

< 논문 >

조직화되지 않은 점군으로부터의 3 차원 완전 형상 복원

김 석 일[†] · 이 일 섭^{*}

(2004 년 9 월 30 일 접수, 2005 년 3 월 2 일 심사완료)

Complete 3D Surface Reconstruction from Unstructured Point Cloud

Seokil Kim and Rixie Li

Key Words : Surface Reconstruction(형상 복원), Point Cloud(점군), Complete Matching(완전 매칭), Reverse Engineering(역설계), Shrink-Wrapping(슈링크 래핑)

Abstract

In this study, a complete 3D surface reconstruction method is proposed based on the concept that the vertices of surface model can be completely matched to the unstructured point cloud. In order to generate the initial mesh model from the point cloud, the mesh subdivision of bounding box and shrink-wrapping algorithm are introduced. The control mesh model for well representing the topology of point cloud is derived from the initial mesh model by using the mesh simplification technique based on the original QEM algorithm, and the parametric surface model for approximately representing the geometry of point cloud is derived by applying the local subdivision surface fitting scheme on the control mesh model. And, to reconstruct the complete matching surface model, the insertion of isolated points on the parametric surface model and the mesh optimization are carried out. Especially, the fast 3D surface reconstruction is realized by introducing the voxel-based nearest-point search algorithm, and the simulation results reveal the availability of the proposed surface reconstruction method.

1. 서 론

일반적으로 역설계는 실물로부터 공학적 모델을 생성하는 것을 의미한다. 특히 형상 역설계는 제품의 실물로부터 CAD/CAM 시스템에서 활용 가능한 형상 모델을 생성하는 것을 의미하며, 방법론적으로 점군을 이용한 역설계 기법,⁽¹⁻⁶⁾ 다중 이미지를 이용한 역설계 기법^(7,8) 등이 연구되고 있다. 이러한 형상 역설계의 주요 응용 사례로는 설계 도면이 존재하지 않는 제품의 단순 복제, 기존 제품의 해석 및 수정을 통한 신제품의 개발, 그리고 제품의 개발 초기 단계에서 스타일 디자이너가 제작한 모형(mock-up)이나 모형으로부터의 CAD 모델 생성 등을 들 수 있다.

실물로부터 CAD 모델을 생성하는 형상 역설계

의 과정은 기본적으로 실물 측정, 형상 복원, CAD 모델 생성 등으로 나누어진다. 최근 눈부시게 발전한 광학, 영상 처리 기술 등에 의해서 다양한 방식의 고효율 3 차원 측정 장비들이 개발되었고, 그 결과로서 측정 시간의 단축과 함께 측정 정보량이 두드러지게 증가하고 있다. 따라서 수많은 측정점들의 집합인 점군으로부터 보다 정밀하고 신뢰성이 높게 3 차원 형상을 복원하거나 CAD 모델을 생성할 수 있는 방법들이 다각적으로 검토되고 있다.

점군을 이용한 3 차원 형상 복원과 관련하여 Delaunay 삼각화 기법에 기반을 둔 연구들이 그동안 많이 수행되었다. Gopi 등⁽¹⁾은 한 점을 지나가는 법선 평면에 대해서 그 근처의 점들을 투영하여 국부적인 2 차원 Delaunay 삼각화 관계를 얻은 후, 그 결과를 3 차원 공간으로 변환시키는 방법을 제안하였다. Hoppe 등⁽²⁾은 근접점들로 이루어진 K-NN(K-Nearest Neighborhood)을 이용하여 모든 점들의 접선 평면을 구하고, 그 접선 평면에 대한 근접점들의 거리와 방향, Marching Cube 등을 토대로 형상 복원을 시도하였다. Bernardini 등⁽³⁾은 점군에

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

^{*} 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부

접한 상태로 이동하는 볼의 운동 궤적을 이용한 형상 복원을 수행하였다. 그리고 Boissonnat⁽⁴⁾은 임의로 주어진 초기 삼각형의 모서리들을 이용하여 접선 평면을 얻고, 그 모서리들의 두 꼭지점에 대응하는 K-NN 들을 그 접선 평면에 투영한 후, 투영점들과 두 꼭지점 사이의 각도가 최대인 투영점을 두 꼭지점과 함께 새로운 3각형 메시의 꼭지점으로 설정하는 형상 복원 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 기본적으로 Delaunay 삼각화 기법을 이용하기 때문에 점군의 수가 많아질수록 형상 복원에 소요되는 시간이 급격히 늘어나고, 형상 오차도 발생한다는 문제가 있다.

또한 Lee 등⁽⁵⁾은 이미 주어진 초기 메시 모델의 간략화(simplification) 과정을 통해서 제어 메시 모델(control mesh model)을 얻은 후, 제어 메시 모델에 대한 세분화(subdivision), 치환(displacement) 및 재추출(resampling) 과정을 반복 수행하여 형상을 복원하는 방법을 제안하였다. Jeong 과 Kim⁽⁶⁾은 점군을 모두 둘러싼 기본 입체의 표면에 정규화된 메시를 생성하고, 그 메시의 꼭지점들을 근접점으로 이루어진 평면에 수직 투영시키는 방법을 통해서 점군으로부터 최종 형상을 직접 복원하는 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 형상 복원 방법들은 모두 점군을 근사적으로 묘사하는 형상을 도출하기 때문에 측정점들을 획득하는 과정에서 측정 오차가 없더라도 원리적으로 복원된 형상은 점군과의 오차를 가지게 되며, 특히 형상 변화가 심한 경우나 정밀한 형상 복원이 요구되는 경우에는 적용하기 어렵다는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 형상 복원 시간이 짧고, 조직화되지 않은 점군에 대한 근사적인 형상 복원이 아니라 주어진 모든 점군을 꼭지점으로 하는 3차원 완전 형상 복원 방법을 제안하였다. 먼저 점군을 둘러싸는 직육면체 형태의 경계 상자(bounding box)에 대한 삼각형 메시의 세분화 과정과 슈링크 래핑(shrink-wrapping)⁽⁹⁾ 과정을 반복 수행함으로써 점군 형상을 개략적으로 묘사한 초기 메시 모델을 생성하였고, QEM 알고리즘⁽¹⁰⁾을 이용한 꼭지점 기반의 메시 간략화 기법을 토대로 초기 메시 모델로부터 제어 메시 모델을 얻었다. 제어 메시 모델은 점군 형상의 위상(topology) 정보를 잘 반영하고 있으며, 추가적인 삼각형 메시의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 주어진 점군의 수와 최대한 일치하도록 구성된 삼각형 메시 모델을 의미한다. 그리고 이러한 제어 메시 모델에 국부 세분화 곡면 적합 기법(local subdivision surface fitting scheme)⁽¹¹⁾을 적용하여 점군 형상을 매우 근사적으로 묘사하는 매개변수 곡

면 모델(parametric surface model)⁽¹²⁾을 도출하였고, 최종적으로 매개변수 곡면 모델의 꼭지점들이 주어진 점군과 완전하게 일치하면서 제곱 형상을 정밀하게 묘사하도록 완전 매칭(complete matching) 기법과 메시 최적화(mesh optimization) 기법을 적용함으로써 점군과의 오차가 존재하지 않으면서 형상 왜곡도 없는 3차원 형상을 복원하였다. 또한 점군의 수가 많아질수록 근접점들의 탐색 시간이 급격히 증가하게 되는 문제를 해결하기 위해서 국부적인 미소 공간 영역만을 탐색하기 때문에 탐색 시간이 매우 짧은 복셀(voxel) 기반의 최근접점 탐색 방법을 제안하여 3차원 형상의 복원 시간을 대폭 단축시켰다. 특히 본 연구에서 제안한 3차원 완전 형상 복원 방법의 유용성은 골프 헤드 및 말머리에 대한 형상 복원 결과를 통해서 입증하였다.

2. 3차원 완전 형상 복원 방법

2.1 복셀 기반의 최근접점 탐색

3차원 형상 복원 과정에서는 필연적으로 수많은 측정점과 형상 모델의 꼭지점 및 삼각형 메시에 대한 정보와 관계를 이용하게 된다. 특히 점군의 수가 많아질수록 가장 가까운 점이나 메시를 파악하는 과정에서 소요되는 최근접점 탐색 시간이 급격히 증가하기 때문에 최근접점 탐색 방법의 효율성은 형상 복원 시간의 단축을 위해서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 국부적인 미소 공간 영역만을 탐색하는 관계로 최근접점 탐색 시간이 매우 짧은 복셀 기반의 최근접점 탐색 방법을 다음과 같이 제안하였다.

먼저 3차원 공간에 분포되어 있는 점군을 둘러싸는 직육면체 형태의 경계 상자를 구하고, 그 경계 상자를 크기가 일정한 직육면체 형태의 복셀들로 분할한 후 측정점들과 형상 모델의 꼭지점들을 그 점들이 속하는 복셀에 모두 등록시킨다. 측정점 좌표가 (p_x, p_y, p_z) , 형상 모델의 꼭지점 좌표가 (v_x, v_y, v_z) , 경계 상자의 기준 꼭지점 좌표가 $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$, 복셀의 크기가 δ 인 경우, Fig. 1에서와 같이 측정점과 형상 모델의 꼭지점이 속할 복셀의 지수(index) 정보는 아래와 같이 주어진다.

$$i = \frac{p_x - x_{min}}{\delta}, j = \frac{p_y - y_{min}}{\delta}, k = \frac{p_z - z_{min}}{\delta} \quad (1)$$

$$i = \frac{v_x - x_{min}}{\delta}, j = \frac{v_y - y_{min}}{\delta}, k = \frac{v_z - z_{min}}{\delta} \quad (2)$$

Fig. 2는 형상 모델의 꼭지점으로부터 가장 가까운 측정점을 탐색하는 예를 보여주고 있는데, 기본적으로 주어진 꼭지점이 속하는 복셀(1차 탐

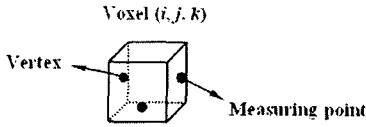


Fig. 1 Voxel with measuring points and/or vertices

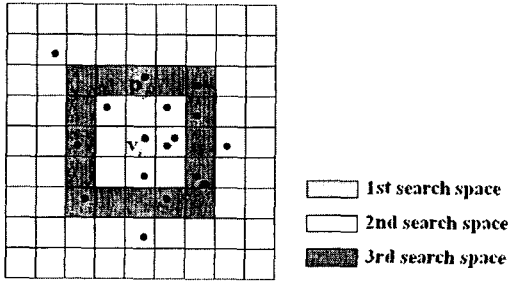


Fig. 2 Search of nearest point

색 공간) 내의 모든 측정점들에 대해서 거리를 구하고, 그 복셀의 외곽을 한 겹 둘러싼 복셀들(2 차 탐색 공간) 내의 모든 측정점들에 대해서 거리를 구한 후, 가장 짧은 거리를 갖는 측정점을 최근접점으로 결정한다. 1 차와 2 차 탐색 공간 내에 측정점이 존재하지 않아서 최근접점이 얻어지지 않는 경우에는 3 차 탐색 공간, 4 차 탐색 공간 등으로 탐색 공간을 확장시켜서 최근접점을 탐색한다. 따라서 이러한 복셀 기반의 최근접점 탐색 방법은 국부적이고 제한적인 공간 영역만을 탐색하기 때문에 최근접점의 탐색 시간이 매우 짧다는 장점이 있다.

2.2 초기 메시 모델의 생성

본 연구에서는 3 차원 공간에 분포되어 있는 조직화되지 않은 점군으로부터 형상을 복원하기 위해서 점군을 둘러싸는 직육면체 형상의 경계 상자를 구하고, 그 표면을 삼각형 메시로 구성한 후에 삼각형 메시의 세분화 과정과 슈링크 래핑 과정을 반복 적용함으로써 점군 형상을 개략적으로 묘사하는 초기 메시 모델을 생성하였다.

Fig. 3(a)와 같이 점군의 좌표값들을 이용해서 초기 경계 상자를 구한다. 초기 경계 상자는 하나의 면에 대한 삼각형 메시의 수가 2 개이므로 모두 12 개의 삼각형 메시로 구성되고, 직육면체 형상인 관계로 꼭지점 수는 8 개이다.

보다 상세한 초기 메시 모델을 생성하기 위해서는 경계 상자의 표면에 존재하는 삼각형 메시들의 꼭지점 수가 점군의 수보다는 작지만 가장 근접하게 되도록 초기 경계 상자의 삼각형 메시들에 대한 세분화 과정이 요구된다. Fig. 3(b)와 같은 삼각형 메시의 세분화 과정은 기본적으로 세 모서리의

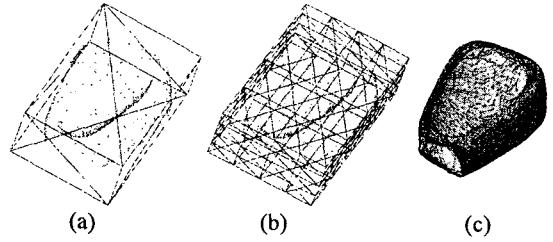


Fig. 3 Generation of initial mesh model by subdivision and shrink-wrapping. (a) initial bounding box, (b) subdivided bounding box, (c) initial mesh model

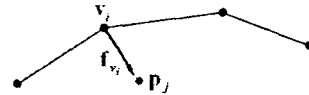


Fig. 4 Projection force

중점을 새로운 꼭지점으로 설정하는 방법을 사용하기 때문에 세분화 과정을 수행할 때마다 삼각형 메시 수는 4 배씩 증가하게 된다. 따라서 삼각형 메시 수와 꼭지점 수의 관계를 나타내는 식 (3)을 이용하면 점군의 수로부터 초기 경계 상자의 삼각형 메시들에 대해서 요구되는 세분화 과정의 최대 수행 횟수를 결정할 수 있다.

$$N_{triangle} = 2N_{vertex} - 4 \tag{3}$$

여기서 \$N_{triangle}\$ 은 삼각형 메시 수, \$N_{vertex}\$ 는 꼭지점 수를 의미한다.

그리고 Fig. 3(b)와 같이 세분화된 경계 상자를 이용해서 Fig. 3(c)와 같은 초기 메시 모델을 생성하기 위해서는 슈링크 래핑 알고리즘의 투영 (projection) 과정과 평탄화(smoothing) 과정이 요구된다.

투영 과정에서는 삼각형 메시의 꼭지점에 대해서 Fig. 4 와 같이 표현되는 투영력(projection force)을 부여하게 되는데, 투영력은 식 (4)와 같이 삼각형 메시의 꼭지점과 측정점 사이의 벡터로서 정의된다.

$$f_{v_i} = p_j - v_i \tag{4}$$

모든 삼각형 메시의 꼭지점에 대한 최근접 측정점을 탐색한 후, 그 측정점에 대해서 산정한 투영력과 투영 속도 변수 \$\xi \in [0,1]\$ 를 이용하면, 식 (5)와 같이 측정점에 보다 근접하도록 위치가 변경된 삼각형 메시의 꼭지점들로 구성된 형상 모델 \$M_b\$ 를 얻게 된다.

$$M_b = \sum_i (v_i + \xi f_{v_i}) \tag{5}$$

세분화된 경계 상자에서 2 개 이상의 꼭지점들

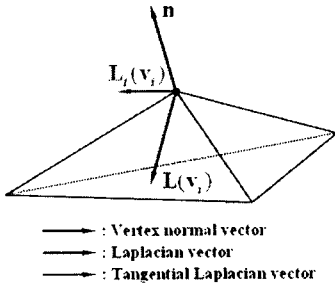


Fig. 5 Normal and Laplacian vectors

이 동일한 측정점을 최근접점으로 공유하는 경우, 투영 속도 변수 ξ 가 1.0으로 주어지면 해당 꼭지점들이 동일한 좌표값을 갖게 되기 때문에 왜곡된 형상 모델이 얻어진다. 따라서 초기 메시 모델을 생성하는 과정에서 이러한 왜곡 현상이 발생하지 않도록 하기 위해서는 투영 속도 변수 ξ 를 1.0보다 작게 설정하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 투영 속도 변수 ξ 가 0.85일 때 형상과 관계없이 가장 만족스러운 투영 결과가 얻어진다는 사실을 경험적으로 확인하였다.

슈링크 래핑 알고리즘에서의 평탄화 과정은 삼각형 메시들이 한 곳에 집중되지 않고 균일하게 분포되도록 만드는 일종의 완화(relaxation) 과정이다. 식 (6)과 같이 하나의 꼭지점을 공유하는 모서리 벡터들의 평균을 의미하는 Laplacian 벡터⁽²⁾ \mathbf{L} 과 그 꼭지점의 법선 벡터 \mathbf{n} 을 이용하면, 식 (7)과 같은 형태로 꼭지점에서의 접선 벡터 $\mathbf{L}_t(\mathbf{v}_i)$ 를 산정할 수 있다.

$$\mathbf{L}(\mathbf{v}_i) = \frac{1}{K_{\mathbf{v}_i}} \sum_{\mathbf{v}_k \in N_{nb}(\mathbf{v}_i)} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_i) \quad (6)$$

$$\mathbf{L}_t(\mathbf{v}_i) = \mathbf{L}(\mathbf{v}_i) - \{\mathbf{L}(\mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{n}\} \mathbf{n} \quad (7)$$

그리고 평탄화 과정의 수렴 속도를 조절하는 평탄화 속도 변수 η 와 꼭지점에서의 접선 벡터 $\mathbf{L}_t(\mathbf{v}_i)$ 를 토대로 평탄화된 형상 모델을 아래와 같이 얻게 된다.

$$\mathbf{M}'_b = \mathbf{M}_b + \sum_i \eta \mathbf{L}_t(\mathbf{v}_i) \quad (8)$$

평탄화 속도 변수 η 가 클수록 형상 모델은 균일하게 얻어지지만, 형상 변화가 심해서 보다 세밀한 형상 표현이 요구되는 영역을 묘사하기는 어려워지게 된다. 따라서 평탄화 속도 변수 η 를 적절하게 부여하는 것은 형상 모델을 도출하는 과정에서 중요한데, 본 연구에서는 평탄화 속도 변수 η 에 대해서 경험적으로 결정한 0.2를 사용하였다.

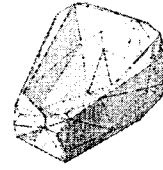


Fig. 6 Control mesh model

2.3 제어 메시 모델의 생성

초기 메시 모델은 점군 형상을 개략적으로 묘사하고 있지만, 점군 형상의 위상 정보를 체계적으로 표현하지는 못하고 있다. 따라서 점군 형상의 위상 정보를 잘 반영하고, 추가적인 삼각형 메시의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 주어진 점군의 수와 최대한 일치하는 제어 메시 모델을 초기 메시 모델로부터 얻기 위해서는 메시 간략화 과정이 요구된다. 특히 제어 메시 모델은 최종적으로 복원되는 형상에 큰 영향을 주기 때문에 제어 메시 모델의 생성은 형상 복원 과정에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 QEM 알고리즘을 이용한 꼭지점 기반의 메시 간략화 기법을 이용하여 Fig. 3(c)와 같은 초기 메시 모델로부터 Fig. 6과 같은 최적의 제어 메시 모델을 생성하였다.

QEM 알고리즘을 이용한 꼭지점 기반의 메시 간략화 기법은 다음과 같이 꼭지점 쌍 축약(vertex pair contractions) 과정과 자승 오차(error quadric) 계산 과정으로 나누어진다.

① 형상 모델의 모든 꼭지점에 대해서 그 꼭지점을 공유하는 삼각형 메시의 평면 방정식을 식 (9)의 형태로 구성한다.

$$\mathbf{P} = [a \ b \ c \ d]^T \quad (9)$$

여기서 $ax + by + cz + d = 0$, $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 이다.

② 삼각형 메시의 평면 방정식 \mathbf{P} 를 이용해서 기본 자승 오차(fundamental error quadric) \mathbf{K}_p 를 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{P}\mathbf{P}^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

③ 기본 자승 오차 \mathbf{K}_p 를 토대로 모든 모서리의 두 꼭지점 \mathbf{v}_1 과 \mathbf{v}_2 에 대해서 자승 오차 \mathbf{Q}_v 를 식 (11)과 같이 계산한다.

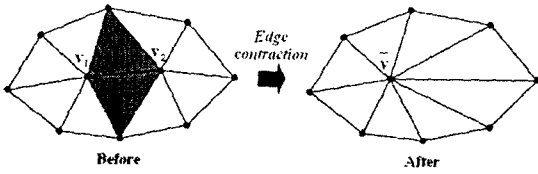


Fig. 7 Edge contraction

$$Q_{v_i} = \sum_{P \in Plane(v_i)} K_P \quad (11)$$

④ 식 (12)와 같이 표현되는 축약 비용(contraction cost) C_e 를 모든 모서리에 대해서 계산한 후, 최소 축약 비용을 갖는 축약 대상(contraction target)의 꼭지점 \bar{v} 와 대응되는 모서리를 구하고, 그 모서리를 Fig. 7과 같이 삭제한다.

$$C_e = \bar{v}^T (Q_{v_i} + Q_{v_j}) \bar{v} \quad (12)$$

⑤ 만족할 수준의 제어 메시 모델이 얻어질 때까지 ①부터 ④까지의 과정을 반복 수행한다.

2.4 매개변수 곡면 모델의 생성

점군 형상을 근사적으로 묘사하는 형상 모델인 매개변수 곡면 모델은 점군과의 완전 매칭을 위해서 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 제어 메시 모델에 대해서 반복적인 국부 세분화 곡면 적합 기법을 적용하여 매개변수 곡면 모델을 얻었다.

국부 세분화 곡면 적합 기법에서는 K_{v_i} 개의 모서리가 공유하고 있는 꼭지점 v_i 를 최근접 측정점 p^* 로 이동시키기 위한 인력(attraction) r_i 가 최근접 측정점 p^* 와 꼭지점 v_i 의 벡터 차, 그리고 꼭지점 v_i 와 모서리를 공유하는 꼭지점 v_j 의 벡터 차에 의해서 식 (13)과 같이 정의된다.

$$r_i = (p^* - v_i) - \chi_i \sum_{j \in I} (v_j - v_i) \quad (13)$$

여기서 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 식 (14)와 같이 인력 r_i 에 인력 속도 변수 $\lambda \in [0,1]$ 를 곱한 변이만큼 꼭지점 v_i 를 벡터 이동시키면, Fig. 8에서와 같이 최근접 측정점 p^* 에 보다 근접한 꼭지점 v_i^* 을 얻게 된다. 모든 꼭지

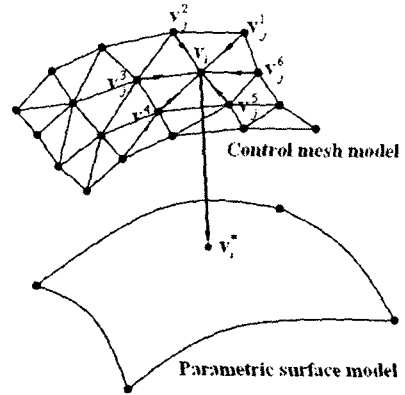


Fig. 8 Surface fitting of vertex v_i



Fig. 9 Parametric surface model

점들에 대해서 이 과정을 적용하면, Fig. 9와 같이 기본적으로 점군 형상과 근사화된 매개변수 곡면 모델을 구현할 수 있다.

$$v_i^* = v_i + \lambda r_i \quad (14)$$

2.5 완전 매칭 곡면 모델의 생성

본 연구에서는 점군 형상과 근사화된 매개변수 곡면 모델의 꼭지점들이 주어진 점군과 완전하게 일치되도록 슈링크 래핑 알고리즘에 기반을 둔 완전 매칭 기법을 다음과 같이 제안하였다.

먼저 매개변수 곡면 모델의 모든 꼭지점들이 최근접 측정점들과 완전하게 일치하도록 식 (5)의 투영 속도 변수 ξ 와 식 (8)의 평탄화 속도 변수 η 를 각각 1.0 과 0.0 으로 설정한 후, 매개변수 곡면 모델에 대해서 슈링크 래핑 알고리즘을 적용한다. 이때 매개변수 곡면 모델의 꼭지점 중의 일부가 동일한 측정점을 최근접 측정점으로 공유하게 되어 기하학적으로 불완전한 삼각형 메시들이 생성되는데, 이러한 불완전한 삼각형 메시들은 꼭지점 3개 중에서 2개 이상이 동일한 좌표값을 갖기 때문에 검색해서 삭제해야 한다.

결과적으로 측정점의 일부는 매개변수 곡면 모델의 꼭지점과 매칭되지 않은 유리화된 상태로 존재하게 되는데, 기본적으로 이와 같이 유리화된 측정점이 삽입될 메시는 그 측정점으로부터 수선의 발 길이가 가장 짧은 삼각형 메시를 탐색함으로써 결정할 수 있다. Fig. 10은 유리화된 측정점

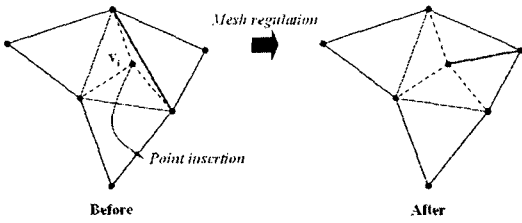


Fig. 10 Point insertion and mesh regulation



Fig. 11 Initial complete matching surface model

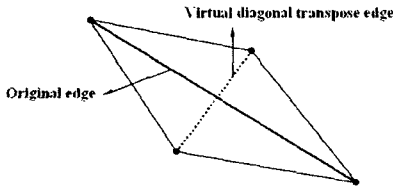


Fig. 12 Original and virtual diagonal transpose edges

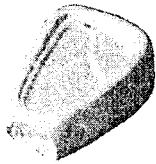


Fig. 13 Optimized complete matching surface model

이 삼각형 메시 내로 삽입된 후 메시 세분화 과정을 통해서 매개변수 곡면 모델의 꼭지점으로 변환되는 개념과 함께, 최대-최소 모서리 기준(Max-Min edge criterion)의 모서리 교환(edge swapping) 방법을 이용한 메시 정규화(regulation) 과정을 통해서 보다 균일한 삼각형 메시로 변환되는 과정을 보여주고 있다.

이러한 유리화된 측정점들의 삽입 과정, 메시 세분화 과정 및 메시 정규화 과정은 유리화된 측정점들이 존재하지 않을 때까지 반복적으로 수행하게 되는데, Fig. 11 은 이 과정들을 3 회 반복 수행함으로써 생성한 매개변수 곡면 모델인 완전 매칭 곡면 모델을 보여주고 있다.

이상의 과정들을 통해서 도출한 완전 매칭 곡면 모델은 점군의 위상 정보를 최대한 반영한 메시들로 구성된 것이 아니라 단지 균일한 메시들로 구성된 것이다. 따라서 점군의 위상 정보를 잘 반영

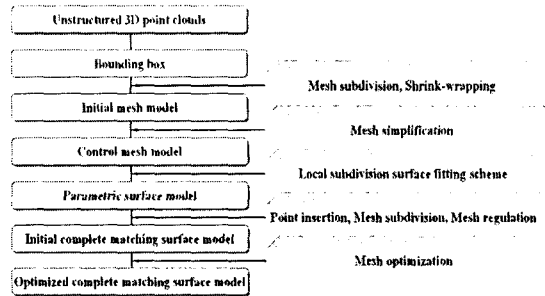


Fig. 14 3D surface reconstruction process

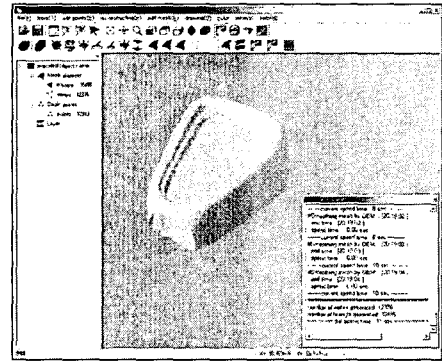


Fig. 15 3D surface reconstruction program

하기 위해서는 별도의 메시 최적화 과정이 요구된다. 본 연구에서는 앞에서 서술한 꼭지점 기반의 메시 간략화 기법을 이용해서 Fig. 12 와 같이 완전 매칭 곡면 모델의 실제 모서리와 그에 대응되는 가상 대각 모서리(virtual diagonal transpose edge)에 대해서 식 (12)의 축약 비용을 각각 계산하고, 축약 비용이 작은 모서리를 실제 모서리로 설정하는 메시 최적화 기법을 제안하였다. Fig. 13 은 모든 모서리에 대해서 이러한 메시 최적화 과정을 적용하여 최종적으로 복원한 완전 매칭 곡면 모델의 형상을 보여주고 있다.

3. 적용 사례 및 고찰

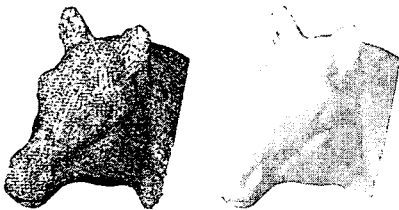
본 연구에서는 2.8GHz 의 CPU 와 522MB 의 RAM 을 탑재한 Pentium IV 컴퓨터, Visual C++6.0, OpenGL 라이브러리를 토대로 조직화되지 않은 점군으로부터의 3 차원 완전 형상 복원을 위한 전용 프로그램을 개발하였다. Fig. 14 는 3 차원 완전 형상 복원 프로그램의 화면 구성 및 형태를 보여주고 있으며, Fig. 15 는 점군으로부터 경계 상자, 초기 메시 모델, 제어 메시 모델, 매개변수 곡면 모델, 초기 완전 매칭 곡면 모델, 그리고 최종 복원 형상인 최적화된 완전 매칭 곡면 모델을 생성하는

Table 1 3D surface reconstruction of golf head

Model	No. of vertices	Process time
Initial mesh model	1,538	0.157 sec
Control mesh model	771	0.188 sec
Parametric surface model	12,306	0.516 sec
Initial complete matching surface model	12,321	3.031 sec
Optimized complete matching surface model	12,321	1.000 sec
Total	-	4.892 sec

Table 2 3D surface reconstruction of horse head

Model	No. of vertices	Process time
Initial mesh model	1,538	0.111 sec
Control mesh model	1,522	0.016 sec
Parametric surface model	6,082	0.234 sec
Initial complete matching surface model	6,102	1.265 sec
Optimized complete matching surface model	6,102	0.468 sec
Total	-	2.094 sec

**Fig. 16** 3D surface reconstruction of horse head

3 차원 완전 형상 복원 과정을 순서도의 형태로 나타낸 것이다.

Fig. 13 에 제시한 골프 헤드 모델은 12,321 개의 측정점들을 이용해서 형상 복원한 것으로 형상 복원 과정에서 생성되는 형상 모델들의 꼭지점 수와 계산 시간은 Table 1 에 제시하였다. 골프 헤드와 관련된 형상 모델들의 꼭지점 수는 초기 메시 모델 1,538 개, 제어 메시 모델 771 개, 매개변수 곡면 모델 12,306 개, 그리고 완전 매칭 곡면 모델 12,313 개이다. 그리고 형상 모델 생성 과정의 소요 시간은 초기 메시 모델 0.157sec, 제어 메시 모델 0.188sec, 매개변수 곡면 모델 0.516sec, 초기 완전 매칭 곡면 모델 3.031sec, 최적화된 완전 매칭 곡면 모델 1.000sec 등으로 나타났으며, 총 소요 시간은 4.892sec 이다.

또한 Fig. 16 에 제시한 말 머리 모델은 6,102 개의 측정점들을 이용해서 형상 복원한 것으로 형상 복원 과정에서 생성되는 형상 모델들의 꼭지점 수

와 계산 시간은 Table 2 에 제시하였다. 말 머리와 관련된 형상 모델들의 꼭지점 수는 초기 메시 모델 1,538, 제어 메시 모델 1,522 개, 매개변수 곡면 모델 6,082 개, 그리고 완전 매칭 곡면 모델 6,102 개이다. 그리고 형상 모델 생성 과정의 소요 시간은 초기 메시 모델 0.111sec, 제어 메시 모델 0.016sec, 매개변수 곡면 모델 0.234sec, 초기 완전 매칭 곡면 모델 1.265sec, 메시가 최적화된 완전 매칭 곡면 모델 0.468sec 등으로 나타났으며, 총 소요 시간은 2.094sec 이다.

특히 이러한 두 가지의 적용 사례를 통해서 본 연구에서 제안한 3 차원 완전 형상 복원 방법은 형상 복원 시간이 매우 빠르고, 모든 측정점들을 꼭지점으로 하는 완전 매칭 곡면 모델의 형태로 최종 형상을 생성한다는 사실을 확인하였다. 그리고 말 머리 모델의 경우에서 알 수 있듯이 말의 귀 부분처럼 돌출부가 있는 형상의 경우도 매우 정확하고 효율적으로 복원할 수 있다는 것을 보여 주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 형상 복원 시간이 짧고, 조직화 되지 않은 점군에 대한 근사적인 형상 복원이 아니라 주어진 모든 점군을 꼭지점으로 하면서 점군 형상의 위상 정보를 최대한 반영하는 3 차원 완전 형상 복원 방법을 제안하였고, 그 방법의 유용성은 적용 사례를 통해서 입증하였다. 그리고 그 과정에서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

(1) 점군 형상을 개략적으로 묘사한 초기 메시 모델은 점군을 둘러싸는 경계 상자에 대한 삼각형 메시의 세분화 과정과 슈링크 래핑 과정을 반복 수행함으로써 생성하였다.

(2) 점군 형상의 위상 정보를 잘 반영하면서 추가적인 삼각형 메시의 세분화 과정을 통해서 얻어지는 꼭지점 수가 점군의 수와 최대한 일치하도록 구성된 제어 메시 모델은 초기 메시 모델에 대해서 꼭지점 기반의 메시 간략화 기법을 적용하여 생성하였다.

(3) 점군 형상을 매우 근사적으로 묘사하는 매개변수 곡면 모델은 제어 메시 모델에 국부 세분화 곡면 적합 기법을 적용해서 생성하였다.

(4) 점군과 완전하게 일치하면서 제품의 형상을 정밀하게 묘사하는 완전 매칭 곡면 모델을 구현하기 위한 목적으로 완전 매칭 알고리즘과 메시 최적화 알고리즘을 제안하였다.

(5) 형상 복원 시간을 단축하기 위해서 국부적인 미소 공간 영역만을 탐색하기 때문에 탐색 시

간이 매우 짧은 복셀 기반의 최근접점 탐색 방법을 제안하였다.

(6) 형상 복원 시간의 상당 부분은 초기 완전 매칭 곡면 모델을 생성하는 데 소요되고 있는데, 그 이유는 유리화된 측정점들의 삽입 과정, 메시 세분화 과정 및 메시 정규화 과정에 상대적으로 많은 계산이 필요하기 때문으로 나타났다.

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) Boissonnant, 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) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Michael, G. and Paul, S. H., 1997, "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics," *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 209~216.
- (11) Suzuki, H., Takeuchi, S. and Kanai, T., 1999, "Subdivision Surface Fitting to a Range of Points," *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 158~167.
- (12) Taubin, G., 1995, "A Signal Processing Approach to Fair Surface Design," *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 351~358.