

경계면 축소포장에 기반한 비정렬 3차원 측정점으로부터의 표면 재구성

박은진⁰ 최영규 이재협 구본기 추창우 김재철
한국기술교육대학교, 한국전자통신연구원

{ejinpark⁰, ykchoi, jae}@kut.ac.kr {bkkoo, cwchu, jckim}@etri.re.kr

Shrink-Wrapped Boundary Face Algorithm for Surface Reconstruction from Unorganized 3D Points

Eun-Jin Park,⁰ Young-Kyu Choi, Jae-Hyub Lee, Bon-Ki Koo, Chang-Woo Chu, Jae-Chul Kim
School of Information and Technology, Korea University of Technology⁰ Digital Content Research Division, ETRI

요 약

정렬되지 않은 3차원 측정점들로부터 이들을 근사하는 표면을 재구성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 *경계면 축소포장* 방식에 의한 표면 재구성 방법 (*shrink-wrapped boundary face : SWBF*)으로, 측정점으로부터 경계셀과 경계면을 구해 초기 메쉬를 생성하고 이를 연속적으로 축소하는 방식에 의해 표면을 재구성한다. 제안된 방법은 기존의 표면 축소포장 방식의 메쉬 생성 방법의 문제점인 물체의 토폴로지에 대한 제약이 없이 어떠한 형태의 표면 재구성에도 적용이 가능하며, 기존 방법이 축소 단계에서 각 메쉬 정점에 대한 최단거리 측정점을 찾는 전역 탐색을 해야 하는데 비해 지역 탐색만으로 최적의 측정점을 찾을 수 있으므로 처리 시간 측면에서도 우월하다. 실험을 통해 제안된 표면 재구성 알고리즘이 측정점들간의 관계를 알 수 없는 정렬되지 않은 3차원 점들에 대한 표면 재구성에 매우 안정적이고 효과적인 결과를 확인할 수 있었다.

1. 서 론

실물에 대한 3차원 표면 모델의 재구성에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 3차원 표면 모델의 생성을 위한 과정은 크게 *데이터의 취득* 단계와 *표면 재구성* 단계로 나눌 수 있다. Curless는 다양한 3차원 형태 측정 방법을 분류하였는데 [1], CMM과 같이 물체의 표면에 접촉하여 데이터를 측정하는 방법과 비 접촉식 측정법으로 먼저 분류하였고, 비 접촉식 방법을 투과방식(transmissive)과 반사방식(reflective)으로, 그리고 반사방식은 광학기반 측정법과 비 광학 측정법으로 세분하였다. 이러한 다양한 3차원 측정법에 의해 취득되는 3차원 정보는 데이터들 사이에 유용한 상관관계의 여부에 따라 정렬되어 (organized) 있다고 볼 수 있는 데이터와 정렬되지 않은 (unorganized) 데이터 (또는 측정점)로 분류할 수 있다. 정렬되어 있는 데이터는 등고선과 같이 같은 높이의 정점이 순서적으로 주어지거나, 거리영상(range image)과 같이 2차원 영상의 형태로 주어지는 것들을 말하는데, 현재까지 다양한 표면 재구성 방법들이 알려져 있다. 이에 비해 정렬되지 않은 데이터는 취득된 점들간의 상관관계가 주어지지 않으므로 표면 재구성이 일반적으로 매우 어려운데, 전형적인 방법으로 Hoppe[2]가 제안한 측정점의 접평면(tangent plane)과 부호화된 거리(signed distance)의 개념을 도입한 불륨기반 재구성 방법이며, 측정점에 잡음이 포함되어 있거나 표면의 굴곡이 심한 부

분에서 법선 벡터가 매우 상이하게 나타날 수 있어 매우 자연스럽지 않은 결과를 만들어 낼 수 있다는 단점이 있다. 최근 Jeong은 축소포장의 개념[3]을 도입하여 정렬되지 않은 측정점에서 메쉬를 재구성하는 방법을 소개하였는데[4], *구형 토폴로지(Genus-0 spherical topology)*에는 적용할 수 있지만, 환형(ring shape)과 같이 물체의 내부에 구멍이 있는 경우에는 적용될 수 없고 처리 시간이 매우 길다는 단점이 있다.

본 논문에서는, 정렬되지 않은 점들로부터 메쉬를 생성하는데 있어서 축소 포장의 개념을 임의의 토폴로지에 대해서도 적용할 수 있도록 하는 방법뿐만 아니라 처리시간도 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 방법은 표면에 다수의 구멍이 있는 임의의 토폴로지의 물체에 대해서도 적용이 가능하며, 최단 측정점 탐색에서 전역 탐색이 필요 없이 지역 탐색만으로 최적의 최단 측정점을 추출할 수 있다. 또한 실험을 통해 제안된 표면 재구성 알고리즘이 측정점들간의 관계를 알 수 없는 정렬되지 않은 3차원 점들에 대한 표면 재구성에 매우 안정적이고 효과적인 결과를 확인할 수 있었다.

2. 경계면 축소방식의 표면 재구성 알고리즘

표면을 재구성 하고자 하는 실세계 사물을 $o_{..w}$ 이라고 하면 $o_{..w}$ 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합인 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 를 구할 수 있다. 이때 각 측정점 p_i 사이에는 같은 물체의 표면상의 한 점이라는 것

이외에는 아무런 상관관계가 없다고 가정하며, 이러한 데이터를 *정렬되지 않은 3차원 데이터*라고 정의한다. 이러한 실제 표면의 샘플링은 비교적 균일하게 이루어져 있다고 가정하는데, 이것은 비슷한 표면 넓이에 대해 비슷한 수의 샘플링이 이루어진 것을 의미한다. 임의의 실제 사물에 대한 정렬되지 않은 데이터 P 에 대하여 표면 재구성 알고리즘은 P 에 근사하는 다각형 메쉬 $M^P \approx P$ 를 생성하는 과정으로 정의된다. 이를 위해 제안된 표면 재구성 알고리즘은 전체 공간의 쉘분할, 경계면 정의와 초기메쉬의 생성, 정점 축소, 그리고 평활화의 네 단계를 거쳐 진행된다.

2.1 공간의 쉘 분할

측정점 P 를 포함하는 최소 직육면체를 구하여 물체가 들어 있을 공간에 대해서만 처리한다. 먼저 P 내의 모든 3차원 좌표들에 대해 X, Y 및 Z 축 방향으로 최대값과 최소값을 구하고 3차원 공간상의 6개의 평면(각 좌표축 방향의 평면 2개씩)을 정의함으로써 직육면체 B_P 를 추출한다. 다음으로 최소 직육면체를 임의의 크기의 체적소인 셀(cell)로 균등하게 분할하는 과정이 이어지는데, 쉘 공간과 쉘을 다음과 같이 정의한다.

[정의 1] 쉘 공간 (Cell Space) : 실제 사물 O_{real} 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합 P 를 포함하는 최소 직육면체 B_P 를 균등한 크기의 체적소로 분할한 공간을 쉘 공간 (Cell Space) C_P 라 정의한다. 이때의 각각의 체적소를 쉘(Cell)이라 정의하며 c 또는 $c(i, j, k)$ 이라 표기한다. C_P 는 다음과 같다.

$$C_P = \{c(i, j, k) \mid i = 0, 1, \dots, n_x, j = 0, 1, \dots, n_y, k = 0, 1, \dots, n_z\} \quad (1)$$

이때 n_x, n_y 및 n_z 는 각각 X, Y 및 Z 축 방향으로의 분할의 정밀도를 나타낸다. 이때, 각 축 방향의 쉘 분해능 (또는 분할의 정밀도)의 결정은 최종적인 메쉬의 품질에 영향을 주게 되므로 매우 신중하게 결정하여야 한다.

2.2 경계면 정의 및 초기 메쉬의 생성

하나의 쉘 공간내의 임의의 셀 c 는 측정점의 집합 P 내의 하나 이상의 측정점을 포함할 수도 있고 측정점을 하나도 포함하지 않을 수도 있는데, 이에 따라 경계셀과 외부셀을 정의한다.

[정의 2] 경계셀(Boundary Cell) 과 외부셀(Outer Cell) : 쉘 공간 C_P 내의 셀들 중에서 측정점을 포함하는 셀을 *경계셀 (Boundary cell)*로, 측정점을 포함하지 않는 셀을 *외부셀(outer cell)*로 정의하고 각각 c_b, c_o 로 표시한다. 셀들을 외부셀과 경계셀로 구분한 것은 처리를 위해 입력된 데이터 P 에 포함된 측정점이 모두 물체의 표면만에 대한 정보이며 따라서 물체의 내부와 외부 구분할 수 없기 때문인데, 결국 의미상의 내부셀과 외부셀을 모두 외부셀로 규정하는 것이다. 외부셀은 물체의 표면 생성에 아무런 기여를 하지 못하고 측정점들을 포함하는 경계셀들 안에서만 물체의 표면이 발생하게 되므로 메쉬를 생성하기 위해서는 경계셀에 대해서만 고려하게 된다.

[정의 3] 경계면(Boundary Face) : 임의의 경계셀 c_b 는 6개의 면(face)이 있으므로 $O(1)$ -인접성으로 인접한 6개의 이웃셀들이 있다. c_b 의 6개의 면 중에서 외부셀과 접하고 있는 면을 *경계면(Boundary Face)*이라고, 경계셀과 접하고 있는 면을 *내부면(Internal Face)*이라 하며, 표기는 각각 f_b, f_i 로 한다.

[정의 4] 초기 메쉬(Initial Mesh) : O_{real} 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합 P 로부터 실제 사물의 표면에 근사하는 메쉬 M^P 생성을 위한 초기 메쉬 M^I 는 쉘 공간 C_P 의 경계셀들의 경계면을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$M^I = \{\forall f_b \in c_b \mid c_b \in C_P\} \quad (2)$$

즉 초기 메쉬 M^I 는 C_P 의 모든 경계셀들에 대한 모든 경계면들로부터 정의된다. M^I 는 측정점들의 집합 P 로 표시되는 실제 사물 O_{real} 의 표면에 대한 하나의 단순한 근사 형태가 되며, 대부분의 경우 O_{real} 의 토폴로지를 그대로 유지하게 된다. 이러한 초기 메쉬는 항상 닫혀(closed) 있으며, 토폴로지의 제약이 없이(다양하게 분기되거나 구멍이 있는 표면 등) 임의의 토폴로지의 물체에 대해서도 적용될 수 있다. 이 후의 처리 과정은 기존의 방법들[3][4]과 유사하며, 여러번의 축소와 평활화 과정을 통해 O_{real} 의 실제 표면에 더 가깝도록 변형된다.

2.3 메쉬 정점의 축소 (Shrinking process)

초기 메쉬 M^I 가 구해지면 축소과정을 수행한다. 즉, M^I 를 구성하는 각 정점 q 에 대해 P 내의 모든 측정점들까지의 거리를 계산하여 가장 가까운 측정점을 찾고 그 방향으로 정점을 이동시킨다. 제안된 방법에서는 q 가 포함된 셀과 $O(3)$ 로 인접하는 26개의 이웃셀 내에 있는 측정점들과의 거리만을 계산한다. 이들 27개의 셀들 안에 최소한 하나 이상의 측정점이 반드시 존재하며, 이렇게 추출한 측정점이 전체 측정점에서(전역탐색) 구한 최단거리 측정점과 항상 동일하기 때문이다. 최단거리의 측정점이 결정되면 초기 메쉬 M^I 를 축소시켜 O_{real} 의 실제 표면과 보다 근사해 지도록 메쉬의 정점을 그 방향으로 이동시킨다. 메쉬 정점의 이동은 원래 메쉬의 정점과 최단 측정점간의 선분상의 임의의 위치로 옮기게 된다. 이동할 메쉬의 정점을 q_i 라고 하고 이 정점의 최단 측정점을 $p_{nearest}$ 라고 하면, 메쉬 정점의 이동은 다음과 같다.

$$q_i \leftarrow q_i + \alpha(p_{nearest} - q_i) \quad (3)$$

이때, 계수 α 는 이동의 정도를 나타내어 0에서 1사이의 값을 갖는다. 이 값이 1이면 메쉬 정점을 바로 최단 측정점으로 옮기는 것을 의미하는데, 이것은 같은 측정점에 여러 개의 메쉬 정점이 모이게 될 수 있으며 표면이 겹치는 문제를 발생시킬 수도 있으므로 추가적인 평활화 과정을 불가하게 할 수 있다. 또한 이 값이 너무 작으면 초기 메쉬가 측정점으로 수렴해 가는 속도가 너무 느려 처리시간이 많이 걸릴 수 있다는 단점이 있다. 보통 이 값은 0.5 정도를 사용하게 된다.

2.4 메쉬 평활화 (Smoothing process)

메쉬 정점의 축소과정에서 적당한 α 값을 사용 하더라도 정점들이 국부적으로 하나의 측정점들로 편중되는 결과를 완화시키기 위하여 메쉬 평활화 과정이 수행된다. 메쉬 평활화 과정은 축소된 각 정점의 위치를 이 정점과 이웃하는 정점들의 위치를 평균하여 가능한 한 이웃 정점들의 중앙부로 이동시키는 방향으로 진행된다 [4]. 이와 같은 축소 과정과 메쉬 평활화 과정을 반복하면 초기 메쉬 M^1 가 O_{real} 의 실제 표면과 점점 더 가까워지게 된다. 실험 결과 셀의 크기가 적절히 선택된 경우 일반적으로 4~5회만 반복해도 충분한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 실험

그림 1은 제안된 방법의 표면 모델링 과정을 [4]와 비교하여 보여준다. Ring데이터 (a)에 대해 (a)와 (e)는 초기메쉬의 형태에 있어 근본적인 차이가 있다. 특히 (b)는 최단거리 측정점을 찾기 위해 전역 탐색이 필요한데 비해 제안된 방법에서는 (e)에서와 같이 초기메쉬의 어떤 정점에서든 O(3)-인접한 셀에 측정점이 존재하여 지역탐색만으로 최적의 측정점을 찾을 수 있다. 실험 결과, 제안된 방법으로 4회 반복 시행에 3초 미만의 시간이, [4]의 방법으로 한 번의 축소과정에서만 3~4분의 시간이 걸렸다. 또한 제안된 방법이 Ring과 같이 표면에 구멍이 있는 데이터에 대해서도 안정적으로 동작하므로 물체 표면의 토폴로지에 상관없이 표면을 재구성 할 수 있는데 비해, [4]의 방법에서는 아무리 축소 평활화 과정을 반복해도 (g)와 같은 토폴로지의 표면을 얻을 수 없음을 알 수 있었다.

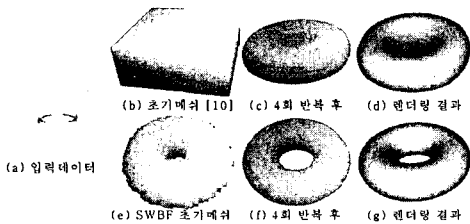


그림 1. 기존방법[4]과의 비교 (resolution: $n_y=21$):
(a) 입력데이터, (b)-(d) [4]에 의한 처리 결과,
(e)-(g) 제안된 방법에 의한 처리결과

그림 2의 측정점의 수가 비교적 많은 Happy Buddha 데이터는 팔이나 허리, 다리부분 등에서 표면에 다수의 구멍을 포함하고 있다. 이러한 데이터에 대해서도 제안된 방법이 안정적인 초기메쉬 (b)를 만들고, 몇 번의 축소-평활화 과정을 거쳐 표면 모델을 잘 만들어 주는 것을 알 수 있다. 특히 제안된 방법은 처리시간 측면에서 1회의 축소와 평활화 과정에서 각각 4초 내외의 시간이 걸렸으나 기존의 방법은 한 번의 축소단계에만 10시간 가까운 시간이 걸려 (평활화 시간은 동일함) Happy Buddha와 같이 크기가 큰 데이터들에 대해서는 표면의 재구성이 현실적이지 않았다(Pentium-4 2.4GHz).

표 1. Happy Buddha 데이터 처리결과

측정점수		543,652
Cell Space	최대 Resolution	X:65, Y:150, Z:65
	경계셀 수	39,994
결과 (생성된 메쉬)	정점수	83,215
	면수	166,828
	처리시간(초)	< 35

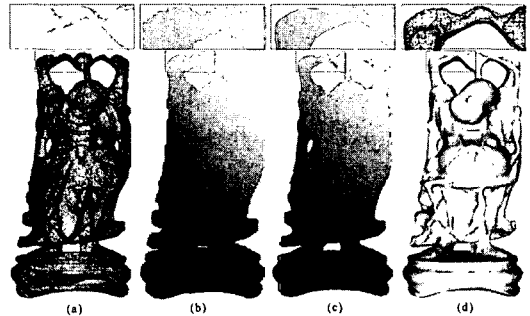


그림 2. Happy Buddha데이터 처리 과정 : (a) 입력 데이터, (b) 초기 메쉬, (c) 축소-평활화(shrink-wrapped) 된 표면, (d) 렌더링 결과

4. 결론

본 논문에서는 측정점간의 상관관계가 주어지지 않는 (또는 정렬되지 않은) 3차원 데이터로부터 실물에 근사하는 표면을 재구성하는 방법인 경계면 축소포장방식에 의한 표면 재구성 방법을 제안하였다. 실험을 통해 제안된 알고리즘이 표면에 구멍이 있는 물체에 대한 표면 재구성에도 물체의 구형 토폴로지 제약 없이 적용 가능하고, 비교적 잡음이 많은 3차원 데이터에 대해서도 안정적인 결과를 생성하며 또한 지역 탐색으로 처리 시간이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] B. Curless and M. Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images," *SIGGRAPH '96 Proceedings*, pp. 303-312, Aug. 1996.
 [2] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, "Surface reconstruction from unorganized points," *SIGGRAPH '92 Proceedings*, pp. 71-78, Jul. 1992.
 [3] L. Kobbelt, J. Vorsatz, U. Lubsik, and H. Seidel, "A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces," In *Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics '99*, vol. 18, 3, pp. 119-129, Sep. 1999.
 [4] W. Jeong, and C. Kim "Direct reconstruction of displaced subdivision surface from unorganized points," in *Journal of Graphical Models*, Volume 64, Issue 2, pp. 78-93, Mar. 2002.