

대단위 점 데이터를 위한 빠른 삼차원 삼각망 생성방법

이 상 한* · 박 강**

The Fast 3D mesh generation method for a large scale of point data

Sang-Han Lee and Kang Park

Key Words: reverse engineering(역공학), triangulation(삼각화), surface-based method(면 기준 방법), boundary edge(경계 모서리), triangle generation criteria(삼각형 생성 기준), stitching algorithm(접합 알고리즘)

Abstract

This paper presents a fast 3D mesh generation method using a surface based method with a stitching algorithm. This method uses the surface based method since the volume based method that uses 3D Delaunay triangulation can hardly deal with a large scale of scanned points. To reduce the processing time, this method also uses a stitching algorithm: after dividing the whole point data into several sections and performing mesh generation on individual sections, the meshes from several sections are stitched into one mesh. Stitching method prevents the surface based method from increasing the processing time exponentially as the number of the points increases. This method works well with different types of scanned points: a scattered type points from a conventional 3D scanner and a cross-sectional type from CT or MRI.

1. 서 론

최근에 의학, 제조업, 만화 캐릭터 개발 등의 여러 분야에서 3차원 실물 형상을 스캐닝하여 컴퓨터 상에서 형상을 재현하는 역공학(reverse engineering)에 관한 연구가 활발히 진행중이다.[1][2]

역공학 분야의 기초 기술 중 하나는 스캐닝된 3차원 좌표 값을 이용하여 삼각망을 구성해 표면의 형상을 재구성하는 것이다. 이에 대한 연구 방법은 스캐닝하는 방법에 따라 달라지는 측정 점들의 특성에 따라 결정된다.[1] 즉, 레이저 변위

스캐너, 접촉식 스캐너나 CCD 카메라를 통해서 분산형태의 데이터를 얻게되며[8], 컴퓨터 단층 촬영(CT: Computed Tomography)이나 자기공명영상술(MRI: Magnetic Resonance Image)로 얻어진 영상을 이미지 처리함으로써 단층형태(cross-sectional data)의 데이터를 얻게 된다.[1] 이렇게 하여 얻어진 측정 데이터들은 곡면 패치의 형태로 표면 형상을 표현하기 위해 사용되는데, 선행 과정으로서 삼각망을 형성하는 것이 요구된다. 삼각망 생성은 초기의 3차원 좌표 데이터에 기하학적, 위상학적인 연관성을 부여함으로써, 이후 형상 재구성의 단계를 수행하는 기초 데이터를 얻게 해 준다.

본 논문에서는 초기 삼각형을 만든 후, 최 외각에 있는 모서리를 경계 모서리(boundary edge)로 정의하고, 몇 가지 제시된 기준들에 만족하는 측정 점을 선택하여 새로운 삼각형을 추가해 나가는 면 기준 방법을 제안하고자 한다. 제안된

* 명지대학교 기계공학과 대학원

** 명지대학교 기계공학과

방법은 분산 형태와 단층 형태 등의 여러 형태의 삼차원 측정 데이터에 적용이 가능하나, 석고로 제작된 치아모델로부터 CCD 카메라로 스캔된 분산 형태의 측정 데이터를 이용하여 삼각망을 구성하는 것에 초점이 맞추어져 있다.

2. 관련 연구

형상을 재구성하는 방법에는 일반적으로 체적 기준 방법(volume-based method), 면 기준 방법(surface-based method), 그리고 2차원 투영 방법(two dimensional projection method)의 3가지 정도가 알려져 있다.

2.1 체적 기준 방법

이 방법은 측정된 점 데이터를 모두 포함하는 사면체 집합(convex hull)을 형성하고, 이렇게 얻어진 삼각형 정보를 이용하여 실제 물체의 표면에 존재한다고 생각되는 점들로 만들어진 삼각형만을 남기는 방법이다.[4] 측정 점의 분포 품질이 다소 나쁘거나, 상대적으로 적은 숫자만 이용하였을 때도 매끄럽지는 않지만 정확한 삼각망을 얻을 수 있다.[5] 일반적으로 이 방법은 초기단계에서 사면체 집합의 형성을 위해 3차원 Delaunay Triangulation 방법을 사용하게 되는데, 이는 점의 개수가 늘어감에 따라 생성되는 사면체 개수가 지수적으로 급격히 증가하기 때문에, 이 정보를 저장할 메모리나, 연산을 수행할 CPU의 성능이 뒷받침 되어야하는 단점이 있다.[4] 또, 모든 점이 동일 평면상에 존재하게 되면, 사면체 집합을 형성할 수 없기 때문에 형상 재구성은 불가능하게 된다.

2.2 면 기준 방법

이 방법은 3차원 형상의 표면을 구성하는 삼각형만을 고려하여 삼각망을 구성하는 방법으로서, [4] 이 방법은 삼각망을 형성해 나가는 기준들에 따라 결과가 민감하게 나타나는 단점이 있지만, 체적 기준 방법과 같이 초기 사면체 집합의 형성 과정이 없기 때문에 상대적으로 시스템의 연산시간이 줄고, 이때 요구되는 메모리 공간이 작아지며 속도가 빠르다는 장점이 있다.[5] Choi[6]는 실제 물체의 표면이 모두 보이는 임의의 정점을 충분한 거리가 떨어진 곳에 설정한 후 이 점과 각

측정 점 사이의 기하학적 관계에 의해서 삼각형을 만드는 방법을 제안하였다. 그러나 이 정점에서 보이지 않는 경우에 몇 개의 그룹으로 나누어 각각 삼각망을 구성한 후 다시 결합해야 하는 단점이 있다. 또, Oblonsek[5]는 초기 삼각망의 구성시 요구되는 점들의 분포조건에 대해서 언급하고 있다. 즉, 각각의 점과 가장 가까운 점간의 거리가 실제 물체 표면이 가지는 최대 곡률 반경의 절반 길이보다 더 작아야한다는 조건을 만족하지 않으면 삼각망 구성에 실패할 수 있다고 언급하고 있다.

2.3 2차원 투영 방법

보통 3차원 스캐너를 통해서 얻어진 점 데이터는 측정시 가려져 측정이 안되는 부분이 존재하게 되는데, 이러한 특징은 레이저 변위 스캐너와 CCD 카메라를 이용한 스캐너에서 쉽게 발견된다. 따라서 이를 측정면과 평행한 면으로 투영하여, 2차원상에서 Delaunay Triangulation을 수행하고 삼각망을 형성한 후, 여기서 얻게되는 위상학적관계를 그대로 이용하여 3차원으로 나타내는 방법이다.[4] 이 방법은 속도가 빠르다는 장점이 있으나 폐곡면 형상을 가지는 컴퓨터 단층촬영이나 자기공명 영상술을 통해서 얻어진 단층형태의 데이터에는 적용할 수 없다. 즉, 물체가 오목하게 생겨서 투영면에 가까운 점이 먼쪽의 점보다 물체 중심에 가까우면 실제 법선 방향과 반대 방향으로 뒤집힌 삼각형이 생성되는 오류가 발생하는 단점이 있다.[7][8]

오랜 계산 시간과 큰 메모리 용량을 필요로 하는 체적 기준 방법의 단점과 Choi[6]의 방법에서의 복잡한 형상에 적용하기 어려운 점과, 초기 점들의 제한된 분포 조건[5]와 같은 기존의 면 기준 방법의 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 개선된 면 기준 방법에 기초한 삼각화 알고리즘을 제안한다.

3. 데이터 구조

삼각망을 구성하는 목적은 각각의 측정점들 사이의 관계와 삼각형들 사이의 관계를 얻는데 있으므로, 각각의 데이터 구조에는 원하는 정보를 포함하고 있어야 한다. 예를 들어 한 면과 이웃

하는 면의 법선 벡터의 변화량을 이용해서 실제 물체의 표면이 어떤 곡률의 분포를 가지는지 알 수 있고, 이는 물체의 특징적인 형상을 추출하는데 기본이 되는 정보를 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 꼭지점(vertex), 모서리(edge), 면(face)에 관한 데이터 구조(data structure)를 구성하여 서로 연결함으로써 삼각망 형성에 필요한 정보를 저장, 추출할 수 있게 하였다.

3.1 꼭지점 구조

꼭지점은 파일을 통해서 읽어들이는 순서대로 저장되며, 3차원 좌표 값을 가진다.

3.2 모서리 구조

모서리는 이를 형성하는 2개의 꼭지점을 시계 반대 방향으로 가지고, 공유 면을 2개 가진다.

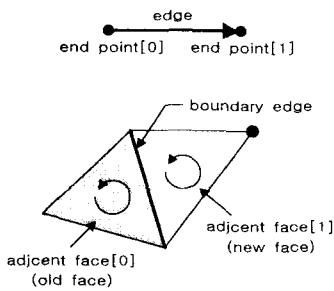


Fig. 1 Edge structure

3.3 면 구조

면은 이를 형성하는 각각 3개씩의 꼭지점·모서리를 가지면서 새로 추가되는 꼭지점으로부터 시작하여 시계반대 방향으로 저장되고, 법선 벡터가 저장된다.

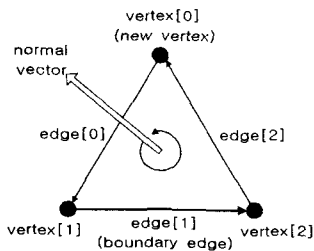


Fig. 2 Face structure

4. 삼각화 알고리즘

삼각망을 생성하기 위한 알고리즘의 진행 순서를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

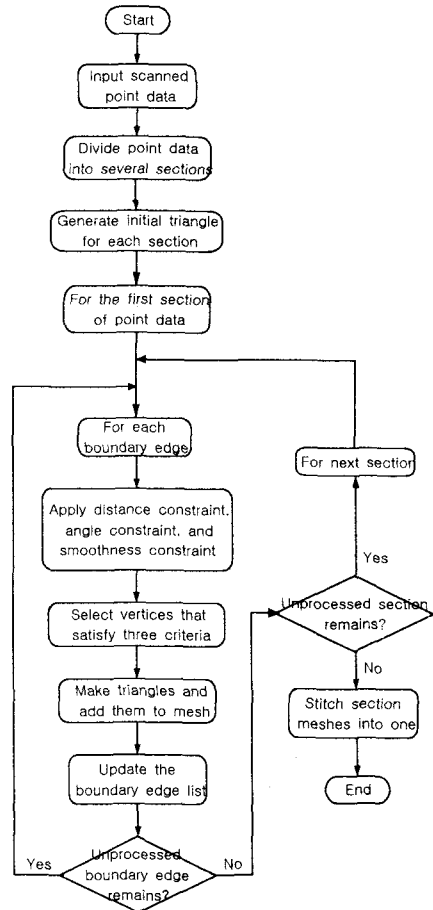


Fig. 3 Flowchart of mesh generation

입력받은 대단위 점 데이터는 천 개 내외가 되도록(Table.1, 2 참조) 몇 개의 구간으로 나누고, 각각의 부분별로 초기 삼각형을 생성시킨다. 그로부터 인접하는 삼각형들을 생성하여 삼각망 생성을 마친 후 최종적으로 이를 합치게 된다. 각 부분별로는 첫째, 기존에 생성되어 있는 삼각형의 경계 모서리를 알아내고 둘째, 이 각각의 경계 모서리에 꼭지점을 추가시켜 삼각형을 추가시켜 나간다. 마지막으로 더 이상 삼각형을 만들 수 있는 경계 모서리가 없으면 삼각망 형성을 중

단한다. 이에 대한 자세한 설명은 아래에 서술한다.

4.1 측정점 데이터의 품질 요건

형상이 급격히 변화하는 큰 곡률을 가진 부위는 측정 간격을 작게 부여하고 곡률이 작은 부위는 위상학적 오류가 발생하지 않는 범위 내에서 최대한 측정 간격을 크게 부여하는 것을 이상적 추출법(*good sampling*)이라고 한다.[4]

본 연구는 측정 데이터가 이상적 추출 조건을 만족한다고 가정하여 수행되었다.

4.2 초기 삼각형의 결정

최초의 꼭지점은 z 값이 가장 큰 것을 선택하고, 다음은 이와 가장 가까운 꼭지점을, 3번째 꼭지점은 각도 제한 기준과 거리 제한 기준을 적용하여 얻는다. 모든 삼각형의 법선 벡터는 우수계, 즉 시계 반대 방향의 순서로 정의된다.

4.3 삼각형의 추가

초기 삼각형이 결정되면, 그 삼각형이 가지는 3개의 모서리를 경계 모서리 목록에 등록하고, 이 경계 모서리들에 대해서 아래의 3가지 삼각형 생성 기준을 적용하여 삼각형을 선정하게 된다. 새로운 삼각형이 생성되면 경계 모서리 목록을 갱신하여 반복작업을 수행한다.

4.3.1 거리 제한 기준

Fig. 4에서 보는 바와 같이 새로 생성될 2개의 모서리들의 길이 합이 기준 거리 이상일 때, 이 꼭지점은 삼각형형성 후보에서 제외된다.

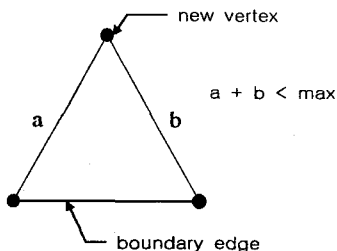


Fig. 4 Distance constraint criterion

4.3.2 각도 제한 기준

Fig. 5에서 보는 바와 같이 경계 모서리

(boundary edge)에 새로운 꼭지점을 추가하여 새로운 삼각형을 생성한다. 이때 생성되는 3개의 내각 크기를 일정한 값으로 제한함으로써, 매우 큰 각이나 매우 작은 각을 포함하는 삼각형의 생성을 제한한다.

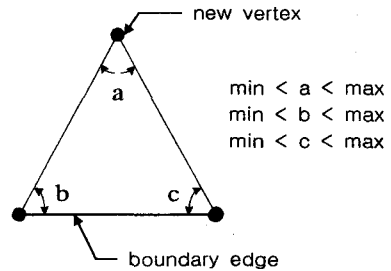


Fig. 5 Angle constraint criterion

4.3.3 평활도 기준

Fig. 6에서 보는 바와 같이 경계 모서리에서 새로 생성되는 삼각형은 그 경계 모서리를 공유하는 기존 삼각형과 예각을 이루지 않아야 한다. 즉, 새로 생성될 삼각형의 법선 벡터와 기존 삼각형의 법선 벡터 사이의 각도가 $\pm \pi/2$ 이내에 들어야 한다. 이는 기존의 삼각형의 법선 방향들과 반대의 값을 갖는 삼각형이 생성되는 것을 방지해 준다.

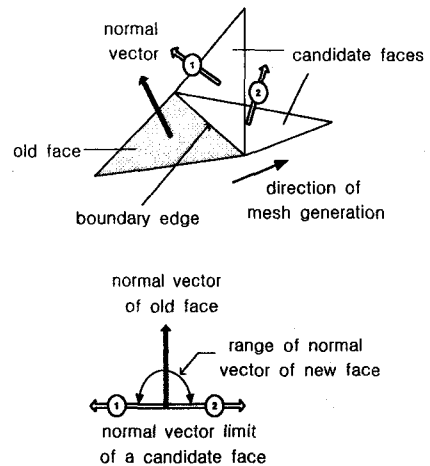


Fig. 6 Smoothness criterion

거리 제한, 각도 제한, 평활도 기준의 순서로 적용하여 만족되는 꼭지점 중 새로 만들어질 2개

의 모서리의 길이 합이 가장 작은 것을 선택한다. 이렇게 되면 새로운 경계 모서리가 2개 생성되고, 사용된 모서리는 경계 모서리 리스트에서 제외된다. 새로 만들어지는 경계 모서리가 경계 모서리와 만나면 이 모서리는 경계 모서리 리스트에서 제외된다. 만약 조건들을 만족하는 꼭지점이 없으면 이 모서리도 역시 삼각형을 추가하는 후보에서 제외된다(죽은 모서리-dead edge-로 정의). 새로 추가된 삼각형에 사용된 꼭지점은 이미 사용되었음을 나타내는 표시가 되고, 사용되지 않은 꼭지점과는 구별된다. 또, 사용된 꼭지점 중에서 경계 모서리에 속한 꼭지점을 제외한 것들을 내부 꼭지점으로 표시하여 다음 삼각형형성 후보에서 제외한다. 즉, 새로운 삼각형을 만들 수 있는 후보 꼭지점은 한번도 사용되지 않은 꼭지점과 경계 모서리가 포함하고 있는 꼭지점들이다. 이러한 과정을 반복하다가, 사용되지 않은 꼭지점의 개수를 더 이상 줄일 없으면 작업이 종료되도록 한다.

4.2.3 접합 알고리즘(stitching algorithm)

위의 알고리즘을 통해서 생성되는 삼각망은 주어진 꼭지점의 개수의 증가에 따라 계산시간의 급격한 증가를 보인다. 이 문제를 해결하기 위해 점들을 몇 개의 구역으로 나눈 후, 다시 접합하는 알고리즘을 제안한다. 이를 통해서 대단위 점 데이터에도 위의 알고리즘을 적용할 수 있을 것이다. 구역이 나누어지고, 각 구역별로 삼각망의 형성이 끝나면, 최 외각 모서리들은 더 이상 삼각망을 추가하지 못하게 된 상태를 말하는데 이를 죽은 모서리로 정의된다. 접합 알고리즘은 앞에서 설명한 삼각형 생성 알고리즘과 같으나 구역의 경계에 생성된 죽은 모서리 관해서 수행되는 것이 다른 점이다. 각 경계에 있는 죽은 모서리를 이용하여 새로 만들어지는 2개의 모서리는 다시 죽은 모서리가 되어, 구역의 경계가 다 배워질 때까지 수행된다. 단, 새로 생성되는 죽은 모서리가 다른 죽은 모서리와 만나면 죽은 모서리 리스트에서 제거된다. 여기서 삼각형을 만드는 꼭지점은 옆에 이웃하는 삼각망 중 죽은 모서리가 가지는 꼭지점이며, 이 꼭지점은 앞 단계에서 결정된 3가지 삼각망 평가 기준의 제한 값을 그대로 사용하여 선택된다. 이로써 구역이 나뉘지 때문에 생성되지 못한 구역의 경계 삼각형

들이 추가된다.

5. 알고리즘 적용 예

본 연구에서 제시한 알고리즘의 적용을 위해 유한요소해석용 소프트웨어인 ANSYS를 통해서 얻어낸 일정한 패턴을 가진 torus의 표면 점 데이터를 이용하여 수행해 보았다(Fig. 7). 또 단층형태를 가진 사람 두개골의 상단부 데이터에도 본 알고리즘을 적용해 보았으며(Fig. 8), 실제 곡률이 많이 변하는 복잡한 모델에의 적용성 평가를 위해 CCD 카메라로 측정된 사람 치아 데이터를 이용하여 평가하였다(Fig. 9, 10). 최종적으로 접합 알고리즘은 어금니 상단데이터를 이용하여 수행하였다(Fig. 10, 11, 12). 이를 위해 pentium II PC(CPU- 350 Mhz)에서 C언어로 구현되었고, 그래픽 라이브러리는 OpenGL을 이용하였다.

Table 1은 삼각망 생성에 사용된 점 데이터를 각각의 개수와 생성 시간을 보여주고 있는데 torus와 head는 시간적 차이가 나지 않는데, 이는 head의 경우가 삼각망 형성시에 정삼각형에 가깝게 되므로, 거리 제한 기준 설정시 긴 모서리를 기준으로 설정할 필요가 없기 때문이다. Table 2는 tooth II의 경우에 접합 알고리즘을 적용하여 본 결과인데 Table 1에서 34초 걸리던 것을 16초에 할 수 있었다. 여기서 생성률이란 전체 점의 개수에 대한 삼각망 구성에 사용된 점의 비율을 말한다. tooth I의 경우처럼 삼각망 형상에 사용되지 않은 꼭지점들이 남아 있더라도, 이 점들이 경계 모서리와 삼각형을 형성할 때 요구되는 3가지 조건이 만족되지 않은 면 그대로 종료된다. Fig. 10의 상단 영역의 포인트가 남아 있는 것이 보이는데, 이는 초기 삼각형이 오른쪽 부분에 생기면서, 삼각망 추가 시 거리 제한 기준 때문에 더 이상 전파되지 못하고 남은 것이다.

삼각망 형성 시 위상학적 오류를 피하기 위한 3가지 삼각망 평가 기준을 설정하는데는 스캔된 점 데이터의 분포 특성에 따라 달라지게 된다. 그러므로 3가지 조건의 정확한 설정을 위해서는 어느 정도 분포특성을 파악해야만 하는 약간의 어려움이 있었다. 왜냐하면 실제로 CCD 카메라로 스캐닝된 데이터는 다른 스캐너에서 얻은 것보다는 상대적으로는 품질이 좋지만 이상적으로 분포된 점 데이터를 얻을 수는 없기 때문이다.

따라서 실제 형상의 표면 기울기가 커서 간격이 크게 스캔되거나, 카메라에서 보이지 않아 스캔되지 못한 부분은 삼각형이 생성되지 못한다. Fig. 10에서 삼각망에 구멍이 난 부분은 측정점이 없는 부분이다. 또, 점 데이터의 측정 간격이 일정하면 이를 근거로 조건을 쉽게 설정할 수 있고, 빈 부분이 없는 삼각망을 얻을 수 있다(Fig. 9).

Table 1 Results of mesh generation

입력데이터		최종 삼각망		생성률 (%)
물체	점(개)	계산시간(sec)	삼각형수	
torus	784	8.0	1568	100
head	900	8.2	1680	100
tooth I	1264	16.7	2368	99
tooth II	2048	34.4	3816	100

Table 2 Results of stitching tooth II

입력데이터		계산시간(sec)	생성률 (%)
부분	점(개)		
upper	911	15.2	96
lower	1137		100

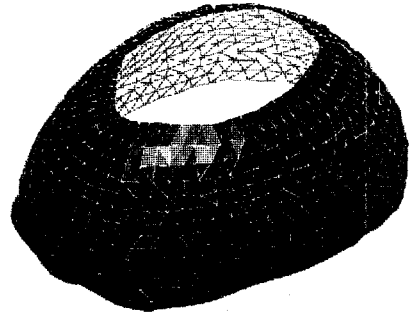


Fig. 8 Head's mesh

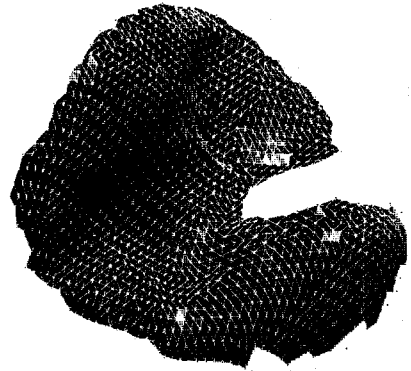


Fig. 9 Tooth I's mesh

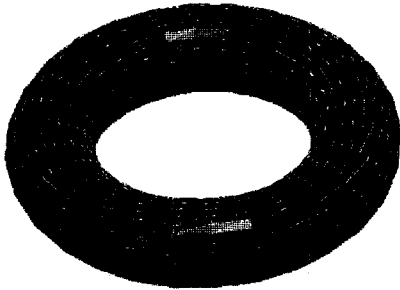


Fig. 7 Torus's mesh

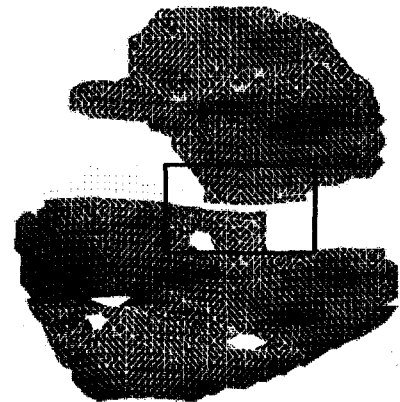


Fig. 10 Total tooth II before stitching

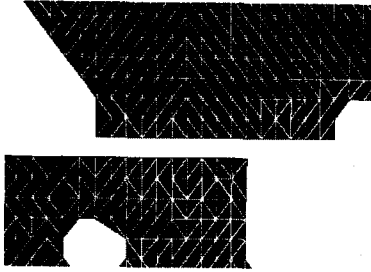


Fig. 11 Tooth II before stitching

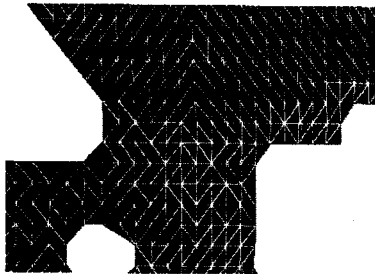


Fig. 12 Tooth II after stitching

6. 결론

본 논문에서 제안한 방법을 사용함으로써 3차원 Delaunay Triangulation을 수행하는데 걸리는 시간과 이를 통해 생성된 사면체 집합을 저장하는 공간 문제를 해결할 수 있었다. 또 Choi[6]에 의해 제안된 알고리즘의 한계인 복잡한 형상이나 폐곡면에 관한 문제도 정점에서 보이지 않는 면의 경우에만 삼각화가 가능한 제한 조건을 제거함으로써 해결하였다. 또, Oblonsek[5]의 입력 데이터의 한계조건도 적절한 평활도 조건 값을 적용함으로써 해결하였다. 마지막으로, 투영면에 가까운 점이 면 쪽의 점 보다 물체 중심에 가까운 측정 점을 포함한 단층 형태의 데이터에 대해서도 순차적으로 삼각망을 형성해 나감으로써 2차원 투영 방법의 한계를 해결하였다. 대단위 점 데이터의 처리를 위해서는 집합 알고리즘을 이용하였는데 계산 시간을 절반 이하의 수준으로 줄일 수 있었다.

후기

본 연구는 중소기업청 기술혁신 과제의 일부로 수행되었으며, 공동 참여 업체인 (주)KCI 관계자 분께도 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) The University of Texas, Center for Computational Visualization(CCV) webpage, <http://king.ticam.utexas.edu/CCV>.
- (2) 배석훈, 2000, "RapidForm을 이용한 리버스 엔지니어링 프로세스 혁신" CAD/CAM학회 학술 발표회 논문집, pp. 273~276.
- (3) 박현구, 김명철, 김승우, 1994, "슬릿광 3차원 형상측정에서 측정분해능 최적화를 위한 시스템설계 및 카메라보정", 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 5호, pp. 1182~1191.
- (4) 최영환, 이순재, 김광수, 2000, "입의의 점군으로부터 사면체 형성을 통한 3차원 형상 재구성", CAD/CAM학회 학술 발표회 논문집, pp. 389~394.
- (5) C. Oblonsek, N. Guid, 1998, "A Fast Surface-Based Procedure for Object Reconstruction from 3D Scattered Points", Computer Vision and Image Understanding, Vol. 69, No. 2, pp. 185~195.
- (6) B. K. Choi, H. Y. Shin, Y. I. Yoon and J. W. Lee, 1984, "Triangulation of scattered data in 3D space", Computer-Aided Design, Vol. 20, No. 5, pp. 239~248.
- (7) 장민호, 전용태, 노형민, 박세형, 2000, "3차원 측정데이터 합성 기술", 대한기계학회 생산 및 설계 공학 부문 춘계학술강연회 강연집, pp. 46~60.
- (8) P. J. Laurent, 1991, "Curves and Surfaces", Academic Press, pp. 433~436.