Remained triangles	Maximum (+) error	Average (+) error	Minimum (-) error	Average (-) error	Elapsed time (seconds)
foot model 100×280(mm)	41173	5	18	20860	0.271	0.011	-0.056	-0.007	62
		10	23	7174	0.739	0.110	-0.162	-0.014	48
		15	26	4824	1.397	0.275	-0.319	-0.036	41
face model 150×240(mm)	28706	5	10	24874	0.249	0.003	-0.280	-0.006	38
		10	15	13046	1.230	0.052	-1.457	-0.098	30
		15	20	8140	1.832	0.170	-1.281	-0.177	23

Table 1은 두 모델에 대한 반복 횟수에 따른 삼각형 분할의 최종적인 적용 결과를 나타낸다. 인족 모델과 같이 스캔 데이터를 전부 이용한 경우에는 삼각형의 선택 기준이 비교적 적은 5도인 경우에 49.3%까지 데이터가 감소하였다. 얼굴 모델과 같이 필터링된 모델에서는 5도인 경우의 감소율은 적었으나 불필요한 정점을 찾아 제거할 수 있음을 보였다.

이상의 다양한 적용 결과를 통해서 사용 목적에 적합한 데이터의 정도와 양을 가진 STL 파일을 생성한다.

5. 결 론

본 논문에서는 레이저 스캐너에서 측정된 다수의 점 데이터로부터 RP 장비에서 조형 가능한 STL 데이터로 변환하기 위한 소프트웨어를 개발하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼각형간의 각도에 의한 선택으로 곡률이 변화하는 부분을 찾으므로 경계를 찾는데 더욱 적합하다. 미세한 홈 또는 스크래치 등이 데이터의 상당한 감소 이후에도 어느 정도의 데이터 감소와 함께 존재하므로, 급변하는 형상에 대해서 미세한 부분이 상하지 않게 한다. 따라서 데이터의 감소 이후에도 모델 전체의 특징을 유지한다.

(2) 입력된 점 데이터를 계산상의 편의를 위하여 삼각형망을 구성하고 인접한 삼각형과의 각도의 편차는 삼각형간의 법선 벡터의 차이로서 표현하였다. 생성된 삼각형 그룹은 다시 이웃한 삼각형을 찾는 과정을 재귀호출로 반복하여 적합하지 않은 삼각형이 포함되는 경우를 제거하였다.

(3) Delaunay 삼각형 분할을 통해서 분할된 삼각형의 가장 작은 각을 크게 만들어 STL 파일 생성시에 가늘고 긴 삼각형이 발생하여 수치 오류를 일으키는 경우를 억제하였다.

(4) 최종적으로 생성된 STL 파일은 삼각형 감소에도 불구하고 실제 측정 데이터와 생성된 데이터의 오차 분석에서 좋은 결과를 얻었다. RP 조형 과정에서 오류 검사나 슬라이싱 과정 중에 발생하는 불필요한 계산 시간을 줄일 수 있다.

(5) 개발된 소프트웨어는 분할될 삼각형 그룹의 선택 기준인 삼각형간의 각도와 삼각형 수의 감소율을 사용자의 입력에 의해 정한다. 이는 작업자의 수작업에 의한 먼 생성 과정에서 발생할 수 있는 모델링 오차와 시간을 줄이고, RP 제품의 정도 향상을 통해 자동화된 공정에 기여할 수 있다.

참고문헌

- (1) Cline, A. K. and Renka, R. L., 1984, "A Storage-Efficient Method for Construction of a Thiessen Triangulation," *Rocky Mountain Journal of Mathematics*, Vol. 14, No. 1, pp. 119~139.
- (2) Bowyer, A., 1981, "Computing Dirichlet Tessellations," *Computer Journal*, Vol. 24, No. 2, pp. 162~166.
- (3) Lawson, C. L., 1977, "Software for C1 Surface Interpolation," *Mathematical Software III*, J. R. Rice, ed., Academic Press, New York.
- (4) Chen, Y. H. and Wang, Y. Z., 1999, "Genetic Algorithms for Optimized Retriangulation in the Context of Reverse Engineering," *Computer Aided Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 261~271.

- (5) Chen, Y. H., Ng, C. T. and Wang, Y. Z., 1999, "Generation of an STL File from 3D Measurement Data with User-controlled Data Reduction," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, pp. 127~131.
- (6) Park, H. and Kim, K., 1995, "An Adaptive Method for Smooth Surface Approximation to Scattered 3D Points," *Computer Aided Design*, Vol. 27, No. 12, pp. 929~939.
- (7) Volpin, O., Sheffert, A., Bercotier, M. and Joskowicz, L., 1998, "Mesh Simplification with Smooth Surface Reconstruction," *Computer Aided Design*, Vol. 30, No. 11, pp. 875~882.
- (8) Hamann, B., 1994, "A Data Reduction Scheme for Triangulated Surfaces," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 11, No. 2, pp. 197~214.
- (9) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W., 1993, "Mesh Optimization," *Computer GRAPHICS Proceedings*, pp. 19~26.
- (10) Piegl, L. and Tiller, W., 1996, "Algorithm for Approximate NURBS Skinning," *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 699~706.
- (11) Sarkar, B. and Menq, C. H., 1991, "Smooth-Surface Approximation and Reverse Engineering," *Computer Aided Design*, Vol. 23 No. 9, pp. 623~628.
- (12) Cho, M., Seo, T., Kim, J. and Kwon, O., 2000, "Reverse Engineering of Compound Surfaces Using Boundary Detection Method," *KSM5 International Journal*, Vol. 14, No. 10, pp. 1104~1113.
- (13) Christiansen, H. N. and Sederberg, T. W., 1978, "Conversion of Complex Contour Line Definition into Polygonal Element Mosaics," *Proc. of the ACM SIGGRAPH'78*, pp. 187~192.
- (14) O'Rourke, J., 1994, "Computational Geometry in C," Cambridge University Press, New York.
- (15) 허성민, 김호찬, 이석희, 2001, "역공학에서의 Delaunay 삼각형 분할에 의한 점 데이터 감소," *대한기계학회논문집 A권*, 제25권, 제8호, pp. 1246~1252.