

< 논문 >

경계 복셀 모델을 이용한 임의 형상의 비조직화된 점군으로부터의 3 차원 완전 형상 복원

이 일 섭* · 김 석 일†

(2005 년 12 월 13 일 접수, 2006 년 5 월 8 일 심사완료)

Complete 3D Surface Reconstruction from an Unstructured Point Cloud of Arbitrary Shape by Using a Bounding Voxel Model

Rixie Li and Seok-II Kim

Key Words : Surface Reconstruction(형상 복원), Point Cloud(점군), Complete Matching(완전 매칭), Bounding Voxel Model(경계 복셀 모델), Reverse Engineering(역설계)

Abstract

This study concerns an advanced 3D surface reconstruction method that the vertices of surface model can be completely matched to the unstructured point cloud measured from arbitrary complex shapes. The concept of bounding voxel model is introduced to generate the mesh model well-representing the geometrical and topological characteristics of point cloud. In the reconstruction processes, the application of various methodologies such as shrink-wrapping, mesh simplification, local subdivision surface fitting, insertion of isolated points, mesh optimization and so on, are required. Especially, the effectiveness, rapidity and reliability of the proposed surface reconstruction method are demonstrated by the simulation results for the geometrically and topologically complex shapes like dragon and human mouth.

1. 서 론

형상 역설계는 CAD 정보가 없는 실물 모형을 측정해서 가공, 해석, 품질 검사 등과 같은 여러 응용 분야에 직접 적용할 수 있는 3 차원 형상 모델을 생성하는 기술을 의미하며, 방법론적으로 점군을 이용한 형상 역설계 방법,⁽¹⁻⁷⁾ 다중 이미지를 이용한 형상 역설계 방법^(8,9) 등이 있다. 특히 점군을 이용한 형상 역설계 방법은 CMM(Coordinate Measuring Machine), 3 차원 스캐너 등을 이용해서 측정된 실물 제품, 점도 모델 및 목형의 점군으로부터 효율적으로 정밀하고 신뢰성이 높은 3 차원 형상 모델을 생성하는 데 그 초점을 두고 있다.

최근 눈부시게 발전한 광학 기술, 영상 처리 기술 등에 의해서 다양한 고효율 3 차원 측정 장비들이 개발되었고, 그 결과로 측정 시간의 단축과 함께 측정 형상의 다양화, 복잡화 및 정밀화에 대

한 요구가 산업 현장에서 적극 제기되고 있다. 따라서 많은 측정점들의 집합이면서 기하학적 및 위상학적으로 복잡한 형태를 갖는 점군으로부터 정밀도와 신뢰도가 높은 3 차원 형상을 복원하기 위한 방법들이 많은 주목을 받고 있다.

점군으로부터 3 차원 형상을 복원하기 위한 방법론의 하나로 Delaunay 삼각화 기법에 기반을 둔 연구들이 있다. Gopi 등⁽¹⁾은 한 점을 지나는 법선 평면에 대해서 그 근처의 점들을 투영하여 얻은 국부적인 2 차원 Delaunay 삼각화 관계를 토대로 3 차원 형상 복원을 시도하였다. Hoppe 등⁽²⁾은 근접점들로 이루어진 K-NN (K-Nearest Neighborhood) 을 이용하여 모든 점들의 접선 평면을 구한 후, 그 평면에 대한 근접점들의 거리와 방향, Marching Cube 등을 이용해서 형상을 복원하였다. Bernardini 등⁽³⁾은 점군에 접해서 이동하는 볼의 운동 궤적을 토대로 형상을 복원하는 방법을 제시하였다. 그리고 Boissonnat⁽⁴⁾은 임의로 주어진 초기 삼각형의 모서리들을 이용하여 접선 평면을 얻은 후, 그 모서리들의 두 꼭지점에 대응하는 K-NN 들을 그 접선 평면에 투영하고, 투영점들과 두 꼭지점 사이의

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : sikim@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0176 FAX : (02)3158-4231

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부

각도가 최대인 투영점을 두 꼭지점과 함께 새로운 3 각형 메쉬의 꼭지점으로 설정하는 개념을 토대로 형상 복원을 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 Delaunay 삼각화 기법에 기반을 두고 있기 때문에 측정점 수가 많아질수록 형상 복원을 위한 소요 시간이 급격히 늘어나고, 형상 오차도 발생하는 문제를 가지고 있다.

또한 Lee 등⁽⁶⁾은 이미 주어진 초기 메쉬 모델의 간략화 과정을 통해서 얻은 제어 메쉬 모델에 대해서 세분화, 치환 및 재추출 과정을 반복 수행하여 형상을 복원하였다. Jeong 과 Kim⁽⁹⁾은 점군을 모두 둘러싼 기본 입체의 표면에 정규화된 메쉬를 생성한 후, 그 메쉬의 꼭지점들을 근접점들로 이루어진 평면에 수직 투영시키는 방법을 통해서 점군으로부터 최종 형상을 직접 복원하였다. 특히 Kim 과 Li⁽⁷⁾는 이전의 연구들이 모두 점군을 근사적으로 묘사하는 형상을 도출하기 때문에 점군 측정 과정에서의 오차가 없더라도 원리적으로 점군과 복원 형상 사이에는 오차가 존재한다는 점에 주목하고, 국부 세분화 곡면 적합(local subdivision surface fitting) 기법,⁽¹⁰⁾ 완전 매칭(complete matching) 기법, 메쉬 최적화(mesh optimization) 기법 등을 이용하여 점군과 완전하게 일치하면서 제품 형상을 정밀하게 묘사하는 3 차원 형상을 복원하였다. 그러나 이 연구도 점군 형상을 개략적으로 묘사하는 초기 메쉬 모델을 생성하기 위해서 점군을 둘러싸는 직육면체 형태의 경계 상자를 사용하였기 때문에 원리적으로 구멍이나 가늘고 긴 틈새 등이 존재하는 복잡한 형상에 대해서는 적용하기 어렵다는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 구멍이나 가늘고 긴 틈새 등이 존재하기 때문에 기하학적 및 위상학적으로 형상이 복잡한 대상물을 측정해서 얻은 비조직화된 점군으로부터 형상 복원 오차 없이, 즉 최종 복원 형상이 측정 대상물과 동일한 형상이 되도록 최종 복원 형상의 꼭지점과 측정점 사이에 일대일 대응이 성립하면서 공간 기하학적 위치 오차와 형상 왜곡이 없이 3 차원 형상을 완전 복원하는 방법을 제시하였다. 특히 기하학적 및 위상학적 제한 없이 3 차원 형상을 복원하기 위해서는 무엇보다도 점군과 유사한 형태의 경계 모델이 필요하다는 점을 고려해서 복셀 기반의 경계 모델인 경계 복셀 모델의 개념을 제안하였다. 그리고 초기 메쉬 모델의 생성을 위해서 경계 복셀 모델에 슈링크 래핑(shrink-wrapping)⁽¹¹⁾ 기법을 적용하였고, 추가적인 삼각형 메쉬의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 측정점 수와 최대한 일치하도록

만들어주는 제어 메쉬 모델은 QEM(Quadric Error Metrics) 알고리즘⁽¹²⁾에 토대를 둔 꼭지점 기반의 메쉬 간략화 기법을 이용해서 초기 메쉬 모델로부터 얻었다. 그리고 점군 형상을 근사적으로 묘사하는 매개변수 곡면 모델(parametric surface model)⁽¹³⁾은 제어 메쉬 모델에 국부 세분화 곡면 적합 기법을 적용하여 도출하였고, 최종적으로 점군과의 오차가 존재하지 않으면서 형상 왜곡도 없는 3 차원 형상은 매개변수 곡면 모델의 꼭지점들이 점군과 완전하게 일치하면서 실물 형상을 정밀하게 묘사하도록 완전 매칭 기법과 메쉬 최적화 기법을 적용함으로써 복원하였다. 특히 본 연구에서 제안한 경계 복셀 모델 기반의 3 차원 완전 형상 복원 방법의 유용성, 신속성 및 신뢰성은 기하학적으로나 위상학적으로 매우 복잡한 형태인 용 모델(dragon model), 구강 모델(mouth model) 등에 대한 형상 복원 결과를 통해서 입증하였다.

2. 경계 복셀 모델 기반의 형상 복원

2.1 경계 복셀 모델

구멍이나 가늘고 긴 틈새 등이 존재하는 기하학적 및 위상학적으로 복잡한 형상을 측정해서 얻은 비조직화된 점군으로부터 3 차원 형상을 완전 복원하기 위해서는 무엇보다도 점군 형태와 근사한 경계 모델이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 먼저 Fig. 1 과 같이 점군을 둘러싸는 직육면체 형태의 경계 상자를 동일한 크기의 복셀들로 분할한 후, 측정점을 포함하고 있는 외곽 복셀들의 바깥쪽에 위치하는 속이 빈 복셀들을 모두 제거함으로써 Fig. 2 와 같이 점군 형태와 유사한 초기 복셀 모델(initial voxel model)을 얻었다. 특히 복셀의 크기는 Fig. 1 과 같이 복셀들로 구성된 경계 상자의 표면 상의 꼭지점 수가 측정점 수와 가장 근접하게 되도록 결정하였다.

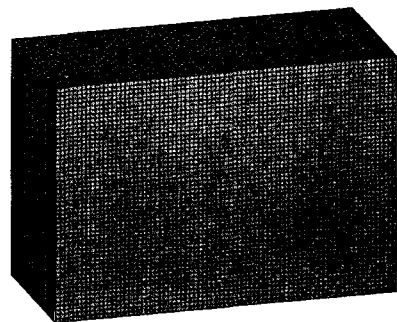


Fig. 1 Voxel-based bounding box

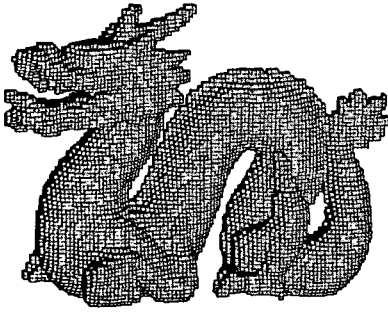


Fig. 2 Initial voxel model

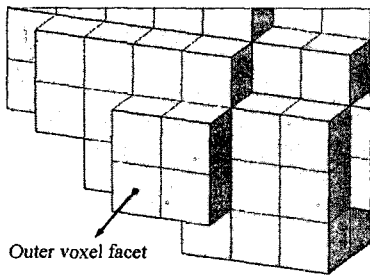


Fig. 3 Outer voxel facet

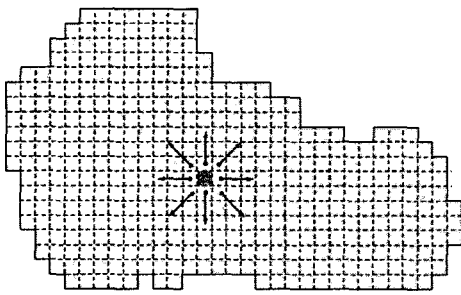


Fig. 4 Elimination of inner voxel facets

그러나 이러한 초기 복셀 모델은 각각의 복셀들에 의해서 내부가 작은 공간들로 분할되어 있기 때문에 형상 복원에 필요한 메쉬 모델로 직접 사용하기에는 부적합한 상태이다. 특히 형상 복원에 적합한 메쉬 모델을 얻기 위해서는 Fig. 3 과 같은 최외곽 복셀 면(outer voxel facet)들로만 구성되는 경계 복셀 모델이 요구되는데, 이러한 경계 복셀 모델은 이웃한 두 복셀들이 서로 공유하는 면들을 모두 제거함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 초기 복셀 모델로부터 경계 복셀 모델을 도출하기 위해서 Fig. 4 에서와 같이 초기 복셀 모델 내에 존재하는 임의의 한 복셀에 대해서 전후, 좌우 및 상하 방향으로 최외곽 복셀 면들에 도달할 때까지 만나게 되는 모든 내부 복셀 면들을 소거하는 방법을 사용하였으며, 이러한 과정을 초기 복셀 모

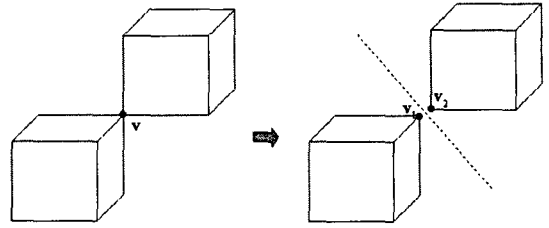


Fig. 5 Separation of facets with a common vertex

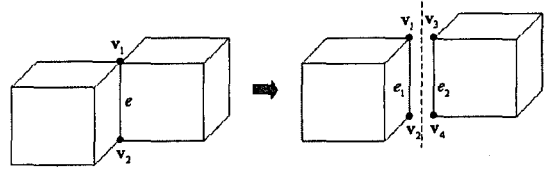


Fig. 6 Separation of facets with a common edge and two common vertices

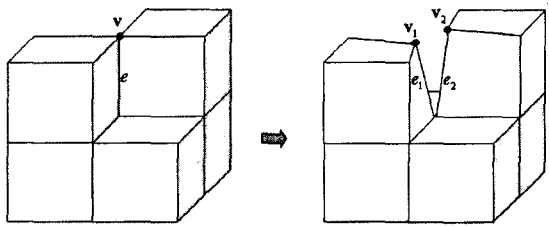


Fig. 7 Separation of facets with a common edge and a common vertex

델 내의 모든 복셀들에 대해서 적용하였다.

본 연구의 경계 복셀 모델은 최외곽 복셀 면들로 구성된 다양체(manifold) 모델을 의미하므로 위상(topology) 요소들의 상관 관계를 나타내는 아래의 Euler-Poincare 관계식을 만족해야 한다.

$$v - e + f - h = 2 \cdot (s - p) \quad (1)$$

여기서 v 는 꼭지점의 수, e 는 모서리의 수, f 는 면 또는 외곽 루프(loop)의 수, h 는 내부 루프의 수, p 는 관통 구멍의 수, 그리고 s 는 독립된 셸(shell)의 수를 각각 의미한다.

특히 경계 복셀 모델을 얻는 과정에서 식 (1)의 조건을 위배하는 경우들이 나타나게 되는데, Figs. 5~7은 그 예와 처리 과정들을 보여주고 있다. Fig. 5는 하나의 꼭지점이 인접한 두 복셀들로부터 파생된 면들에 의해서만 공유되는 경우인데, 식 (1)을 만족시키기 위해서는 공유 꼭지점이 기하학적으로는 같은 좌표값을 갖지만 위상학적으로는 다른 점이 되도록 공유 꼭지점을 2개의 꼭지점으로 분할해야 한다. Fig. 6은 하나의 모서리와 두 꼭지점들이 인접한 두 복셀들로부터 파생된 면들에 의

해서만 서로 공유되는 경우이며, 공유 모서리와 꼭지점들이 모두 위상학적으로 분할되어야 한다. 그리고 Fig. 7 은 하나의 모서리와 꼭지점이 인접한 두 복셀들로부터 파생된 면들에 의해서만 서로 공유되고 있는 경우를 보여주고 있는데, 공유 모서리의 꼭지점 중의 하나가 인접한 세 복셀들로부터 파생된 면들에 의해서도 공유되고 있다는 점에서 Fig. 6의 경우와 차이가 있다. 이러한 경우에는 인접한 두 복셀들로부터 파생된 면들에 의해서만 공유되는 하나의 모서리와 꼭지점을 위상학적으로 분할하면, 식 (1)의 조건을 만족하는 다양체 모델을 얻게 된다.

이와 같은 위상학적 예외 처리 과정들을 거쳐서 구현한 경계 복셀 모델의 형태는 Fig. 8 에 제시하였다. 외관 상으로는 Fig. 2 의 초기 복셀 모델과 동일하지만, 최외곽 복셀 면들만으로 구성되어 있고, 식 (1)에 제시한 Euler-Poincare 관계식을 만족하는 다양체 모델이라는 점에서 큰 차이가 있다.

2.2 초기 메쉬 모델의 생성

본 연구에서는 경계 복셀 모델을 구성하는 면들이 모두 사각형 형상이라는 점을 고려하여 사각형의 대각선을 따라서 2 개의 삼각형으로 분할하는 삼각형 메쉬화를 모든 사각형 면들에 대해서 수행한 후, 쉬링크 래핑 알고리즘의 투영 (projection) 과정과 평탄화 (smoothing) 과정을 반복 적용함으로써 점군 형상을 개략적으로 묘사하는 초기 메쉬 모델을 생성하였다.

쉬링크 래핑 알고리즘의 투영 과정에서는 삼각형 메쉬의 꼭지점 v_i 를 측정점 p_j 로 접근시키기 위한 투영력 (projection force) f_{v_i} 가 요구되는데, 투영력은 삼각형 메쉬의 꼭지점과 측정점 사이의 벡터로 아래와 같이 정의된다.

$$f_{v_i} = p_j - v_i \quad (2)$$

그리고 모든 삼각형 메쉬의 꼭지점들에 대한 최근접 측정점을 탐색한 후, 그 최근접 측정점에 대



Fig. 8 Bounding voxel model

해서 산정한 투영력과 투영 속도 변수 $\xi \in [0,1]$ 를 이용하면, 측정점들에 보다 근접한 삼각형 메쉬의 꼭지점들로 구성된 형상 모델 M_b 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$M_b = \sum_i (v_i + \xi f_{v_i}) \quad (3)$$

동일한 측정점을 최근접점으로 공유하는 삼각형 메쉬의 꼭지점 수가 2 개 이상인 경우, 투영 속도 변수가 1.0 으로 주어지면 해당 꼭지점들이 동일한 좌표값을 갖게 되기 때문에 왜곡된 형상 모델이 얻어진다. 따라서 이러한 왜곡 현상이 발생하지 않도록 하기 위해서는 투영 속도 변수를 1.0 보다 작게 설정하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 투영 속도 변수로 Kim 과 Li⁽⁷⁾ 가 제시한 $\xi = 0.85$ 의 값을 적용하였다.

쉬링크 래핑 알고리즘의 평탄화 과정에서는 삼각형 메쉬의 꼭지점들이 국부적인 집중 없이 균일하게 분포하도록 만들기 위한 Laplacian 접선 벡터 $L_i(v_i)$ 가 요구되는데, Laplacian 접선 벡터는 Fig. 9 와 같이 꼭지점 v_i 를 공유하는 K_{v_i} 개의 모서리 벡터들의 평균을 의미하는 Laplacian 벡터⁽²⁾ $L(v_i)$ 와 그 꼭지점의 법선 벡터 n 을 이용하면 식 (4)의 형태로 표현할 수 있다.

$$L_i(v_i) = L(v_i) - \{L(v_i) \cdot n\} n \quad (4)$$

여기서의 Laplacian 벡터 $L(v_i)$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$L(v_i) = \frac{1}{K_{v_i}} \sum_{v_k \in N_{nb}(v_i)} (v_k - v_i) \quad (5)$$

이러한 Laplacian 접선 벡터 $L_i(v_i)$ 에 대해서 평탄화 과정의 수렴 속도를 조절하는 평탄화 속도 변수 η 를 적용하면 평탄화된 형상 모델 M_b^* 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_b^* = M_b + \sum_i \eta L_i(v_i) \quad (6)$$

평탄화 속도 변수가 클수록 형상 모델은 균일한

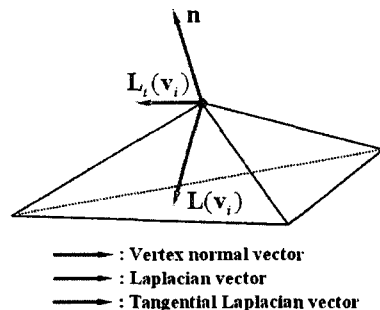


Fig. 9 Normal and Laplacian vectors

형태로 얻어지지만, 형상 변화가 심해서 세밀한 표현이 요구되는 부분을 묘사하기는 어려워진다. 따라서 평탄화 속도 변수를 적절하게 부여하는 것은 형상 모델을 도출하는 과정에서 중요한데, 본 연구에서는 평탄화 속도 변수로 Kim 과 Li⁽⁷⁾가 제시한 $\eta=0.2$ 의 값을 적용하였다.

Fig. 10 은 경계 복셀 모델에 대한 삼각형 메쉬화를 수행한 후, 쉬링크 래핑 알고리즘을 적용해서 얻은 초기 메쉬 모델을 보여주고 있다. 초기 메쉬 모델은 외형적으로 점군 형상과 근사한 모습이지만, 쉬링크 래핑 과정에서 야기되는 동일한 측정점에 여러 개의 삼각형 메쉬의 꼭지점들이 중첩되는 현상 때문에 기하학적으로 부적절한 삼각형 메쉬들이 발생하거나 위상학적으로 다양체 모델을 유지하지 못하게 되는 문제점을 가지고 있다.

2.3 제어 메쉬 모델의 생성

본 연구에서의 제어 메쉬 모델은 점군 형상의 기하학적 및 위상학적 정보를 간략하게 잘 표현하고, 추가적인 삼각형 메쉬의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 주어진 측정점 수와 최대한 일치하게 되는 메쉬 모델을 의미한다. 특히 제어 메쉬 모델은 최종 복원 형상에 큰 영향을 주기 때문에 적절한 제어 메쉬 모델의 생성은 형상 복원 과정에서 매우 중요하다. 이러한 제어 메쉬 모델을 얻기 위해서는 초기 메쉬 모델에서 기하학적 및 위상학적으로 부적절한 메쉬들을 제거하는 메쉬 간략화 과정이 요구된다. 본 연구에서는 QEM 알고리즘을 이용한 꼭지점 기반의 메쉬 간략화 기법을 토대로 초기 메쉬 모델로부터 제어 메쉬 모델을 생성하였다.

QEM 알고리즘을 이용한 꼭지점 기반의 메쉬 간략화 기법에서는 먼저 메쉬 모델의 모든 꼭지점에 대해서 그 꼭지점을 공유하는 삼각형 메쉬의 평면 방정식을 식 (7)의 형태로 구성한다.

$$P = [a \ b \ c \ d]^T \tag{7}$$

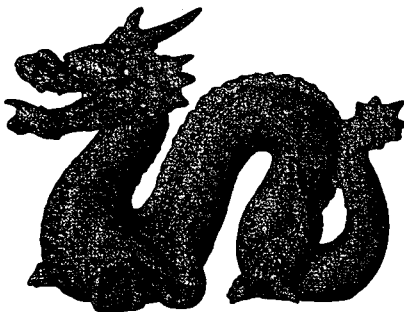


Fig. 10 Initial mesh model

여기서 a, b, c 및 d 는 $ax+by+cz+d=0$ 과 $a^2+b^2+c^2=1$ 의 관계를 만족하는 평면 방정식의 계수들을 의미한다.

그리고 식 (7)과 같이 주어지는 삼각형 메쉬의 평면 방정식에 대한 계수들을 이용하면, 기본 자승 오차(fundamental error quadric) K_p 는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_p = PP^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

모든 모서리의 두 꼭지점 v_1 과 v_2 에 대한 자승 오차 Q_v 는 해당 꼭지점을 공유하는 모든 삼각형 메쉬의 기본 자승 오차들의 합을 의미하기 때문에 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{v_i} = \sum_{P \in Plane(v_i)} K_p \tag{9}$$

특히 모든 모서리의 축약 비용(contraction cost) C_e 를 식 (10)과 같이 계산함으로써 최소 축약 비용을 갖는 축약 대상의 꼭지점 \bar{v} 와 대응되는 모서리를 구한 후, Fig. 11과 같이 그 모서리를 제거하면 메쉬 간략화가 이루어진다.

$$C_e = \bar{v}^T (Q_{v_1} + Q_{v_2}) \bar{v} \tag{10}$$

이러한 메쉬 간략화 과정은 만족할 수준의 제어 메쉬 모델이 얻어질 때까지 반복 수행하게 되는데 Fig. 10의 초기 메쉬 모델로부터 생성한 제어 메쉬 모델은 Fig. 12에서 볼 수 있다.

2.4 매개변수 곡면 모델의 생성

본 연구에서의 매개변수 곡면 모델은 점군 형상을 기하학적으로나 위상학적으로 매우 근사하게 묘사하는 형상 모델을 의미하며, 점군과의 완전 매칭을 위한 전단계 모델로서 필수적으로 요구된다. 특히 제어 메쉬 모델은 측정점 수보다 매우 적은 수의 꼭지점들로 구성되어 있기 때문에 측정점 수와 거의 동일한 수의 꼭지점들로 구성되는 매개변수 곡면 모델을 얻기 위해서는 제어 메쉬 모델에 대해서 삼각형 메쉬의 세분화 과정과 곡면 적합 과정을 수행하는 국부 세분화 곡면 적합 기

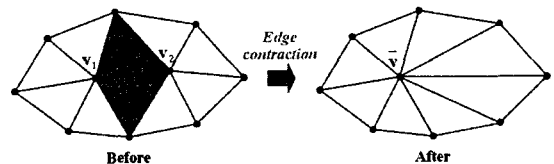


Fig. 11 Edge contraction

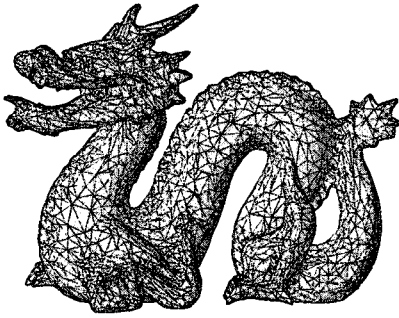


Fig. 12 Control mesh model

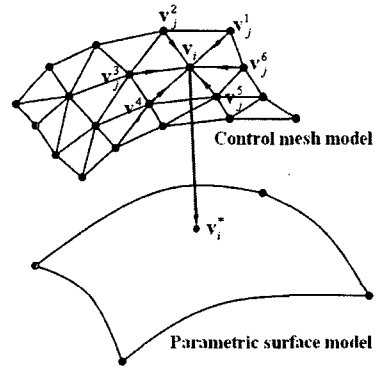


Fig. 13 Surface fitting of vertex v_i

법을 반복적으로 적용할 필요가 있다.

국부 세분화 곡면 적합 기법의 메쉬 세분화 과정은 삼각형 메쉬의 세 모서리 중점들을 새로운 꼭지점들로 생성한 후, 그 꼭지점들을 연결하는 모서리들을 생성함으로써 하나의 삼각형 메쉬를 4개의 삼각형 메쉬들로 분할하는 과정을 의미한다.

또한 곡면 적합 과정은 삼각형 메쉬의 꼭지점들을 각각의 최근접 측정점으로 이동시키는 과정을 의미한다. 이러한 곡면 적합 과정을 수행하기 위해서 필요한 인력 벡터(attraction vector) r_i 는 꼭지점 v_i 와 최근접 측정점 p^* 의 벡터 차, 그리고 꼭지점 v_i 와 모서리를 공유하는 꼭지점 v_j 의 벡터 차에 의해서 식 (11)과 같이 정의된다.

$$r_i = (p^* - v_i) - \chi_i \sum_{j \in I} (v_j - v_i) \quad (11)$$

여기서 K_{v_i} 는 꼭지점 v_i 를 공유하는 모서리 수를 의미하며, β 와 χ_i 는 아래와 같이 주어진다.

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{16} & (K_{v_i} = 3) \\ \frac{1}{K_{v_i}} \left\{ \frac{5}{8} - \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{K_{v_i}} \right)^2 \right\} & (K_{v_i} > 3) \end{cases}$$

$$\chi_i = \left(\frac{3}{8\beta} + K_{v_i} \right)^{-1}$$

특히 꼭지점 v_i 를 식 (12)에서와 같이 인력 벡터 r_i 와 인력 속도 변수 $\lambda \in [0,1]$ 의 곱으로 표현되는 변위 벡터만큼 이동시키면, Fig. 13에 표현한 바와 같이 최근접 측정점 p^* 에 보다 근접한 꼭지점 v_i^* 를 얻게 된다. 이러한 국부 세분화 곡면 적합 기법을 토대로 도출한 매개변수 곡면 모델은 Fig. 14에 제시하였다.

$$v_i^* = v_i + \lambda r_i \quad (12)$$

2.5 완전 매칭 곡면 모델의 생성

본 연구에서의 완전 매칭 곡면 모델은 꼭지점



Fig. 14 Parametric surface model

수가 측정점 수와 같고, 점군 형상을 기하학적으로나 위상학적으로 완전하게 묘사하는 최종 형상 모델을 의미한다.

이러한 완전 매칭 곡면 모델을 얻기 위해서 먼저 매개변수 곡면 모델의 모든 꼭지점들이 최근접 측정점들과 완전하게 일치하도록 식 (3)의 투영 속도 변수 ξ 와 식 (6)의 평탄화 속도 변수 η 를 각각 1.0과 0.0으로 설정한 후, 쉬링크 래핑 알고리즘을 적용한다. 이 과정에서는 매개변수 곡면 모델의 꼭지점 일부가 동일한 측정점을 최근접 측정점으로 공유함으로써 기하학적 및 위상학적으로 부적절한 삼각형 메쉬들이 생성될 수 있다. 이러한 부적절한 삼각형 메쉬들은 2개 이상의 꼭지점들이 동일한 좌표값을 갖고 있기 때문에 쉽게 검출해서 제거할 수 있다.

결과적으로 측정점의 일부가 곡면 모델의 꼭지점과 매칭되지 않은 유리화된 상태로 존재하게 되는데, 본 연구에서는 이러한 유리화된 측정점들을 그 측정점으로부터 수선의 발 길이가 가장 짧은 삼각형 메쉬 내의 새로운 꼭지점으로 삽입시키는 방법을 이용해서 꼭지점 수와 측정점 수의 일치도를 도모하였다. 특히 유리화된 측정점이 삼각형 메쉬 내로 삽입된 후 메쉬 세분화 과정을 통해서 곡면

모델의 꼭지점으로 변환되는 개념과 함께, 최대-최소 모서리 기준 (Max-Min edge criterion)의 모서리 교환 방법을 이용한 메쉬 정규화 과정을 통해서 보다 균일한 삼각형 메쉬로 변환되는 과정은 Fig. 15에서 볼 수 있다. 그리고 Fig. 16은 이와 같이 유리화된 측정점의 삽입, 메쉬 세분화, 메쉬 정규화 등을 수행하는 완전 매칭 기법⁽⁷⁾을 통해서 도출한 초기 완전 매칭 모델을 보여주고 있다.

초기 완전 매칭 곡면 모델은 점군 형상의 기하학적 및 위상학적 정보와 무관하게 메쉬들의 균일성만을 고려해서 구성한 형상 모델이다. 따라서 점군 형상의 기하학적 및 위상학적 정보를 잘 표현하기 위해서는 메쉬 최적화 기법⁽⁷⁾이 요구되는데, 그 개념은 Fig. 17에서 볼 수 있는 완전 매칭 곡면 모델의 실제 모서리와 그에 대응되는 가상 대각 모서리(virtual diagonal transpose edge)에 대해서 식 (10)의 축약 비용을 각각 계산한 후, 축약 비용이 작은 모서리를 실제 모서리로 설정하는 것이다. 특히 이러한 메쉬 최적화 기법에 의해서 최적화된 완전 매칭 곡면 모델의 최종 형상은 Fig. 18에 제시하였다.

3. 적용 사례 및 고찰

본 연구에서는 2.8GHz의 CPU와 512MB의 RAM을 탑재한 Pentium IV 컴퓨터, Visual C++6.0, OpenGL 라이브러리 등을 이용해서 PLY 및 STL 파일 형태로 주어지는 임의의 형상의 비조직화된 점

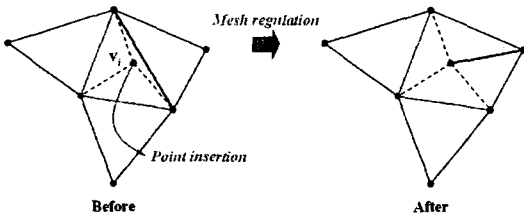


Fig. 15 Point insertion and mesh regulation



Fig. 16 Initial complete matching surface model

군으로부터 3차원 완전 형상 복원을 수행하는 전용 프로그램을 개발하였다. 3차원 완전 형상 복원 프로그램의 화면 구성과 형태는 Fig. 19에 제시하였으며, 점군 형상을 체계적으로 묘사하기 위한 경계 복셀 모델, 초기 메쉬 모델, 제어 메쉬 모델, 매개변수 곡면 모델, 초기 완전 매칭 곡면 모델, 그리고 최종 복원 형상인 최적 완전 매칭 곡면 모델을 생성하는 형상 복원 과정은 Fig. 20에 나타내었다.

Fig. 18의 용 모델은 99,475개의 측정점들을 이용해서 형상 복원한 것이며, 형상 복원 과정에서 생성되는 형상 모델들의 꼭지점 수와 계산 시간은 Table 1에서 볼 수 있다. 꼭지점 수는 경계 복셀 모델과 초기 메쉬 모델 27,920개, 제어 메쉬 모델 6,219개, 매개변수 곡면 모델 24,876개, 초기 및

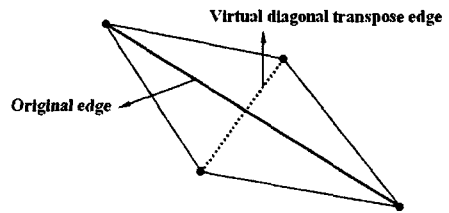


Fig. 17 Original and virtual diagonal transpose edges

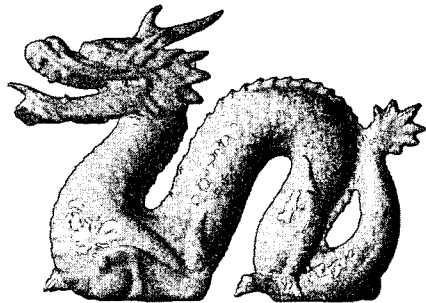


Fig. 18 Optimized complete matching surface model

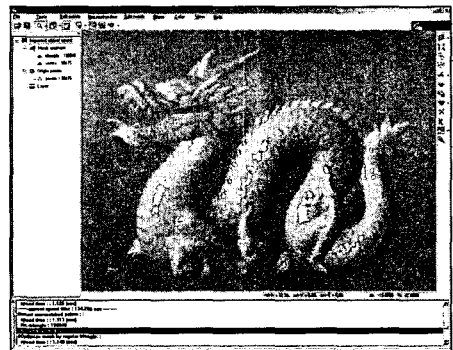


Fig. 19 3D surface reconstruction program

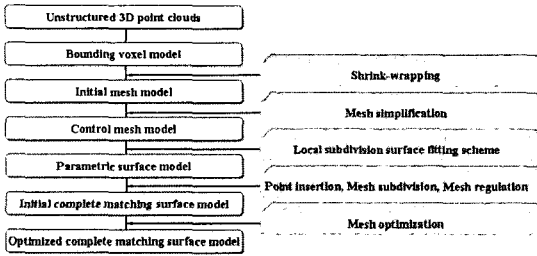


Fig. 20 3D surface reconstruction process

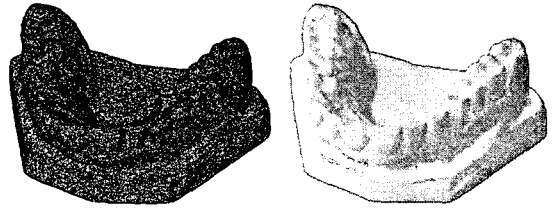


Fig. 21 3D surface reconstruction of mouth model

Table 1 3D surface reconstruction of dragon model

Model	No. of vertices	Process time
Bounding voxel model	27,920	3.625 sec
Initial mesh model	27,920	1.094 sec
Control mesh model	6,219	43.187 sec
Parametric surface model	24,876	1.906 sec
Initial complete matching surface model	99,475	15.890 sec
Optimized complete matching surface model	99,475	7.501 sec
Total	-	73.203 sec

최적 완전 매칭 곡면 모델 99,475 개 등으로 나타났다. 그리고 형상 모델 생성 과정에 대한 소요 시간은 경계 복셀 모델 3.625 sec, 초기 메쉬 모델 1.094 sec, 제어 메쉬 모델 43.187 sec, 매개변수 곡면 모델 1.906 sec, 초기 완전 매칭 곡면 모델 15.890 sec, 최적 완전 매칭 곡면 모델 7.501 sec 로 형상 복원에 모두 73.203 sec 가 소요되었다.

또한 Fig. 21 은 58,303 개의 측정점들로 이루어진 구강 모델에 대한 형상 복원 결과를 보여주고 있으며, 형상 복원 과정에서의 꼭지점 수와 계산 시간 변화는 Table 2 에 제시하였다. 꼭지점 수는 경계 복셀 모델과 초기 메쉬 모델 9,748 개, 제어 메쉬 모델 912 개, 매개변수 곡면 모델 58,242 개, 초기 및 최적 완전 매칭 곡면 모델 58,303 개 등으로 나타났다. 그리고 형상 모델 생성 과정에 대한 소요 시간은 경계 복셀 모델 0.531 sec, 초기 메쉬 모델 0.437 sec, 제어 메쉬 모델 7.765 sec, 매개변수 곡면 모델 3.057 sec, 초기 완전 매칭 곡면 모델 10.907 sec, 최적 완전 매칭 곡면 모델 5.830 sec 로 형상 복원에 모두 28.527 sec 가 소요되었다.

이러한 두 가지의 적용 사례를 통해서 본 연구에서 제안한 경계 복셀 모델 기반의 3 차원 완전 형상 복원 방법은 많은 측정점들로 이루어진 점군에 대해서도 형상 복원 시간이 매우 짧다는 것을 알 수 있었다. 특히 용 모델과 같이 기하학적 및 위상학적으로 복잡한 대상물을 측정해서 얻은 비

Table 2 3D surface reconstruction of mouth model

Model	No. of vertices	Process time
Bounding voxel model	9,748	0.531 sec
Initial mesh model	9,748	0.437 sec
Control mesh model	912	7.765 sec
Parametric surface model	58,242	3.057 sec
Initial complete matching surface model	58,303	10.907 sec
Optimized complete matching surface model	58,303	5.830 sec
Total	-	28.527 sec

조직화된 점군의 경우에도 형상 복원 오차가 없는 상태로, 즉 최종 복원 형상의 꼭지점 수가 측정점 수와 같고, 꼭지점들이 측정점들과 공간 기하학적으로 일치하면서 형상 왜곡이 없는 상태로 3 차원 형상을 완전하게 복원할 수 있다는 사실을 확인하였다. 그리고 점군 형상에 따라서 다소 차이는 있지만, 제어 메쉬 모델과 초기 완전 매칭 곡면 모델을 생성하는 데 상대적으로 많은 시간이 소요되고 있는 것으로 나타났다. 제어 메쉬 모델의 경우에는 메쉬 간략화를 위한 축약 비용의 산정과 축약 모서리의 탐색, 그리고 초기 완전 매칭 곡면 모델의 경우에는 완전 매칭 기법에서 요구하는 유리화된 측정점의 삽입, 메쉬 세분화 및 메쉬 정규화에 대한 처리 시간이 상대적으로 길다는 데 그 원인이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 많은 측정점들로 이루어진 점군에 대해서도 형상 복원 시간이 짧고, 특히 구멍이나 가늘고 긴 틈새 등이 존재하는 기하학적 및 위상학적으로 형상이 복잡한 대상물을 측정해서 얻은 비조직화된 점군으로부터도 형상 복원 오차 없이 3 차원 형상을 완전하게 복원할 수 있는 경계 복셀 모델 기반의 3 차원 완전 형상 복원 방법을 제안하였고, 그 유용성은 적용 사례를 통해서 입증하였다. 그리고 그 결과들을 정리하면 다음과

같다.

(1) 임의 형상의 비조직화된 점군으로부터 3 차원 완전 형상을 복원하기 위하여 점군에 대한 복셀 모델의 최외곽 면으로 구성되면서 다양체 모델에 대한 Euler-Poincare 관계식을 만족하는 경계 복셀 모델의 개념을 제안하였다.

(2) 점군 형상에 대한 초기 메쉬 모델은 경계 복셀 모델의 삼각형 메쉬화를 수행한 후, 쉬링크 래핑 알고리즘을 반복 적용함으로써 생성하였다. 이러한 초기 메쉬 모델은 외형적으로 점군 형상과 유사하지만, 동일한 측정점에 여러 꼭지점들이 중첩되기 때문에 기하학적으로 부적절한 삼각형 메쉬들이 발생하거나 위상학적으로 다양체 모델을 유지하지 못하는 문제가 있다

(3) 점군 형상의 기하학적 및 위상학적 정보를 간략하게 잘 표현하고, 추가적인 삼각형 메쉬의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 측정점 수와 최대한 일치해야 하는 제어 메쉬 모델은 꼭지점 기반의 메쉬 간략화 기법을 토대로 초기 메쉬 모델에서 기하학적 및 위상학적으로 부적절한 메쉬들을 제거함으로써 생성하였다.

(4) 점군 형상을 기하학적 및 위상학적으로 근사하게 묘사하면서 측정점 수와 거의 동일한 수의 꼭지점들로 구성되는 매개변수 곡면 모델은 제어 메쉬 모델에 대해서 삼각형 메쉬의 세분화 과정과 곡면 적합 과정을 수행하는 국부 세분화 곡면 적합 기법을 반복 적용해서 생성하였다.

(5) 측정점 수와 동일한 꼭지점 수를 가지면서 메쉬 균일화에 초점이 맞추어진 초기 완전 매칭 곡면 모델은 먼저 꼭지점과 매칭되지 않은 유리화된 측정점들을 그 측정점으로부터 수선의 발 길이가 가장 짧은 삼각형 메쉬 내의 새로운 꼭지점으로 삽입시킨 후, 메쉬 세분화 과정과 메쉬 정규화 과정을 수행하는 완전 매칭 기법을 이용해서 생성하였다.

(6) 점군 형상의 기하학적 및 위상학적 정보를 완벽하게 잘 표현하는 최적 완전 매칭 곡면 모델은 실제 모서리와 그에 대응되는 가상 대각 모서리에 대해서 축약 비용을 각각 계산한 후, 축약 비용이 작은 모서리를 실제 모서리로 설정하는 메쉬 최적화 기법에 의해서 생성하였다.

(7) 본 연구의 형상 복원 방법은 제어 메쉬 모델과 초기 완전 매칭 곡면 모델을 생성하는 데 상대적으로 많은 시간이 소요되고 있다. 특히 제어 메쉬 모델을 생성하기 위한 메쉬 간략화 과정과 초기 완전 매칭 곡면 모델을 생성하기 위한 완전 매칭 기법에 대한 처리 시간이 상대적으로 길다는

데 그 원인이 있다.

후 기

본 연구는 한국항공대학교의 2005년도 교비 연구과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Gopi, M., Krisnan, S. and Silva, C., 2000, "Surface Reconstruction Based on Lower Dimensional Localized Delaunay Triangulation," *Computer Graphics Forum*, Vol. 19, No. 3, pp. 467-478.
- (2) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W., 1992, "Surface Reconstruction from Unorganized Points," *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 71-78.
- (3) Bernardini, F., Mittelman, J., Rushmeier, H., Silva, C. and Taubin, G., 1999, "The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction," *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 4, pp. 349-359.
- (4) Boissonant, J. D., 1984. "Geometric Structures for Three-Dimensional Shape Reconstruction," *ACM Transactions on Graphics*, Vol.3, No. 4, pp. 266-289.
- (5) Lee, A., Moreton, H., and Hoppe, H., 2000, "Displaced Subdivision Surfaces," *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 85-94.
- (6) Jeong, W. K. and Kim, C. H., 2002, "Direct Reconstruction of Displaced Subdivision Surface from Unorganized Points," *Graphical Models*, Vol. 64, No. 2, pp. 78-93.
- (7) Kim, S. I. and Li, R. X., 2005, "Complete 3D Surface Reconstruction from Unstructured Point Cloud," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 29, No. 4, pp. 570-577.
- (8) Cho, J. H. Song, Samuel M. H., 2003, "Three-Dimensional Shape Reconstruction from Images by Shape-from-Silhouette Technique and Iterative Triangulation," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1665-1673.
- (9) Mülayim, A. Y., Ulaş, Y., and Atalay, V., 2003, "Silhouette-based 3D Model Reconstruction from Multiple Images," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, Vol. 33, No. 4, pp. 582-591.
- (10) Suzuki, H., Takeuchi, S. and Kanai, T., 1999,

- “Subdivision Surface Fitting to a Range of Points,”
Proceedings of SIGGRAPH, pp. 158~167.
- (11) Leif, P. K., Jens, V., Ulf, L., and Seidel, H. P., 1999,
“A Shrink Wrapping Approach to Remeshing
Polygonal Surface,” *Computer Graphics Forum*, Vol.
18, No. 3, pp. 119~130.
- (12) Michael, G., and Paul, S. H., 1997, “Surface
Simplification Using Quadric Error Metrics,”
Proceedings of SIGGRAPH, pp. 209~216.
- (13) Taubin, G., 1995, “A Signal Processing Approach to
Fair Surface Design,” *Proceedings of SIGGRAPH*, pp.
351~358.