

개선된 Shrink-wrapping 알고리즘을 이용한 비조직 3차원 데이터로부터의 표면 재구성

박 은 진^{*} · 구 분 기^{**} · 최 영 규^{***}

요 약

SWBF(shrink-wrapped boundary face) 알고리즘은 조직되지 않은 3차원 측정점으로부터 표면을 재구성하기 위해 최근에 제안된 방법이다. 본 논문에서는 SWBF 알고리즘의 표면 중복문제를 제거하고, 이를 해결하기 위한 개선된 표면 재구성 방법을 제안한다. 제안된 방법은 경계셀이 아닌 모든 셀들을 내부셀과 외부셀로 구분하고, 개선된 경계면의 정의를 이용해 초기메쉬에서 표면의 중복이 발생하지 않도록 하였다. 또한, 측정 방향에 따라 표면 샘플링의 조밀도가 차이가 나는 일반적인 3차원 스캐너로부터 추출된 데이터의 처리를 위해 셀 영상에서 2차원 연결성을 정의하여 사용하였다. 실험을 통해 제안된 방법이 SWBF 알고리즘의 표면중복문제를 극복하는데 매우 유용함을 알 수 있었다.

키워드 : 표면 재구성, 비조직 3차원 측정점, 축소포장, 셀 공간, 3차원 스캐너

Surface Reconstruction from unorganized 3D Points by an improved Shrink-wrapping Algorithm

Park, Eun-Jin^{*} · Koo, Bon-Ki^{**} · Choi, Young-Kyu^{***}

ABSTRACT

The SWBF(shrink-wrapped boundary face) algorithm is a recent mesh reconstruction method for constructing a surface model from a set of unorganized 3D points. In this paper, we point out the surface duplication problem of SWBF and propose an improved mesh reconstruction scheme. Our method tries to classify the non-boundary cells as the inner cell or the outer cell, and makes an initial mesh without surface duplication by adopting the improved boundary face definition. To handle the directional unbalance of surface sampling density arise in typical 3D scanners, two dimensional connectivity in the cell image is introduced and utilized. According to experiments, our method is proved to be very useful to overcome the surface duplication problem of the SWBF algorithm.

Key Words : Surface reconstruction, Unorganized 3D data points, Shrink-wrapping, Cell space, 3D scanner

1. 서 론

최근 다양한 분야에서 실세계 사물의 3차원 표면정보에 대한 활용이 이루어지고 있다. 특히 멀티미디어 콘텐츠의 제작과 관련이 깊은 컴퓨터 그래픽스와 가상현실 분야에서 이러한 표면 모델에 대한 요구와 관심이 급증하고 있는데, 이에 따른 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 표면모델을 생성하기 위해서는 실물에서부터 3차원 정보를 추출하는 데이터 취득(data acquisition) 단계와, 구해진 데이터로부터 표면 메쉬를 생성하는 표면 재구성(surface reconstruction) 단계가 처리되어야 한다. 일반적으로 3차원

데이터의 취득은 다양한 능동형 및 수동형 스캐너를 사용하거나 CMM(Coordinate Measuring Machine)이라 불리는 3차원 디지털타이저를 사용해 이루어진다. Curless는 이러한 다양한 3차원 형태 측정 방법을 분류하였는데[1], 먼저 CMM과 같은 접촉식 측정법과 비접촉식 방법들로 구분하고, 비접촉식을 다시 CT(Computed Tomography)와 같은 투과방식(transmissive)과 반사방식(reflective)으로 나누었다. 또한, 반사방식은 광원과 카메라를 사용하는 광학기반 측정법과 초음파나 레이더와 같은 비 광학식 측정법으로 세분하였다. 일반적으로 그래픽스 및 컴퓨터 비전 분야에서는 광학기반의 반사형 3차원 측정방법이 가장 활발하게 이용되고 있다[2][3].

이렇게 추출된 3차원 정보로부터 표면을 생성하는 것은 매우 중요한 과정으로, CT와 같이 투과방식을 사용해 취득된 데이터는 보통 단층영상의 형태로 주어지는데 마칭큐브(marching cube)라 불리는 대표적인 방법들을 통해 표면을

^{*}준 회원 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과 박사과정

^{**}정 회원 : 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 CG기반기술연구팀 팀장

^{***}총신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수(교신저자)

논문접수 : 2007년 1월 9일, 심사완료 : 2007년 4월 20일

생성할 수 있다[4][5]. 표면에 대한 정보가 등고선의 형태로 구해지는 경우 등고선 삼각분할방식(contour triangulation)에 의해 표면을 재구성하며[6][7], 거리영상(range image)의 형태로 주어지는 데이터는 인접 화소들을 삼각형으로 연결하여 쉽게 표면을 재구성 할 수 있다. 이들은 측정점들 간에 특정한 관계가 존재하고, 따라서 조직된(organized) 데이터로 불리는데, 예를 들어, 등고선의 경우 정점들이 순서적으로 주어지므로 측정점간의 선후관계가 존재하고, 거리영상은 2D 영상으로 주어지므로 화소간의 인접관계를 쉽게 찾을 수 있어 이들 관계를 표면 모델링에 유용하게 활용할 수 있다. 그러나 측정점간의 상관관계가 주어지지 않는 데이터의 경우 표면생성에 사용할 정보가 제한적이고 안정적으로 메쉬를 생성하는 것이 일반적으로 매우 어려운데, 이러한 데이터를 “조직되지 않은(unorganized)” 또는 “비조직” 데이터[8] 라고 부른다. 본 논문에서는 이러한 3차원 비조직 데이터로부터 표면을 재구성하기 위해 제안된 방법들 중에 하나인 SWBF 알고리즘에서 표면의 중복이라는 매우 중대한 문제가 발생함을 제기하고, 이를 해결하기 위한 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 3차원 비조직 데이터로부터 표면을 재구성하기 위한 기존 연구들을 살펴보고, SWBF 알고리즘의 표면중복 문제를 제기한다. 3장에서 이를 해결하기 위해 개선된 축소포장에 기반한 3차원 비조직 데이터의 표면 모델링 방법을 자세히 소개한다. 4장에서는 다양한 3차원 데이터에 대한 실험 결과를 제시하며 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 기존 연구 및 SWBF 알고리즘의 표면 중복문제

조직되지 않은 3차원 데이터로부터 표면을 재구성하기 위해 다양한 연구들이 출판되었다. Hoppe등은 처음으로 이러한 3차원 비조직 데이터로부터 표면을 생성하기 위한 방법을 개척하였다[8]. 이들은 임의의 측정점에서 가장 가까운 여러 개의 정점들을 구하여 그 점의 접평면(tangent plane) 방향을 추측하였고, 부호화된 거리(signed distance)를 도입해 체적기반 재구성 방법[4]을 적용하여 표면 메쉬를 재구성하였다. 그러나 이 방법은 각 측정점에 대한 접평면을 추산하는데 시간이 많이 걸리고, 표면이 복잡하거나 스캐너의 불안정성으로 인해 데이터에 잡음이 포함되어 있는 경우 가까운 측정점들 사이의 법선 벡터가 매우 상이하게 나타날 수 있고, 이에 따라 매우 부자연스러운 표면을 만들어 낸다는 단점이 있다.

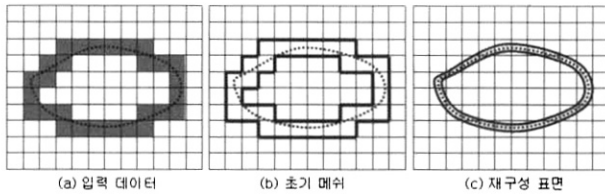
Boissonnat 등은 Voronoi 다이어그램을 사용하는 체적기반 재구성방법을 제안하였다[9]. 이 방법은 표면의 샘플링 조건에 대한 비교적 강한 가정아래에서 (샘플링이 매우 균일하고 조밀할) 좋은 표면을 만들어내지만, 일반적인 스캐너로부터 추출되는 데이터가 이러한 가정을 만족시키기는 매우 어렵다.

표면의 포장(wrapping)에 기반한 방법들도 제안되었는데, Jeong 등은 Seidel이 처음으로 제안한 표면의 축소포장(shrink-wrapping)[10]의 개념을 입력 데이터가 다각형 표면이 아닌 비조직 측정점으로 확장하여 메쉬를 재구성하고자 하였다[11]. 이들은 3차원 데이터를 포함하는 최소 직육면체의 6개의 면을 분할하여 초기 메쉬를 만들고, 이 메쉬의 각 정점들을 가장 가까운 측정점 방향으로 이동시키는 축소(shrink)와 평활화(smooth) 단계를 통해 초기 메쉬가 점점 더 실제 표면에 가깝게 변형될 수 있도록 하였다. 이 방법은 축소과정에 시간이 많이 걸리며, 구형 토폴로지(Genus-0 spherical topology)에는 적용할 수 있으나 환형(ring shape)과 같이 물체의 내부에 구멍이 있는 경우에는 적용될 수 없다는 근본적인 한계가 있었다.

Jeong의 방법이 표면을 축소시키는데 비해, Sharf등은[12] 데이터의 내부에 먼저 작은 구형(genus-0)의 초기메쉬를 놓고 성장면(fronts)들을 경합하여(competing fronts) 메쉬를 점점 확장하는 방법을 사용하였는데, 토폴로지의 확장을 위해 후처리로 토폴로지 제어 단계에서 핸들을 붙이는 방법으로 초기메쉬의 토폴로지 한계를 극복하고자 하였고, 최종적으로 프로젝트 단계를 통해 표면이 측정점의 방향으로 가서 밀착되도록 하였다. 이 방법 역시 많은 처리시간이 요구되며, 얇은 표면에 대한 모델링에 어려움이 있다.

최근에 Choi등은 Jeong의 방법에서 초기 메쉬의 형태를 개선하여 임의의 토폴로지에 대한 재구성이 가능한 표면 축소포장 알고리즘(shrunked-wrapped boundary face, SWBF)을 제안하였다[13]. 이 방법은 [11]에 비해 임의의 토폴로지의 표면을 처리할 수 있다는 큰 장점을 갖는다. 또한 표면의 축소과정에 걸리는 시간도 크게 단축시킬 수 있는데, [11]나 [12]에서는 메쉬형태의 변형을 위한 최단 측정점의 추출에 전역탐색이 필요한데 비해 지역탐색만으로 항상 최적의 정점을 구할 수 있기 때문이다.

SWBF 알고리즘은 이러한 장점에도 불구하고 표면의 중복이라는 매우 중대한 문제가 발생한다. 이 방법은 먼저 3차원 공간을 셀 공간으로 분할하고, 모든 셀들을 측정점을 포함하는 경계셀과 그렇지 않은 외부셀로 구분하였다. 경계셀과 외부셀이 접하는 모든 면들을 이용하여 초기메쉬를 만들고 이를 축소와 평활화 과정을 반복적으로 적용하여 최종적인 표면 모델을 재구성하는 이 방법은 기존의 방법들에 비해 매우 안정적으로 표면을 만들어 낸다[13]. 그러나 최종적으로 생성되는 표면이 안과 밖으로 중첩되어 있는 두 겹의 메쉬를 만들게 되는 표면 중복문제가 발생하는데, 이는 분할된 공간의 한 단면을 나타내는 (그림 1)을 통해 쉽게 확인할 수 있다. 그림에서 점선과 같이 비조직 측정점이 주어졌을 때, 전체 셀은 회색의 경계셀(측정점 포함)과 흰색의 외부셀(측정점을 포함하지 않음)로 구분된다. 이때, SWBF 알고리즘은 (b)와 같이 경계셀과 외부셀이 인접하는 면을 경계면으로 정의하고 이들을 이용해 초기메쉬(굵은 선)를 만들게 되며, 추가적인 축소와 평활화 과정을 반복적으로



(그림 1) (a) 입력된 비조각 데이터(점선)와 경계셀(회색) 및 외부셀(흰색), (b) 초기 메쉬 (중첩된 표면이 생성됨), (c) 축소 및 평활화 처리 후의 결과

적용하여 (c)와 같은 최종 표면을 만든다. 그러나 (b)에서와 같이 처음부터 표면이 측정점의 양쪽방향으로 중복해서 생성되어 결과적으로 (c)와 같이 법선벡터가 반대방향인 안과 밖의 두 겹의 중첩된 메쉬가 측정점으로 주어진 물체의 표면을 표현하게 된다.

이러한 문제의 원인은 다음과 같다.

- 일반적으로 3차원 스캐너는 물체의 표면에 대한 정보만을 추출할 수 있다. 대부분의 3D 스캐너는 광학이나 레이더 등을 이용해 물체의 표면에서 반사되는 정보로 3차원 데이터를 계산하므로 표면 정보만을 추출할 수 있고, 따라서 물체 내부영역에 대한 정보추출이 기본적으로 불가능하다 [2][3]. 이것은 CT와 같은 투과식 측정 장치를 사용하지 않는 이상 피할 수 없는 근본적인 문제이다. 최근 단층영상으로부터 등밀도의 표면(isosurface)을 재구성하는데 축소포장 방법이 적용되었으나 이 경우는 측정점과 함께 물체의 내부영역에 대한 복셀 정보를 활용할 수 있으므로 이러한 표면의 중첩문제가 발생하지 않는다[14].

- 이렇게 표면에서 추출한 측정점만을 사용하는 경우, SWBF에서는 전체 셀을 3차원 측정점을 포함한 경계셀과 그렇지 않은 셀로만 구분하였고, 다른 종류의 셀들이 인접하는 면으로 초기 메쉬를 정의하였다. 이때 경계셀이 아닌 임의의 셀이 외부인지 물체의 내부인지를 판단할 수 있는 근거가 없으며, 따라서 내부면 및 외부면 모두 초기메쉬에 포함되게 된다. 따라서 축소포장 과정을 거친 최종메쉬 역시 내부면과 외부면이 계속 남아있게 된다.

이러한 문제점은 [13]에서 언급이 되지 않았으나 실제로 매우 바람직하지 않은 결과이다. 본 논문에서는 SWBF에서의 이러한 문제를 지적하고, 이를 해결하기 위한 방법을 제안한다. 그 핵심이 경계셀 아닌 셀들을 내부셀과 외부셀로 분류하는 것으로, 최종적으로 경계셀과 외부셀과의 인접면(경계면)만을 초기메쉬에 사용함에 따라 SWBF의 표면 중복문제를 해결하고자 한다.

3. 제안된 shrink-wrapping 알고리즘 기반의 표면 재구성 방법

임의의 실세계 사물 O_{real} 의 표면에서 샘플링 된 조직되지 않은 측정점 데이터 P 가 주어졌을 때, 표면 재구성 알고리즘은 P 를 사용해 O_{real} 을 잘 근사하는 다각형 메쉬

$M^P \cong O_{real}$ 를 생성하는 과정으로 정의된다. 전체 표면 재구성은 공간의 셀 분할, 경계면 정의와 초기 메쉬의 생성, 정점 축소, 그리고 평활화의 네 단계를 거쳐 진행된다.

3.1 공간의 셀 분할

측정점 P 가 주어지면 먼저 물체가 포함된 공간에 대해서만 알고리즘을 처리하기 위해 P 를 포함하는 최소 직육면체 B_p 를 구하고, 다음으로 B_p 를 균일한 크기의 체적소인 셀(cell)로 분할하는 과정이 이어진다. 이를 위해 셀 공간과 셀을 다음과 같이 정의한다.

[정의 1] 셀 공간 (Cell space)

실세계 사물 O_{real} 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합 P 를 포함하는 최소 직육면체 B_p 를 균등한 크기의 체적소로 분할한 공간을 셀 공간(cell space)이라 정의하고 C_p 로 표기한다. 이때 각각의 체적소를 셀(Cell)이라 정의하며 c 또는 $c(i, j, k)$ 이라 표기한다.

셀은 정육면체로 가정하는데 셀의 한 방향의 크기가 셀 공간의 분해능(또는 분할의 정밀도)을 결정하게 되고 표면 조각의 개수나 최종적인 표면의 품질에도 영향을 주게 된다. 예를 들어, 측정점들이 매우 조밀하게 샘플링 된 데이터에 대해 정밀한 표면을 구하기 위해서는 비교적 단위 셀의 크기를 작게 하여야 한다. 반면에 측정점들의 거리가 비교적 큰 경우 셀의 크기를 키워야 하는데, 이렇게 표면의 샘플링이 조밀하지 않은 데이터에 대해 분해능이 너무 높으면(단위 셀의 크기가 작으면) 실제로 연결된 표면이지만 샘플링이 상대적으로 비 조밀한 부분에서 구멍(hole)이 발생할 가능성이 많아진다. 연구결과 최적의 정밀도를 위해 다음의 요인들이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

- **최단 측정점의 평균 거리:** 표면 샘플링이 균일한 경우에는 단위 셀의 크기는 최단거리 측정점들 사이의 평균 거리에 비례해서 증가하도록 해야 한다. 즉 전반적으로 조밀하게 샘플링된 경우 각 셀의 크기를 줄여 정밀한 표면을 재구성 할 수 있도록 한다. 그렇지 않은 경우는 단위 셀의 크기를 키워 표면에 구멍이 생기는 것을 막는 것이 좋다.

- **표면 샘플링의 균일도:** 표면 샘플링이 표면의 위치에 따라 매우 불균일하게 이루어진 경우에는 일반적으로 기존에 제안된 어떤 방법들도 좋은 모델링 결과를 구하지 못한다. 즉 샘플링이 조밀한 부분에서는 상대적으로 입력에 비해 매우 정밀하지 않은 표면을 만들고, 그렇지 않은 부분에서는 표면에 구멍이 발생하는 현상이 나타난다. 조악한 표면은 후처리를 통해 개선할 수 있으나 표면에 구멍이 생기는 것은 표면의 토폴로지가 바뀌게 되어 더욱 바람직하지 않으므로 샘플링의 균일도가 높지 않은 경우 단위 셀의 크기가 더 커져야 한다.

다양한 데이터에 대한 실험 결과, 평균 거리가 가장 중요한 요인으로 나타났으며, 비교적 균일한 데이터에 대해서는 평균 거리의 3~4배 정도로 단위 셀의 크기를 결정하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 또한 균일도가 비교적 떨어지

는 경우(최단거리의 분산이 큰 경우) 평균 거리의 5~7배 정도로 단위 셀이 적당한 것으로 나타났다.

3.2 경계셀과 비경계셀의 정의

셀 공간 C_p 내의 임의의 셀 c 는 측정점의 집합 P 내의 하나 이상의 측정점($p \in P$)을 포함할 수도 있고(그림 1의 회색 셀) 그렇지 않을 수도(그림 1의 흰색 셀) 있다. SWBF 알고리즘에서는 이들을 “경계셀”과 “외부셀”이란 용어를 사용하여 정의하였다. 본 논문에서는 “비경계셀”이란 용어를 도입해 이들 셀을 분류하였다.

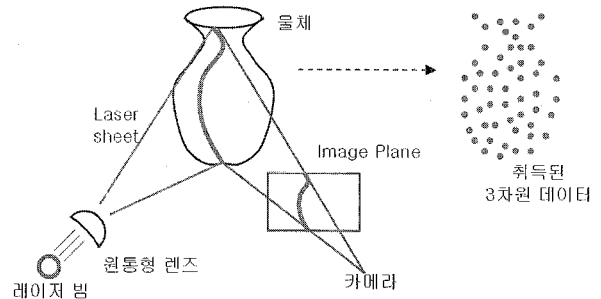
[정의 2] 경계셀(Boundary cell) 과 비경계셀(Non-boundary cell)

셀 공간 C_p 내의 셀 들 중에서 측정점을 포함하는 셀을 경계셀(Boundary cell)이라 정의하고 c_b 로 표기한다. 그렇지 않은 나머지 셀은 비경계셀(non-boundary cell)로 정의되며 c_{nb} 로 표기한다.

경계셀은 표면에서 샘플링된 측정점을 최소 하나 이상 포함하게 되므로 셀 내부에서 어떠한 형태로든지 실제 표면이 존재해야 한다고 볼 수 있다. 이에 비해 비 경계셀들은 물체의 내부영역이거나 외부공간에 해당하며 표면이 만들어지지 않는 부분이다. SWBF 알고리즘에서는 이들을 구분하지 않고 비 경계셀을 모두 외부셀로 규정하였고, 이에 따라 2장에서 언급한 바와 같이 중첩된 표면이 생성되었다. 이것은 비 경계셀을 표면이 만들어지지 않는 내부셀과 외부셀로 구분할 수 있는 근거를 구하기가 힘들었기 때문이다.

3.3 반사적인(reflective) 3차원 데이터 추출의 특징

본 논문에서는 이러한 비 경계셀을 물체의 내부인지 외부인지 구분할 수 있는 방법을 고찰하였으며, 이를 위해 입력 데이터의 특성을 분석하였다. Curless는 3차원 측정을 위한 여러 가지 방법들을 체계적으로 분류하였는데[1], 능동적인 3차원 측정법을 단층영상 촬영장치에서와 같은 투과적인 방법과, 3차원 스캐너와 같은 반사적인 방법으로 크게 나누었다. 투과적인 방법으로 구해지는 3차원 정보는 CT영상과 같이 물체의 표면정보뿐만 아니라 물체 내부의 정보가 잘 나타나며, 마칭큐브등의 방법을 이용하여 원하는 밀도의 표면을 비교적 안정적으로 재구성 할 수 있다. 그러나 3차원 스캐너 등에서 많이 사용되고 있는 반사적인 방법은 레이저 빔과 같은 능동적인 에너지를 물체에 조사하고 물체 표면에서 반사되어 나오는 신호를 분석하여 3차원 데이터를 추출하게 된다. 따라서 물체 내부의 정보는 알 수 없으며 단지 물체 표면에서 샘플링 된 지점의 정보만이 추출된다. 본 논문에서는 이러한 반사적인 방법에 의해 추출되는 조직되지 않은 3차원 측정점으로부터의 표면 재구성에 초점을 맞추었다. (그림 2)에서 이러한 방식의 3차원 데이터 측정시스템을 잘 보여주고 있는데, 임의의 물체가 입력되면 능동광원을 조사하고 보정된 카메라를 사용해 추출한 영상을 분석해 오른쪽과 같이 샘플링 된 표면정보를 구하게 되며, 이 과정을



(그림 2) 반사적인 방식의 3차원 데이터 추출 예(Curless[1])

여러 방향에서 반복적으로 수행하게 되면 전체적인 3차원 데이터가 구해지게 된다. 이때, 표면에서 샘플링 된 각 측정점은 3차원 좌표정보만 있으며, 각 정점의 법선벡터를 구할 수가 없다. 따라서 이 공간을 셀 공간으로 변환한 후 내부셀과 외부셀을 구분할 방법이 없다.

그러나 이러한 반사적인 측정법의 특성을 적용하면 비 경계셀을 내부셀과 외부셀로 구분이 가능한데, 즉 “외부”에서 접근이 가능한 셀과 가능하지 않는 셀로 구분하는 것이다. 주어진 데이터가 반사방식의 스캐너를 통해 추출된 데이터이고, 그림에서와 같이 “광원과 카메라가 항상 물체의 바깥쪽에 있다”고 가정하면 “외부”의 기준은 광원이나 카메라가 될 수 있다. 즉 카메라나 광원이 있는 외부로부터 접근이 가능한 (연결될 수 있는) 부분과 그렇지 않은 부분으로 나눌 수 있으며, 이에 따라 비 경계셀의 구분이 가능해 진다. 이를 위해 셀 공간에서의 비 경계셀들의 연결성을 정의하고 비 경계셀을 내부셀과 외부셀로 구분하는 방법을 제안한다.

3.4 내부셀과 외부셀의 정의

3차원 공간상에서 하나의 셀에는 6개의 면이 있고, 따라서 면으로 접하는 6개의 이웃 셀들이 있다. Udupa는 셀의 인접성을 3가지로 구분하였는데[15], O(1)-인접성에서는 임의의 셀에 면으로 접하는 셀들을 인접한 셀로 정의하며, O(2)에서는 면이나 에지를 공유하는 셀들도 이웃셀이 되고, O(3)는 꼭지점을 공유하는 셀들까지도 이웃으로 인정한다. 따라서 임의의 셀의 O(1)-이웃셀의 수는 6개, O(2)-이웃셀은 18개 그리고 O(3)-이웃셀의 수는 26개가 된다. 본 연구에서는 O(1)-인접성을 이용하여 셀 공간에서의 비 경계셀의 연결성(connectivity)을 정의하였다.

[정의 3] 셀 공간에서의 비경계셀의 연결성 (connectivity)

셀 공간 C_p 내의 비경계셀 c_1, c_2 가 있을 때, c_1 에서 c_2 까지 면으로 인접한(O(1)-인접) 경로가 있는 경우 c_1 와 c_2 는 연결되어 있다(connected)고 정의하며, $c_1 \approx c_2$ 로 표기한다.

이러한 연결성에 의하면 $c_1 \approx c_2$ 이고 $c_2 \approx c_3$ 이면 $c_1 \approx c_3$ 관계도 성립하게 된다. 셀 공간에서는 비 경계셀의 연결을 막는 유일한 요소가 경계셀이다. (그림 1)의 경우를 예로 들면, 바깥쪽의 비 경계셀은 안쪽의 셀들과 경계셀(회색 셀들)에 의해 나누어져 있고, 따라서 이들은 서로 연결되

어 있지 않다. 셀 공간에서의 이러한 비 경계셀의 연결성을 바탕으로 내부셀과 외부셀을 다음과 같이 정의한다.

[정의 4] 내부셀(Inner Cell) 과 외부셀(Outer Cell)

셀 공간 C_p 내의 비 경계셀들 중에서 C_p 의 최소 직육면체 B_p 와 $O(1)$ -인접한 셀을 c_{B_p} 라고 할 때, $c_{B_p} \approx c$ 의 관계가 성립하는 모든 셀을 외부셀(Outer Cell)로 정의하고, 그 이외의 모든 비 경계셀은 내부셀(Inner Cell)로 정의한다. 외부셀은 c_{out} 으로, 내부셀은 c_{in} 로 표기하며, 모든 외부셀은 $c_{B_p} \approx c_{out}$ 관계가 성립한다.

3.5 초기 메쉬의 생성

이러한 내부셀과 외부셀의 분류에 의해 경계면을 다음과 같이 정의한다.

[정의 5] 경계면(Boundary Face)

임의의 경계셀 c_b 의 6개의 면들 중에서 외부셀과 접하고 있는 면을 외부경계면(outer boundary face) 또는 경계면(boundary face) 이라 정의하고, 내부셀과 접하고 있는 면을 내부경계면(inner boundary face)이라 정의하며, 경계셀과 접하고 있는 면을 내부면(internal face)이라 정의하고, 각각 f_{bo} , f_{bi} 및 f_i 로 표기한다.

경계셀 c_b 의 6개의 면들 중에서 외부경계면들은 실제적인 물체의 표면이 외부 공간과 만나(레이저 빔 또는 카메라 시선이 지나가는) 부분으로 실제 물체의 표면을 근사하는 면으로 생각할 수 있고, 법선방향도 유사하게 나타난다. 이에 비해 내부경계면들은 3.3절에서 설명한 바와 같은 반사방식의 스캐너에서는 전혀 의미가 없는 표면이 된다. 그리고 경계셀이 인접하는 부분인 내부면은 일반적으로 표면을 포함하는 두 개의 셀이 만나는 부분이므로 실제 표면이 그 면을 통과하는(직교하는) 형태로 나타날 것으로 예상할 수 있다. 따라서 실세계 물체의 표면을 근사하기 위한 초기 메쉬에서는 경계셀의 내부면이나 내부경계면에 대해서는 고려할 필요가 없으며 외부경계면들만을 이용하여 추출한다.

[정의 6] 초기 메쉬(Initial Mesh)

실세계 사물 O_{real} 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합 P 로부터 O_{real} 의 표면을 근사하는 메쉬 M^p 생성을 위한 초기 메쉬는 셀 공간 C_p 의 경계셀들의 모든 경계면에 의해 $M^I = \{\forall f_{bo} \in c_b | c_b \in C_p\}$ 와 같이 정의된다.

이러한 초기 메쉬 M^I 는 측정점들의 집합 P 로 표시되는 실세계 사물 O_{real} 의 표면에 대한 하나의 단순한 근사가 되며, 대부분의 경우 O_{real} 의 토폴로지를 그대로 유지하게 된다. 물론, 겨드랑이와 같이 서로 다른 표면에서 추출된 측정점들이 매우 가깝게 위치하고 있는 경우에는 같은 표면상의 점으로 인식하는 문제가 발생할 수 있으나, 이것은 조직되지 않은 데이터에서부터 표면을 자동으로 재구성하는 대부

분의 방법에서 동일하게 발생하며, 인간의 수정을 통하지 않고서는 해결되기 어려운 문제이다. 이러한 초기 메쉬는 기존의 방법[13]과 같이 중복되어 있지 않으며, 토폴로지의 제약이 없이(다양하게 분기되거나 구멍이 있는 표면 등)[11] 임의의 토폴로지의 물체에 대해서도 적용될 수 있다. 또한 초기 메쉬의 모든 정점들은 경계셀들의 정점중 하나이며, 초기 메쉬의 모든 표면조각은 4각형 형태가 된다.

3.6 메쉬 축소 및 평활화의 반복과 삼각형 표면조각의 생성

이 후의 처리 과정은 SWBF 알고리즘[13]과 동일한데, 연속적인 축소와 평활화 과정이 수행된다. 즉 M^I 가 구해지면 먼저 축소과정이 수행되어 각 메쉬 정점을 P 에서 추출한 최단 측정점 방향으로 이동시킨다. 또한 이러한 과정에서 하나의 측정점으로 여러 개의 메쉬 정점들이 몰릴 수 있는 현상을 보완하기 위해 메쉬 평활화 과정이 수행된다. 이와 같은 축소와 메쉬 평활화 과정을 반복하면 초기 메쉬 M^I 가 O_{real} 의 실제 표면과 점점 더 가깝게 변형된다. 마지막으로 사각형 표면들을 두 개의 삼각형 조각으로 분할하면 최종적인 메쉬가 만들어진다. 축소포장의 반복 회수는 미리 지정할 수도 있고, 축소와 평활화를 통해 메쉬 정점이 움직이는 거리를 이용하여 반복하더라도 변화가 거의 없는 정도를 임계값으로 하여 자동으로 종료할 수도 있다. 실험결과 일반적으로 4~5회 이상만 반복하여도 충분히 측정점에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

3.7 방향에 따른 샘플링 조밀도 차이에 대한 보완

3.5절에서 정의한 경계면은 3차원상의 연결성을 사용하였다. 즉 셀 공간에서 $O(1)$ -인접성을 이용하여 외부셀과 내부셀을 구분하였고, 이에 따라 경계면을 정의하였다. 그러나 일반적인 반사방식의 3차원 스캐너는 보통 광원을 투사하는 방향이 완전한 3차원 방향에서 이루어지지 않는다. (그림 2)와 같은 시스템에서는 다양한 방향의 데이터를 취득하기 위해 일반적으로 광원과 센서는 고정시키고, 회전판 위에 물체를 올려 Z축을 중심으로 회전판을 돌려 여러 방향의 데이터를 추출하게 된다. 따라서 Z축 방향의 법선벡터를 갖는 표면들은 이 축과 직교하는 방향의 표면들에 비해 표면의 샘플링이 현저히 떨어질 수 밖에 없다. 이러한 특성은 전신 스캐너(whole body scanner)등 대부분의 반사방식 3차원 스캐너[2][3]에서 발생하는 공통적인 문제로, 표면 모델링 알고리즘에서 반드시 고려하여야 한다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 3.4절에서 정의된 연결성을 보완하여 2차원 관점으로 확장하였다. 즉, 셀 공간에서 연결성을 결정할 때 Z축 방향으로의 각각의 층별로 독립적으로 처리하는 방법을 사용하였다. 이에 따라, 셀 영상과 셀 영상에서의 비 경계셀의 연결성을 다음과 같이 정의하였다.

[정의 7] 셀 영상 및 2D 연결성

셀 공간 C_p 의 k 번째 층을 C_p 의 k 번째 셀 영상(cell

image)으로 정의하고 C_p^k 로 표기한다. C_p^k 상에 두 비 경계 셀 c_1^k 과 c_2^k 가 있을 때, c_1^k 에서 c_2^k 까지 에지로 인접한 (4-connected) 경로가 있는 경우 이들 두 셀이 C_p^k 에서 연결되어 있다(connected)고 정의하며, $c_1^k \sim c_2^k$ 로 표기한다.

이 경우도 마찬가지로 두 비 경계셀의 2D 연결을 막는 유일한 요인이 경계셀이며, 이러한 셀 영상과 2D 연결성을 이용하여 비 경계셀을 다음과 같이 내부셀과 외부셀로 구분한다.

[정의 8] 셀 영상에서의 내부셀(Inner Cell) 과 외부셀(Outer Cell)

셀 공간 C_p 내의 임의의 한 셀 영상 C_p^k 의 비 경계셀들 중 에서 C_p 의 최소 직육면체 B_p 와 면으로 인접한 셀을 $c_{B_p}^k$ 라고 할 때, $c_{B_p}^k \sim c^k$ 의 관계가 성립하는 모든 셀을 외부셀(Outer Cell)로 정의하고, 그 이외의 모든 셀은 내부셀(Inner Cell)로 정의한다. 외부셀은 c_{out}^k 으로, 내부셀은 c_{in}^k 으로 표기하며, 모든 외부셀은 $c_{B_p}^k \sim c_{out}^k$ 관계가 성립한다.

이후의 초기 메쉬를 만들고 축소와 평활화를 거쳐 표면을 생성하는 과정은 3.5절 및 3.6절에서와 동일하다. 실험을 통해 수학적으로 만들어진 합성데이터가 아닌 스캐너를 통해 추출한 대부분의 데이터에서 사용된 스캐너의 특성에 의해 이러한 축 방향에 따른 표면 샘플링의 차이가 나타남을 알 수 있었다. 예를 들어 (그림 4)의 남자 마네킹의 경우, 목 아랫부분(잘려진 부분)에는 샘플링 된 측정점이 전혀 없으며, 턱 아랫부분의 샘플링 또한 조밀하지 않다. 따라서 이러한 데이터에 3차원 연결성을 적용하면 마네킹 내부의 모든 셀들도 외부에서 접근이 가능해 외부셀로 정의되며, 따라서 SWBF에서와 동일하게 중첩된 표면이 만들어진다. 실험결과 이런 특성을 갖는 대부분의 3차원 스캐너로 추출한 데이터의 경우 스캐닝 방향에 따른 표면 샘플링 정도의 차이를 고려하여 2차원 연결성을 적용하는 것이 바람직하였다.

4. 실험

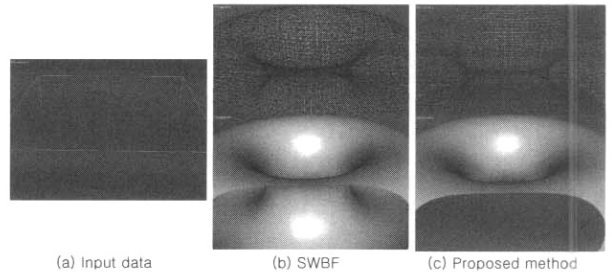
제안된 방법은 Windows-XP 운영체제하의 2.4GHz Pentium-PC 에서 구현되었는데, 모든 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성되었고, 렌더링을 위해 OpenGL 과 MFC를 이용해서 GUI를 작성하였다. 다양한 종류의 데이터가 실험에 사용되었는데 합성된(synthetic) 데이터에 대해서도 적용해 보았다.

먼저 (그림 3)는 Torus에 대한 실험 결과를 보여준다. 이 데이터는 (a)와 같이 테스트를 위해 수학적으로 생성된 점점들의 집합(합성 데이터)이며, (b)와 (c)에서 각각 SWBF와 제안된 방법을 적용하여 표면모델링 하였다. SWBF에 의한 표면에서는 표면이 측정점의 안쪽과 바깥쪽 방향으로 중첩되어 나타남을 알 수 있으며, 제안된 방법에 이러한 문제가 해결된 것을 확인할 수 있다. 이 데이터의 경우 방향에 따

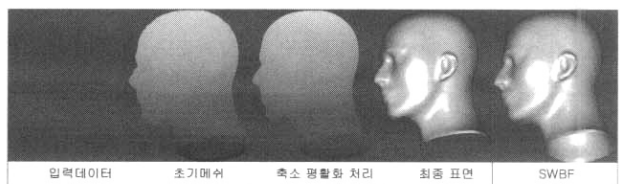
른 표면 샘플링이 차이가 없이 균일하고, 이에 따라 3.5절의 3차원 연결성을 이용하여 재구성되었는데, 내부셀과 외부셀의 구분에 3차원 경계 채움(boundary fill) 알고리즘이 사용되었다.

(그림 4)는 남자 마네킹에 대한 표면 모델링 결과를 보여주고 있는데, 입력 데이터, 초기메쉬 생성결과, 축소와 평활화 과정을 4번 반복 처리한 결과 및 최종 표면을 Gouraud 음영법으로 렌더링 영상을 순차적으로 보여주고 있으며, 마지막에 SWBF를 사용한 결과를 보여주고 있다. SWBF 알고리즘의 처리결과에서 볼 수 있듯이 마네킹 표면의 안쪽에서도 표면이 중복하여 발생하였음을 알 수 있고 제안된 방법에서는 이 문제가 해결되었다. 모델링 결과에서 목 아랫부분과 턱 부분에서 표면이 열려있는 것을 볼 수 있는데, 스캐너의 특성에 의해 방향에 따른 표면 샘플링의 차이가 나타난 결과이다. 따라서 Z축을 제외한 X, 와 Y축 방향으로 3.7절에서 설명한 2차원 연결성을 적용하였으며, 2D 경계 채움 알고리즘을 사용하여 구현하였다. 이렇게 표면이 열린 부분은 실제로 스캐너가 표면을 샘플링하지 못한 부분이며, 기존의 다른 방법들에서도 대부분 같은 형태의 표면을 만든다. SWBF 알고리즘의 경우 항상 닫힌 표면을 만들기 는 하지만, 턱이나 목 아랫부분의 표면을 채우는 것이 아니라 표면을 중복시켜 전체적으로 닫힌 표면을 만들며, 결국 공간이 열리는 것은 마찬가지이므로 바람직한 표면이라고 볼 수 없다.

(그림 5)와 (그림 6)은 각각 Happy Buddha와 장군상 데이터에 대한 표면 모델링 결과를 보여주고 있으며, <표 1>에서 최종적으로 발생된 표면조각의 개수와 정점의 수를 SWBF 알고리즘과 비교하여 보여주고 있다. 모든 데이터에서 안쪽 표면이 더 이상 발생하지 않음에 따라 기존의 방법에 비해 표면의 정밀도는 동일하면서 정점의 개수와 표면조각의 개수가 30~40% 정도 감소함을 알 수 있다.



(그림 3) Torus(합성 데이터)에 대한 표면 재구성 결과: (a) 입력데이터, (b) SWBF 알고리즘에 의한 표면, (c) 제안된 방법에 의한 표면 재구성



(그림 4) 남자마네킹 데이터에 대한 모델링 결과



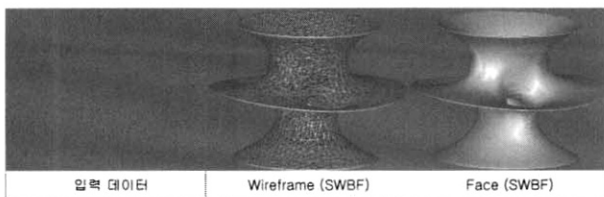
(그림 5) 제안된 방법에 의한 Happy Buddha 모델링 결과



(그림 6) 제안된 방법에 의한 장군상 데이터 모델링 결과(face, wireframe, point)

〈표 1〉 각 데이터에 대한 표면 재구성 결과

구분	데이터	Torus (35)	남자마네킹 (50)	Happy Buddha (110)	장군상 (110)
		입력	측정점수	40,000	543,652
SWBF	메쉬정점수	7,632	14,505	41,992	55,235
	삼각표면수	15,264	29,028	84,224	110,984
제안된 방법	메쉬정점수 (감소율)	4,912	8,592	25,285	35,303
		35.6%	40.8%	39.8%	36.1%
	삼각표면수 (감소율)	9,824	17,072	50,492	69,768
		35.6%	41.2%	40.1%	37.1%



(그림 7) Hypersheet 데이터 모델링 결과

〈표 2〉 장군상에 대한 처리시간 (셀분할 크기:110셀(Z축), 축소포장:4회, 단위:초)

모델링방법	초기메쉬 생성	축소	평활화	축소포장 횟수	전체 처리시간
SWBF	0.38	3.17	0.04	4	13.22
제안된 방법	6.27	1.61	0.02	4	12.79

(그림 7)은 Hypersheet에 대한 SWBF 알고리즘의 처리결과를 보여주고 있다. 이렇게 수학적으로 생성된 물체를 중에서 내부영역(또는 체적)이 없고 얇은 면으로만 이루어진 데이터의 경우에는 하나의 측정점에서 양쪽으로 모두 표면이 만들어지는 것이 더 바람직하다. 이는 실세계의 물체를 직접 3차원 스캐닝해서 구하기가 어려운 데이터로, 이런 경우 제안된 방법의 적용이 바람직하지 않으며 SWBF 알고리즘을 이용해 원하는 표면을 재구성 할 수 있다.

〈표 2〉에서 장군상 데이터에 대한 처리시간을 보여주고 있는데, 주로 초기 메쉬를 생성하는 부분과 축소과정에서 많은 시간이 소비된다. 제안된 방법은 특히 비 경계셀을 외부셀과 내부셀로 구분하기 위해 경계 채움 알고리즘이 처리되므로 초기메쉬 생성에 비교적 많은 시간이 걸리지만, 표면 개수의 감소에 따라 이후의 축소과정에서 시간이 많이 줄어든다. 결과적으로 축소와 평활화를 각각 4번 반복하였을 때 두 방법이 전체적으로 비슷한 처리시간을 나타내는데, 기존의 다른 방법들[8][11][12]이 반복적인 전역탐색이 필요해 최소한 수 분이상이 소요되는데 비해 매우 효율적으로 표면을 생성함을 알 수 있다. 이러한 다양한 실험 결과를 통해 제안된 방법이 SWBF 알고리즘에서 발생하는 중복문제를 매우 효율적으로 극복할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 측정점간의 상관관계가 주어지지 않는 조직되지 않은 3차원 데이터로부터 표면모델을 재구성하기 위한 방법을 제안하였다. 특히 표면 축소포장에 기반한 기존의 SWBF 알고리즘에서 발생하는 표면의 중복문제를 제거하였고, 이를 해결하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서 셀 공간의 비 경계셀을 외부셀과 내부셀로 구분하는 방법을 제시하였고, 경계셀과 외부셀이 인접하는 면을 경계면으로 정의하여 초기 메쉬에서부터 바깥쪽과 안쪽으로 중첩된 표면이 발생하는 것을 막고자 하였다. 또한 각 축에 따른 표면 데이터 샘플링 정밀도 차이를 보완하기 위해 연결성의 정의를 2차원으로 확장하여 실제 3차원 스캐너로부터 추출되는 데이터에 대해서도 안정적인 표면을 생성할 수 있도록 하였다. 실험을 통해 제안된 방법이 SWBF의 문제점인 중첩된 표면의 생성을 해결하고 불필요한 내부면을 없애에 따라 30%~40%정도 개선된 표면조각의 수를 나타냄을 알 수 있었으며, 측정점들간의 관계를 알 수 없는 조직되지 않은 3차원 데이터로부터의 표면 재구성에 매우 안정적이고 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. Curless and M. Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images," In Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings), pp.303-312, August 1996.
 [2] Cyberware co., "WB4 Whole Body Color 3D Scanner,"

www.cyberware.com

- [3] 최영규, 구분기, 최병태, "인체 모델 생성을 위한 등고선 삼각분할 기반의 3차원 전신 스캐너 개발," 정보과학회논문지 30권, 7-8호, pp.397-407, 2003년 8월.
- [4] W. Lorensen and H. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," In Computer Graphics(SIGGRAPH 87 Proceedings), volume 21, pages 163-169, July 1987.
- [5] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법," 정보과학회논문지 27권, 3호, pp.235-244, 2000년 3월.
- [6] Y. Choi, "Surface reconstruction from a set of wire-frame contours," Ph.D thesis. Korea Advanced Institute of Science and Education, 1995.
- [7] Y. Choi, "Band partitioning algorithm for surface reconstruction from planar contours," Electronics Letters, Vol. 35, No. 20, pp.1713-1714, Sep, 1999.
- [8] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. "Surface reconstruction from unorganized points," SIGGRAPH '92 Proceedings, pp.71-78, July 1992.
- [9] J. Boissonnat and F. Cazals "Smooth surface reconstruction via natural neighbour interpolation of distance functions," In Symp. on Computational Geometry, pp.223-232. ACM, 2005.
- [10] L. Kobbelt, J. Vorsatz, U. Labsik, and H. Seidel. "A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces," In Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics 1999, volume 18, 3, pp. 119-129, September 1999.
- [11] W. Jeong and C. Kim, "Direct Reconstruction of Displaced Subdivision Surface from Unorganized Points," Graphical Models, vol. 64, issue 2, pp.78-93, Mar. 2002.
- [12] A. Sharf, T. Lewiner, A. Shamir, L. Kobbelt and D. Cohen, "Competing Fronts for Coarse - to - Fine Surface Reconstruction," In Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics 2006, volume 25, Issue 3, pp.389-398.
- [13] B. Koo, Y. Choi, C. Chu, J. Kim, and B. Choi, "Shrink-Wrapped Boundary Face Algorithm for Mesh Reconstruction from Unorganized Points", ETRI Journal, vol.27, no.2, pp.235-238, Apr. 2005.
- [14] 박은진, 최영규, "Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용한 단층영상으로부터의 표면 재구성," 정보과학회논문지 34권, 1호, pp.28-37, 2007년 2월.
- [15] J. Udupa, S. Srihari, and G. Herman, "Boundary Detection in multi-dimensions," IEEE Transaction on PAMI, vol. 4, no. 1, pp.41-50, 1982.



박은진

e-mail : ejinpark@kut.ac.kr

1991년 단국대학교 전자계산학과
학사

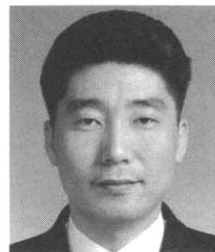
2004년 한국기술교육대학교 전기전자공학과
공학석사

2004년~현재 한국기술교육대학교
전기전자공학과 박사과정

1990년~1998년 한라공조, 쌍용자동차, 쌍용정보통신 연구원

2001년~현재 삼성멀티캠퍼스 강사

관심분야: 컴퓨터그래픽스, 영상기반모델링, 가상현실 저작도구 등



구분기

e-mail : bkkoo@etri.re.kr

1995년 경북대학교 전자공학과 학사

1997년 경북대학교 전자공학과 공학석사
2004년 경북대학교 전자공학과 공학박사

1997년~1998년 시스템공학연구소(SERI)
연구원

1998년~현재 한국전자통신연구원(ETRI)

디지털콘텐츠연구단 CG기반기술연구팀 팀장

관심분야: 컴퓨터그래픽스, 3D Imaging, 비사실적 애니메이션,
HCI 등



최영규

e-mail : ykchoi@kut.ac.kr

1989년 경북대학교 전자공학과 학사

1991년 KAIST 전기 및 전자공학과
공학석사

1995년 KAIST 전기 및 전자공학과
공학박사

1995년~1999년 LG산전연구소 영상연구실 선임연구원

1999년~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수

관심분야: 컴퓨터그래픽스, Surface Modeling, 가상현실,
영상인식 등