

비정렬 3차원 측정점으로부터의 표면 재구성을 위한 경계면 축소포장 알고리즘

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

최영규[†] 구본기^{**} 진성일^{***}
(Young-Kyu Choi) (Bon-Ki Koo) (Sung-Il Chien)

요약 정렬되지 않은 3차원 측정점들로부터 이들을 근사하는 표면을 재구성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 *경계면 축소포장 방식*에 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 효과적임을 확인할 수 있었다.

키워드 : 메쉬 생성, 비정렬 3차원 측정점, 축소포장, 토폴로지 제한, 표면재구성

Abstract A new surface reconstruction scheme for approximating the surface from a set of unorganized 3D points is proposed. Our method, called *shrink-wrapped boundary face (SWBF)* algorithm, produces the final surface by iteratively shrinking the initial mesh generated from the definition of the *boundary faces*. Proposed method surmounts the genus-0 spherical topology restriction of previous shrink-wrapping based mesh generation technique, and can be applicable to any kind of surface topology. Furthermore, *SWBF* is much faster than the previous one since it requires only local nearest-point-search in the *shrinking* process. According to experiments, it is proved to be very robust and efficient for mesh generation from unorganized points cloud.

Key words : mesh generation, unorganized 3D data points, shrink-wrapping, topology restriction, and surface reconstruction

1. 서론

실세계의 사물들에 대한 형태 재구성에 관한 연구가 최근 매우 활발히 진행되고 있다. 특히 멀티미디어 콘텐츠의 제작과 깊은 관련이 있는 컴퓨터 그래픽스와 가상 현실 분야에서 사물에 대한 3차원 표면 모델의 재구성에 대한 요구와 관심이 폭발적으로 증가하고 있다. 이러

한 3차원 표면모델의 생성을 위한 과정은 크게 *데이터의 취득 단계*와 *표면 재구성 단계*로 나눌 수 있다. 데이터의 취득단계는 실물에서부터 3차원 데이터를 샘플링하는 과정을 말하며, 표면 재구성 단계는 취득된 3차원 데이터로부터 표면 메쉬를 생성하는 과정을 의미한다.

일반적으로 3차원 데이터의 취득은 다양한 능동형 및 수동형 스캐너를 사용하거나 CMM(Coordinate Measuring Machine)이라 불리는 3차원 디지털이저 등을 사용하여 이루어진다. Curless는 이러한 다양한 3차원 형태 측정 방법을 분류하였는데[1], CMM과 같이 물체의 표면에 접촉하여 데이터를 측정하는 방법과 비 접촉식 측정법으로 먼저 분류하였고, 비 접촉식 방법들을 다시 CT(Computerized Tomography)와 같은 투과방식(transmissive)과 반사방식(reflective)으로 나누었다. 반

[†] 중신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
ykchoi@kut.ac.kr

^{**} 비 회원 : 한국전자통신연구원 디지털콘텐츠연구단 CG기반기술 연구팀 연구원
bkkoo@etri.re.kr

^{***} 비 회원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수
sichien@ee.knu.ac.kr

논문접수 : 2004년 2월 10일

심사완료 : 2004년 7월 16일

사방식은 다시 광원과 카메라를 사용하는 광학기반 측정법과 초음파나 레이더와 같은 비 광학 측정방식으로 세분하였다. 일반적으로 그래픽스 및 컴퓨터 비전 분야에서는 광학기반의 반사형 3차원 측정 방법이 가장 활발하게 연구되고 있다[2,3].

추출된 3차원 정보는 취득 방법에 따라 다양한 형태로 나타나는데, CT와 같은 투과식 측정장치를 통해 취득된 3차원 정보는 단층 영상의 형태로 주어지며 마칭 큐브(marching cube)라 불리는 대표적인 방법 등을 통해 표면 모델을 생성하게 된다[4,5]. 등고선의 형태로 3차원 정보가 얻어지는 경우 등고선 삼각분할방식(contour triangulation)에 의해 표면을 재구성하며[6,7], 거리영상(range image)의 형태로 나타나는 경우 이웃 화소들을 삼각형으로 묶는 방법으로 표면을 재구성할 수 있다. 이러한 데이터는 어떤 측면에서는 정렬되어(organized) 있다고 생각할 수 있는데, 예를 들어, 등고선의 경우 정점들이 순서적으로 주어지며, 거리영상은 인접한 측정점들 간의 이웃관계가 주어지는 등 데이터들 사이에 유용한 상관관계가 존재하기 때문이다. 이와 달리 취득된 3차원 측정점들 간에 이러한 상관관계가 없는 경우는 표면 모델 생성에 필요한 정보가 제한적이므로 안정적으로 메쉬를 생성하는 것이 매우 어렵다. 일반적으로 이러한 데이터를 정렬되지 않은(unorganized) 데이터 (또는 측정점)이라고 부르는데, 3차원 디지털 이미지에 의해 수동으로 추출된 3차원 좌표점들이 가장 대표적인 예이다. 본 논문에서는 이러한 정렬되지 않은 3차원 좌표로부터 표면을 재구성하는 새로운 방법을 소개한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 본 논문과 관련된 기존 방법들을 소개하며, 3장에서 제안된 축소포장에 기반한 비 정렬 3차원 데이터의 표면 모델링 방법을 자세히 소개한다. 4장에서는 다양한 3차원 데이터에 대한 실험 결과를 보이며 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

2. 기존 연구

현재까지 정렬되지 않은 3차원 측정점에서부터 표면 메쉬를 재구성하기 위한 몇 가지 방법들이 제안되어 왔다. 그 중 가장 대표적인 방법이 Hoppe등이 제안한 알고리즘으로, 먼저 임의의 측정점에서부터 가장 가까운 여러 개의 측정점들을 구해서 각 측정점의 접평면(tangent plane) 방향을 추측하고 부호화된 거리(signed distance)의 개념을 도입하여 볼륨기반 재구성 방법(volume-based reconstruction)을 적용하여 표면 메쉬를 재구성하고자 하였다[8]. 그러나 이 방법은 각 측정점에 대한 접평면을 추산하는데 시간이 많이 걸리는 단

점이 있다. 또한 표면이 복잡하거나, 스캐너의 불안정성으로 인해 측정점에 잡음이 포함되어 있는 경우 등에 대해서는 가까운 측정점들 사이의 법선 벡터가 매우 상이하게 나타날 수 있으며, 이에 따라 매우 자연스럽게 얻은 결과를 만들어 낼 수 있다는 단점이 있다.

최근 Seidel등은 다각형 메쉬의 표면을 세분 표면(subdivision surface)이라 불리는 표면으로 재구성하기 위한 방법으로 축소포장(shrink-wrapping) 방식의 메쉬 재구성 방법을 제안하였는데, 표면 재구성에 처음으로 축소포장의 개념을 도입하였다[9]. 그러나 이 방법은 입력이 다각형 메쉬로 주어지며, 반복적인 최적화 방식을 사용하여 기본 메쉬(base mesh)를 분할하여 세분 표면을 만들어 입력 메쉬를 근사하고자 하였다.

이러한 개념을 확장하여 Jeong등은 입력 데이터가 다각형 표면이 아닌 정렬되지 않은 측정점에 대해 축소포장의 개념으로 메쉬를 재구성하였다[10]. 그들은 먼저 모든 측정점들을 포함하는 최소 직육면체(minimum enclosing box, 또는 bounding box)을 구하고, 이 직사각형의 6개의 면을 임의의 정밀도로 균일하게 분할하여 초기 메쉬를 생성하였다. 이때 분할의 정밀도는 물체의 크기나 복잡도에 따라 적당하게 선택하였다. 또한 메쉬의 각 정점들을 가장 가까운 측정점 방향으로 이동시키는 축소(shrink) 단계를 통해 초기 메쉬가 점점 더 실제 표면의 형태를 근사할 수 있도록 하였다. 이러한 축소 과정은 메쉬의 정점들을 한쪽으로 편중시킬 수 있으며 이를 완화시키기 위해 평활화 과정을 추가로 처리하여 정점들이 가능한 한 고르게 분포할 수 있도록 하였다. 이러한 축소와 평활화 과정을 반복적으로 적용함으로써 입력으로 주어지는 물체의 표면 모델을 구하고자 하였다. 이러한 메쉬 생성 방법은 근본적으로 구형 토폴로지(Genus-0 spherical topology)에는 적용할 수 있지만, 환형(ring shape)과 같이 물체의 내부에 구멍이 있는 경우에는 적용될 수 없다. 초기 메쉬가 구(sphere)와 같이 표면에 구멍을 갖지 않는 형태이므로 이를 아무리 축소하고 평활화하더라도 도너츠와 같은 비구형 토폴로지의 표면을 생성할 수 없기 때문이다. 또한 메쉬의 각 정점에서부터 최단거리 측정점을 찾는 과정에서 하나의 정점에서 모든 측정점과의 거리를 계산하는 전역 탐색이 이루어져야 하며 결과적으로 처리시간이 매우 길어질 수밖에 없다.

본 논문에서는 정렬되지 않은 정점들로부터 메쉬를 생성하는데 기본적으로는 축소포장의 개념을 사용하면서 기존의 문제들을 해결하기 위한 새로운 방법을 제안하는데, 이러한 축소 포장의 개념을 임의의 토폴로지에 대해서도 적용할 수 있도록 하며 처리시간을 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 결과적으로 제안된 방

법은 표면에 다수의 구멍이 있는 임의의 토폴로지의 물체에 대해서도 적용이 가능하며, 최단 측정점 탐색에서 전역 탐색이 필요없이 지역 탐색만으로 최적의 최단 측정점을 추출할 수 있다. 실험을 통해 제안된 표면 재구성 알고리즘이 측정점들간의 관계를 알 수 없는 정렬되지 않은 3차원 점들에 대한 표면 재구성에 매우 안정적이고 효과적임을 확인할 수 있었다.

3. 경계면 축소방식의 표면 재구성 알고리즘

표면을 재구성 하고자 하는 실세계 사물을 O_{real} 이라 하자. 이것을 3차원 스캐너로 자동으로 추출하거나, CMM이라 불리는 3차원 디지털이저를 사용하여 표면을 샘플링 하면 O_{real} 의 표면에서 추출된 측정점들의 집합 $P = p_1, p_2, \dots, p_n, p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 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 데이터라고 정의한다. 또한 이러한 실세계 표면의 샘플링은 비교적 균일하게 이루어져 있다고 가정하는데, 이것은 비슷한 표면 넓이에 대해 비슷한 수의 샘플링이 이루어진 것을 의미한다. 샘플링이 균일하지 않으면 O_{real} 의 표면들 중에서 어떤 부분에서는 매우 조밀하게 샘플링되어 많은 측정점들이 발생하고 다른 부분에서는 표면이 넓는데도 불구하고 매우 적은 수의 측정점이 발생할 수 있다. 측정점들간의 상관관계가 주어지지 않고 물체의 구조에 대한 정보가 없는 상태에서 지나치게 비균일하게 샘플링된 데이터에 대해서는 어떠한 재구성 방법들도 좋은 표면을 생성하기가 어렵다.

이렇게 임의의 실세계 사물에 대한 정렬되지 않은 데이터 P 가 주어졌을 때, 표면 재구성 알고리즘은 P 에서부터 이를 근사하는 다각형 메시 $M^P \approx P$ 를 생성하는 과정으로 정의된다. 이를 위해 제안된 표면 재구성 알고리즘은 전체 공간의 셀분할, 경계면 정의와 초기메시의 생성, 정점 축소, 그리고 평활화의 네 단계를 거쳐 진행 된다.

3.1 공간의 셀 분할

측정점 P 가 주어지면, 먼저 이를 포함하는 최소 직육면체를 구한다. 이것은 전체 공간에서 불필요한 부분을 배제하고 물체가 들어있을 공간에 대해서만 처리하기 위해 구하는데, 이를 위해 먼저 P 내의 모든 3차원 좌표들에 대해서 X, Y 및 Z 축 방향으로 최대값과 최소값 ($\min_x, \max_x, \min_y, \max_y, \min_z, \max_z$)을 구하게 된다. 이들 각 방향의 최소 및 최대값을 이용해서 3차원 공간상의 6개의 평면($x = \min_x, x = \max_x$ 등 각 좌표

축 방향의 평면 2개씩) 정의할 수 있으며, 이를 이용하여 다음과 같은 6개의 부등식으로 직육면체 B_P 를 추출하게 된다.

$$B_P = \{ (x, y, z) | \min_x < x < \max_x, \min_y < y < \max_y, \min_z < z < \max_z \} \quad (1)$$

다음으로 최소 직육면체를 임의의 크기의 체적소인 셀(cell)로 균등하게 분할하는 과정이 이어지는데, 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 체적으로 분할한 공간을 셀 공간(Cell Space) C_P 라 정의한다. 또한 이때의 각각의 체적소를 셀(Cell)이라 정의하며 c 또는 $c(i, j, k)$ 이라 표기한다. C_P 는 다음과 같이 표기된다.

$$C_P = \{ c(i, j, k) | i=0, 1, \dots, n_x, j=0, 1, \dots, n_y, k=0, 1, \dots, n_z \} \quad (2)$$

이때 n_x, n_y 및 n_z 는 각각 X, Y 및 Z 축 방향으로의 분할의 정밀도를 나타낸다.

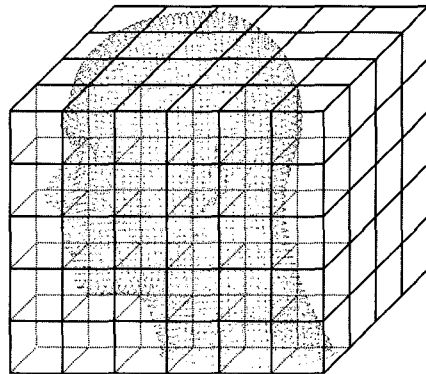


그림 1 셀 공간의 예

그림 1은 하나의 셀 공간의 예를 보여주고 있는데, 이러한 체적의 분할을 위해서는 3방향의 서로 직교하는 평면들의 집합을 사용한다. X 축 방향을 예로 들면, 정밀도 n_x 으로 분할하고자 할 때, X 축 방향으로의 최대값 \max_x 와 최소값 \min_x 사이를 n_x 개로 균일하게 나눌 수 있는데, 이때 i 번째 분할 평면의 X 축 좌표 x_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$x_i = \min_x + \frac{\max_x - \min_x}{n_x} i, \quad i = 0, 1, \dots, n_x \quad (3)$$

이렇게 X 축 방향의 분할에서 최소 직육면체 B_P 는

n_x+1 개의 평면들 ($x = x_i, i = 0, 1, \dots, n_x$)에 의해 n_x 개로 분할되며, 같은 방법으로 Y 와 Z 축에 대해서도 n_y 및 n_z 개의 공간으로 분할하면 B_P 는 $n_x n_y n_z$ 개의 셀(cell)들의 집합인 셀 공간으로 변환된다.

이때, 각 축 방향의 셀 분해능(또는 분할의 정밀도)의 결정은 최종적인 메쉬의 품질에 영향을 주게 되므로 매우 신중하게 결정하여야 한다. 예를 들어 측정점들이 매우 조밀하게 샘플링 된 데이터의 경우 비교적 단위셀의 크기를 보다 작게(정밀도 n 을 크게)하여 보다 정밀한 표면이 만들어질 수 있도록 해야 한다. 이에 비해 측정점들의 간격이 비교적 먼 경우에는 정밀도를 낮춰서 셀의 크기를 키워야 하는데, 물체 표면의 측정점의 샘플링이 드문드문 이루어진 데이터의 경우 분해능이 너무 높으면 측정점이 샘플링 되지 않은 표면 부분에 구멍(hole)이 발생할 가능성이 많아진다.

3.2 경계면 정의 및 초기 메쉬의 생성

그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 하나의 셀 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 다음과 같이 정의한다.

정의 2. 경계셀(Boundary Cell)과 외부셀(Outer Cell)

셀 공간 C_P 내의 셀 들 중에서 측정점을 포함하는 셀을 경계셀(Boundary cell)이라 정의하고 c_b 로 표기한다. 이와는 반대로 측정점을 포함하지 않는 셀을 외부셀(outer cell)이라 정의하며 c_o 로 표기한다.

경계셀은 표면에서 샘플링된 측정점을 최소 하나 이상 포함하게 되므로 그 내부에서 어떠한 형태로든지 재구성할 표면이 존재해야 한다고 볼 수 있다. 이와는 반대로 외부셀들은 물체의 원래의 표면과는 어느 정도 거리가 있는 부분들이라 볼 수 있는데, 실세계 물체의 내부 공간과(예를 들어 그림 1의 실제 마네킹 내부의 공간) 물체 밖의 공간이 이에 해당하게 되며, 따라서 표면이 만들어지지 않는 공간이 된다. 이렇게 셀들을 외부셀과 경계셀 두 가지로 구분한 것은 처리를 위해 입력된 데이터 P 에 포함된 측정점들이 모두 물체의 표면만에 대한 정보이며 따라서 물체의 내부와 외부 구분할 수 없기 때문인데, 결국 의미상의 내부셀과 외부셀을 모두 외부셀로 규정한 것이다. 이러한 외부셀들은 물체의 내부에 위치하고 있거나 외부에 위치하고 있으므로 표면을 생성하는데는 아무런 기여를 하지 못하며, 측정점들을 포함하는 경계셀들 안에서만 물체의 표면이 발생하게 된다. 따라서 물체의 표면을 근사하는 메쉬를 생성하기 위해서는 이러한 경계셀들에 대해서만 고려하게 된다.

3차원 공간상에서 하나의 셀에는 6개의 면이 있고, 따라서 면으로 접하는 6개의 이웃 셀들이 있다. 그림 2는 셀의 인접성의 예를 보여주는데, O(1)-인접성은 임의의 셀에 면으로 접하는 셀들을 이웃셀로 정의하는 것을 말하며, O(2)는 면이나 에지를 공유하는 셀까지를 이웃으로 정의하며, O(3)는 꼭지점을 공유하는 셀들까지도 이웃으로 인정한다. 따라서 임의의 셀의 O(1) 이웃셀의 수는 6개, O(2) 이웃셀은 18개, O(3) 이웃셀의 수는 26개가 된다. 이러한 셀의 인접성을 바탕으로 경계면을 다음과 같이 정의한다.

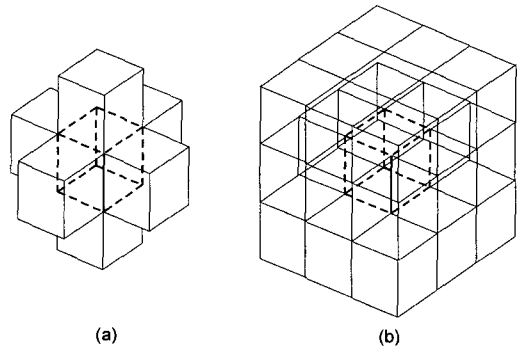


그림 2 셀의 인접성: (a) O(1)-인접, (b) O(3)-인접

정의 3. 경계면(Boundary Face)

임의의 경계셀 c_b 는 6개의 면(face)이 있으며, 따라서 O(1)-인접성으로 인접한 6개의 이웃셀들이 있다. c_b 의 6개의 면들 중에서 외부셀과 접하고 있는 면을 경계면(Boundary Face)이라 정의하며, 경계셀과 접하고 있는 면을 내부면(Internal Face)이라 정의하고, 각각 f_b 와 f_i 로 표기한다.

임의의 경계셀의 6개의 면들 중에서 경계면들은 실제적인 물체의 표면이 외부셀과 만나는 부분으로 생각할 수 있으므로 실제 표면에 가까운 면이 될 것이며 이 면의 방향이 그 셀에 내재되어 있는 실제 표면의 방향과 유사할 것으로 생각할 수 있다. 내부면들은 표면을 포함하는 두개의 셀이 만나는 부분이므로 실제 표면이 그 면을 통과하는 형태로 나타날 것으로 예상할 수 있다. 따라서 실세계 물체의 표면을 근사하기 위한 초기 메쉬에서는 경계셀의 내부면에 대해서는 고려할 필요가 없이 실제 표면과 유사한 형태로 나타나는 외부면들만을 고려하여 다음과 같이 정의한다.

정의 4. 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 메쉬 M^I 는 셀 공간 C_P 의 경계셀들의 경계

면을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$M^i = \{\forall f_b \in c_b | c_b \in C_p\} \quad (4)$$

즉 초기 메쉬 M^i 는 C_p 의 모든 경계셀들에 대한 모든 경계면들로부터 정의된다.

이러한 초기 메쉬 M^i 는 측정점들의 집합 P 로 표시되는 실세계 사물 O_{real} 의 표면에 대한 하나의 단순한 근사 형태가 되며, 대부분의 경우 O_{real} 의 토폴로지를 그대로 유지하게 된다. 물론, 거드랑이와 같이 서로 다른 표면에서 추출된 측정점들이 매우 가깝게 위치하고 있는 경우에는 같은 표면으로 인식하는 등의 토폴로지가 달라질 수 있는데, 이것은 비정렬 데이터에서부터 표면을 자동으로 재구성하는 방법에서 발생하는 공통적인 문제이며, 인간의 수정을 통하지 않고서는 자동으로 처리할 수 없는 문제이다. 이러한 초기 메쉬는 항상 닫혀(closed) 있으며, 토폴로지의 제약이 없이(다양하게 분기되거나 구멍이 있는 표면 등) 임의의 토폴로지의 물체에 대해서도 적용될 수 있다. 메쉬의 모든 정점들은 경계셀들의 정점중 하나이며, 메쉬의 모든 표면조각은 4각형 형태가 된다.

이 후의 처리 과정은 기존의 방법들[9][10]과 유사하며, 연속적인 축소와 평활화 과정이 수행되는데, 이러한 과정을 통해 O_{real} 의 실제 표면에 더 가깝도록 변형된다.

3.3 메쉬 정점의 축소(Shrinking process)

초기 메쉬 M^i 가 구해지면 먼저 축소과정이 수행되는데, 이는 메쉬의 각 정점들을 P 내의 측정점들의 방향으로 이동시키는 과정이다. 즉, 초기 메쉬 M^i 를 구성하는 각 정점 q 에 대해 P 내의 모든 측정점들까지의 거리를 계산하여 가장 가까운 측정점을 찾고 그 방향으로 정점을 이동시킨다. 이 때, 기존의 방법에서는 P 내의 모든 측정점들과의 거리를 계산해야 하는 전역 탐색이 필요한데, 제안된 방법에서는 q 가 포함된 셀과 이와 $O(3)$ 로 인접하는 26개의 이웃셀(면으로 인접하는 6개의 셀과, 변으로 인접하는 12개의 셀, 그리고 꼭지점으로 인접하는 8개의 셀) 내에 있는 측정점들과의 거리만을 계산하면 된다. 이들 27개의 셀들 안에 최소한 하나 이상의 측정점이 반드시 존재하며, 이렇게 추출한 측정점이 전체 측정점에서(전역탐색) 구한 최단거리 측정점과 항상 동일하기 때문이다(기존의 방법 [10]에서는 측정점과 상관없이 최소직육면체로 초기메쉬가 만들어지며, 초기메쉬의 임의의 정점에 대해 $O(3)$ -인접한 셀에 측정점이 하나 이상 있다는 보장이 전혀 없고, 따라서 매번 전역탐색을 할 수 밖에 없다. 그림 7 참조).

최단 거리의 측정점이 결정되면 메쉬의 정점을 그 방향으로 이동하는데 이것은 초기 메쉬 M^i 를 축소시켜

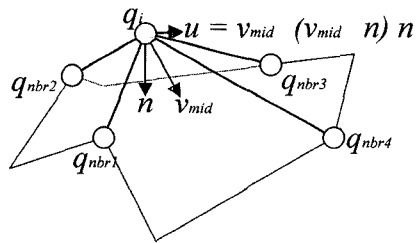
O_{real} 의 실제 표면과 보다 근사해 지도록 하게 된다. 메쉬 정점의 이동은 원래 메쉬의 정점과 최단 측정점간의 선분상의 임의의 위치로 옮기게 된다. 이동할 메쉬의 정점을 q_i 라고 하고 이 정점의 최단 측정점을 p_{*arest} 라고 하면, 메쉬 정점의 이동은 다음과 같이 이루어진다.

$$q_i \leftarrow q_i + \alpha(p_{*arest} - q_i) \quad (5)$$

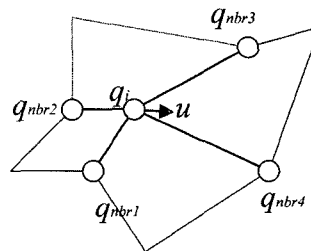
이때, 계수 α 는 이동의 정도를 나타내며 0에서 1사이의 값을 갖는다. 이 값이 1이면 메쉬 정점을 바로 최단 측정점으로 옮기는 것을 의미하는데, 이것은 같은 측정점에 여러 개의 메쉬 정점이 모이게 될 수 있으며 표면이 접히는 문제를 발생시킬수도 있으므로 추가적인 평활화 과정을 불가하게 할 수 있다. 또한 이 값이 너무 작으면 초기 메쉬가 측정점으로 수렴해 가는 속도가 너무 느려 처리시간이 많이 걸릴 수 있다는 단점이 있다. 보통 이 값은 0.5 정도를 사용하게 된다.

3.4 메쉬 평활화(Smoothing process)

메쉬 정점의 축소과정에서 적당한 α 값을 사용 하더라도 비교적 측정점이 적게 분포되어 있는 부분에서는 하나의 측정점 방향으로 여러 개의 메쉬 정점들이 몰리게 되는 현상이 발생할 수 있다. 예를 들어 그림 3의 경우 정점 q_i 가 q_{nbr3} 과 q_{nbr4} 보다는 q_{nbr1} 과 q_{nbr2} 쪽으로 더 가깝게 치우쳐 있는데, 이러한 정점들이 한쪽으로 쏠리는 현상은 전체 표면의 품질을 떨어뜨리게 된다. 복잡한 표면에 많은 정점들이 사용되는 것은 의미가 있지만 일반적으로 복잡도가 비슷한 표면의 경우에는 전체 표면



(a) Side view



(b) Top view

그림 3 메쉬 정점의 평활화 방법의 예

에 대해 골고루 메쉬의 정점들이 분포하는 것이 더 바람직하다. 따라서 이러한 메쉬 정점들이 국부적으로 하나의 측정점들로 편중시키는 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. 임의의 메쉬 정점 q_i 에 대해서, 먼저 이 정점과 이웃하는 n 개 (그림 3의 경우 4개)의 이웃 정점 $q_{nbr1}, q_{nbr2}, q_{nbr3}, q_{nbr4}$ 를 구하고 이들의 중심까지의 벡터 v_{mid} 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{mid} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (q_{nbrj} - q_i) \quad (6)$$

메쉬 정점 q_i 를 이동벡터 v_{mid} 만큼 단순하게 이동하는 것은 정점들의 평활화는 되지만 표면의 축소 현상을 일으키게 된다. 즉 평활화 과정이 처리될 때 마다 전체 물체의 크기가 점점 줄어드는 문제점을 일으키게 된다. 따라서 이러한 정점의 이동은 표면의 접선 방향으로만 발생하도록 최종 이동 벡터 u 를 다음과 같이 구하고, 메쉬 정점 q_i 를 다음과 같이 평활화 한다.

$$u = v_{mid} - (v_{mid} \cdot n)n \quad (7)$$

$$q_i \leftarrow q_i + \lambda u \quad (8)$$

이때 n 은 메쉬 정점 q_i 의 법선 벡터로 4개의 인접 정점들에 의해 구해지는 삼각 표면의 법선벡터를 이용해 구해지며, λ 는 평활화의 정도(0~1)를 나타내는데, 이 값이 크면 보다 더 평활화 된 결과는 얻을 수 있으나 움푹 들어간 부분이나 튀어나온 부분의 모델링이 부자연스러워 질 수 있고, 이 값이 너무 작으면 평활화의 효과가 줄어들게 된다. 보통 이 값은 0.2~0.4 정도로 사용한다. 이러한 방법으로 축소된 메쉬를 평활화 함으로써 국부적으로 메쉬 정점들이 하나의 측정점에 몰리게 되는 현상을 크게 완화시킬 수 있다.

3.5 메쉬 축소 및 평활화의 반복과 삼각형 표면조각의 생성

이와 같은 축소 과정과 메쉬 평활화 과정을 반복하면 초기 메쉬 M^1 가 O_{real} 의 실제 표면과 점점 더 가까워지게 된다. 그러나 반복 회수를 많이 한다고 해서 보다 더 실제 물체 표면과 가깝다고만은 할 수 없는데, 이것은 P 가 물체의 모든 표면의 정보를 갖고 있지 않으며 전체 표면중에서 샘플링 한 부분들에 대한 데이터이기 때문이다. 또한 반복 회수는 셀의 크기와도 관련이 있으며, 셀의 크기가 데이터의 정밀도에 비해서 큰 경우 보다 많이 반복해 주고, 셀의 크기가 작은 경우는 보다 적게 반복하는데, 실험 결과 셀의 크기가 적절히 선택된 경우 일반적으로 4~5회만 반복해도 충분함을 알 수 있었다.

앞에서 설명한 초기메쉬의 각 면의 형태는 사각형이 되는데, 일반적으로 3차원 공간상의 4점은 동일 평면에 있지 않을 수 있다. 따라서 메쉬 축소와 평활화 과정을 반복된 후 최종적인 표면 모델을 만들기 위해서는 사각형 형태의 각 면들을 삼각형 표면조각으로 바꾸는 과정이 수행된다. 그림 4는 이러한 삼각형 표면조각 생성 방법을 보여주고 있는데, 사각형의 두 대각선 중에서 하나를 선택하여 두개의 삼각형을 만든다. 일반적으로 표면 모델에서 가능하고 긴 삼각형 표면조각들은 모델의 품질을 저하시키므로 가능한 두 대각선 중에서 길이가 짧은 대각선을 삼각분할을 위한 예지로 사용한다. 예를 들어 그림 4에서와 같이 $dist(q_2, q_4) < dist(q_1, q_3)$ 인 경우 두 대각선 중에서 q_2 과 q_4 를 연결하여 오른쪽 그림과 같이 두개의 삼각형 표면조각을 생성한다.

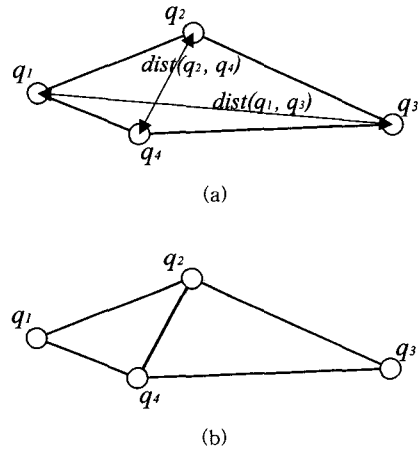


그림 4 삼각형 표면 조각 생성 방법

4. 실험

제안된 방법은 Windows-2000 운영체제하의 PC에서 구현되었는데, 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성하였으며, 렌더링을 위해 OpenGL과 MFC를 이용해서 GUI를 작성하였다. 다양한 종류의 데이터가 실험에 사용되었으며, 자체적으로 제작하였던 스캐너를 통한 데이터에 대해서도 적용해 보았다.

먼저 그림 5는 제안된 방법의 표면 모델링 과정을 Jeong의 방법[10]과의 비교하여 보여주고 있는데, Ring 데이터 (a)에 대해 초기메쉬의 형태에 근본적인 차이가 있으며, 특히 (b)와 같은 초기메쉬에서 8개의 꼭지점 중 하나에서 최단거리 측정점을 찾기 위해서는 전역 탐색이 필요한데 비해 제안된 방법에서는 (e)에서와 같이 초기메쉬의 어떤 정점에서든 $O(3)$ -인접한 셀에 측정점이 존재할 수 밖에 없으므로 지역탐색만으로 최적의 측정

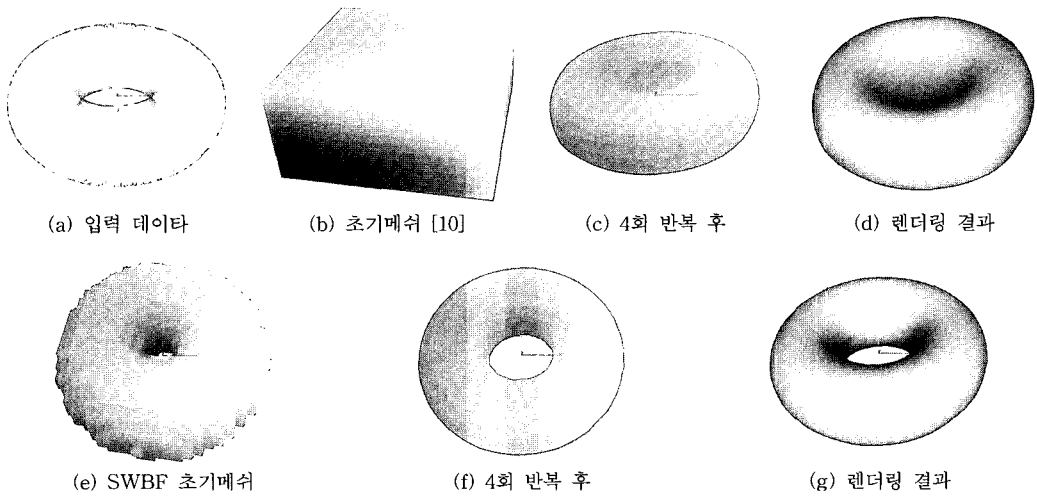


그림 5 기존방법[10]과의 비교(resolution: $n_y = 21$): (a) 입력데이터, (b)-(d) [10]에 의한 처리 결과, (e)-(g) 제안된 방법에 의한 처리결과

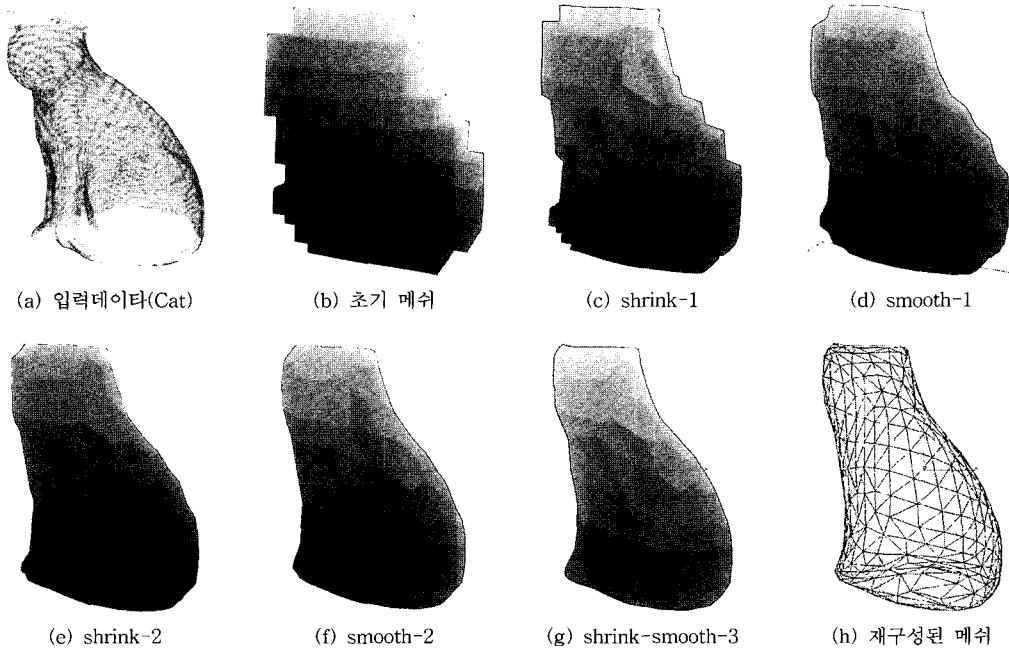


그림 6 고양이 데이터의 처리 과정(resolution: $n_y = 9$)

점을 찾을 수 있다. 이러한 특징으로 인해 두 방법의 처리시간이 크게 차이가 나는데, 실험 결과 제안된 방법은 4번의 반복 전체에 3초 미만의 시간이 걸렸으나 [10]의 방법에서는 한번의 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 있는

데 비해, 기존의 방법 [10]에서는 아무리 축소 평활화 과정을 반복해도 (g)와 같은 토폴로지의 표면을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

그림 6은 표면 모델링에 일반적으로 많이 사용되는 고양이(Cat) 데이터 (a)에 대해 제안된 알고리즘의 각 단계별 처리 과정을 비교적 낮은 정밀도(정밀도=9)에서 보여주고 있다. 먼저 (b)와 같이 경계셀의 경계면을 이

용하여 초기 메쉬를 생성하고 한번의 축소단계를 거치면 (c)가 되며, 평활화 과정을 거치면 (d)가 된다. 같은 방법으로 축소와 평활화를 한번더 수행하면 하면 (e)와 (f)가 되며, 세 번째 축소와 평활화를 거친 결과가 (g)이다. 최종적으로 사각형 면들을 삼각분할하여 구한 최종 메쉬가 (h)이다.

그림 7은 Hoppe의 논문 [8]에서 사용되었던 몇 가지 데이터에 대한 실험결과를 보여주고 있는데, 표면에 구멍을 가진 다양한 형태에 대해 매우 안정적이고 부드러운 표면을 만들어 주는 것을 알 수 있다. 그림 8은 측정점의 수가 비교적 많은 Happy Buddha 데이터에 대한 모델링 과정을 보여주고 있는데, 팔이나 허리, 다리부분 등에서 표면에 다수의 구멍을 포함하고 있는 것을 볼 수 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. 각 영상의 윗부분에 표면의 일부를 확대한 결과를 보여주는데, 초기의 메쉬가 자연스럽게 원래의 표면 형태를 찾아가는 것을 알 수 있다. 특히 처리시간 측면에서 제안된 방법은 한번의 축소단계와 평활화 단계에서 각각 4초 내외의 시간이 걸렸으나 기존의 방법은 한번의 축소단계에만 10시간 가까운 시간이 걸려 (평활화 시간은 동일함) Happy Buddha와 같이 크기가 큰 데이터들에 대해서는 표면의 재구성이 현실적이지 않았다 (Pentium-4 2.4GHz에서). 표 1은 그림 5, 7, 8 데이터의 처리결과를 정리하여 보여주고 있다.

마지막으로 그림 9은 논문 [3]에서 소개한 바 있는 전신 스캐너(Whole Body Scanner) 개발시에 마네킹과 함께 스캐닝한 데이터에 대한 모델링 결과를 보여주고 있다. 마네킹은 밝은 표면이므로 표면에서 비교적 데이터가 잘 취득되는데, 사람의 경우 머리카락이나 허리띠 등과 같이 어두운 부분에는 레이저 슬릿광의 반사가 거의 없으므로 정교한 데이터의 추출이 비교적 어렵다. 또한 입고 있는 옷이 재질과 색에 따라서도 데이터 추출의 정밀도와 잡음의 정도가 크게 차이난다. 일반적으로 전신 스캐너는 데이터 취득에 적합한 옷과 권장 자세가 있어서 그 기준으로 측정을 시도하는데[2], 그림 9에서

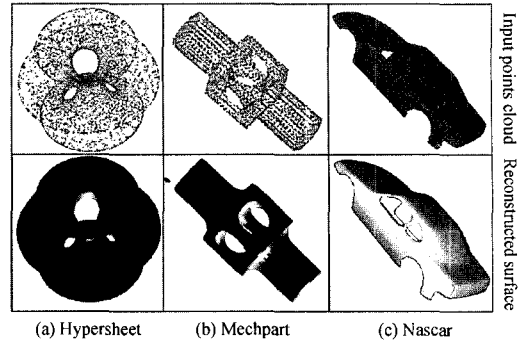


그림 7 Hypersheet, Mechart, Nascar 데이터 처리 결과

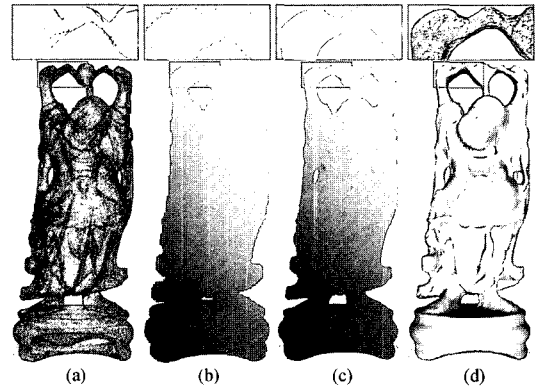
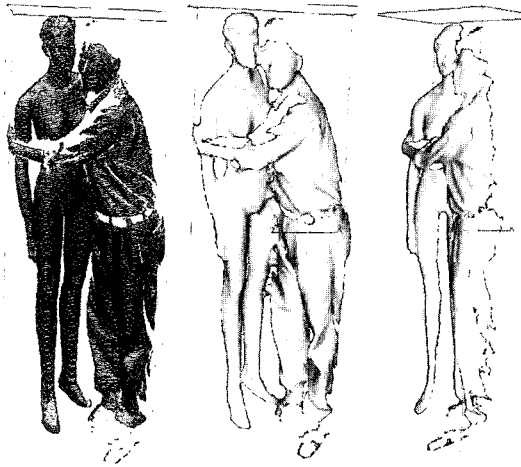


그림 8 Happy Buddha데이터 처리 과정 : (a) 입력 데이터, (b) 초기 메쉬, (c) 축소-평활화(shrink-wrapped) 된 표면, (d) 렌더링 결과

는 임의의 자세로 한 방향의 레이저 프로브에 의해 취득한 데이터를 보여주고 있으며, 따라서 가려지는 부분도(팔 위쪽) 많이 발생하였다. 일반적인 전신 스캐너의 모델링 방법들은 이러한 형태의 데이터에 대한 모델이 쉽지 않은데, 제안된 방법은 이러한 잡음이 많은 데이터에 대해서도 비교적 안정적으로 표면 모델을 생성할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 제안된 방법이 정렬되지 않은 3차원 측정점으로 부터의 표면 재구성에 매우 안정적이고 효과적임을 확인할 수 있었다.

표 1 각 데이터에 대한 실험 결과

데이터	측정점 수	Cell Space			결과			처리 시간 (초)
		Resolution			경계셀 수	정점 수	면수	
		x	y	z				
Ring	40,000	26	13	26	1,154	2,456	4,928	< 3
Mechpart	4,102	20	20	47	11,892	4,726	9,520	< 1
Hypersheet	6,752	39	39	29	2,280	7,569	15,280	< 2
Nascar	20,621	47	107	31	7,182	19,028	38,128	< 4
Buddha	543,652	65	150	65	39,994	83,215	166,828	< 35



(a) 입력 데이터 (b) 렌더링 결과(1) (c) 렌더링 결과(2)
(마네킹과 함께)

그림 9 전신스캐너의 한 방향의 레이저 프로브에서 추출한 잡음이 많은 데이터에 대한 표면 재구성 결과

5. 결론

본 논문에서는 측정점간의 상관관계가 주어지지 않는 정렬되지 않은 3차원 데이터로부터 이들을 근사하는 표면을 재구성하는 새로운 방법인 경계면 축소포장방식에 의한 표면 재구성 방법을 제안하였다. 이 방법은 측정점으로부터 경계셀과 경계면을 추출해 초기 메쉬를 생성하고 이를 반복적으로 축소하고 평활화하는 방식에 표면 메쉬를 생성하였다. 또한 이 방법은 기존의 표면 축소포장 방식의 메쉬 생성 방법의 문제점인 물체의 구형토폴로지에 대한 제약이 없이 표면에 구멍이 있는(그림 7과 그림 8) 물체에 대한 표면 재구성에도 적용이 가능하다는 장점이 있으며, 비교적 잡음이 많은 3차원 데이터에 대해서도 안정적인 결과를 생성하였다. 또한 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 효과적임을 확인할 수 있었다.

향후 과제로는 먼저 거드랑이와 같이 두 표면이 매우 가까운 경우 실제로 붙어있지 않은 표면들이 하나의 표면처럼 재구성될 수 있는 문제를 해결하는 것으로, 이것은 측정점간의 상관관계가 주어지지 않는 경우 자동으로는 처리가 불가능하며, 따라서 후처리에서 효율적인 인간의 상호작용으로 이러한 부분 교정할 수 있는 방법

을 연구할 예정이다. 또한 제안된 방법을 세분표면(subdivision surface)[10]으로 확장하는 방법을 현재 연구하고 있다.

참고 문헌

- [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.E. Lorensen and H. E. 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. K. Choi, "Surface reconstruction from a set of wire-frame contours," Ph.D thesis. Korea Advanced Institute of Science and Education, 1995.
- [7] Y. K. 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," In *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, pp. 71-78, July 1992.
- [9] L. Kobbelt, J. Vorsatz, U. Labsik, and H. Seidel. "A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces," In *Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics '99*, volume 18, 3, pp. 119-129, September 1999.
- [10] 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, March 2002.



최영규

1989년 경북대학교 전자공학과(학사). 1991년 KAIST 전기 및 전자공학과(석사) 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과(박사). 1995년~1999년 LG산전연구소 영상연구실 선임연구원. 1999년 3월~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 컴퓨터공학전공 조교수. 관심분야는 Volume Visualization, 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 생체인식 등



구 본 기

1995년 경북대학교 전자공학과(학사). 1997년 경북대학교 전자공학과(석사). 2004년 경북대학교 전자공학과(박사). 1997년~1998년 시스템공학연구소(SERI) 연구원. 1998년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 디지털콘텐츠연구단 CG기반기술연구팀 선임연구원. 관심분야는 Computer Vision, 3D Imaging, Virtual Reality, Computer Graphics, On-Line Game



진 성 일

1977년 서울대학교 전자공학과(학사). 1981년 한국과학기술원 전자공학과(석사) 1988년 Carnegie Mellon University 전자공학과(박사). 1981년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 Computer Vision, Color Image Processing

for Display