

Non-uniform 3D grid 를 이용한 삼각형망 생성에 관한 연구

강의철*(광주과학기술원 기전공학과), 우혁제(Ohio 주립대학), 이관행(광주과학기술원 기전공학과)

Triangular Mesh Generation using non-uniform 3D grids

E. C. Kang(Mechatronics, K-JIST), H. J. Woo(Comp. Sci., OSU) K. Lee(Mechatronics, K-JIST)

ABSTRACT

Reverse engineering technology refers to the process that creates a CAD model of an existing part using measuring devices. Recently, non-contact scanning devices have become more accurate and the speed of data acquisition has increased drastically. However, they generate thousands of points per second and various types of point data. Therefore, it becomes a important to handle the huge amount and various types of point data to generate a surface model efficiently.

This paper proposes a new triangular mesh generation method using 3D grids. The geometric information of a part can be obtained from point cloud data by estimating normal values of the points. In our research, the non-uniform 3D grids are generated first for feature based data reduction based on the geometric information. Then, triangulation is performed with the reduced point data. The grid structure is efficiently used not only for neighbor point search that can speed up the mesh generation process but also for getting surface connectivity information to result in same topology surface with the point data. Through this integrated approach, it is possible to create surface models from scanned point data efficiently.

Key Words: Reverse engineering(전산역설계), 3D grid(3 차원 그리드), Point data reduction(점데이터 감소), Triangulation(삼각형망)

1. 서론

전산 역설계 기술(Reverse Engineering)이란 실제 파트의 형상을 측정하고 획득된 형상정보를 통해 CAD 모델을 생성하는 기술을 말한다. 최근 3 차원 레이저 스캐너나 광학식 측정기 등의 비접촉식 측정방식의 측정속도 및 정밀도가 매우 향상되면서 비접촉식 측정장비가 보다 널리 사용되고 있고, 이를 통해 획득되는 방대한 양의 점데이터를 이용해 효과적으로 모델링을 수행하기 위한 방법의 개발이 더욱 중요해지고 있다. 이를 위해서는 다양한 종류의 점데이터를 효과적으로 감소시키기 위한 방법과 신속하고 강건하게 곡면을 생성할 수 있는 점데이터를 기반으로 하는 곡면생성 방법이 절대적으로 필요하지만 이와 관련한 기존의 연구들은 점데이터 처리와 곡면생성방법이 연계되어 있지 않고 각각 따로 수행되고 있다.

기존에 많이 사용되고 있는 점데이터 감소방법들

로는 상용 소프트웨어에서도 제공되는 uniform sampling, chordal deviation sampling, space sampling 과 같은 방법들이 있는데[1], 이러한 방법들은 점데이터 순서(ordering)에 많은 영향을 받으며, 전체적인 형상의 분석없이 국부영역안에서 이웃하는 점들간의 관계만을 고려하여 데이터를 감소시키는 한계를 가지고 있다. 이외에도 Martin, et al.[2], Lee, et al.[3] 등은 레이저 스캐너 장비만 특성을 고려하여 2 차원 grid 를 이용한 점데이터 감소 방법에 대한 연구를 수행한바 있고, Fischer 와 Park[4]은 quadtree 를 이용한 data sampling 을 통한 데이터 감소 방법에 관한 연구를 발표하였지만, 이러한 방법들은 래지스트리레이션 후의 복잡한 3 차원 점데이터에 직접 적용하기가 어렵다. 점데이터를 감소시키는 과정에서 원래 형상의 detail 을 잃지 않으면서 점데이터량을 최소화하기 위해서는 곡률, 노멀벡터 등과 같은 형상정보가 필요하다. 본 저자들이 제안한바 있는 3 차원

non-uniform grid 기반의 데이터 감소방법은 점데이터 노멀벡터를 이용하는 feature 샘플링 방식으로, 정렬되어있지 않거나 중첩되어있는 점데이터에도 적용이 가능하고, 초기 입력조건에 의해 원하는 감소율을 얻을 수 있는 효율적인 방법이다[5]. 특히 분할 후 곡면 전영역을 감싸고 있는 grid는 형상의 복잡도에 따라 그 크기가 조절되어 있을 뿐만 아니라 hole 과 같은 비곡면 영역에는 존재하지 않고, grid 각각은 서로 면, 모서리, 꼭지점을 공유하면서 연결되어 있는 일종의 공간분할자(spatial divider)이다. 이와 같은 데이터 구조를 곡면생성시 활용하면 빈번하게 수행되는 인접점 탐색이나 원래 곡면과 위상학적으로 동일한 연결관계(Homeomorphism)를 설정하는데 매우 효율적으로 사용될 수 있다.

최근 각광받고 있는 폴리곤 기반의 곡면생성 관련 연구들로는, 먼저 Delaunay 사면체와 같은 볼륨 데이터를 만들고 이후 refinement 작업을 수행하여 불필요한 삼각형망을 제거하여 최종적으로 곡면 삼각형망을 생성하는 3D Delaunay triangulation 를 이용하는 볼륨 기반의 삼각형망 생성방법들 [6,7,8,9]이 활발하게 연구된 바 있으며, 3D/2D Delaunay triangulation 을 이용하지만 처음부터 볼륨정보를 생성하지 않는 곡면기반의 방법들이 일부 시도되었다[10,11]. 이러한 방법들은 전처리가 수행된 양질의 점데이터에만 적용이 가능하고, 추가로 refinement 작업이 필요하거나, hole 영역에 web 을 생성하거나, non-manifold 삼각형망을 생성하는 등의 한계를 보인다. 이외에도 grid 를 이용한 몇몇 곡면생성관련 연구들은 FEM 분야에서 수행된 바 있지만 uniform 한 grid 만을 이용하거나 점데이터를 보간하는 방식이 아닌 grid vertex 자체를 연결하는 삼각형망을 생성하였다.

본 연구에서는 점데이터 감소를 위해 제안된 바 있는 3차원 grid 를 곡면모델 생성방법과 연계함으로써 다양한 수준의 detail 정도를 가지는 곡면모델을 신속하고 효율적으로 생성 가능한 방법을 개발하여 전산역설계 자동화의 가능성을 보이고자 한다.

2. 3차원 grid 를 이용한 점데이터 감소방법

2.1 데이터 감소 작업 공정

측정점이 입력되었을 때 점데이터 감소를 위해 제안된 작업절차는 Fig. 1 과 같이 점데이터의 pre-processing, 노멀벡터계산, 초기 uniform grid 생성, 3차원 non-uniform grid 생성 및 데이터 감소과정을 거쳐 진행된다.

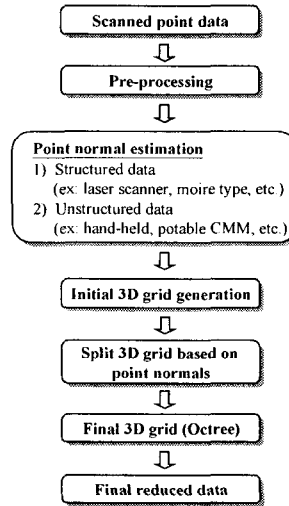


Fig. 1. Overall process of 3D grid reduction method

점데이터 노멀벡터 계산 후 grid 생성 알고리즘은 사용자로부터 초기 grid 크기와 공차를 입력받아 수행되는데, 초기 grid 크기는 형상이 많이 변하지 않는 영역에서도 곡면모델링을 위해 필요한 최소한의 점데이터를 확보할 수 있는 크기로 작게 선택되어야 하고, 각 초기 grid 는 사용자가 정의한 공차값을 만족할 때까지 분할을 계속되므로 입력된 공차값은 최종 결과에 큰 영향을 미친다.

2.2 점데이터로부터 노멀벡터 추정방법

모델의 형상에 잘 부합하는 feature 기반의 3차원 non-uniform grid 를 생성하기 위해서는 점데이터의 형상을 분석할 수 있는 정보의 추출이 필요한데 이를 위하여 본 연구에서는 이웃하는 점들로부터 점데이터 normal 값을 이용한다.

본 연구에서 이용된 레이저 스캐너 등의 측정 장비에서 얻어진 structured data 에 대해서는 그 특성을 이용하여 매우 신속하게 점데이터의 normal 을 계산하는 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 일반적으로 스트라이프 형태의 레이저 스캐너의 경우 다음 Fig. 2 와 같이 측정되고 한 스캔패스에 따라 라인스트라이프 형태의 측정 데이터를 얻을 수 있다. 각 점의 normal 값은 서로 이웃하는 스캔 라인의 점들간에 연결관계를 설정하고, 해당 점을 꼭지점으로 포함하는 삼각형들의 노멀벡터를 평균하여 계산될 수 있다.

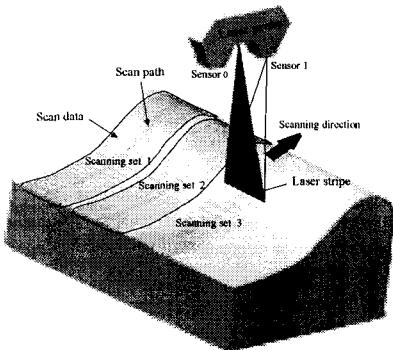


Fig. 2 Scanned point data using Laser Scanning

기타 다른 장비로 측정된 unstructured data 의 경우에는 각 점에서 k-neighbor 를 추출하고 이를 이용하여 평면 근사화를 수행하거나 국소 2 차 곡면 근사, 또는 기존의 delaunay triangulation 기법을 이용하여 normal 을 계산하였다. 최종적으로 한 점을 중심으로 Fig. 3 과 같은 삼각형망이 생성되면 점 p 에 대한 normal 값은 다음 식(1)로 계산된다.

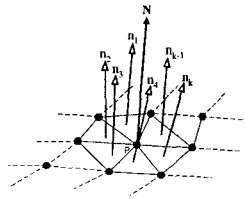


Fig. 3 Calculation of normal values for each point

$$N_{p,i} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{m} \quad (1)$$

2.3 Octree 분할을 이용한 3차원 grid 생성

일반적으로 파트 측정 후, 레지스트레이션, 추가 측정, editing 등으로 인하여 점데이터의 ordering, merging, cross-sectioning 등의 추가 작업이 필요하다. 이러한 작업들에도 많은 시간과 노력이 소요되게 되는데 이를 피하고 점데이터를 효율적으로 관리하기 위해 본 연구에서는 데이터 형상을 고려한 비균일 3차원 grid 를 생성하였다.

본 연구에서 사용된 3차원 grid 는 앞에서 계산된 점데이터 normal 값을 기준으로 한 cell 안에 포함되어 있는 점들의 normal 값의 표준편차가 사용자 정의의 공차보다 작을 경우, 또는 한 cell 안에 한 점만이 존재할 때 까지 subdivision 과정을 수행하여 완성된다. Fig. 4 는 이러한 방법을 통해 얻어진 최종 3차원 grid 를 보여주고 있으며, 형상이 많이 변화하는 edge 부분에서 최소 크기의 grid 가 생성된 것을 볼 수 있다.

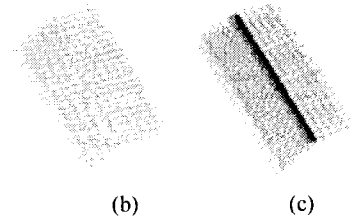


Fig. 4 3D-grid generation by subdivisioning

2.4.3 차원 grid 를 이용한 점데이터 감소

최종 3차원 grid 가 완성되면 이로부터 점데이터 감소를 수행할 수 있다. 점데이터 감소를 위해서 한 grid 당 한 점을 추출하게 되는데, 추출기준으로 grid 내의 점들의 평균 normal 값을 계산하여 이에 가장 가까운 점을 최종 grid 내의 잘 대표하는 점으로 가정하여 추출하였다[5].

3. 3D grid 를 이용한 삼각형망 생성

삼각형망을 비롯해 일반적으로 mesh 모델 생성시 다음과 같은 조건을 만족시키는 것이 유리하다.

- (1) 내/외부 경계영역을 잘 표현 가능해야 함
- (2) Cell 의 모양이 round 에 가까워야 함
- (3) Cell 크기나, 개수 조절이 용이해야 함
- (4) Unstructured 메쉬를 생성 가능해야 함

3차원 grid 를 이용할 경우, 사용자의 입력조건을 조정함으로써 신속하게 형상분석을 통해 샘플링 비율을 조절할 수 있으므로 이러한 점데이터로부터 삼각형망을 생성하면 메쉬생성 후 추가로 메쉬의 개수나 크기를 조정할 필요가 없는 장점이 있다. 또한 3차원 grid 는 데이터가 존재하지 않는 영역에서는 생성되지 않으므로 물체 내부에 hole 이 존재할 경우 이를 탐지하여 이러한 영역에서는 삼각형망을 생성시키지 않음으로써 원래 파트와 homeomorphic 한 곡면모델의 생성이 가능하다. 본 연구에서는 seed 삼각형으로부터 인접영역으로 삼각형망을 확장하는 region growing 방법을 개발하였는데, 이 때 외접원의 반지름을 최소화하는 삼각형망을 생성하도록 하여 삼각형 cell 의 모양이 정삼각형에 가깝게 되는 Delaunay 삼각형망에 근사하도록 하였다. 현재는 각 grid 에서 대표점을 한 점씩만 추출하도록 되어있어 경계영역을 표현하기 위한 충분한 양의 점데이터를 얻지 못하고 있어 이의 보완이 필요하지만, 이러한 방법에 의해 추출된 점데이터는 unstructured 메쉬의 생성에 적합하도록 분포되어 있어 다중해상도(Level Of Details) 곡면

모델을 생성하기에 유리하다.

삼각형망 영역확장 방법은 기본적으로 인접점 탐색을 빈번히 이용하는 방법이다. 비균일 grid 를 사용할 경우, 적은 수의 점데이터나 메시로 정확한 형상을 표현할 수 있는 장점이 있는 반면 uniform grid 에서와는 달리 인덱스로만 인접 grid 를 탐색하는 것이 불가능하여 본 연구에서는 non-uniform 구조하에서도 효율적으로 인접점을 탐색할 수 있는 방법을 개발하였다. 또한 효율적인 삼각형망의 생성, 수정을 위해 필수적인 Vertex, Edge, Triangle 리스트를 갖는 삼각형망 데이터구조를 사용하여 생성시간을 단축시켰다.

3.1 접촉 테스트를 통한 인접점 탐색 방법

일반적으로 spatial divider 를 사용할 경우, 인접점탐색은 전역검색이 아닌 국소지역검색으로 수행될 수 있다. 최적의 삼각형망을 찾기 위해서는 연결 가능한 여러 하위 삼각형망중에서 최선의 것을 선택을 하는 반복작업이 필요하고 이 과정에서 인접점 탐색은 매우 빈번하게 이루어지므로 효율적인 인접점 탐색방법은 매우 중요하다. 본 연구에서는 여러 가지 인접점 탐색방법을 검토하여 grid 의 접촉 테스트를 통한 탐색방법을 개발하였다.

제안된 방법에서는 검색대상 grid 를 이루는 3 가지 요소인 face, edge, vertex 에 대해 먼저 grid 내부에서 바깥쪽으로 향하는 노멀방향을 인접 grid 가 접촉할 수 있는 방향(V)으로 설정하고, $|V| < d$ (d: 최소 크기의 grid 한변의 길이) 를 만족하도록 벡터 V 를 생성하여 이 벡터와 접촉하는 모든 grid 들을 추출해 내는 방법을 통해 인접점을 탐색한다. Fig. 5 에서는 하나의 grid 가 인접 grid 들과 접촉 가능한 모든 방향(V)과 접촉테스트를 통해 추출된 인접 grid 가 추출된 예를 보여준다. 3 차원 grid 분할 후 depth m 인 비균일 grid 가 생성되었을 경우, 하나의 인접 grid 를 탐색하기 위해 필요한 시간은 $O(m)$ 이다.

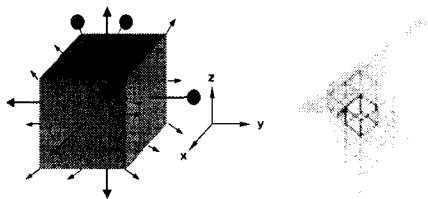


Fig. 5 Neighbor grid search using 3D grid structure

3.2 삼각형망 데이터 구조

본 연구에서는 세 가지의 삼각형망 구성 요소인 vertex, Edge, Triangle 에 대해 index id 를

부여하고 해당 요소가 포함되어 있는 다른 구성요소의 리스트를 attribute 로 가지고 있는 형태의 삼각형망 데이터 구조를 이용한다. 곡면영역이 확장되는 과정에서 새로운 Triangle 이 추가 되면 이로 인해 추가되거나 변경되는 Edge 와 Vertex list 까지도 자동으로 업데이트 해주도록 하였다.

Vertex: [Vertex id(Vi), Vattribute(Edge list, Triangle list)]
Edge: [Edge id(Ei, Ej), Eattribute(Triangle list)]
Triangle: [Triangle id(Ti, Tj, Tk)]

3.3 Region growing 을 통한 삼각형망 생성

초기 seed 삼각형은 boundary 상에 존재하는 임의의 한 점을 선택하고 이로부터 최소거리의 인접점을 선택하여 초기 Edge 를 생성한 후, 초기 edge 와 인접하는 점들을 탐색하여 이중 최소크기의 외접원을 생성하는 제 3 의 점을 선택하여 생성한다. Front 는 일종의 메모리상에 존재하는 buffer 로서 현상태의 삼각형망중에 추가로 확장될 수 있는 edge 들을 모아놓은 버퍼이다. 초기 seed 삼각형으로부터 새로운 triangle 이 삼각형망에 추가되면 Front 를 업데이트하여 계속적으로 삼각형망 영역을 확장해 나가는 알고리즘은 Fig. 6 과 같다.

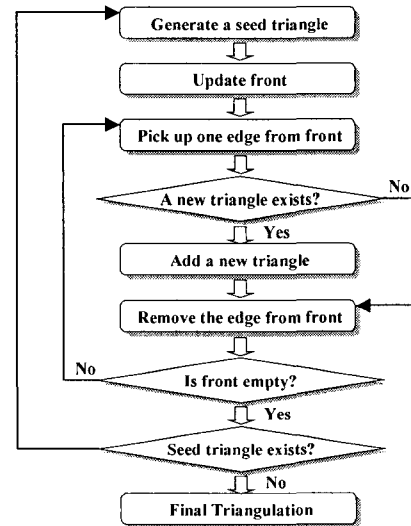


Fig. 6 Triangulation procedure

Front edge 가 확장되어 하나의 삼각형을 이루기 위해서는 해당 edge 에 인접하는 점으로부터 허용 공차보다 작은 외접원을 갖는 후보 삼각형이 존재하여야 하고, 이중 최소 하나의 삼각형은 Fig. 7 과 같은 non-manifold 삼각형을 생성시키지 않아야 한다.

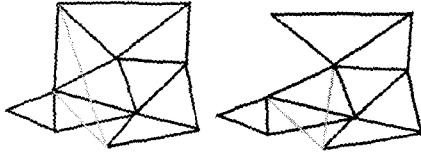


Fig. 7 Non-manifold triangles

4. 실험 결과

본 알고리즘은 Visual C++ 6.0 과 OpenGL 을 사용하여 구현되었고, 하나의 edge 를 가지는 step 형상의 점데이터에 적용하였다. Fig. 8 의 삼각형망 모델은 약 2 만개의 초기 점데이터를 대상으로 320 개의 초기 grid, 허용 공차 0.01 을 입력하여 감소된 점데이터로부터 생성되었다.

현재는 하나의 grid 하나의 대표점만을 추출하여 삼각형망을 생성하였으므로 정확한 boundary 의 표현을 위해서는 해당영역에서 보다 고밀도의 점데이터를 추출할 필요가 있고, 초기 사용자 입력조건을 조절하여 좁으므로 다중해상도를 가지는 여러 가지 삼각형망 모델의 생성이 가능하였다.

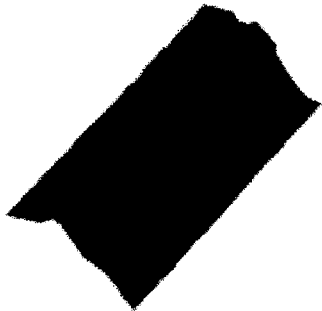


Fig. 8 A resultant triangular mesh model

5. 결론

본 연구에서는 3 차원 grid 를 이용하여 측정 점데이터 감소하고 이를 통해 효율적으로 삼각형망을 생성하는 방법을 제안하였다. 기 수행된 점데이터 감소 알고리즘은 feature 기반의 샘플링방법으로, 본 연구에서는 형상분석을 위해 사용된 3 차원 non-uniform grid 데이터 구조를 이용하여 곡면생성에 필요한 점들과의 연결관계, 이웃점 탐색 등에 효율적으로 사용한다. 개발된 방법은 다양한 장비로 측정된 점데이터에 적용 가능하고, 사용자의 입력조건에 따라 다중해상도를 가지는 삼각형 메쉬모델을 생성 가능하므로 이는 해석용 메쉬로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 정밀도를 향상시켜 곡면 모델로도

활용이 가능하다. 제안된 방법은 기존의 삼각형망 생성 방법과는 달리 점데이터의 전처리 개념까지 포함하고 있으므로 이를 통해 점데이터의 처리와 곡면생성을 동시에 수행하는 전산역설계과정 자동화의 가능성을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단이 주관하고 광주과학기술원이 시행하는 "특정기초연구사업과제"의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Imageware, Inc. Surfacer User's Guide, 1997.
2. Martin, R. R., Stroud, I. A. and Marshall, A. D., "Data Reduction for Reverse Engineering," RECCAD, Deliver-able Document 1 COPERUNICUS project, No 1068, Computer and Automation Institute of Hungarian Academy of Science, 1996.
3. Lee, K. H., Woo, H. and Suk, H., "Accurate Part Shape Acquisition for Reverse Engineering," Proc. of the 25th International Conference on Computers and Industrial Engineering, pp. 52-55, 1999.
4. Fischer, A. and Park, S., "Reverse Engineering: Multi-level-of-Detail Models for Design and Manufacturing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 566-572, 1999.
5. Lee, K., Woo, H. and Suk, T., "Point Data Reduction Using 3D Grids," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 201-210, 2001.
6. Boissonnat, J. K., "Geometric Structures for Three-dimensional Shape Representation," ACM Trans. Graphics, Vol. 3, pp. 266-286, 1984.
7. Edelsbrunner H. and Mucke, E. P., "Three-dimensional Alpha Shapes," ACM Trans. Graphics, Vol. 13, No. 1, pp. 43-72, 1994.
8. Amenta, N., Bern, M., and Kamvysselis, M., "A New Voronoi Based Surface Reconstruction Algorithm," Siggraph 98, pp. 415-421, 1998.
9. Amenta, N., Choi, S., Dey, T. K. and Leekha, N., "A Simple Algorithm for Homeomorphic Surface Reconstruction," ACM sympos. Computational Geometry, pp. 213-222, 2000.
10. Oblonsek, C. and Guid, N., "A Fast Surface-Based Procedure for Object Reconstruction from 3D Scattered Points," Comp. Vision and Image Understanding, Vol. 69, No. 2, pp. 185-195, 1998.
11. Mencl, R. "A Graph-based Approach to Surface Reconstruction," Eurographics 95, Vol. 14, No. 3, pp. 445-456, 1995.