

# 적응 Simplex-Mesh 기술에 기반한 3차원 물체 복원과 자료 압축 3D Object Restoration and Data Compression Based on Adaptive Simplex-Mesh Technique

문성환 · 조용군 · 강 훈

Sung-Hwan Moon, Yong-Gun Jo and Hoon Kang

중앙대학교 전자전기공학부

## 요 약

대부분의 3차원 물체 복원 기술은 물체를 다수의 평면으로 나누고 물체의 각 표면을 근사시켜 표현한다. 주어진 분류치를 사용하여 mesh를 초기화시키는 Marching Cubes 알고리즘과 Delaunay Tetrahedrisation이 널리 사용되고 있다. 이와 더불어 deformable 모델은 적은 수의 가정만으로도 다양한 종류의 데이터들에 대한 복원 및 재구성을 할 수 있기 때문에 일반적인 물체 복원에 적합하다. 현재 deformable 모델이 기반이 된 복원 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 곡면으로 이루어진 물체에 대해서 적응 simplex mesh 기술을 바탕으로 3차원 물체를 압축, 복원하는 방법을 제시한다. 이 방법은 미리 정해진 mesh 구조를 변형시키고 곡률과 같은 기하학적인 특성들을 다시 설정하면서 본래의 3차원 물체로 접근시킨다. 시뮬레이션을 통해서 높은 압축률로 물체를 복원하고, 물체의 모양을 최적으로 기술하기 위해 정점들이 곡률이 높은 곳으로 집중되는 것을 보인다.

## ABSTRACT

Most of the 3D object reconstruction techniques divide the object into multiplane and approximate the surfaces of the object. The Marching Cubes Algorithm which initializes the mesh structure using a given isovalue, and Delaunay Tetrahedrisation are widely used. Deformable models are well-suited for general object reconstruction because they make little assumptions about the shape to recover and they can reconstruct objects from various types of datasets. Now, many researchers are studying the reconstruction systems based on a deformable model. In this paper, we propose a novel method for reconstruction of 3D objects. This method, for a 3D object composed of curved planes, compresses the 3D object based on the adaptive simplex-mesh technique. It changes the pre-defined mesh structure, so that it may approach to the original object. Also, we redefine the geometric characteristics such as curvatures. As results of simulations, we show reconstruction of the original object with high compression and concentration of vertices towards parts of high curvature in order to optimize the shape description.

## 1. 서 론

레이저, 혹은 CCD 카메라를 이용한 3차원 스캐너로 획득한 물체의 이산적인 데이터들은 그 모양을 알 수 없을 뿐만 아니라 데이터의 양도 무척 방대하다. 일반 물체를 재구성하는 기술은 3차원의 데이터로부터 기하학적인 모델을 세우는 작업이라 할 수 있다. 이러한 기하학적 모델의 특성은 사용되는 상황에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 의학용 혹은 유체 해석과 같은 물리적 특성을 다루는 분야에서는 적은 양의 데이터를 갖는 기하학적 모델이 요구되는 반면 CAD와 같은 분야에서는 실제 물체가 가지고 있는 많은 양의 데이터를 갖는 기하학적 모델이 필요하다. 적

은 양의 데이터를 갖는 모델로 물체를 복원하는데 있어 물체의 정점(vertex)을 알고 있다면 최소한의 데이터로 효과적인 물체 복원이 가능해진다. 하지만 일반 물체일 경우, 정점을 결정하고 추출하는 것 또한 매우 어려운 문제이다. 정점 추출 방법으로는 퍼지 클러스터링[1,2] 및 특징 추출 알고리즘을 들 수 있다. 3차원 공간상의 데이터는 그 자료의 크기, 처리속도, 잡음 및 측정 오차 등의 불규칙성 등의 한계 때문에 이들 알고리즘은 그러한 문제점을 보완해 줄 수 있다. 대부분의 3차원 물체의 복원 기술은 물체를 다수의 면으로 나누어 물체의 표면을 근사하여 표현하는 방법을 사용하고 있다. 대표적으로 주어진 분류치(isovalue)를 사용하여 mesh를 초기화시키는 Marching

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

Cubes 알고리즘[3]과 Delaunay Tetrahedrisation[4]이 넓게 쓰이고 있다. 이러한 알고리즘과 더불어 deformable 모델은 적은 가정만으로도 다양한 종류의 데이터들에 대해 복원 및 재구성을 할 수 있기 때문에 3차원 물체 복원에 적합한 모델이라 할 수 있다. 현재 deformable 모델을 기반으로 한 복원 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[5,6]

본 논문에서는 3차원 물체를 복원하는 방법으로 꼭면으로 이루어진 물체를 simplex mesh[7]에 기반하여 복원하는 기법을 제시한다. 이는 미리 정해진 mesh 구조를 점차 변형시켜 나가면서 3차원 물체에 접근시키는 방법이다. Deformable 모델 기반의 simplex mesh를 사용할 경우 mesh의 기하학적인 특성을 이용하여 비교적 간단하게 물체를 표현할 수 있다. 기존의 simplex mesh에 기반한 3차원 물체 복원 곡률과 같은 기하학적 정의가 불분명하기 때문에 이를 보완하여 이들을 재정의하였다. 하지만 초기 mesh의 모양에서부터 적은 제약 조건을 가지고 물체의 mesh 형태를 조정하여 나가기 때문에 처음 mesh의 노드 수와 면, 변의 연결 정보 등을 알고 있어야 한다는 가정은 기존의 방법과 동일하다.

## 2. Simplex Meshes as Deformable Models

Simplex mesh는 삼각화(triangulation)처럼 물체의 위상학적인 표면을 표현할 수 있다. 그러나 삼각화와는 달리 곡률 혹은 수직벡터와 같은 이산적이면서 기하학적인 특성을 정의함으로써 mesh 조정을 쉽게 할 수 있다[7]. Simplex mesh를 이용하여 3차원 물체를 복원하는 과정에는 크게 두 가지 주된 문제가 있다. 첫째, 초기 mesh가 구성되면 초기 mesh의 노드들은 시간이 지남에 따라 물체에 접근해야 하고, 둘째, 정의된 곡률에 따라 곡률이 높은 쪽으로 mesh의 노드들이 집중해야 한다는 것이다. 물체를 복원하기 위해 deformable 모델을 사용한다. 이 모델은 적은 가정만으로도 다양한 종류의 데이터들을 복원 및 재구성할 수 있고 뉴턴의 운동방정식을 다이나믹식으로 이용하고 이에 따라 mesh 노드의 이동방향을 결정한다. mesh 노드의 이동방향은 방정식 내의 내적 힘(internal force)와 외적 힘(external force)에 의해 크게 영향을 받게 되는데, 내적 힘은 mesh가 물체에 접근해 갈 방향을 제시하고 외적 힘은 mesh의 노드들을 곡률이 높은 쪽으로 이동시켜 mesh의 효율을 높여준다. Simplex mesh의 특징은 각각의 mesh 노드들이 항상 3개의 이웃 노드를 갖는다는 것이다. 이러한 특성은 mesh 조정을 위한 물체상의 데이터에 관한

미분식과 같은 복잡한 과정을 이웃 노드와의 상대적 위치를 통해 해결할 수 있다는 것이다. 이웃 노드들과의 상대적 거리에 의한 곡률과 수직벡터를 정의함으로써 mesh 노드 조정을 쉽게 할 것이다.

### 2.1 Simplex Meshes

#### 2.1.1 셀과 Simplex Meshes의 정의

Definition 1.

$R^d$ 의 0-cell은  $R^d$ 의 점 P로 정의하고  $R^d$ 의 1-cell은  $R^d$ 의 변(edge)으로 정의한다. 반복적으로  $R^d$ 의 p-cell( $p \geq 2$ )은 (p-1)-cells의 유니온이다. p-cell ( $p \geq 2$ )은 다음과 같은 성질을 갖는다.

- (1) p-cell ( $p \geq 2$ ) 들은 각각 (p-1)-cells들로 나눌 수 있다.
- (2) 두개의 (p-1)-cells의 교차(intersection)는 존재하지 않거나 (p-2)-cell 이다.

Definition 2.

$R^d$ 의 k-simplex mesh, M은  $R^d$ 의 (k+1)-cell 이다.

k-simplex mesh는 (k+1)-cell임과 동시에 (k+1)-connected mesh이다. 즉 각각의 노드는 (k+1)개의 이웃한 노드들을 갖는다. k=2인 경우, 2-simplex mesh는 3-cell이고 3개의 이웃 노드를 갖는다. 표 1은 k-simplex mesh의 노드, 면, 변 사이의 관계를 보여주고 있다.

2-simplex mesh의 경우 노드 하나에 인접한 변은 3

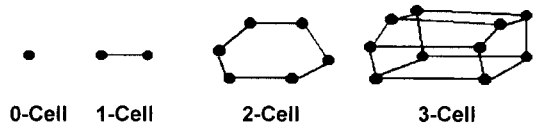


그림 1. p-cell의 예제( $0 \leq p \leq 3$ )

표 1. k-simplex mesh의 연결 관계

|     | Edges/Node | Faces/Node | Faces/Edge |
|-----|------------|------------|------------|
| k=1 | 2          | 1          | 1          |
| k=2 | 3          | 3          | 2          |

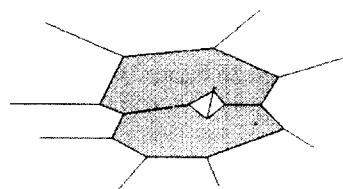


그림 2. 3-연결 mesh

개, 면은 3개이고 변 하나에 인접한 면은 2개임을 보여준다. 하지만 모든  $k$ -simplex mesh가  $(k+1)$ 의 연결을 갖는다고 해서 모든  $(k+1)$ 로 연결된 mesh가 simplex mesh가 되는 것은 아니다. 두 개의 변을 따라 공통된 2개의 면을 가질 수도 있기 때문이다[그림 2].

3차원 물체를 복원하기 위해서는 2-simplex mesh를 이용한다. 앞으로 2-simplex mesh를 simplex mesh로 표기하겠다.

**2.1.2 삼각화와 이원성(Duality with Triangulations)**

Simplex mesh와 삼각화(Triangulation)는 이중적 관계에 있다[그림 3]. 이는 mesh를 조정할 때 mesh 노드들 간의 관계를 삼각화를 통해 쉽게 얻을 수 있게 해준다. 초기 mesh를 위한 셸(shell)을 구성할 때 먼저 삼각형으로 이루어진 셸을 이용하여 simplex mesh 셸을 만들게 된다. 이렇게 함으로써 초기 mesh의 노

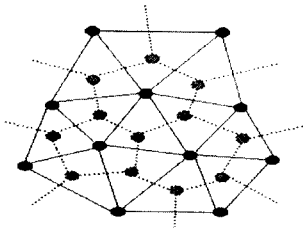


그림 3. 삼각화와 simplex mesh간의 이원성

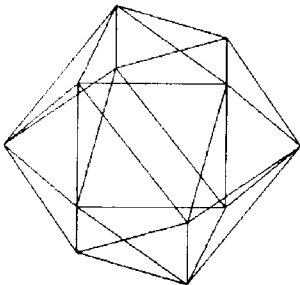
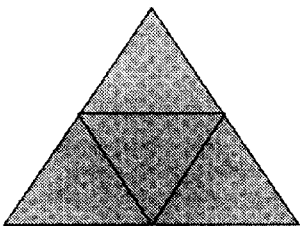


그림 4. 초기 20 면체



한개의 면을 4개로 분할  
그림 5. 면의 분할

드 및 각 면과 변들 간의 연결정보를 쉽게 얻을 수 있다.

**2.1.3 초기 Mesh 셸(Initial Mesh Shell) 형성**

3차원 물체의 복원은 simplex mesh로 구성된 구 모양의 셸로부터 시작된다. 여기서 simplex mesh와 삼각화의 이원적 성질을 이용한다. 먼저 삼각형으로 이루어진 20면체에 의해 mesh의 노드가 결정되며, 각 삼각형의 분할을 통해 전체 simplex mesh의 노드를 조정할 수 있다.

삼각형의 면의 개수는 20개이다[그림 4]. 삼각형의 노드에 인접한 면들을 찾아서 각 면들의 중심에 새로운 노드를 생성한 후 이들 노드를 연결하면 simplex mesh상에 새로운 면을 만들 수 있다. 즉 삼각형의 노드는 simplex mesh의 면으로 바뀌게 된다. 삼각화와 simplex mesh의 이원적 성질을 이용한 것이다. 따라서 삼각형의 면의 개수는 simplex mesh의 노드의 개수와 같게 된다. Simplex mesh의 초기 노드의 개수는 각각의 삼각형을 그림 5와 같이 4등분하여 조정하도록 하였다. 이것을 삼각형을 1회 분할한 것이라 하면,  $k$ 를 삼각형을 분할하는 횟수라고 할 때 simplex mesh의 총 노드의 수는  $20 \times 4^k$ 로 표시할 수 있다. 좀 더 세밀하게 노드의 수를 조정하고 싶다면 분할 방법을 여러 가지로 사용하면 된다.

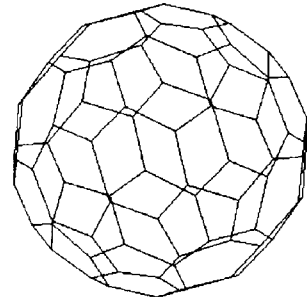


그림 6.  $k=1$  일 때 simplex mesh

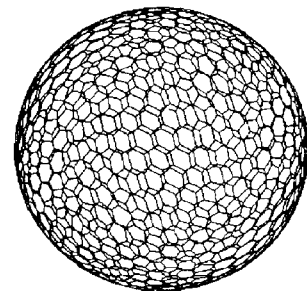


그림 7.  $k=3$  일 때 simplex mesh

Simplex mesh의 노드의 수는 물체를 복원하는데 중요한 역할을 한다. 만약 일반적으로 많은 양의 노드가 형성되면 훨씬 더 실물에 가까운 복원이 가능하다 [그림 6.7]. 따라서 simplex mesh의 노드의 수를 조정함으로써 전체 압축률을 조정할 수 있다.

## 2.2 Geometry of three-dimensional 2-simplex meshes

### 2.2.1 수직벡터

Mesh 노드  $P_i$ 의 이웃 노드를 각각  $P_{N_1(i)}$ ,  $P_{N_2(i)}$ ,  $P_{N_3(i)}$ 라 할 때  $P_i$ 에 대한 수직 벡터는 이웃한 노드들이 이루고 있는 평면의 수직벡터로 정의하고 물체 중심에서 밖으로 향하는 수직벡터를 선택하였다.

$$n_i = \frac{P_{N_1(i)} \wedge P_{N_2(i)} + P_{N_2(i)} \wedge P_{N_3(i)} + P_{N_3(i)} \wedge P_{N_1(i)}}{\left| P_{N_1(i)} \wedge P_{N_2(i)} + P_{N_2(i)} \wedge P_{N_3(i)} + P_{N_3(i)} \wedge P_{N_1(i)} \right|} \quad (1)$$

### 2.2.2 평균 곡률(The Mean Curvature)

물체의 곡률은 보통 수학적으로 미분을 이용하여 구한다. 하지만 simplex mesh의 이웃 노드의 상대적 위치를 이용하면 이를 대신 할 수 있다. Mesh 노드  $P_i$ 에 대한 곡률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \frac{P_i P_{N_j(i)} \cdot n_i}{\left| P_i P_{N_j(i)} \right| \left| n_i \right|} \quad (2)$$

$P_i$ 에 대한 곡률  $K_i$ 는 세 면이 이루고 있는 평면의 수직벡터와 각각의 이웃 노드들 사이의 각으로 나타낼 수 있다. 노드  $P_i$ 에서 이웃 노드  $P_{N_{j(i)}}$ 를 이은 벡터와 수직벡터가 이루는 각을  $\theta_{N_{j(i)}}$ 라 할 때, (2)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \cos \theta_{N_{j(i)}} \quad (3)$$

따라서  $K_i$ 가 클수록  $P_i$ 가 위치한 곳은 모양의 변화가 심한 곳이라고 추측할 수 있다. 노드  $P_i$ 의 곡률은 범위를 확장시켜 정의될 수도 있다. 노드가 가지고 있는 곡률은 자신의 주변 상황을 알려주는 것이기 때문에 곡률 범위의 확장으로 좀더 넓은 지역의 모양을 알아 볼 수 있다. 확장 범위를  $Q^s(P_i)$ 라고 할 때 (3)식으로 곡률의 범위를 다음 (4)식과 같이 확장할 수 있다

$$K_i = \sum_{j \in Q^s(P_i)} K_j \quad (4)$$

### 2.2.3 Metric Parameters

Simplex mesh 노드  $P_i$ 는 세 개의 이웃 노드들과 각각의 metric 파라미터 ( $\epsilon_j$ ,  $j=1,2,3$ )를 이용하여 다시 표현할 수 있다. 이때 노드  $P_i$ 와 세 개의 이웃 노드가 이루고 있는 평면에  $P_i$ 를 수직 투영(orthogonal projection)한 점을  $F_i$ 라 할 때,

$$F_i = \epsilon_1^2 P_{N_1(i)} + \epsilon_2^2 P_{N_2(i)} + \epsilon_3^2 P_{N_3(i)} \quad (5)$$

$$\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 = 1$$

특히  $F_i$ 가 이웃한 노드들로 이루어지는 삼각형 내에 존재하기 위해서 각각의 metric 파라미터들은 반드시 양수이어야 한다. 이때 이웃 노드에서 바라본 상대적인  $P_i$ 의 위치는

$$P_i = \epsilon_1^2 P_{N_1(i)} + \epsilon_2^2 P_{N_2(i)} + \epsilon_3^2 P_{N_3(i)} + L n_i \quad (6)$$

$L$ 은  $P_i$ 와  $F_i$  간의 거리이고  $n_i$ 는 세 이웃 노드가 지나는 평면의 수직 벡터이다.

## 2.3 Deformable Simplex Meshes

Simplex mesh의 기하학적 구조는 mesh 상의 노드의 위치에 따라 정의 되어진다. 이러한 mesh의 변형은 노드와 이웃 노드들과의 상대적 위치에 의해 결정된다. 일반적으로 deformable model 기술은 내적 힘(internal force)과 외적 힘(external force)으로 구성되어 있는 뉴턴의 운동 방정식을 이용한다.

$$m \frac{d^2 P_i}{dt^2} = -\gamma \frac{d P_i}{dt} + F_{int} + F_{ext} \quad (7)$$

$m$ 은 노드의 질량성분이고  $\gamma$ 는 damping 요소이다.  $F_{int}$ 은 내적 힘으로써 mesh의 모양에 대한 연속성을 유지시켜 주고  $F_{ext}$ 는 외적 힘으로써 임의의 3차원 물체로 노드들을 접근시키는 역할을 한다. 운동방정식 하에 simplex mesh의 전개방법을 계산하기 위해 식 (7)을 이산적인 식으로 바꾸어 주면 다음과 같다.

$$P_i^{t+1} = P_i^t + (1-\gamma)(P_i^t - P_i^{t-1}) + F_{int} + F_{ext} \quad (8)$$

### 2.3.1 내적 힘의 계산

Simplex mesh 상에서 작용하는 내적 힘은 local criterion의 최소화에 기반하여 계산된다. 이것에 관한 내용은 Szelisky[8]에 의해 소개된 deformation of particle systems에서 찾아볼 수 있다.

내적 힘은 임의의 순수한 위치의 휘어짐 정도에 비례하는 local energy를 최소화하는데서 유도된다.

$$S_i = \frac{\alpha_i}{2} \left| \vec{P}_i P_i \right|^2 \quad (9)$$

Local criterion  $S_i$ 를  $P_i$ 에 관해 최소화시키면,

$$F_{int} = \frac{\partial S_i}{\partial P_i} = \alpha_i \overrightarrow{P_i P_i} \quad (10)$$

$\alpha_i$ 는 ( $0 < \alpha < 0.5$ ) 사이의 상수다. 만약  $\alpha_i$ 가 0.5보다 클 경우 unstable deformation의 결과를 낼 수 있다.  $\hat{P}_i$ 는  $P_i$ 의  $\hat{\epsilon}_i^1, \hat{\epsilon}_i^2, \hat{\epsilon}_i^3$ 의 값을 갖는 이웃한 노드에서 바라본 노드이다. 이것을 (6)식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{int} = \hat{\epsilon}_i^1 \overrightarrow{P_i P_{N1(i)}} + \hat{\epsilon}_i^2 \overrightarrow{P_i P_{N2(i)}} + \hat{\epsilon}_i^3 \overrightarrow{P_i P_{N3(i)}} + \hat{L}_i \quad (11)$$

$\hat{L}$ 의 값을 조정함으로써 mesh의 부드러움을 조절할 수 있다. 그리고  $\hat{\epsilon}_i$ 의 값은 mesh의 모양과 관계가 있다. 만약  $\hat{\epsilon}_i$ 를 1/3으로  $\hat{L}$ 을 0으로 하면 mesh의 노드들은 노드로부터 이웃 노드의 중심을 향하여 움직이기 때문에 mesh의 모양은 uniform하게 된다. 다시 말해  $\hat{\epsilon}_i$ 의 값을 변화시켜 mesh의 모양을 변형시킬 수 있다. 2.4절에서  $\hat{\epsilon}_i$ 의 값을 곡률에 의해 계산함으로써 mesh 노드를 상대적으로 높은 곡률을 가지는 이웃 노드 방향으로 이동시켜 mesh 노드의 위치를 효율화시키는 방법에 대해 설명한다.

**2.3.2 외적 힘의 계산**

외적 힘은 mesh의 노드들을 3차원 물체 쪽으로 이동시켜 주는 역할을 한다. mesh의 노드들은 외적 힘에 의해 물체의 원래 모양을 찾게 된다.

$$F_{EF} = \beta_i P_i M_{C(i)} \quad (12)$$

여기서  $\beta_i$ 는 weight parameter로 1보다 작은 값이고  $M_{C(i)}$ 는 입력 데이터 중  $P_i$ 에서 가장 가까운 거리에 있는 데이터를 나타낸다. 외적 힘은  $P_i$ 와  $M_{C(i)}$  사이의 거리를  $\beta$ 만큼 이동시켜준다.  $\beta$ 의 값이 1보다 작기 때문에 mesh 노드들은 물체로 접근하게 된다.

**2.4 The Adaptation Algorithm**

Simplex mesh로 복원되는 물체의 표면은 이산적인 값으로 표현되기 때문에 mesh를 이용한 효율적인 물체 구현은 mesh 노드와 데이터의 거리뿐만 아니라, 물체상의 정점(꼭지점)의 상대적 위치에 달려 있다. 이에 대한 문제는 정점 주위로 mesh 노드들을 집중시킴으로써 해결할 수 있다. metric 파라미터는 mesh 노드와 그 이웃노드들 간의 상대적 거리를 조정한다. 알고리즘은 이웃 노드와 mesh 노드의 평균 곡률의 상대적 차이를 이용하여 metric 파라미터를 변형하여 나간다. 기본적으로 낮은 평균 곡률을 가진 노드는 상대적으로 높은 평균 곡률을 갖는 노드 방향으로 이동하게 한다. 노드의 집중은 에너지  $E_i$ 를 지역적으로 최

소화하는 방향으로 진행한다. 만약 시간  $t$ 에서 metric 파라미터를  $\epsilon_i^t$ 라 하면 시간  $t+p$ 에서 metric 파라미터,  $\epsilon_i^{t+p}$ 는 다음과 같다.

$$\epsilon_i^{t+p} = \epsilon_i^t - \frac{1}{2} \nabla E_i \quad (13)$$

에너지  $E_i$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$E_i = \frac{1}{2} (\hat{\epsilon}_i - \epsilon_i)^2 \quad (14)$$

$\hat{\epsilon}_i$ 는 평균 곡률의 절대치에 대한 변동을 다루는 함수이다. mesh 노드와 이웃 노드에 대한 평균 곡률의 절대치를  $|K_j|, |K_{Nj(i)}|$  ( $j=1,2,3$ )라 하자. 이때 mesh 노드와 이웃노드들 간의 상대적 평균 곡률의 비율은 다음과 같다.

$$H_j = \frac{|K_{Nj(i)}|}{|K_j|}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

이웃 노드들과의 곡률의 비율을 이용해 현재 노드를 중심으로 이웃 노드중 곡률이 높은 곳으로 이동시켜 나간다. 이웃 노드와의 곡률의 비를 이용해  $\hat{\epsilon}_i$ 을 구한다.

$$\hat{\epsilon}_i = \begin{cases} \epsilon_i, & \text{if } H_j < 1 \\ \frac{1}{\sum_{j=1}^3 |H_j|} (|H_1|, |H_2|, |H_3|)^T, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (16)$$

식(13)은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_i^{t+p} = \epsilon_i^t + \frac{1}{2} (\hat{\epsilon}_i - \epsilon_i^t) \quad (17)$$

weight 0.5는 metric 파라미터를 시간이 지남에 따라 부드럽게 해주는 역할을 한다. 앞으로 보여질 예제에서 metric 파라미터들은  $p=5$  마다 수정된다.

**2.5 The First Fitting**

물체의 모양이 convex하거나 곡면의 변화가 완만할 경우 문제가 없으나 만약 물체의 곡면 변화가 두드러지게 되면 그림 8과 같은 현상이 나타날 수 있다. 이것은 mesh의 이동 방향 중 일부가 외적 힘에 의해 가장 가까운 데이터로 이동하기 때문에 나타나는 현상이다. 이럴 경우 상대적으로 안으로 들어가 있는 부분에 대해서는 mesh의 노드가 도달할 수 없기 때문에 물체의 모양을 정상적으로 복원할 수 없다. 이러한 현상을 피하기 위해 초기 mesh 셀이 어느 정도 물체에 접근하도록 first fitting을 한다.

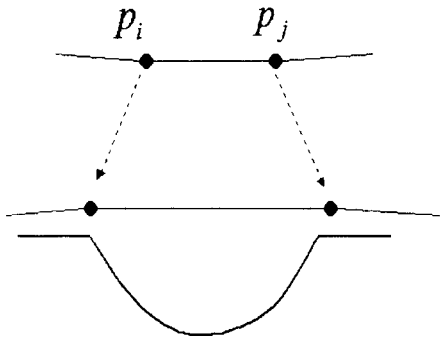


그림 8. 외적 힘에 의한 노드의 이동

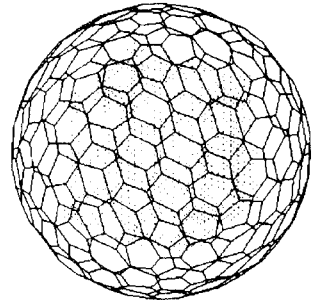


그림 10. 육면체와 초기 mesh 셸

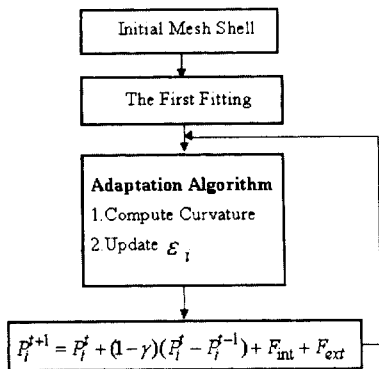


그림 9. 알고리즘 순서도

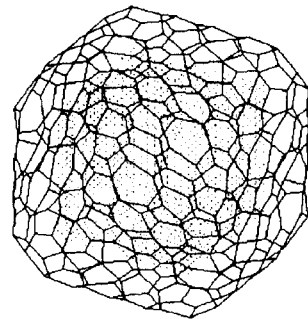


그림 11. The first fitting

$$P_i = O_M + D \frac{\overrightarrow{O_M P_i}}{O_M P_i} \quad (18)$$

$O_M$ 은 mesh 노드  $P_i$ 와 물체의 무게 중심을 지나는 직선의 수직거리가 가장 가까운 데이터이다. 식(18)은 mesh 노드  $P_i$ 를  $O_M$ 에서 거리  $D$ 만큼 떨어진 위치로 이동시킨다. First fitting을 통해 물체의 모양은 어느 정도 복원할 수 있다.

그림 9는 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다. First fitting 이후 adaptation 과정에서 노드마다 곡률을 계산하고 내적 힘의 metric 파라미터를 곡률에 따라 업데이트한 후 노드의 위치를 변경하면서 물체로 접근시켜 나간다.

### 3. 시뮬레이션

그림 10-12는 노드의 metric 파라미터를 1/3로 고정시켰을 때의 결과이다. 그림에서 보듯이 어느 곳이나 균일한 분포로 mesh 노드가 분포하고 있음을 알 수 있다. 그림 13은 adaptive 식을 사용하여 metric 파라미터를 수정하여 실행시켰을 때의 결과이다. 모서

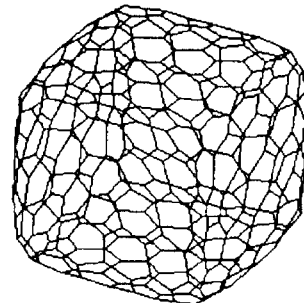


그림 12.  $\epsilon_i=1/3$

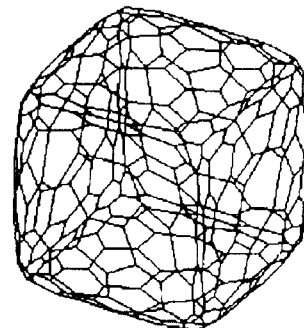


그림 13. Adaptive mesh를 이용한 결과

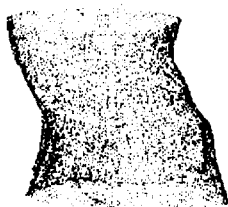


그림 14. 인체의 무릎



그림 17. 토끼 모양의 데이터

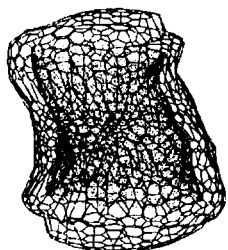


그림 15. The first fitting

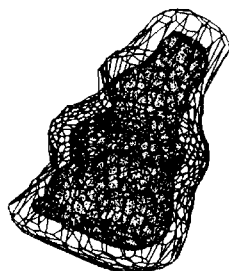


그림 18. The first fitting

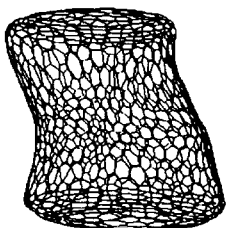


그림 16. The final mesh

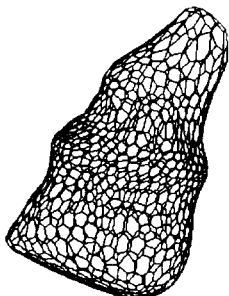


그림 19. The final mesh

리 부분, 다시 말해 곡률이 높은 곳으로 mesh의 노드가 집중되었음을 볼 수 있다.

14-16은 인체의 무릎 부분을 스캔한 3차원 데이터에 알고리즘을 적용시켰을 때의 결과이다. 입력 데이터[그림 14]의 개수는 9500개이고 mesh 노드[그림 16]의 개수는 1280개이다. 원 데이터에 비해 약 1/7.4로 압축된 결과이다.

17-19은 토끼 모양의 3차원 데이터에 알고리즘을 적용시켰을 때의 결과이다. 입력 데이터[그림 17]의 개수는 16760개이고 mesh 노드[그림 19]의 개수는 1280개이다. 약 1/13로 압축되었음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

지금까지 3차원 물체의 복원을 위한 알고리즘을 살펴보았다. Scatter matrix의 고유치를 이용해 면의 정보 및 개수를 추정하여 최적의 수직벡터를 찾아주는

기존의 정점 검출 알고리즘은 정점이 존재하지 않는 물체일 경우 물체의 모양을 복원하기에 다소 어려움이 있는 반면, deformable model을 기반으로 한 simplex mesh를 이용하면 물체의 모양에 상관없이 복원이 가능함을 볼 수 있다. 비록 복원을 위한 데이터의 개수가 정해지지만 적당한 개수가 정해지면 물체의 복원이 가능하다. 1/7.4[그림 14-16]과 1/13[그림 17-19]의 압축률을 갖는 시뮬레이션 예제를 통해 이를 살펴보았다. 또한 곡률의 정의에 의해 mesh 노드들을 물체의 곡률이 높은 곳으로 집중시킴으로써 mesh의 효율을 향상시켰다. 압축률이 낮으면 그만큼 실제 물체에 가까이 접근시킬 수 있다.

알고리즘을 통해 얻어진 압축된 데이터를 VRML (Virtual Reality Modeling Language) 혹은 CAD/CAM과 같이 컴퓨터를 이용한 디자인과 제조 과정에 사용될 것이 기대된다.

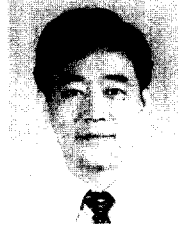
### 참고문헌

- [1] J. C. Bezdek, C. Coray, R. Gunderson, and J. Watson. "Detection and characterization of cluster substructure Part I. Linear structure: Fuzzy c-lines", *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 40, No. 2, pp. 339-357, 1981.
- [2] J. C. Bezdek, C. Coray, R. Gunderson, and J. Watson. "Detection and characterization of cluster substructure Part II. Fuzzy c-Varieties and convex combinations thereof", *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 40, No. 2, pp. 358-372, 1981.
- [3] W. Lorensen and H. E. Cline. "Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm", *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'87)*, 21:163-169, 1987.
- [4] B. Curless and M. Levoy. "A volumetric method for building complex models from range images", *Computer Graphics (SIGGRAPH'96)*, 1996.
- [5] I. Cohen, L. D. Cohen and N. Ayache. "Using deformable surfaces to segment 3-d images and infer differential structures", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, pp. 242-263, 1996.
- [6] H. Delingette, M. Hebert, and K. Ikeuchi. "Shape representation and image segmentation using deformable surfaces", *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 91)*, pp. 467-472, June 1991.
- [7] H. Delingette. "Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction", Technical Report 2241, INRIA, March 1994.
- [8] R. Szeliski and D. Tonnesen. "Surface modeling with oriented particle systems", *Computer Graphics (SIGGRAPH'92)*, pp. 185-194, July 1992.



**문 성 환 (Sung-Hwan Moon)**

1997년 2월 : 중앙대학교 제어계측 공학과(공학사)  
 1999년 2월 : 중앙대학교 제어계측학과 대학원(공학석사)  
 주관심분야 : 퍼지 시스템 및 제어, 퍼지 클러스터링, 3차원 스캐너 시스템, 신경회로망



**강 훈 (Hoon Kang)**

1982년 2월 : 서울대학교 공학사  
 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 공학석사  
 1989년 9월 : Georgia Inst. of Tech. 공학박사  
 1989년 9월~1990년 9월 : Georgia Tech. Post Doctor  
 1990년 9월~1992년 2월 : Georgia Tech. 연구교수



**조 용 군 (Yong-Gun Jo)**

1994년 2월 : 중앙대학교 제어계측 공학과(공학사)  
 1997년~현재 : 중앙대학교 제어계측학과 대학원 석사과정  
 주관심분야 : 신경회로망, 퍼지 시스템 및 제어, 인공생명, 셀룰라 오토마타, 진화연산

1991년 1월~1991년 12월 : Automation Concepts & Sys. 연구원  
 1992년 3월~1995년 2월 : 중앙대학교 제어계측공학과 조교수  
 1992년 9월~1997년 12월 : 한국퍼지 및 지능시스템 학회 재무이사  
 1995년 3월~현재 : 중앙대학교 제어계측공학과 부교수  
 1996년 1월~1996년 12월 : 한국통신학회 편집위원  
 1997년 9월~현재 : 제어자동화시스템공학회 편집위원  
 1997년 9월~현재 : 대한전자공학과 논문지 편집위원  
 1998년 1월~현재 : 한국퍼지 및 지능시스템 학회 협력위원  
 주관심분야 : 퍼지 시스템 및 제어, 카오스 시스템, 인공생명, 셀룰라 오토마타 신경망 회로망 및 패턴인식, 진화연산, 유전 프로그래밍, 로보틱스 및 지능 제어