

Delaunay 삼각화 시 Pole 선택 방법

박태종*, 장민호**, 박형태***, 박상철****

Pole Selection Method for Delaunay Triangulation

Taejong Park*, Minho Chang**, Hyeongtae Park*** and Sangchul Park****

ABSTRACT

Presented in the paper is a procedure to reconstruct a triangular mesh from a point cloud. Although, the proposed procedure is based on the well-known Voronoi diagram approach, it introduces a selection method of 'Pole' to improve the quality of resulting mesh. To select the appropriate Poles for high quality of Triangular mesh, the patterns that the Poles affect to the mesh quality are carefully analyzed. It is possible to improve the mesh quality by controlling the selection method of 'Pole' in terms of distance limit. The initial mesh obtained by the proposed procedure may include invalid triangles. To relieve this problem, a slicing method is proposed to remove invalid triangles from the initial mesh. At last, correcting technique of normal vectors of generated mesh is introduced.

Key words : Point Cloud, Voronoi Diagram, Delaunay Triangulation, Triangular Mesh, Assistant Point

1. 서 론

최근 비 접촉 레이저 측정 기술의 발달은 3차원 형상 정보의 빠르고 정확한 획득을 가능하게 하였다. 하지만 이와 같은 점 데이터는 각 점들 사이의 어떠한 위상 정보도 가지고 있지 않으므로 획득된 정보의 후처리를 통해서 체계화된 표면 정보를 생성하는 것이 필수적이다. 이와 같은 표면 정보 재구성은 제품 설계 및 생산, 여가 및 오락, 의류 그리고 의료 산업 등의 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 존재하는 파트로부터 형상 정보를 얻은 후, 생성된 파트와 선계상 상태에서 계획된 파트 사이의 차이를 분석 함으로써 고 정밀의 제품을 생산하거나, 혹은 획득된 형상 정보로부터 반대로 CAD 모델을 생성하는 역 공학(Reverse Engineering)에 적용되기도 한다^[1]. 여가 및 오락 산업에서는 3차원 영상에서 추출된 배우의 얼굴이나 대상 물체를 빠르게 Mesh로 변환하여 현실에 가까운 가상 현실을 접할 수 있도록 한다. 의료 분야에서는 단층

촬영된 환자의 장기 등의 표면 재구성을 통해서 맞춤형 정보 구축에 사용될 수 있으며 이와 비슷하게 의류 분야에서도 사람의 체형에 따른 맞춤형 옷을 만들 수 있는 차세대 기술에 적용될 수 있다. 이처럼 표면 정보 재구성은 그 적용 분야가 광범위한 뿐 아니라 부가가치가 크다고 할 수 있다. 하지만 점 데이터로부터 Mesh생성을 위해 제안된 기존 알고리즘들은 비 현실적인 가정으로 알고리즘의 사용 범위가 제한적이며 또한 과도한 연산 시간은 현실성이 떨어져 보인다.

표면 정보 재구성 알고리즘은 위상 정보를 전혀 가지지 않은 임의의 점 데이터를 입력 정보로 받으며 이의 처리를 통해서 다각형으로 구성된 Mesh를 생성한다. 본 논문은 다각형 형태의 Mesh 중에서 그 구성 요소가 삼각형인 Mesh로 그 범위를 한정한다. 생성된 Mesh는 일반적으로 삼각형 간의 겹침이 존재하거나 일관된 법선 벡터 정보를 지니지 못하는 등 완전한 상태가 아니기 때문에 이를 위한 후처리 과정이 수반되어야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 기존 연구에 대한 고찰을 한다. 제 3장에서는 Amenta *et al.*가 제시한 알고리즘을 기본적으로 적용하여 표면 재구성을 수행하며 Pole을 선택하는 방법을 다룬다. Voronoi diagram을 이용해서 삼각망을 만드는 방법은

*아주대 산업공학과 대학원

**교신저자, 종신회원, (주)솔루션닉스

***학생회원, 아주대 산업공학과 대학원

****종신회원, 아주대 산업공학과 조교수

- 논문부고일: 2006. 11. 06

- 심사완료일: 2007. 09. 03

꼭들이 높은 곳에서 구멍이 뚫리거나 원하지 않는 삼각형이 생성되어 형상의 왜곡시킨다. 특히 원하지 않는 삼각형의 생성은 형상의 특성 부분의 왜곡과 동시에 불필요한 위상 정보를 야기시키기 때문에 제거되어야 할 부분이다. 이를 방지하기 위해서 삼각망의 여러 층에 걸친 단면 정보를 이용하여 필요한 삼각형을 선별하는 방법을 제안한다. 또한 초기 생성된 삼각망의 삼각형들이 일관된 법선 벡터를 지니고 있지 않으므로 이를 해결하는 법선 벡터 추정 방법에 대해 제안한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구 과제에 대해 논의한다.

2. 기존 연구

Boissonnat *et al.*^[1]은 표면 재구성 문제를 최초로 제시한다. Delaunay 삼각화는 측정된 점들을 부피적으로 표현하는 한 가지 방법이며 그 결과는 사면체의 집합으로 표현된다^[2]. 여기서 사면체 집합의 외부 경계는 측정 점들의 Convex hull이다. 측정 점에 대해 초기 Delaunay 삼각화를 수행하면 Convex hull의 내부는 사면체 집합으로 채워지게 된다. 만약 Convex hull 상에 모든 측정 점이 포함되어 있다면 이것은 대상 물체의 표면에 대한 근사라고 할 수 있다. 하지만 초기 Delaunay 삼각화를 수행하면 Convex hull 상에 모든 측정 점이 포함되어 있지 않으며 따라서 모든 측정 점이 Convex hull 상에 존재할 때까지 사면체를 제거하는 작업을 수행하게 된다. 사면체를 제거하는 이 과정을 위해 표현 가능한 모든 사면체의 조합을 10개로 제시하며 그 중 제거해야 할 사면체의 기준을 정함으로써 순차적으로 사면체를 제거해 나간다. 하지만 이 방법은 실제 구현 시 많은 예외 상황들이 존재하며, 또한 제거하는 사면체의 순서에 따라 결과에 큰 영향을 미친에도 불구하고 이에 대한 기준은 제시하지 못하고 있다. 또한 사면체를 제거할 때 한 개씩 순차적으로 제거하게 되는데 각 사면체가 갖는 정보량은 유효한 면, 선분, 점, 그리고 이웃한 사면체에 대한 정보를 포함하는 등 매우 많으므로 복잡한 형상에 대해 삼각망을 생성할 때 많은 시간이 소요된다.

Edelsbrunner *et al.*는 표면 재구성을 위해 α -shape 방법을 제안한다^[3]. 부드러운 재질로 구성되어 있는 3차원 공간에 측정 점들이 딱딱한 물질에 의해 고정되어 있다고 가정한다. 지름이 α 인 구를 이용해서 이 점들을 건드리지 않고 제거 가능한 부드러운 공간을 모두 제거한다. 제거되지 않고 남은 위의 일부는 선분으로 복원하고, 구면의 일부는 삼각 면으로 복원한 후

남은 모양을 α -shape이라고 정의한다. α 의 값이 0이 되면 모든 공간을 다 제거할 수 있으므로 측정 점만이 남게 되며 α 가 일정 범위 이상 커지면 Convex hull만이 남게 된다. 그러나 최적의 α 값을 자동으로 추정하는 방법은 없으며, 이상적인 값을 얻기 위해 무수한 시행 착오 과정이 요구된다는 한계점이 있다.

Hoppe *et al.*는 표면 재구성을 위해 Voxel grid를 이용하는 방법을 제시한다^[4]. 한 점에 대해 접평면을 추정하고 선택된 측정 점에 대해 가장 가까운 주변의 점을 몇 개 추출한다. 공 분산 벡터를 연산하고 이에 대한 고유 값을 계산하여 가장 큰 고유 값에 대응하는 고유 벡터를 현재 점에 대한 접평면의 법선 벡터로 추정한다. 근접한 접평면들 사이의 법선 벡터는 일관성 있게 추정한다. 위에서 계산한 법선 벡터는 그 부호가 정확하게 추정되었다고 볼 수 없으므로 근접한 접평면들 사이에 법선 벡터가 일관된 방향성을 유지할 수 있도록 그 부호를 추정하여야 한다. Voxel grid 위에서 부호를 가진 거리를 계산하고 표면을 추정한다. 이 접근 방법은 접평면 추정 자체가 정확하지 않으며 법선 벡터의 추정 방식도 다소 부정확하여 복잡한 모델에의 적용에는 한계가 있다.

Amenta *et al.*는 가중치를 갖는 Voronoi diagram인 Power diagram을 이용하여 표면 재구성을 수행한다^[5]. 각 측정 점은 Voronoi diagram으로부터 얻어진 Voronoi 점을 선택하여 2개의 Pole을 갖게 되며 각 Pole에 대한 Power diagram을 연산한다. 이 때 각 Pole들은 내부와 외부 Pole로 나뉘어 지는데 내부 Pole들과 외부 Pole들의 겹침에 의해 생긴 경계면을 Power Crust라고 명명하며 이 부분이 측정 점들로 구성된 표면이 된다. 연산 속도 면에서는 이미 검증된 Voronoi diagram의 연산을 기초로 표면 재구성을 수행하기 때문에 우수하다. 하지만 내부 Pole과 외부 Pole 사이의 겹침을 통해서 발생하는 모든 다면체들이 측정 점의 표면으로 간주되기 때문에 측정 점이 아닌 다른 점들까지 표면 재구성에 참여하게 된다. 경우에 따라서는 점들이 폭발적으로 늘어날 수 있으며 이에 대한 간소화가 필요한 단점이 있다. 또한 측정 점만으로 모델을 구성하고자 한다면 이에 부합하지 않은 표면 재구성 방법이다.

3. Pole의 선택적 이용

측정물의 표면을 측정 점이 재구성해야 할 이상적인 표면이라고 하면 재구성을 위해 만들어져야 할 삼각형을 우리가 원하는 유효한 삼각형이라고 정의하

고, 표면에 있지 않으며 유효한 삼각형을 가리는 삼각형 혹은 형상을 왜곡하는 삼각형을 부효한 삼각형이라고 정의한다.

Amenta와 Bern은 다음과 같은 표면 재구성 과정을 제시한다^[7].

S : 측정 점들의 집합

Step1: S의 Voronoi diagram을 연산한다.

Step2: 각 측정 점의 Pole을 연산한다. Voronoi diagram의 계산 결과 각 측정점에 대해 각기 다른 Voronoi Cell이 생성된다. 각 측정점에 대한 Pole은 가상의 평면의 내부에서 측정 점으로부터 가장 멀리 떨어진 Voronoi 집과 반대 방향으로 가장 먼 곳에 위치하는 Voronoi 점으로 구성된다.

Step3: Delaunay 삼각화를 수행 한다.

Step4: Delaunay 삼각화 결과 생성된 각 사면체의 삼각형 중에서 세 점 모두 측정 점으로 이뤄진 삼각형을 유효한 삼각형으로 판단한다.

Step 2의 Pole이란 측정점을 Delaunay 삼각화했을 때 얻어지는 Voronoi vertices 중 측정 점의 내, 외부 방향에서 가장 멀리 떨어진 점으로 정의한다^[7]. Pole 선택 시, 고려 대상이 측정 점의 Voronoi diagram을 통해 얻어진 Voronoi 점들 중의 일부인 사실은 위 알고리즘과 동일하지만 그 중에서 어떤 기준으로 얼마만큼의 점을 선택할 것인가에 대한 방법이 다르다. Pole의 선택에 따라 표면 재구성에 미치는 영향은 다음과 같다.

3.1 Pole과 측정 점의 거리가 가까운 경우

측정 점과 Pole의 거리가 지나치게 가까운 경우 Pole이 1개이고 측정 점이 3개인 유효한 사면체의 형

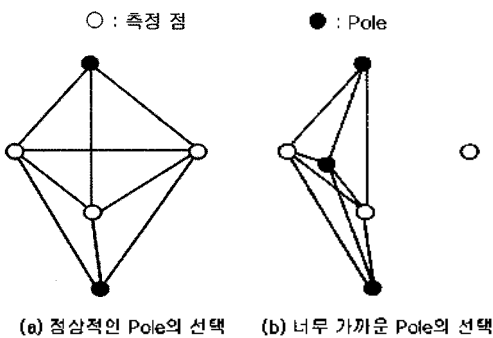


Fig. 1. Pole과 측정 점이 가까운 경우.

성을 방해하고 보조 점과 측정 점이 각각 2개인 사면체를 형성하게 되어 유효한 삼각형이 생성되지 않는다. Fig. 1(a)는 정상적인 Pole의 선택으로 인해 생성되는 유효한 삼각형을 보이고 있다. 하지만 Fig. 1(b)와 같이 측정 점에 지나치게 가까운 거리에 Pole이 형성되면 측정 전 세 개로 이뤄져야 할 유효한 삼각형 부분에 Pole이 그 사이에 놓이게 되어 유효한 삼각형을 형성할 수 없게 된다. 따라서 형성되지 않은 유효한 삼각형의 면적만큼 구멍이 뚫리는 현상이 발생한다.

3.2 Pole과 측정 점의 거리가 먼 경우

Pole이 측정 점과 멀리 떨어져 있는 경우 Delaunay 삼각화 연산을 할 때, 다른 측정 점의 보조 점으로 사용될 수 있다. 그런 경우 다른 측정 점들 간의 삼각형 형성에 기여하게 되어 원하지 않는 삼각형이 생성될 수 있다. Fig. 2가 삼각 방의 단면을 보여주고 있다고 가정하면 여기서 Pole은 유효한 삼각형의 형성에 기여하고 있지 않으며 유효한 삼각형을 가리는 원하지 않는 삼각형을 생성하게 되어 Fig. 2의 a 부분만큼 곡률이 높은 부분의 형상이 누락되게 된다.

이와 같이 Voronoi 점들로부터 Pole을 선택할 때 측정 점과의 거리는 최종 삼각 방의 형성 패턴에 큰 영향을 주고 있으며 따라서 반드시 고려되어야 할 필수 요소임을 알 수 있다. 하지만 Amenta와 Bern의 알고리즘은 Pole과 측정 점과의 거리가 고려되고 있지 않다. 즉, 단순히 양 극단에서 거리가 가장 먼 Voronoi 점만을 선별하여 Pole로 구성하는데 이로 인해 원하지 않는 삼각형이 생성되거나 혹은 유효한 삼각형이 누락되어 전체적 형상에 구멍이 뚫리는 현상이 발생하게 된다.

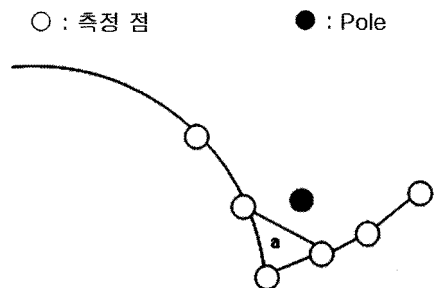


Fig. 2. Pole과 측정 점이 먼 경우.

한편 거리 기준에 따라 Voronoi 점을 선별하지 않고 모두 Pole로 선택하여 표면 재구성에 사용하는 경우 결과적으로는 측정 점과 가까이 있는 Voronoi 점

들이 유효한 삼각형을 만드는데 관여하게 된다. Voronoi 점이 측정 점과 가까이 있을 경우 곡률이 높은 부분에서는 앞서 언급했듯 형상에 구멍이 뚫리게 되며 또한 측정 점으로부터 거리가 가장 먼 Voronoi vertex만을 Pole로 선택하여 사용할 경우 구멍이 뚫리지는 않지만 원하지 않는 삼각형의 생성이 빈번하게 발생된다.

3.3 Voronoi 점의 제한적 선택

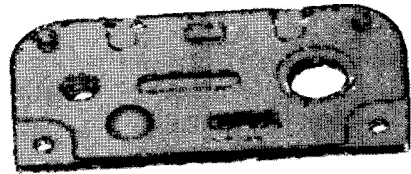
본 논문에서는 Pole을 선택하는 과정에서 거리에 대한 고려를 제한한다. 측정 점과 측정 점에 관련된 Voronoi 점들 사이의 일정한 거리 이상이 되는 모든 점을 선택한다. 이 일정한 거리는 측정 점간의 일반적인 거리, 즉 측정 점 간의 밀도에 따라 영향을 받으며 이 밀도는 측정 장비의 resolution 또는 측정된 형상의 다양한 부분에 따라 다르기 때문에 절대적인 거리를 제시하기에는 어려움이 따른다. 측정 점의 유효한 삼각형 형상에 직접적인 영향을 미치는 Pole은 위치와 거리에 따라 결정되며 원하지 않는 삼각형이 생성되는 현상과 구멍이 뚫리는 현상은 항상 거리에 종속적이다. 거리에 따라 Voronoi 점을 제한적으로 선택하는 경우 삼각형의 형성에 영향을 미치는 실질적인 Pole은 측정 점에서 멀리 떨어져 있지 않으므로 원하지 않는 삼각형이 생성되는 현상의 완화가 가능하며, 구멍이 뚫리는 현상도 지나치게 가까운 Pole을 Delaunay 삼각화 연산 이전에 제거 함으로써 많이 완화 될 수 있다. Fig. 3은 구현된 결과를 보여 준다. Fig. 3(a)는 거리를 고려하지 않고 모든 Voronoi 점을 보조 점으로 선택한 결과이며 많은 부분에서 구멍이 뚫린 현상을 확인할 수 있으며 Fig. 3(b)는 가장 거리가 먼 Voronoi 점만을 선택한 결과이다. 이 경우 앞서 설명한 것처럼 유효한 삼각형을 가리는 원하지 않는 삼각형의 생성으로 인해 곡률이 높은 부분의 형상이 누락되는 현상이 발생한다. Fig. 3(c)는 거리에 따라 선택적으로 Voronoi 점을 선택한 결과를 보여준다. 결과에서 볼 수 있듯 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 보였던 구멍이 뚫리는 경우와 원하지 않는 삼각형이 형성되는 현상이 많이 완화된 것을 확인할 수 있다.

결국 품질 좋은 삼각망을 생성하는 방법은 가까운 Pole을 선택함으로써 유발되는 구멍 뚫린 삼각망을 피하는 동시에 곡률이 높은 부분에서는 너무 멀리 떨어진 점을 Pole로 선택하는 것을 피함으로써 높은 곡률의 형상을 보존하는 것이다. 논문에서 사용한 점군의 경우 다음의 기준에 의해 Pole을 선택 함으로써 앞서 언급한 두 유형의 문제점을 피하는 개선된 삼각망을

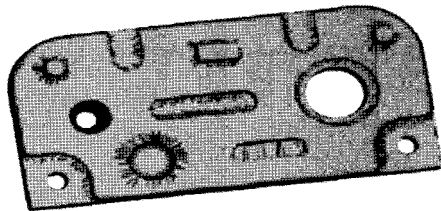
생성할 수 있었다.

첫째, 구멍이 뚫리는 현상의 경우는 너무 가까운 점을 Pole로 선택 함을 피해야 한다. 그러나 앞서 언급했듯 점군의 부분에 따라 점 밀도는 다르게 나타나며 따라서 로컬한 점 밀도를 고려하여 Pole을 선택하여야 한다. 이를 위해 본 구현에서는 측정 점으로부터 가장 가까운 4개 점들의 평균 거리를 구하여 이 거리 이상 떨어진 voronoi 점을 Pole로 정하여 2차 삼각화에 사용하였다.

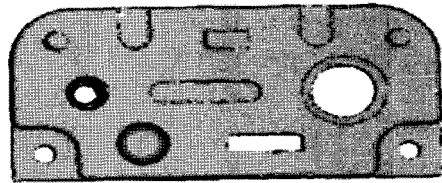
둘째, 곡률이 높은 부분의 형상을 온전히 보존하기 위해서는 측정 점으로부터 인접한 4개의 점들 중 최대 거리 이하의 점을 Pole로 선택하여 2차 삼각화에 사용하여 높은 곡률의 형상의 누락을 방지하였다.



(a) 거리를 고려하지 않은 Pole의 선택



(b) 가장 거리가 먼 Pole의 선택



(c) 선택적인 Pole의 선택

Fig. 3. Pole과의 거리에 따른 결과.

3.4 후처리 과정

유효한 삼각형을 가로 막는 원하지 않는 삼각형은 삼각형의 위상 정보를 왜곡할 뿐만 아니라 대상 물체에서 곡률이 높은 부분의 형상 정보의 누락을 유발하여 형상 특성을 왜곡하기 때문에 제거되어야 한다. 그러나 원하지 않는 삼각형들을 3차원 상에서 판별하여 바로 해결하기에는 어려움이 따른다. 따라서 본 논문은 이미 생성된 Mcsh를 여러 평면으로 축추출해 잘라내어 그 단면 정보를 이용하는 방법을 제안한다. Fig. 4는 삼각 망의 단면을 보여주고 있다. 특정 평면으로

삼각 망의 단면을 도출하였기 때문에 초기에는 2개의 점으로 이루어진 선분들의 집합으로 단면을 표현할 수 있다. 만약 중복된 삼각형이 존재하지 않고 또 원하지 않는 삼각형이 존재하지 않는다면 삼각 망의 단면은 겹치지 않은 몇 개의 폐곡선으로 구성될 것이다. 하지만 Fig. 4에서 볼 수 있듯 표면 재구성 과정을 통해서 생성된 삼각망은 여러 개의 선분 조각(segment)들로 이루어질 수 있으며 여러 각도의 조각들을 확인 함으로써 우리는 원하지 않는 삼각형이 존재함을 알 수 있다. 이러한 단면을 하나의 폐곡선으로 연결되게 만들고 이 폐곡선을 만드는 데 기여한 삼각형만을 삼각 망을 구성하는 유효한 삼각형으로 판단하며 그 외의 삼각형은 삼각 망에서 제거한다. 본 논문이 제시하는 알고리즘은 초기 삼각 망의 단면이 선분 조각들로 구성되어 있으며 최종적인 폐 곡선(선분 조각의 연결)을 도출하기에 부족함이 없다고 가정한다. 즉, 단면이 여러 개의 폐곡선으로 구성될 수는 있으나 폐곡선이 아닌 끊어진 곡선은 존재하지 않는다.

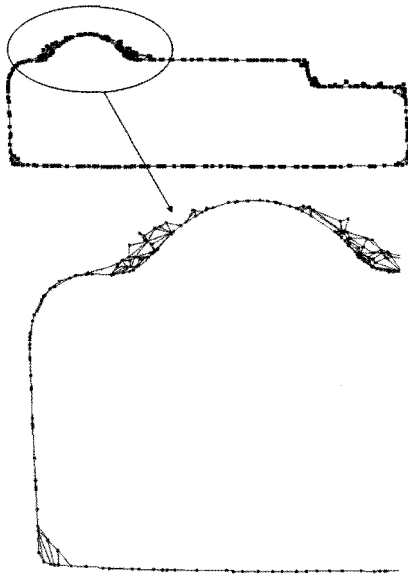
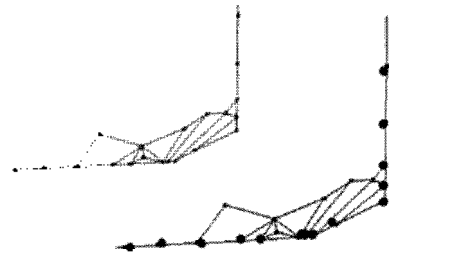


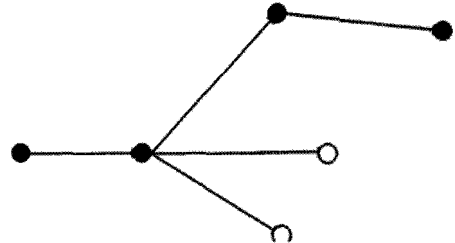
Fig. 4. 삼각 망의 단면.

먼저 최초 시작할 초기 선분 조각(segment)을 선택해야 하는데 초기 선분의 조건은 선분 조각의 양 끝점과 연결된 선분 조각이 모두 한 개인 경우로 한정하여 무작위로 선택한다. 위의 조건이 없이 무작위로 초기 선분을 선택하여도 부분적인 일그러짐이 있을 수 있으나 전반적으로 추정하고자 하는 폐곡선의 형상에는 큰 영향을 미치지 않았다. 선택된 선분의 끝점에 연결된 선분이 복수 개인 경우 다음 선분의 선택은 Fig.

5(a)에서 보인 추적 결과와 같이 각도의 변화가 가장 작은 선분을 우선으로 선택한다. 하지만 아무리 각도가 작아도 선택될 선분의 다음 연결 선분이 존재하지 않는다면 그 선분은 선택될 수 없다(Fig. 5(b)). 앞서 언급했듯 폐 곡선이라는 가정은 끊어지지 않는 하나의 고리를 의미하기 때문이다. 선분 조각 연결의 종결 조건은 마지막으로 연결된 선분 조각이 초기 선분 조각일 경우 폐 곡선 추적 과정은 종결되게 된다.



(a) 작은 각도 변화로의 선분 연결



(b) 로컬 종결을 피하는 방향의 연결

Fig. 5. 선분 조각들의 연결 방법.

Fig. 6과 같이 전반적인 곡선의 추정에 있어 본 논문이 제시하는 폐곡선 추정 알고리즘이 무리없이 수행됨을 확인할 수 있으나 때로 원하지 않는 삼각형들이 유효한 삼각형들을 심각하게 가리는 경우 선분 조

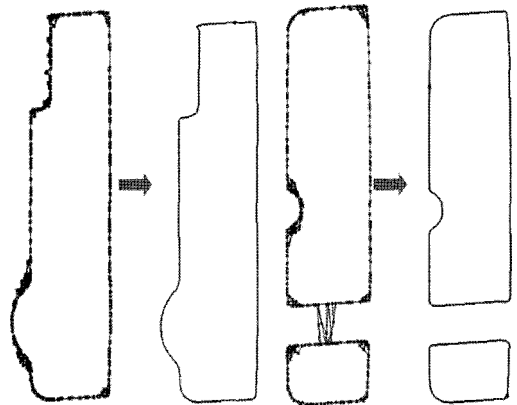


Fig. 6. 연결된 단면 결과.

각을 선택하는 복잡성이 증가하여 부분적으로 형상이 왜곡될 수 있다.

또 다른 후 처리 과정으로 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯 표면 재구성의 과정을 거친 삼각 망의 삼각형들의 법선 벡터는 일관성이 존재하지 않는다. 그림의 검은 부분은 법선 벡터가 아래쪽을 향하는 삼각형들이며 밝은 부분은 법선 벡터가 위쪽을 향하는 삼각형들을 나타낸다. 이와 같이 삼각형의 법선 벡터가 일관성이 없는 경우 삼각 망의 표현에 어려움이 있을 뿐 아니라 삼각형들 간의 연결 관계도 불명확하여 완전한 위상 정보를 지닌 삼각 망이라고 말할 수 없다. 따라서 삼각 망에서 삼각형 간 법선 벡터가 일관성을 지니도록 조정하는 과정이 필요하다.

삼각형의 법선 벡터는 삼각형을 이루는 점들의 순서로 결정한다고 가정할 수 있다. 즉, Fig. 8에서 보는 것과 같이 삼각형의 점의 순서가 1-3-2 순(반시계 방향)이라면 법선 벡터가 위쪽을 향하는 것으로, 1-2-3 순(시계 방향)이라면 법선 벡터가 아래쪽을 향하는 것으로 규정한다. 삼각형이 인접하여 있음은 서로 선분(edge)을 공유하고 있음을 의미한다. 따라서 인접한 삼각형의 법선 벡터가 서로 일관되게 존재한다면 삼각형 점의 색인(index)이 서로 반대 방향으로 포함되어 있어야 한다. 즉, Fig. 8에서 *tri1*이 공유하는 선분을 3-2 순서로 포함하고 있다면 *tri2*는 2-3의 순서로 선분의 점을 포함하여야 한다. 법선 벡터가 올바르게 주어진 초기삼각형이 존재한다면 이것을 기준으로 주위 삼각형의 법선 벡터 정보를 일관성 있게 통일해 나갈 수 있다. 초기 삼각형의 선택은 삼각 망에서 존재하는

가장 큰 Z 좌표 값을 갖는 삼각형으로 선택한다. 이 삼각형보다 Z 좌표가 더 큰 삼각형은 존재하지 않기 때문에 이 삼각형의 법선 벡터는 Z축의 양의 방향을 향한다고 가정할 수 있다. 만약 초기 삼각형의 법선 벡터가 잘못되어 삼각 망 전체의 법선 벡터가 뒤집어 졌다 하더라도 삼각 망 내 삼각형 간의 법선 벡터에는 이미 일관성이 존재하기 때문에 모든 삼각형의 법선 벡터를 반대로 바꿔 줌으로써 올바른 법선 벡터 정보를 지닌 삼각 망의 생성할 수 있다. Fig. 7(b)는 올바른 법선 벡터 추정 과정을 통해서 얻어진 위상 정보를 지닌 삼각 망이다.

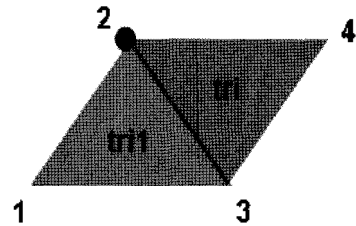
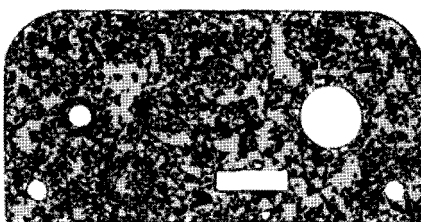


Fig. 8. 삼각형의 법선 벡터 결정 원칙.

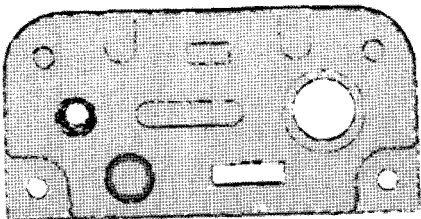
6. 결 론

본 논문은 3차원 광학 측정 장비로부터 획득한 입체 형상의 점 데이터로부터 표면 재구성을 통해 삼각 망을 생성하는 과정에 대해 기술한다. Voronoi 점들 중 일부를 Pole로 이용하여 삼각 망을 생성하는 방법은 이미 존재하는 방법이지만 측정 점과 Pole과의 거리를 고려하지 않을 경우 삼각 망의 형성에 일관성이 떨어지며 특히 곡률이 높은 부분에서 위하지 않는 삼각형이 생기거나 구멍이 뚫리게 된다. 이러한 현상을 완화하기 위해서 논문에서는 측정 점과의 거리를 고려한 Pole의 선택을 제안한다. 표면 재구성을 통해 얻어진 삼각망은 원치 않는 삼각형이 존재할 수 있기 때문에 후처리 과정을 필요로 하며 이를 위해 삼각 망을 여러 평면으로 촘촘하게 절단하여 생성된 단면 정보를 이용한다. 이러한 단면 정보를 이용하는 방법은 표면 재구성의 삼각 망 뿐 아니라 삼각형의 겹침이나 원하지 않는 삼각형이 발생하는 일반적인 삼각 망에서도 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 표면 재구성을 통해 얻어진 삼각 망의 삼각형 간에 일관성 없는 법선 벡터 정보를 올바르게 고치기 위한 작업을 통해서 완전한 위상 정보를 가진 삼각 망의 생성을 이룬다.

본 논문의 향후 연구되어야 할 부분으로는 Voronoi 점을 이용하여 Pole을 선별할 때 곡률이 높은 곳에서



(a) 일관되지 않은 삼각형의 법선 벡터



(b) 후 처리로 조정된 법선 벡터

Fig. 7. 올바른 법선 벡터의 추정 결과.

의 한계와 관련된다. 앞서 언급한 것처럼 곡률이 높은 부분에서는 일정 거리 이상의 점을 보조 점으로 선택 시, 원하지 않는 삼각형이 생성되며 일정 거리 이하의 점을 보조 점으로 선택하면 구멍이 뚫리게 된다. 이점이 Voronoi diagram을 이용한 방법의 한계이며 이에 대한 극복 방안이 연구되어야 할 것이다. 또한 꼬인 삼각형을 제거하기 위해서 삼각 망의 단면 정보를 추출하는 방법은 서로 다른 단면 간에 추출된 원하지 않는 삼각형과 유효한 삼각형에 대한 정보가 상충되는 경우가 생길 수 있으며 이런 경우 어떤 삼각형을 선택할 것인가에 대한 추가적인 선택 알고리즘이 생각되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Varady, T., Martin, R. R. and Cox, J., "Reverse Engineering of Geometric Models-an Introduction". *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
2. Amenta, N., Bern, M. and Kamvysselis, M., "A New Voronoi based Surface Reconstruction Algorithm" *Proceeding of SIGGRAPH 98*, pp. 415-421, 1998.
3. David Cohen-Steiner, Eric Colin de Verdiere and Mariette Yvinec, "Conforming Delaunay Triangulation in 3D", *Computational Geometry*, Vol. 23, No. 2-3, pp. 217-233 2004.
4. Edelsbrunner, H. and Mucke, E. P., "Three-dimensional Alpha Shapes", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 13, No. 1, pp. 43-72 1994.
5. Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W., "Surface Reconstruction from Unorganized Points", *Proceeding of SIGGRAPH 92*, pp. 71-78, 1992.
6. Amenta, N., Choi, S. and Kolluri, R., "The Power Crust, Unions of Balls and the Medial Axis Transform", *Computational Geometry and Applications*, Vol. 19, No. 2-3, pp. 127-153, 2001.
7. Amenta, N. and Bern, M., "Surface Reconstruction by Voronoi Filtering", *Discrete and Computational Geometry*, Vol. 22, No. 4, pp. 481-504, 1999.



박 태 중

2005년 아주대학교 산업공학과 학사
2007년 2월 아주대학교 산업공학과 석사
2007년 2월-현재 (주)덕인
관심분야: CAD/CAM, Virtual Manufacturing System



장 민 호

1991년 서울대학교 기계설계학과 학사
1993년 미국 MIT 기계공학과 석사
1996년 미국 MIT 기계공학과 박사
1996년-2001년 KIST CAD/CAM연구센터 선임연구원
2001년-현재 (주)솔루션닉스 연구소장
관심분야: CAD/CAM, Design, Reverse Engineering, Digital Inspection



박 형 태

2005년 8월 아주대학교 산업공학과 학사
2007년 8월 아주대학교 산업공학과 석사 과정
2007년 8월-현재 아주대학교 산업공학과 박사 과정
관심분야: CAD/CAM, PLC, Simulation, FMS



박 상 철

1994년 KAIST 산업공학과 학사
1996년 KAIST 산업공학과 석사
2000년 KAIST 산업공학과 박사
2001년-2004년 미국 DaimlerChrysler ITM research engineer
2004년-현재 아주대학교 산업정보시스템 공학부 교수

관심분야: CAD/CAM, Virtual Manufacturing System, Discrete Event System Modeling & Simulation