

# 연결정보가 없는 3차원 점으로부터 차이분할메쉬 직접 복원

## (Direct Reconstruction of Displaced Subdivision Mesh from Unorganized 3D Points)

정 원 기<sup>†</sup> 김 창 현<sup>\*\*</sup>

(Won Ki Jung) (Chang Hun Kim)

**요 약** 본 논문은 연결정보가 없는 3차원 점으로부터 차이분할메쉬를 직접 생성하는 새로운 메쉬 복원 알고리즘을 제안한다. 차이분할메쉬는 표현해야 하는 각 정점을 1차원 상수 차이값으로 표현하는 메쉬로써 저장해야 하는 데이터양을 획기적으로 줄이면서 분할메쉬의 장점인 분할연결성을 가지므로 다단계 표현이 가능한 새로운 메쉬 표현법이지만 차이분할메쉬를 생성하는 기존의 방법은 레인지 데이터로부터 복원된 비정형 메쉬로부터 차이분할메쉬로의 변환을 거쳐야 하는 문제점이 있다. 제안 알고리즘은 비정형 메쉬로부터의 메쉬 변환과정이 필요 없이 연결정보가 없는 레인지 데이터로부터 차이값에 기반한 분할메쉬를 메쉬 복원과정에서 직접 생성해 낼 수 있다. 기본 아이디어는 연결정보가 없는 점 데이터만을 이용하여 이에 근사한 파라메트릭 도메인을 생성한 후 도메인 상의 각 정점의 법선 벡터 방향으로 세부 표면 정보를 샘플링 하는 것이다. 이를 위하여 우리는 분할곡면 근사기법을 적용한 파라메트릭 도메인 생성기법을 적용하여 입력 점 데이터에 최대한 근사하는 기본메쉬를 생성하며, 연결정보가 없는 점 데이터로부터 세부 표면정보를 올바르게 샘플링 하기 위한 법선벡터와 교차하는 유효한 삼각형 판정기준을 제시한다. 또한 기존 메쉬 복원 기법에서 사용되던 전역 에너지 최적화 방법 대신 입력 데이터를 고려한 지역적 라플라시안 평활화를 이용하여 고품질의 메쉬를 빠르게 복원할 수 있다. 이렇게 복원된 차이분할메쉬는 적은 데이터로 자세한 표현이 가능해져 메쉬 간략화나 압축 등의 후처리 과정이 필요 없으며, 분할연결성을 이용한 다단계 애니메이션등의 다양한 응용분야에 활용 가능하다.

**키워드** : 메쉬 복원, 차이분할메쉬, 메쉬 최적화

**Abstract** In this paper we propose a new mesh reconstruction scheme that produces a displaced subdivision surface directly from unorganized points. The displaced subdivision surface is a new mesh representation that defines a detailed mesh with a displacement map over a smooth domain surface, but original displaced subdivision surface algorithm needs an explicit polygonal mesh since it is not a mesh reconstruction algorithm but a mesh conversion (remeshing) algorithm. The main idea of our approach is that we sample surface detail from unorganized points without any topological information. For this, we predict a virtual triangular face from unorganized points for each sampling ray from a parameteric domain surface. Direct displaced subdivision surface reconstruction from unorganized points has much importance since the output of this algorithm has several important properties: It has compact mesh representation since most vertices can be represented by only a scalar value. Underlying structure of it is piecewise regular so it can be easily transformed into a multiresolution mesh. Smoothness after mesh deformation is automatically preserved. We avoid time-consuming global energy optimization by employing the input data dependant mesh smoothing, so we can get a good quality displaced subdivision surface quickly.

**Key words** : Mesh reconstruction, Displaced subdivision mesh, Mesh fitting

<sup>†</sup> 비 회 원 : 고려대학교 컴퓨터학과  
jeong@mpi-sb.mpg.de  
<sup>\*\*</sup> 종 신 회 원 : 고려대학교 컴퓨터학과 교수  
chkim@cgvr.korea.ac.kr

논문접수 : 2001년 5월 8일  
심사완료 : 2002년 3월 29일

1. 서론

광학기술의 발달에 힘입어 실제 사물로부터 추출한 위치정보를 이용한 정교한 모델링이 보편화되고 있다. Laser range scanner 장비를 이용하면 실제 물체로부터 샘플링 된 레인지 점 데이터를 획득할 수 있으며, 이를 컴퓨터 그래픽스에서 이용하기 위해서는 적절한 연결정보를 갖는 3차원 메쉬로 변환하는 알고리즘이 필수적이다[1, 6, 7, 13, 15].

기존의 메쉬 복원 알고리즘은 틈이 없고(seamless) 자세한 메쉬를 복원할 수 있으나, 다음과 같은 단점이 있다. 첫째, 복원되는 메쉬는 방대한 데이터 양 때문에 원본의 형상을 최대한 유지하면서 데이터 양을 줄이는 메쉬 간략화가 필수적이다. 둘째, 연결정보가 없는 점 데이터로부터 메쉬를 복원하는 경우 대부분 입력 데이터와 복원되는 데이터와의 차이를 에너지로 계산하여 이를 최소화시키는 전역 에너지 최적화 방법을 사용한다. 이 방법으로 복원되는 메쉬는 입력 데이터에 최대한 근사하는 좋은 품질을 갖지만 복원에 소요되는 계산량이 너무 많다. 셋째, 복원되는 메쉬는 분할연결성을 갖지 않는 임의의 비정형(irregular) 메쉬이다. 분할 연결성이 있는 정형화된 메쉬를 결과로 복원하는 방법이 있으나[7, 15] 다단계 표현에 적용하기 어렵거나 단지 주어진 점 데이터에 최대한 근사하는 부드러운 분할메쉬를 생성하기 때문에 형상의 표면정보를 자세히 표현하는 데에는 한계가 있다. 최근 제안된 차이분할메쉬[10]는 이러한 기존 메쉬 복원 알고리즘으로 생성되는 비정형 메쉬의 단점을 보완할 수 있는 여러 장점 - 메모리 효율적인 구조, 다양한 응용분야 - 을 가지지만 기존의 차이분할메쉬 생성 알고리즘은 주어진 메쉬로부터 차이값을 샘플링하여 새로운 분할메쉬를 생성하는 방법이므로 메쉬 복원 후에 적용 가능한 후처리 과정이다.

본 논문은 임의의 3차원 점으로부터 원래의 형상에 최대한 근사하며 데이터의 표현이 간결하고 다단계 표현이 용이한 차이분할메쉬를 직접 복원하는 알고리즘을 제안한다. 본 알고리즘은 연결정보가 없는 3차원 점으로부터 차이분할메쉬를 직접 추출해 내는 기술로써, 기존의 차이분할메쉬 생성을 위해서 메쉬 복원과 간략화의 두 단계를 거쳐서 기본메쉬를 생성하던 작업을 메쉬 복원단계에서 바로 기본메쉬를 생성하여 같은 결과를 얻는다 (그림 1 점선).

기존의 차이분할메쉬 생성방법은 임의의 3차원 점으로부터 복원된 메쉬와 도메인 메쉬와의 차이값을 샘플링하여 도메인메쉬와 차이맵으로 차이분할메쉬를 표현

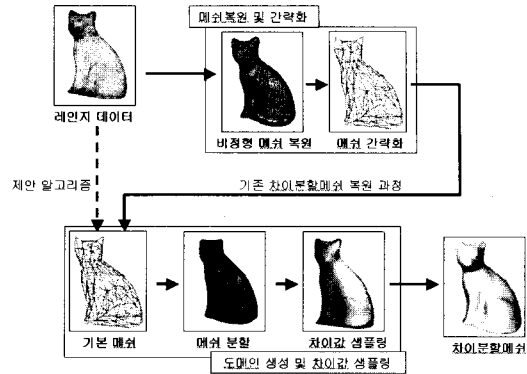


그림 1 차이분할메쉬 생성 과정 비교

실선 : 기존 차이분할메쉬 복원 과정(메쉬 복원 및 간략화를 통한 기본메쉬 생성)

점선 : 제안 알고리즘(레이저 데이터로부터 직접적인 기본메쉬 생성)

한다. 본 논문의 특징은 이러한 차이값 샘플링을 복원된 메쉬로부터가 아니고 초기에 주어진 임의의 3차원 점으로부터 직접 샘플링한다는 점에 있다. 즉, 복원된 메쉬가 주어지지 않기 때문에 점데이터 집합과 도메인 메쉬와의 차이값을 도메인 메쉬의 각 정점벡터 방향으로 샘플링 할 경우 점데이터가 이룰수 있는 가상면의 조합을 다 찾아야 하는 어려움이 있다. 본 알고리즘은 면과 정점벡터의 교차여부와 면적의 크기를 기준으로 하는 유효면 판정규칙을 고안하여 빠르고 효율적인 차이값 샘플링 방법을 제안하고 있다. 또한 입력 점데이터의 형상에 최대한 근접하며 부드러운 차이분할메쉬를 얻기 위하여 지역적 곡률을 최소화 하는 힘과 입력점으로부터 멀어지는 힘을 최소화 하는 힘을 정의하는 라플라시안 평활화를 이용한 최적화함수를 제안한다. 이렇게 복원된 차이분할메쉬는 주어진 입력 점데이터에 최대한 근사하는 간단한 기본메쉬와 이를 분할하여 얻은 각 파라메트릭 좌표에 할당될 1차원 상수 차이맵 구조로 표현된다. 이는 기존의 메쉬 저장 방법인 모든 정점의 3차원 좌표를 저장하는 방법에 비해 2/3 이상의 메모리 절약 효과가 있다. 또한 복원된 메쉬는 분할연결성을 가지는 분할메쉬이므로 재메쉬화 등의 후처리 과정 없이 웨이블릿 기반의 다단계 메쉬 표현 및 압축에 직접 적용되어 활용될 수 있다[14].

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 본 논문의 관련 연구에 대해 소개하며, 3장에서는 문제 및

용어에 대해 정의한다. 4장에서는 제안하는 차이분할메쉬 복원 알고리즘에 대해 구체적으로 알아보고 5장에서는 실험 결과를 기존 복원 방법과 비교하며 마지막 6장에서는 결론 및 향후연구로 끝맺는다.

## 2. 관련 연구

본 논문의 관련연구는 연결정보가 없는 3차원 점으로부터 메쉬 복원 기술과 차이분할메쉬 생성을 위한 차이값 샘플링 연구이다.

### 2.1 메쉬 복원 기술

#### 2.1.1 비정형 메쉬 복원 기술

연결정보가 없는 공간상의 점 데이터를 3차원 모델로 복원하는 기술은 컴퓨터 비전 및 그래픽스 분야에서 많이 연구되고 있다 [1, 6, 7, 13, 15]. 초기에는 주어진 점을 지나는 부드러운 곡선이나 곡면을 구해내는 곡면 근사기술에 대한 이론적인 연구가 대부분이었으나 최근에는 광학 기술의 발달에 힘입어 3차원 스캐닝 장비를 통해 획득한 공간상의 연결정보가 없는 점 데이터를 입력으로 받아 이에 최대한 근접하는 3차원 메쉬 복원기술에 대한 연구가 진행 중이다. Hoppe는 점 데이터를 점평면을 이용하여 거리함수를 구한 후 이를 이용하여 복셀 정보를 구하여 Marching cube 알고리즘으로 대략적인 3차원 메쉬를 복원하고, 이를 간략화 하여 원하는 상세도를 가진 메쉬를 생성하였다[6]. 이렇게 복원된 메쉬는 데이터양이 많으므로 간략화가 필수적이며 복셀의 해상도에 따라 복원되는 메쉬의 품질이 좌우되는 단점이 있다. 이후에 에너지 최적화 및 메쉬 분할법을 이용하여 견고하고 우수한 품질의 메쉬를 복원하는 알고리즘으로 발전시켰으나 계산량이 많은 단점이 있다[7].

#### 2.1.2 분할 메쉬 복원 기술

Suzuki [15]는 메쉬분할법을 메쉬 복원기술에 적용하여 분할메쉬를 결과로 복원하는 알고리즘을 제안하였다. 분할메쉬는 다단계 메쉬 표현을 위해 필수적이기 때문에 메쉬 복원 단계에서 분할메쉬를 생성하는 것은 많은 장점을 가진다. Suzuki는 Loop 메쉬분할법에서 극한위치를 간단한 수식계산만으로 구해 낼 수 있다는 점을 이용하여 메쉬분할시에 극한위치가 점 데이터와 가장 근접할 수 있도록 매 분할 단계마다 기본 메쉬의 모양을 수정하는 방법을 제안하였으며, 계산량을 줄이기 위하여 에너지 최적화 방법 대신 Gauss iteration 방법을 도입하였다. Hoppe방법보다 계산량이 매우 적은 장점이 있고 생성되는 메쉬가 분할메쉬라는 장점이 있지만 자세한 형상 표현이 부족하다는 단점이 있다. 즉, 복원되는 메쉬는 주어진 3차원 점에 최대한 근접하는 부드러운

곡면이며 메쉬 복원기술이라기 보다 곡면근사기술에 가까운 기술이다.

### 2.2 차이값 샘플링 기술

본 논문에서 생성하는 차이분할메쉬는 상수 차이값에 기반한 메쉬이므로 메모리 효율적인 구조를 가진다. 즉, 전체적인 형상은 일반적인 메쉬분할법에 의하여 간단한 기본메쉬로부터 자동으로 생성되고 세부적인 표면 정보는 각 파라메트릭 좌표에 할당되는 1차원 차이값으로 복원되므로, 복잡한 연결정보와 기하정보를 가진 전체 메쉬를 저장하는 것이 아니라 단지 간단한 기본메쉬와 1차원 차이값만 저장하면 된다. 차이값을 만들기 위하여 차이값을 샘플링하는 기술에 대한 기존 연구는 B-스플라인 곡면에 기반한 방법과 분할메쉬에 기반한 방법이 대표적이다.

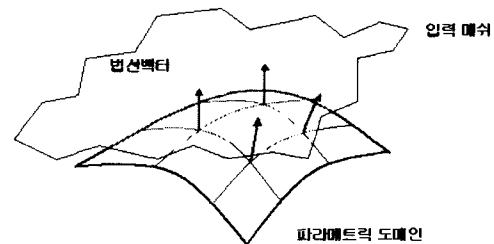


그림 2 파라메트릭 도메인에서 메쉬까지의 차이값 샘플링

Krishnamurthy와 Levoy[9]는 다각형 메쉬를 B-스플라인 곡면과 차이값으로 표현하였다. 입력받은 다각형 메쉬를 사용자가 수동으로 적절한 개수의 영역들로 분할한 후 각각의 다각형 영역에 잘 들어맞는 B-스플라인 곡면을 구하여 이를 기반으로 표면의 세부 표현을 위해서 곡면의 각 격자점에서 다각형 영역과 B-스플라인 곡면과의 3차원 차이 벡터를 구한다. 이 방법은 B-스플라인 곡면에 기반하여 3차원 벡터값을 저장하므로 메모리 효율적이지는 않다.

Aaron Lee [10]는 Loop 메쉬분할법으로 생성한 부드러운 파라메트릭 도메인 표면에서 대상 메쉬에 표면 법선 방향으로 차이값을 샘플링을 하여 근사하는 새로운 메쉬를 생성하는 방법을 제안하였다. 즉, 입력 메쉬를 간략화 하여 생성한 기본메쉬를 Loop분할법으로 분할하여 파라메트릭 도메인을 생성한 후, 각 도메인 좌표 상에서 정점법선벡터 방향으로 차이값을 샘플링 하여 차이값을 생성하는 방법이다. 차이분할메쉬는 일반적인 메쉬 복원 기술로 생성된 비정형 메쉬의 단점인 많은 데이터양과 비정형구조를 해결할 수 있는 좋은 구조를

가지나 이를 생성하는 기존의 방법은 메쉬 복원기술이 아니라 메쉬 변형기술이므로 레인지 데이터로부터 차이 분할메쉬를 얻기 위해서는 일반적인 메쉬 복원 알고리즘으로 비정형 메쉬를 복원한 후 다시 재메쉬화 과정을 통하여 차이분할메쉬를 생성하여야 한다.

### 3. 문제 정의

본 알고리즘은 연결정보가 없는 3차원 점의 집합을 입력으로 받아 이에 근사 하는 3차원 다각형 메쉬를 결과로 생성한다. 제안하는 알고리즘은 복원되는 결과 메쉬  $M'$  이 차이맵에 기반한 메모리 효율적인 차이분할 메쉬의 구조를 갖는다.

#### 1) 입력 점데이터

본 알고리즘의 입력 데이터는 실제 물체  $M$ 로부터 획득한 연결정보가 없는 3차원 점  $x_i$ 의 집합  $X$ 이다.

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

본 논문의 입력 점 데이터는 노이즈가 없고 이미 정렬이 되어 있다고 가정하며, 복원 대상 모델  $M$ 의 위상을 평면 위상이나 Genus 0의 구의 위상을 갖는 모델로 제한한다.

#### 2) 파라메트릭 도메인 및 차이값

샘플링을 수행하는 파라메트릭 도메인  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$P = S^k m$$

$m$  : 점 데이터로부터 생성한 기본메쉬

$S$  : 메쉬 분할 연산(Loop 메쉬분할법)

$k$  : 샘플링 당시의 메쉬 분할 레벨

차이값  $d$ 는 파라메트릭 도메인의 한 정점  $p$ 와 점 데이터  $X$ 로부터 유추된 된 실제 물체의 표면  $M$ 까지의 거리를 정점법선벡터 방향으로 측정된 값을 의미한다 (그림 3). 제안 알고리즘은 점 데이터로 가상의 삼각형을 여러 개 만든 후 이 중에서 법선 벡터와 교차하면서 넓이가 최소인 삼각형을 유효 삼각형이라고 정의하며 정점  $p$ 에서부터 유효 삼각형까지의 정점법선벡터 방향의 거리를 차이값으로 구한다.

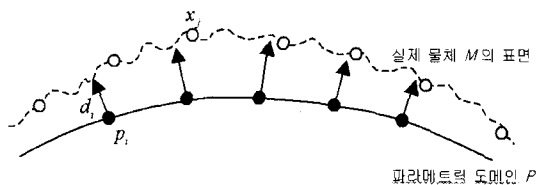


그림 3 차이값 샘플링 개념도

#### 3) 복원 문제

본 알고리즘으로 복원되는 메쉬는 간단한 기본메쉬와 차이맵 으로 저장되는 차이분할메쉬  $M'$  이다.

$$M' = (m, D)$$

$D$  : 차이맵  $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$

그러므로, 제안 차이분할메쉬 복원 알고리즘은 실제계의 물체  $M$ 으로부터 획득한 3차원 점의 집합  $X = \{x_0, x_1, \dots, x_{n-1}\}$ 로부터  $M$ 과 근사한 차이분할메쉬  $M'$ 을 정의하는  $P$ 와  $D$ 를 생성하는 과정이다.

$$M' = P + D$$

즉, 메쉬 분할법으로 기본메쉬  $m$ 을 적절한 해상도를 갖는 레벨  $k$  까지 분할하여 파라메트릭 도메인  $P$ 를 생성한 후,  $P$ 의 각 정점에 차이값  $D$ 를 법선 벡터 방향으로 더하여 변형시키면 최종의 원하는 3차원 메쉬를 얻게 된다. 메쉬 분할법으로 분할하는 과정은 저장할 필요가 없으므로 저장해야 하는 데이터는 간단한 기본메쉬와 1차원 상수로 정의되는 차이맵 뿐이며 이러한 기본구조로 인해 메모리 효율적인 메쉬 구조를 가질 수 있다.

### 4. 차이분할메쉬 복원 알고리즘

본 절에서는 연결정보가 없는 점 데이터로부터 차이 분할메쉬를 복원하는 알고리즘을 소개한다. 제안하는 복원 알고리즘의 흐름도는 다음과 같다.

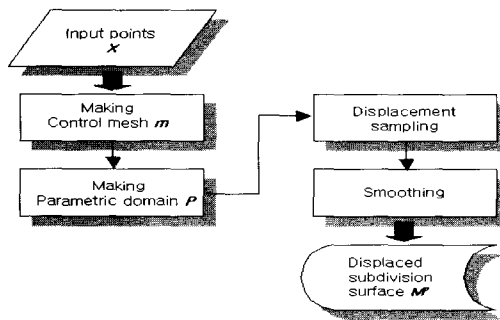


그림 4 복원 알고리즘의 흐름도

#### 4.1 기본메쉬 생성

기본메쉬 생성은 전체 메쉬의 모양과 샘플링 정확도를 결정하는 중요한 과정이다. 입력 레인지 데이터에 최대한 근접한 기본모델이 생성되어야 파라메트릭 도메인도 최대한 근접한 결과를 얻을 수 있고 샘플링이 성공적일 수 있다.

대상 모델의 위상이 평면인 경우(지형모델 등) 점 데이터의 최대, 최소의  $x, y, z$  값을 구한 후, 최대값과 최소값이 대각선이 되는 사각 평면을 기본 메쉬로 생성한다. 대상 모델의 위상이 구형인 경우 점 데이터를 포함하는 바운딩박스(bounding box)를 생성하고 각 면과 모서리를 2~3회 분할한 후 점 데이터와 거리가 최소가 되도록 변형시켜 기본메쉬를 만들 수 있다. 이 때 중심점에서 샘플링을 하는 방법을 사용하였는데, 레인지 데이터의 중점에서 각 포함상자의 정점을 지나는 방향으로 광선을 쏘아 가장 근접한 레인지 데이터를 구한 후 그 점의 위치로 바운딩박스의 정점을 변경시켜 주었다.

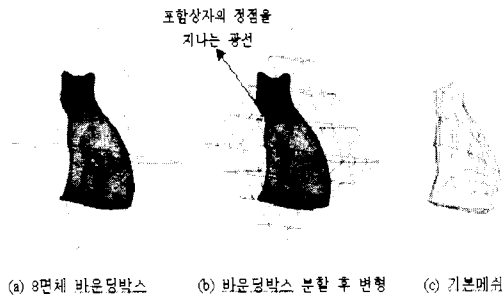


그림 5 바운딩박스를 이용한 기본메쉬 생성

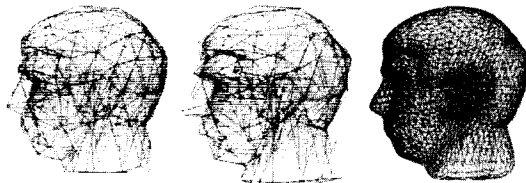


그림 6 분할 표면 근사 기법을 이용한 파라메트릭 도메인 생성

#### 4.2 파라메트릭 도메인 생성

기본메쉬를 Loop 메쉬분할법으로 분할하여 원하는 복잡도를 가진 파라메트릭 도메인을 생성한다. 파라메트릭 도메인과 점 데이터 사이의 차이값을 성공적으로 샘플링하기 위해서는 파라메트릭 도메인이 입력 점 데이터에 충분히 가까워야 한다. 그러나 Loop 메쉬분할법은 메쉬 축소(shrinkage)현상이 발생하기 때문에 이를 보정해 주어야 한다. 이를 위해서 Suzuki[15]의 분할 메쉬 근사 기법을 도입하여 입력 점 데이터에 최대한 근사하면서 부드러운 파라메트릭 도메인을 생성한다. 그림

6의 (b)는 메쉬 축소 현상을 보완하기 위하여 기본 메쉬를 변형한 모습이고 (c)는 분할 후 레인지 데이터에 최대한 근접한 파라메트릭 도메인을 생성한 결과이다.

#### 4.3 입력 점 데이터로부터 차이값 샘플링

차이값 샘플링은 표면의 세부 정보를 표현하기 위해서 파라메트릭 도메인과 입력 레인지 데이터로 추정할 수 있는 복원 대상 모델과의 차이를 추출하는 과정이다. 기존의 메쉬 기반 차이값 샘플링은 원래 메쉬로부터 도메인 메쉬까지의 거리를 추출해 내는 방법으로 도메인 상의 각 정점에서 법선 벡터 방향으로 발사한 샘플링 광선과 교차하는 원래 메쉬상의 위치를 정확히 구할 수 있으나 제안 알고리즘은 연결정보가 없는 점 데이터만을 이용하여 가상의 모델의 표면을 추정하고 차이값을 샘플링 해야 하는 어려움이 있다. 본 논문에서는 입력 점 데이터로 생성 가능한 삼각형의 조합 중에서 실제로 법선벡터와 교차하는 삼각형을 찾는다.

입력 점 데이터  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  가 주어졌을 때 파라메트릭 도메인의 한 정점  $p_i$ 에서의 차이값  $d_i$ 는  $X$ 의 원소로 구성할 수 있는 여러 삼각형 중에서 정점  $p_i$ 의 정점법선벡터와 교차하면서 면적이 제일 작은 삼각형 - 유효삼각형 - 과의 거리를 말한다 (그림 7 점선으로 표시된 삼각형). 이때 구해진 유효삼각형  $T_{valid}$  는 점 데이터  $X$ 가 샘플링 되었던 실제 물체의 표면에 지역적으로 가장 잘 근사하는 삼각형이라고 볼 수 있다.

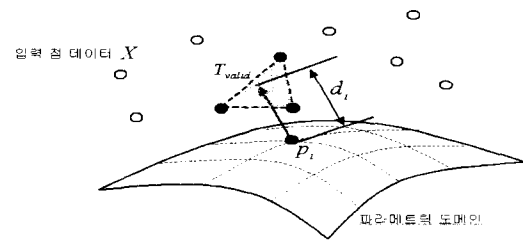


그림 7 점 데이터로 생성한 유효삼각형까지 차이값 샘플링

파라메트릭 도메인의 각각의 정점  $p_i$ 에 대해 차이값  $d_i$ 를 구하기 위해서는 유효 삼각형을 구해야 하는데,  $X$ 의 원소 중 정점  $p_i$ 의 정점법선벡터  $n_i$ 와 수직 거리가 가까운 입력 점부터 순서대로 가상의 삼각형을 만들어 유효성을 조사한다. 처음에는 가장 가까운 세 개의 점으로 삼각형을 만든 후, 법선 벡터가 이 삼각형과 교차하는지를 조사한다. 만일 교차 할 경우 이 삼각형을 유효 삼각형으로 간주하고 이 삼각형까지의 거리를 차이값으로 샘플링 하게 된다. 만약 교차하지 않는 경우 법선 벡

터와 다음으로 가까운 점을 하나 더 추가하여 만들 수 있는 가능한 삼각형을 조합을 통하여 생성한다. 이렇게 생성한 삼각형 각각에 대해 법선 벡터와의 교차 여부를 같은 방법으로 조사하여 유효삼각형이 찾아 질 때까지 반복한다. 만일 법선벡터와 교차하는 삼각형이 여러 개 찾아 진 경우 그 중에서 법선벡터의 수직인 평면으로 정사영 시켰을 때 넓이가 제일 작은 삼각형을 유효삼각형으로 간주한다. 이때 넓이가 최소인 삼각형을 유효삼각형으로 간주하는 이유는 샘플링이 점 데이터의 매우 일부분만 사용하여 지역적으로 수행되므로 삼각형을 만들기 위하여 점 데이터에서 탐색하는 지역이 거의 평면에 가깝다고 볼 수 있으며, 평면에 흩뿌려져 있는 점을 이어서 삼각형을 만드는 경우 넓이가 제일 작은 것을 택하는 것이 실제로 삼각화를 하였을 때에 생성될 수 없는 잘못된 삼각화를 방지할 수 있기 때문이다. 그림 8 은 점 데이터로부터 유효삼각형을 찾아 차이값을 샘플링 하는 과정을 2차원적으로 보여 주고 있다. 그림에서 (a,b)와 (c,d)는 모두 법선벡터와 교차하는 삼각형이 될 수 있지만 (c,d)를 유효삼각형으로 택한다면 차이값이 실제 보다 작게 측정될 것이다. 즉, 넓이가 가장 작은 삼각형 (a,b)가 샘플링 당시의 모델에 가장 근접한 삼각형으로 볼 수 있다. 그러므로 법선벡터와 교차하는 삼각형이 중복으로 찾아 진 경우 최소의 넓이를 가진 삼각형을 유효삼각형으로 간주한다.

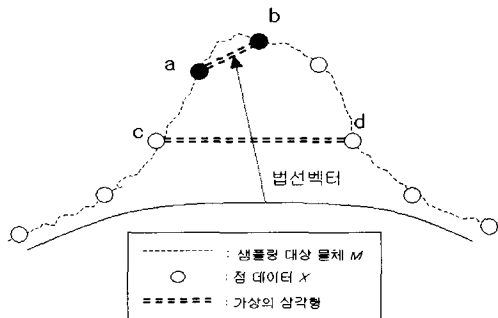


그림 8 유효삼각형까지의 차이값 샘플링

다음은 주어진 정점법선벡터  $n_i$  에 대해 유효 삼각형  $T_{valid}$ 를 찾는 의사코드 이다.

**Procedure** *Get\_Valid\_Triangle*( $X, n$ )

```
{
  Let  $X$  be the set of input range points
  Let  $n$  be the vertex normal
```

```
  Let tempXQ be a queue for storing points  $x_i$  in  $X$ 
  Let tempTQ be a queue for storing virtual triangles
  Return the valid triangle  $T_{valid}$  made with three points in  $X$ 

  Sort  $X$  according to vertical distance to  $n$ 
  Put  $x_1 \sim x_3$  in tempXQ
  do // finding virtual triangles
  {
    do // make combination from tempXQ
    // to make virtual triangles
    {
      Make triangle  $T$  by combination of points in tempTQ
      If( $T$  intersect  $n$ ) add  $T$  in tempTQ
    } while no more triangle  $T$  can be made from tempXQ
    add next closest point  $x_i$  to tempXQ
  } while tempTQ is empty
  return smallest triangle in tempTQ // return valid triangle
}
```

그림 9는 유효 삼각형  $T_{valid}$ 를 찾는 예제를 보여주고 있다. 그림에서 점정색 점으로 표현된 것이 정점법선벡터  $n_i$ 이며 본 논문 지면위로 수직으로 뚫고 올라오는 방향으로 설정되었다. 지면은 정점  $p_i$ 를 지나고 정점법선벡터를 법선벡터로 가지는 평면이며 흰색 점은 본 평면에 정사영된 입력 점 데이터  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_5\}$  이다. 점 데이터  $X$ 와 정점법선벡터  $n_i$ 가 주어 졌을 때  $X$ 로 생성 가능한 가상의 삼각형의 갯수는  ${}_5C_3 = 10$ 개 이다. 10개의 가상 삼각형 중에서  $n_i$ 와 교차하는 삼각형은 그림과 같이  $(x_1, x_2, x_4)$ ,  $(x_1, x_3, x_4)$ ,  $(x_1, x_4, x_5)$  세 개 이고 (그림 9 (b)~(d)) 이 중에서 넓이가 제일 작은  $(x_1, x_4, x_5)$ 가 실제로  $n_i$ 와 교차하는 삼각형이므로 차이값을 샘플링 할 유효 삼각형이 된다 (그림 9 (d)).

법선벡터에 수직 최단거리 점을 구할 때에는 Octree 기반의 공간탐색법을 이용하여  $O(\log n)$  이하의 복잡도로 탐색이 가능하다 ( $n$ : 입력 점 개수). 즉, 입력받은 점 데이터들을 최소육면체를 이용해 여러개의 작은 최소육면체들로 분할시켜 Octree를 생성한다. Octree의 각 노드에는 해당 육면체에 포함된 정점의 포인터가 저장된다. Octree를 이용해 파라메트릭 도메인의 정점  $p_i$ 와 정

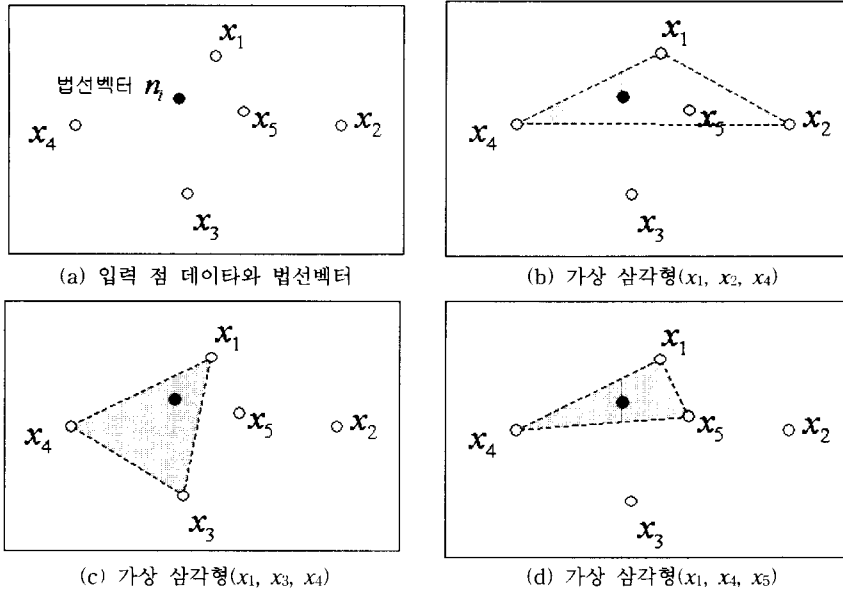


그림 9 법선벡터와 교차하는 가상의 삼각형의 예

점법선벡터  $n_i$ 이 주어 졌을 때  $n_i$ 까지의 수직 최단거리 점을 찾는다. 최단거리 점은 Octree에서 정점  $p_i$ 를 포함하는 리프노드 찾아서 그 노드가 포함한 정점 중에서 정점법선벡터  $n_i$ 까지의 수직 거리가 최소인 점이다. 이때 법선 벡터의 수직 거리로 근접한 점을 찾는 이유는 그림 10과 같이 샘플링 지점인 정점  $p_i$ 로부터의 3차원 거리는 멀지만 법선 벡터와는 가깝기 때문에 실제로 샘플링을 하여야 하는 위치를 제대로 찾기 위해서이다.

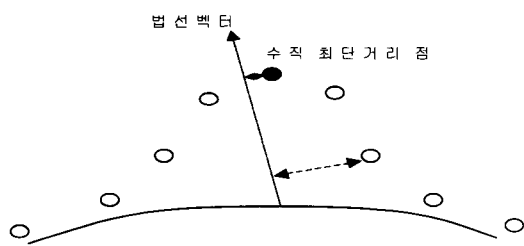


그림 10 법선벡터에 수직최단거리 정점(회색점)

#### 4.4 메쉬 표면 최적화

앞에 설명한 세 단계만으로도 이미 차이값을 가진 분할메쉬를 얻을 수 있다. 그러나, 최대한 표면이 최적화된 메쉬를 얻기 위해서 입력 점데이터에 기반한 라플라시안 평활화 방법을 제안한다. 일반적인 메쉬 평활화는

다음과 같은 연속적인 가우시안 필터링에 의해 얻어진 다 [16]:

$$M^{n+1} = M^n + \lambda L(M^n)$$

$$L(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j \in N_i(x_i)} (x_j - s_i)$$

$M^n$  : 평활화를  $n$ 번 거친 메쉬

$L(x)$ : 정점  $x$ 의 라플라시안 함수

그러나, 위와 같은 메쉬 평활화는 메쉬 축소화를 발생시켜 메쉬의 모양을 많이 변형시키며 표면 세부 정보를 손상시킨다. 그러므로, 본 논문에서는 입력 점데이터로부터 거리가 멀어지는 것을 방지하는 항을 추가하여 다음과 같이 **입력 데이터 기반 라플라시안**을 정의 하였다.

$$L(x_i) = (x_{nearest} - x_i) \frac{1}{m} \sum_{j \in N_i(x_i)} (x_j - s_i)$$

$x_{nearest}$  : 입력 레인지 데이터 중  $x_i$ 와 가까운 점

$N_i(x_i)$  :  $x_i$ 의 1-이웃점(1-neighbor)들

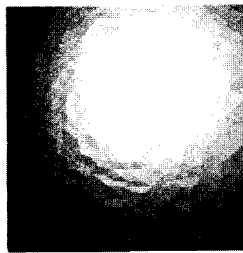
벡터  $x_{nearest} - x_i$ 는  $x_i$ 로부터 입력 레인지 데이터로의 외향힘(outer force)를 의미하고,  $\frac{1}{m} \sum_{j \in N_i(x_i)} (x_j - s_i)$ 은 로부터 1-이웃점들로 구성되는 평균평면 까지의 벡터를 의미한다. 입력 데이터 기반 라플라시안은 지역적 곡률을 최소화 하려는 힘과 입력 레인지 데이터로부터 멀어지는 것을 최소화하려는 힘의 합으로 정의되었으므로 전체적인 모양을 크게 변화 시키지 않으면서 최대한 부드러운 표면을 결과로 얻을 수 있다.

표 1 실험 결과(Geometric, Cat, Spock, head, Beethoven model)

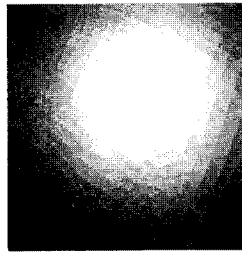
모델	데이터			수행시간 (초)			
	입력 #V	도메인 #V	도메인 #F	도메인 생성	복원	최적화	합계
Cat	5842	6402	12800	2	17	2	21
Spock head	16386	19202	38400	5	111	3	119
Venus	22502	20162	40320	5	212	3	220

표 2 기존 메쉬 복원 알고리즘과의 실험 결과 비교

		입력 레인지 데이터 개수	복원 결과 메쉬 정점 개수	소요시간
Suzuki 알고리즘	Cat	5842	6146	1 초
	Spock head	16386	24578	3 초
제안 알고리즘	Cat	5842	6402	21 초
	Spock head	16386	19202	119 초

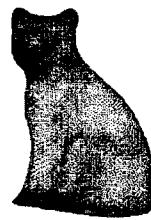


(a) 최적화 전

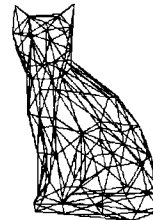


(b) 최적화 후

그림 11 입력 데이터 기반 표면 최적화 결과



(a) 입력 점  
데이터



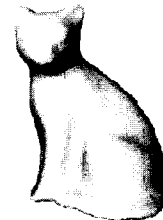
(b) 기본 메쉬



(c) 파라메트릭  
도메인



(d) 차이값 샘플링



(e) 복원된 차이 분할 메쉬

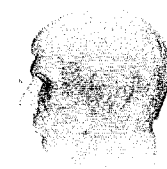
그림 12 Cat 모델의 각 단계별 복원 과정

## 5. 결과

### 5.1 실험 결과

실험 환경은 Pentium III 866CPU 384M ram의 PC이며, OpenGL, OpenInventor 라이브러리와 Visual C++을 사용하여 구현하였다. 복원 결과는 표 1, 2 및 그림 11~13과 같다.

제안 알고리즘은 대부분의 시간을 차이값 샘플링 과정에 소비하고 있기 때문에 Suzuki방법에 비해 조금 느리나 세부 표현이 훨씬 자세한 장점이 있으며, Hoppe의 에너지 최적화 방법으로 수시간에 걸쳐 복원되는 결과 만큼의 정확도를 갖지는 못하지만 수 분 내로 전체적인 형상과 자세한 형상 표현이 모두 가능하므로 CAD데이터와 같이 정확도가 중요시되는 데이터가 아닌 그래픽스 데이터의 경우 빠른 시간내에 비교적 근사하게 입력 데이터에 근사하는 메쉬를 복원 해 낼 수 있다는 유용성을 가진다.



(a) 입력 레인지  
데이터

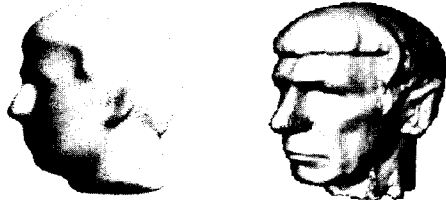


(b) 기본 메쉬

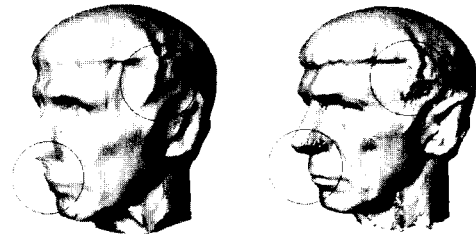


(c) 파라메트릭  
도메인

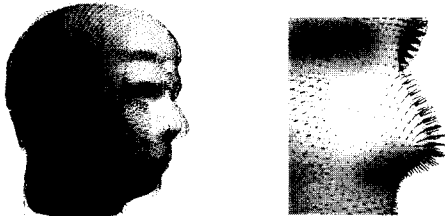




(d) 차이값 샘플링 (e) 복원된 차이분할메쉬  
그림 13 Spock head 모델의 각 단계별 복원 과정



(a) Suzuki 알고리즘의 복원 결과 (b) 제안 알고리즘의 복원 결과  
그림 15 Suzuki 알고리즘[15]과 제안하는 알고리즘의 Spock head 복원 결과 비교



(a) 레인지 데이터와 (b) 코 부근의 차이값 벡터 도메인 표면  
그림 14 Spock head 모델의 차이값 샘플링 예



(a) Suzuki 알고리즘의 복원 결과 (b) 제안 알고리즘의 복원 결과  
그림 16 코와 입 주위를 확대하여 비교한 모습

### 5.2 실험 평가

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 메쉬 복원 알고리즘을 기존 분할메쉬 복원 알고리즘[7, 15]과 비교, 평가한다.

#### 5.2.1 복원 소요 시간 및 표면 세부 정보 표현

제안하는 알고리즘은 기존 알고리즘[7]이 사용하였던 수 시간이 걸리는 에너지 기반의 간략화 대신에 기하학적 위치정보만을 이용한 표면 정보 샘플링 방법을 이용하여 복원시간을 수분으로 대폭 단축시켰다. Suzuki는 단지 1-이웃점들의 정보만 이용하여 지역적으로 극한위치를 구하고 이를 반복적인 수렴과정을 통하여 Hoppe 방법보다 빠르게 복원이 가능하다고 주장하였으나 복원 시간이 적게 걸리는 대신 세부 표현이 거의 불가능하였다. 본 논문의 제안하는 알고리즘은 Suzuki 방법처럼 지역적인 계산만 이용함으로써 빠른 복원이 가능하며, 차이값 샘플링 기법을 이용하여 표면 세부 표현도 최대한 자세하게 표현할 수 있다.

Suzuki 알고리즘과 본 논문의 알고리즘과의 차이 중 하나는 기본 메쉬 생성 방법이다. Suzuki 알고리즘에서는 기본 메쉬가 Bounding Box이며 이를 분할해 나감과 동시에 각 정점(Vertex)의 위치는 극한 위치(limit position)와 가장 근접한 레인지 포인트의 위치가 되도록 한다. 이 방법의 문제점은 그림 15(a), 16(a)에서 보

이듯이 convex나 concave 지역이 불완전할 수 있다. 본 논문에서 제공하는 알고리즘은 기본 메쉬 생성시 간단한 Bounding Box를 생성한 후 이를 수 회 분할하여 정점(Vertex)들이 고르게 분포되도록 기본 메쉬를 생성 후 복원을 하게 된다. 이 때문에 그림 16(b)처럼 복원이 가능하게 되었다

그림 15는 Suzuki 알고리즘과 본 논문의 알고리즘을 이용하여 Spock head를 복원한 결과 비교이다. Suzuki 방법으로 복원된 결과를 보면 옆 머리 부근과 코 주변 같이 복잡한 부근의 정밀도가 떨어짐을 확인할 수 있다. 또한 Suzuki 방법은 거리상 가장 가까운 점을 근접한 점이라고 보고 복원을 하였기 때문에 코 끝부분이 잘려나간 듯이 복원되었음을 볼 수 있다(그림 16). 다음의 표 3은 입력 레인지 데이터와 복원된 메쉬와의 차이를 계산하는 gap function[15] 으로 Suzuki 알고리즘으로 복원한 결과와 제안 알고리즘으로 복원된 결과의 품질을 비교 하고 있다. 표에서 보듯이 제안하는 알고리즘이 최대 차이 에러 및 차이 에러 평균 수치에 있어서 Suzuki 알고리즘 결과보다 매우 우수함을 볼 수 있다. 이는 제

표 3 Spock head 모델의 차이 에러 비교 (Suzuki 알고리즘, 제안 알고리즘)

	최대 차이 에러	최소 차이 에러	차이 에러 평균
Suzuki 알고리즘	0.123361	0.000108	0.010948
제안 알고리즘	0.026467	0.000131	0.007379

안하는 알고리즘이 입력 레인지 데이터의 전체적인 윤곽뿐만 아니라 세부적인 표면 정보까지 최대한 자세하게 복원할 수 있음을 보여준다.

#### 5.2.2 다단계 메쉬 표현

제안하는 알고리즘으로 복원되는 차이분할메쉬는 분할연결성이 있는 분할메쉬로 직접적인 다단계 표현이 가능하다. 분할메쉬가 아닌 임의의 메쉬가 다단계 모델링에 적용되기 위해서는 정형구조(regular structured) 메쉬로 변환되어야 한다. 이러한 변환 과정을 *재메쉬화*라고 한다[5, 11]. 대부분의 재메쉬화 기법은 1-4 메쉬 분할법으로 정형구조를 만들어낸다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 메쉬분할법으로 생성한 파라메트릭 도메인에서 차이값을 샘플링 하므로 메쉬의 기본 연결구조는 분할연결성을 갖는 piecewise-regular 메쉬이다. 그러므로, 본 알고리즘으로 복원된 결과 메쉬는 재메쉬화 과정을 거치지 않고 바로 웨이블릿 기반의 다단계 메쉬 표현에 적용되어 사용 될 수 있다.

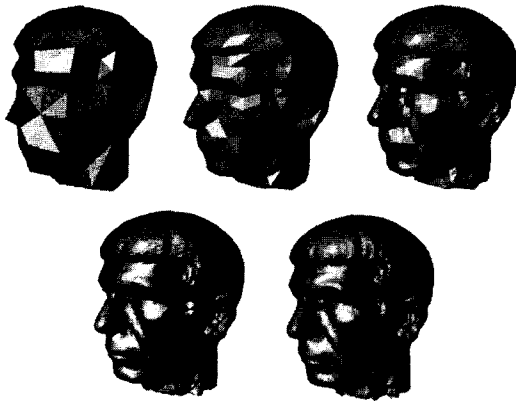


그림 17 Spock head 모델의 다단계 메쉬 생성 결과 (레벨 0~4)

Hoppe[7]와 Suzuki[15]의 복원방법도 분할메쉬를 결과로 생성하지만 Hoppe의 방법은 최적화 된 기본메쉬를 부드럽게 만들기 위하여 메쉬 분할법을 이용한 것으로, 메쉬 분할에 의해 생성되는 새로운 점들은 입력 레인지 데이터가 표현하는 대상의 세부 표면 정보를 표현

하지 않는다. 그러므로 Hoppe의 방법으로 복원된 메쉬는 분할연결성을 갖지만 다양한 LOD를 생성하는데 적합하지 못한 메쉬이다. Suzuki의 방법도 분할메쉬를 생성하지만 이 방법은 메쉬 복원이 아니라 보다는 표면 근사(surface fitting)에 가까운 방법으로 세부 표면 정보는 거의 표현하지 못하고 최대한 근사하는 부드러운 메쉬를 생성해 내므로 다단계 표현에 적합하지 않다.

## 6. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 연결정보가 없는 점 데이터로부터 차이분할메쉬를 직접 생성하는 새로운 메쉬복원 알고리즘을 제안하였다. 기존의 차이분할메쉬 생성 기법에서는 원래의 메쉬와 도메인 메쉬와의 차이값을 샘플링한 반면, 제안 알고리즘은 복원된 메쉬가 주어지지 않기 때문에 연결정보가 없는 점데이터와 도메인 메쉬와의 차이값을 샘플링하는 새로운 방법을 제안하였고, 기존 차이분할메쉬 생성방법은 비정형 메쉬복원, 메쉬 간략화, 기본메쉬 생성, 그리고 차이값 샘플링의 과정을 처리해야 하나 제안 알고리즘은 비정형 메쉬 복원과 메쉬 간략화 과정을 생략하여 빠르게 차이분할메쉬를 생성할 수 있다. 또한 제안하는 알고리즘은 계산량이 많은 전역적 에너지 최적화 대신 분할곡면 근사기법을 적용한 파라메트릭 도메인 생성 및 각 파라메트릭 법선 방향으로의 유효한 가상의 교차 평면을 찾는 방법으로 표면 정보를 빠르고 정확하게 샘플링 하고 지역적인 Laplacian 평활화 방법을 이용하여 최적화 하기 때문에 비교적 적은 계산량으로 고품질의 메쉬를 복원할 수 있다. 복원되는 메쉬는 저장해야 하는 데이터 양이 매우 적은 메모리 효율적이며 분할연결성을 갖는 메쉬 구조를 얻게 되므로 메쉬 간략화나 재메쉬화등의 후처리 과정 없이 다단계 애니메이션 등의 응용분야에 직접적으로 활용될 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 메쉬 변환시에 사용하였던 표면 세부정보 샘플링 기법을 연결정보가 없는 점의 집합에 적용하여 효율성을 보였으며, 임의의 위상을 가진 모델에 대해서도 블룸 기반 위상추출 방법을 이용하여 기본메쉬만 획득할 수 있다면 본 알고리즘에서 제안하는 표면 세부정보 샘플링 방법을 그대로 적용 가능하므로 향후연구로 효과적인 기본메쉬 생성 기법과 임

의 위상을 가진 모델의 복원기법에 대해 연구 중이다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. M. Bolle and B. C. Vermuri. *On three-dimensional surface reconstruction methods*. IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 13, No.1, January 1991.
- [2] E. Catmull and J. Clark. *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*. Computer-Aided Design, 10:350-355, September 1978.
- [3] N. Dyn, J. Gregory, and D. Levin. *A Butterfly Subdivision Scheme for Surface Interpolation with Tension Control*. ACM Trans. Graph. 9, pages. 160-169, 1990.
- [4] T. DeRose, M. Kass, and T. Truong. *Subdivision surfaces in character animation*. Computer Graphics (SIGGRAPH 98 Proceedings), pages. 85-94, July 1998.
- [5] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, and W. Stuetzle. *Multiresolution analysis of arbitrary meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH 95 Proceedings), pages. 173-182, August 1995.
- [6] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. *Surface reconstruction from unorganized points*. Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Proceedings), 26(2):71-78, July 1992.
- [7] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, M. Halstead, H. Jin, J. McDonald, J. Schweitzer, and W. Stuetzle. *Piecewise smooth surface reconstruction*. Computer Graphics (SIGGRAPH 94 Proceedings), pages. 295-302, July 1994.
- [8] L. Kobbelt, *Interpolatory Subdivision on Open Quadrilateral Nets with Arbitrary Topology*. Computer Graphics Forum 15 (1996), Eurographics 96 Conference Issue, pages. 409-420, 1996.
- [9] V. Krishnamurthy and M. Levoy. *Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH 96 Proceedings), pages. 313-324, August 1996.
- [10] A. Lee, H. Moreton, and H. Hoppe. *Displaced subdivision surfaces*. Computer Graphics (SIGGRAPH 2000 Proceedings), pages 85-94, August 2000.
- [11] A. Lee, W. Sweldens, P. Schröder, L. Cowsar, and D. Dobkin. *MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces*. Computer Graphics (SIGGRAPH 98 Proceedings), pages. 95-104, July 1998.
- [12] C. Loop. *Smooth subdivision surfaces based on triangles*. Masters thesis, Department of Mathematics, University of Utah, August 1987.
- [13] M. Lounsbery, S. Mann, and T. DeRose. *Parametric surface interpolation*. IEEE Computer Graphics and Applications, 12(5):45-52, September 1992.
- [14] M. Lounsbery, T. DeRose, and J. Warren. *Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type*. TR 93-10-05b, Dept. of Computer Science and Engineering, University of Washington, October 1993.
- [15] H. Suzuki, S. Takeuchi, and T. Kanai. *Subdivision surface fitting to a range of points*. Proceedings of Pacific Graphics 99, pages.158-167, 1999.
- [16] G. Taubin. *A Signal Processing Approach to Fair Surface Design*. Computer Graphics (SIGGRAPH 95 Proceedings), pages 351-358, August 1995.
- [17] D. Zorin and P. Schroder. *Subdivision for modeling and animation*. SIGGRAPH 99 Course notes, August 1999.



정 원 기

1999년 고려대학교 수학과(이학사).  
2001년 고려대학교 일반대학원 컴퓨터  
학과(이학석사). 2001년 ~ 현재 Max-  
Planck-Institut 박사과정.



김 창 현

1979년 고려대 경제학 학사. 1987년 한양  
대 전산학 석사. 1993년 Tsukuba대 전자  
정보 박사 취득. 1981년 ~ 1989년 한국  
과학기술원 시스템공학연구소 선임연구  
원. 1989년 ~ 1990년 Tokyo Institute of  
Technology 객원연구원. 1993년 ~ 1995  
년 한국과학기술연구원 시스템공학연구소 책임연구원. 1993  
년 ~ 1995년 충남대 컴퓨터공학과 겸임교수. 1994년 ~  
1995년 한국컴퓨터그래픽스학회 총무이사. 1994년 ~ 국립중  
앙박물관 자문위원. 1995년 ~ 현재 고려대 컴퓨터학과 부교  
수. 관심분야는 도면, Multiresolution analysis and  
Synthesis, 얼굴 애니메이션, 다중 레인지 이미지에서의 복  
원, 메쉬 분할법, 사진을 이용한 모델링, 이미지 스티칭, 간략  
화 방법 등