

# 3차원 삼각형 메쉬에 대한 기하학적 스내핑과 그의 응용

## (Geometric Snapping for 3D Triangular Meshes and Its Applications)

유 관 희 <sup>†</sup>      하 증 성 <sup>\*\*</sup>  
(Kwan H. Yoo)      (Jong S. Ha)

**요 약** 2차원 영상에 대한 이미지 스내핑(image snapping)이란 이미지 상에서 커서를 찍었을 때 그 커서를 이미지상의 에지와 같은 주요 특징을 나타내는 위치로 자연스럽게 옮겨주는 기능을 말한다. 본 논문에서는 이미지 스내핑 개념을 3차원 삼각형 메쉬로 확장한 기하학적 스내핑(geometric snapping)을 제시한다. 기하학적 스내핑이란 이미지 스내핑과 유사하게 사용자가 삼각형 메쉬상에서 선택한 위치가 주요 특징을 나타내는 위치로 자연스럽게 옮겨갈 수 있는 기능을 말한다. 커서의 움직임은 삼각형 메쉬상에 정의된 근사 곡률(approximate curvatures)을 기반으로 이루어진다. 제안된 기하학적 스내핑을 응용하여 3차원 삼각형 메쉬상에 나타나는 주요 특징을 찾을 수 있었고, 더욱이 치과 보철물 분야에서 교합면을 생성하는데 필수적인 치아의 기하학적 특징을 추출하는데 적용될 수 있음을 알았다.

**키워드** : 기하학적 스내핑, 삼각형 메쉬, 근사 곡률

**Abstract** Image snapping for an image moves the cursor location to nearby features in the image, such as edges. In this paper, we propose geometric snapping for 3D triangular meshes, which is extended from image snapping. Similar to image snapping, geometric snapping also moves the cursor location naturally to a location which represents main geometric features in the 3D triangular meshes. Movement of cursor is based on the approximate curvatures which appear geometric features on the 3D triangular meshes. The proposed geometric snapping can be applied to extract main geometric features on 3D triangular meshes. Moreover, it can be applied to extract the geometric features of a tooth which are necessary for generating the occlusal surfaces in dental prostheses.

**Key words** : geometric snapping, triangular meshes, approximate curvatures, geometric features

### 1. 서론

일반적으로 커서 스내핑(cursor snapping)이란 직접적으로 조작할 수 있는 그래픽 인터페이스를 위해 정확한 커서의 위치를 제공하기 위한 표준 기법으로 널리 알려져 있다[1,2]. 이러한 커서 스내핑은 Sutherland의 Sketchpad 시스템[2]에서 소개된 이후로 선, 원 등과 같은 객체 선택, CAD 시스템 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 이러한 2차원상의 커서 스내핑의 개념은 2차원 스크린상에서 사용자에게 의해 선택된 커서의 위치를 어떻게 3차원 공간상에 존재하는 객체를 향하게 할 것

인지에 대한 연구로 발전하였다[3,4].

2차원에서 커서 스내핑 개념은 Gleicher[5,6]에 의해 2차원 이미지 상에서 커서를 찍었을 때 이 커서의 위치를 에지와 같은 주요 특징 부위로 자연스럽게 옮겨갈 수 있는 이미지 스내핑(image snapping)이라는 개념으로 확장되어 제시되었다. 이러한 이미지 스내핑 개념은 이미지를 효율적으로 편집하는데 사용될 수 있을 뿐만 아니라 이미지상의 주요 특징을 효과적으로 추출하는데 응용되고 있다.

본 논문에서는 2차원 이미지 스내핑 개념을 3차원 공간에서 삼각형 메쉬로 모델링된 객체로 확장하여 고려하고자 한다. 다시 말해 삼각형 메쉬로 모델링된 객체가 3차원 공간상에 주어질 때 사용자가 커서를 이용하여 메쉬상의 임의의 정점을 선택하였을 때 그 정점이 메쉬의 주요 기하학적 특징을 표현하는 위치로 어떻게 자연스럽게 옮겨갈 수 있게 할 것인지에 대해 연구하고자 한다. 메쉬상의 주요 기하학적 특징이란 이미지에서

· 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-03-D00309).

<sup>†</sup> 통신회원 : 충북대학교 컴퓨터교육과 교수  
khyoo@cbucc.chungbuk.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 통신회원 : 우석대학교 컴퓨터공학과 교수  
jsha@woosuk.ac.kr

논문접수 : 2003년 4월 18일

심사완료 : 2004년 1월 9일

에지와 같이 메쉬 모델상에 주요 경계를 말한다. 본 논문에서는 이러한 개념을 기하학적 스내핑(geometric snapping)이라 부르고, 삼각형 메쉬 모델에서 기하학적 스내핑을 효과적으로 처리할 수 있는 기법을 제시한다. 또한 제시된 기하학적 스내핑 기법을 응용하여 삼각형 메쉬상에 기하학적 주요 특징을 추출할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 기하학적 스내핑의 전체적인 과정을 개략적으로 설명하고 제3장에서는 3차원 삼각형 메쉬에서 주요 특징을 표현하기 위한 곡률 개념 및 이의 계산 방법과 기하학적 스내핑을 효과적으로 처리하기 위한 요구되는 블러링(blurring) 기법을 제시한다. 제4장에서는 메쉬상에서 기하학적 스내핑을 처리하는 구체적인 기법을 소개하고, 제시된 기법에 의해 얻어진 구현 결과가 제5장에 기술되어 있다. 제6장에서는 본 논문에서 제시한 기하학적 스내핑을 이용하여 얼굴 모델과 차아 모델에서의 주요 기하학적 특징을 어떻게 추출하고 추출된 결과의 문제점 및 그의 해결 방법을 제시한다. 마지막으로 제7장에서는 본 논문의 결과를 요약하고 향후 연구 과제를 제시한다.

## 2. 기하학적 스내핑의 전체 개요

본 논문에서 제안하는 기하학적 스내핑은 먼저 특정 시점이 주어질 때 3차원 공간상에 존재하는 객체를 표현하는 삼각형 메쉬를 2차원 스크린 상에 가시화한 후, 선택 기법(picking method)에 따라 사용자 인터페이스를 통해 삼각형 메쉬를 구성하는 정점을 선택한다. 이번 장에서는 이렇게 선택된 정점이 삼각형 메쉬 상에서 주요 특징을 표현하는 위치로 어떻게 이동하는지에 대한 전반적인 과정을 개략적으로 소개한다.

그림 1에서 보는 바와 같이 기하학적 스내핑을 처리하기 위해서는 먼저 주어진 3차원 삼각형 메쉬에 대해 전처리 작업을 수행해야 한다. 이미지에서 각 픽셀 당 인텐시티(intensity)를 갖는 것처럼 삼각형 메쉬의 각 정점에 대해서도 기하학적 특징을 표현할 수 있는 정보를 부여하여야 한다. 다시 말해 메쉬 모델에 Phong 셰이딩과 같은 렌더링 방정식을 이용하여 각 정점이 갖는 인텐시티를 얻어야 한다. 그러나 Phong 셰이딩 기법을 이용하여 메쉬 모델의 각 정점에 대한 인텐시티를 계산하는데 많은 시간에 소요될 뿐만 아니라 광원으로부터 보이지 않은 정점들에 대한 인텐시티가 거의 영에 가깝기 때문에 렌더링 방정식으로 삼각형 메쉬 모델의 기하학적 특징을 표현하기란 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 삼각형 메쉬에 대한 주요 기하학적 특징을 표현하기 위한 기준으로 근사 곡률(approximate curvature)을

사용하였고, 이들 근사 곡률을 구하기 위한 다양한 방법들[7-11]중에서 주어진 삼각형 메쉬에서 주요 기하학적 특징을 가장 잘 표현하는 근사 곡률 기법을 사용하였다. 이렇게 얻어진 근사 곡률을 갖는 삼각형 메쉬에서도 또한 이미지 스내핑에서와 같이 그라디언트(gradient)의 국부 최소 값이 존재할 수 있고, 또한 선택된 점 주위에 근사 곡률이 약간 큰 값이 존재할 수 있어 구해진 근사 곡률 자체를 주요 기하학적 특징을 표현하는 정보로 이용하는 데 문제가 있을 수 있다. Gleicher[5]가 이 문제를 해결하기 위해 이미지 블러링(blurring)을 적용했던 것처럼 본 논문에서 제안한 기하학적 스내핑에서도 주어진 삼각형 메쉬의 각 정점에서 구해진 근사 곡률에 대해 곡률 블러링(curvature blurring)을 처리하였다. 삼각형 메쉬 모델에 대한 근사 곡률 계산 방법과 기하학적 블러링은 제3장에서 자세히 설명할 예정이다.

주어진 3차원 삼각형 메쉬에 대한 전처리 작업이 완료된 후 사용자는 주요 기하학적 특징을 가시적으로 표현하고 있다고 생각되는 정점을 선택한다. 선택된 정점이 주요 기하학적 특징 정보를 표현하고 있으면 실물이 완료되고 그렇지 않으면 이 정점을 기점으로 좀더 기하학적 특징을 잘 표현하고 있는 다른 정점으로 이동한다. 이러한 과정을 이동된 정점이 주요 기하학적 특징을 표현하고 있을 때까지 반복적으로 수행한다. 본 논문에서는 정점간의 이동을 자연스럽게 처리하기 위해 먼저 삼각형 메쉬 모델 자체를 하나의 연결 그래프(connected graph)로 표현한다. 즉 메쉬의 정점은 바로 그래프의 정점이고 메쉬의 면을 구성하는 에지가 그래프의 에지이다. 따라서 특정 단계에서 선택된 정점으로부터 다른 정점으로의 이동은 주어진 연결 그래프의 연결 경로를 통해 이루어진다. 그림 1이 지금까지 설명한 전반적인 과정을 설명하고 있다.

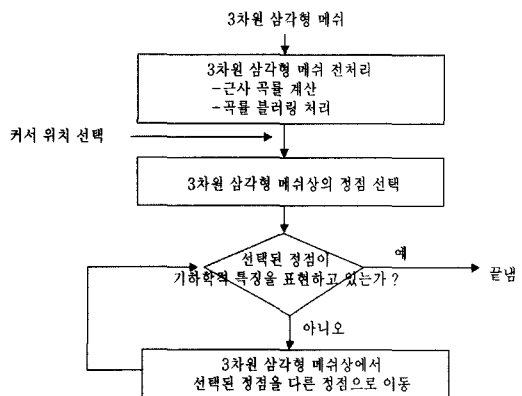


그림 1 기하학적 스내핑의 전체적인 개요

### 3. 주요 기하학적 특징 표현

앞 장에서도 논의한 바와 같이 3차원 삼각형 메쉬상에서 기하학적 스내핑을 효과적으로 처리하기 위해서는 메쉬상에 주요 기하학적 특징을 표현하기 위한 계량화된 수치가 요구된다. 이번 장에서는 계량화된 수치로 사용될 삼각형 메쉬에 대한 근사 곡률 계산 방법을 소개하고 계산된 곡률에 대한 근사 곡률을 어떻게 불러링하는지를 소개하고자 한다.

#### 3.1 근사 곡률 계산

일반적으로 3차원 모델에서 기하학적인 특징은 곡률을 기준으로 사용한다[7-11]. 일반적으로 곡률이란 특정한 점에서 기울기의 변화량으로 정의된다[10]. 따라서 곡률은 2차 이상 미분 가능한 곡선 혹은 곡면에 대해서 정확히 정의될 수 있다. 그러나 삼각형 메쉬 모델을 이용한 객체는 면들의 집합으로 구성되어 있으므로 특정 점에 대한 곡률이 정확히 정의될 수 없다. 따라서 특정 점에서 정의 가능한 곡률에 가장 근접한 근사 곡률을 계산하는 기법이 다양하게 제시되었다[7-11].

본 논문에서는 3차원 삼각형 메쉬로 표현된 객체의 특징 정보를 좀더 정확하게 표현하고 있는 기존에 연구된 두 가지 근사 곡률 계산 기법을 사용한다. 주어진 정점  $v$ 에 대한 근사 곡률  $ACv$ 를 구하기 위한 첫 번째 방법은  $v$ 를 포함하는 면의 법선 벡터를 이용하는 방법으로 Lee 등[9]에 의해서 제안되었으며,  $ACv$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$ACv = \text{Min}_{i=0, \dots, k} (FN_i^T FN_{(i+1) \bmod k}) \quad (1)$$

식 (1)에서  $k$ 는  $v$ 를 포함하는 평면의 수를 의미하고 임의의 평면으로부터 시작하여 이들 평면들을 인접한 순서대로 나열했을 때  $i$ 번째 평면에 대한 법선 벡터를  $FN_i$ 라 한다. 정점  $v$ 에 대한 근사 곡률  $ACv$ 는 인접한 두 평면의 법선벡터의 내적 중에 가장 큰 내적으로 정의된다.

두 번째로 Kwak 등[8]에 의해 제안된 방법으로 정점  $v$ 의 평균 곡률을 구하기 위해 먼저  $v$ 와 인접한 순서화된 정점들을 구하여 그들을  $NVi, i=1, \dots, k$ 라 하고,  $v$ 와  $NVi$ 를 연결하는 에지를  $VEi$ 라 놓고, 에지  $VEi$ 에 대한 평균 곡률  $CVEi$ 를 식 (2)와 같이 구한다.

$$CVEi = (r_v + r_{Nvi})/2 \quad (2)$$

식 (2)에서  $r_v$ 는  $v$ 를 포함하고  $NEi$ 에 인접한 두 에지와  $NEi$ 에 의해 정의된 원의 반지름이고,  $r_{Nvi}$ 는  $NVi$ 를 포함하고  $NEi$ 에 인접한 두 에지와  $NEi$ 에 의해 정의된 원의 반지름이다. 그들은  $v$ 를 포함한 모든 에지에 대한 근사 곡률을 구한 후, 이들 곡률을 평균함으로써 정점  $v$ 에 대한 곡률  $CV$ 를 구하였다.

$$CV = \frac{\sum_{i=0}^k CVE_i}{k} \quad (3)$$

식 (3)에서  $k$ 는 정점  $v$ 에 인접한 인접한 정점들의 개수를 의미한다.

#### 3.2 근사 곡률 불러링

3-1절에서 언급한 방법대로 구해진 이웃한 정점들의 근사 곡률의 특성을 살펴보면 분명 이미지 스내핑에서도 언급한 것처럼 근사적인 곡률 계산 뿐만 아니라 객체 특성으로 인해 극단적인 곡률이 존재할 수 있게 되고 이로 인해 잡음 현상이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 현상을 해결하기 위해 이미지에서처럼 삼각형 메쉬상의 정점  $P=(px, py, pz)$ 에 대한 곡률을  $P$ 에 이웃한 정점들의 곡률에 대해 식 (4)와 같은 가우시안 스무딩 필터를 적용한 근사 곡률의 합으로 다시 정의하여 사용하였다.

$$G[dx, dy, dz] = \frac{e^{-\frac{(dx^2+dy^2+dz^2)}{2h^2}}}{2\pi h^2} \quad (4)$$

정점  $P$ 에 인접한 정점  $Q=(qx, qy, qz)$ 라 할 때, 식 (4)에 존재하는 벡터  $(dx, dy, dz)=(px-qx, py-qy, pz-qz)$ 이다. 일반적으로 가우시안 필터에서  $h$  값이 작으면 고려되는 필터의 폭이 좁고 크면 넓어짐을 의미하므로 정점  $P$ 에 이웃한 정점의 수에 따라  $h$  값을 다르게 주었다. 본 논문에서는 이웃한 정점의 수가 7이하이면 0.85를 주었고, 16개 이하이면 1.7를, 36이하이면 2.5를 주었고, 그 이상이면 3.5를 주었다.

### 4. 기하학적 스내핑의 처리

이번 장에서는 사용자가 선택한 정점이 3차원 삼각형 메쉬의 주요 특징으로 어떻게 이동하는지를 구체적으로 기술한다. 이를 위해서는 먼저 현재 선택된 정점으로부터 다음 정점으로 이동할 때 어떤 기준에 따라 이동해야 하는지를 알아야 한다. 본 논문에서는 그 기준으로 선택된 정점으로부터 이동 가능한 정점으로 이동하는데 소요되는 비용을 비용함수로 정의하고 제 3.1절에서 비용함수를 구하는 방법을 제시하고 제 3.2절에서는 제 3.1절에서 계산된 비용함수를 기반으로 기하학적 스내핑의 핵심 과정인 선택된 정점으로 주요 기하학적 특징을 표현하고 있는 정점으로 어떻게 옮겨갈 수 있는지를 구체적으로 제시한다.

#### 4.1 비용 함수

먼저 주어진 정점으로부터 다른 정점으로 이동하는데 소요되는 비용을 계산해보자.  $p$ 와  $q$ 를 각각 현재의 정점과 다음으로 선택될 정점이라 하고,  $cost(p, q)$ 를 정점  $p$ 로부터  $q$ 로 이동하기 위한 비용 함수라 하자. 이미지상의 에지를 검출하기 위해 사용한 인공 가위 기법[9]에

서 제시된 비용함수와 유사하게 3차원 삼각형 메쉬상에서 라플라시안 제로 교차( $f_z(p)$ ), 곡률 방향( $f_d(p,q)$ )과 곡률 크기( $f_g(q)$ )를 이용하여 식 (5)와 같이 비용함수를 정의하였다.

$$\text{cost}(p, q) = w_z f_z(p) + w_d f_d(p, q) + w_g f_g(q) \quad (5)$$

일반적으로 라플라시안 제로 교차 ( $f_z(p)$ )는 이미지의 특정한 픽셀이 주요 특징을 나타내는 에지에 존재하는지를 나타내기 위해 사용된다. 다시 말해 에지에 존재하면 1 그렇지 않으면 0으로 정의한다. 본 논문에서도 이와 유사하게 정점  $p$ 가 주요 특징을 표현하고 있는지 아닌지에 따라 그 값을 부여하였으며, 경험적으로 3-1절에서 구해진 근사 곡률이 2보다 크면 주요 특징을 표현하는 것으로 정의하였다. 일반적으로 좀더 큰 곡률을 갖는 정점이 주요 특징을 표현하고 있으므로 곡률 방향을 나타내는 함수  $f_d(p,q)$ 는  $q$ 의 곡률에서  $p$ 의 곡률을 뺀 값으로 정의하였다. 특히  $f_d(p, q)$ 의 값이 0보다 크면 정점  $p$ 에서 정점  $q$ 로 옮겨갈려는 특성이 있으며, 그렇지 않으면  $q$ 로 이동하지 않으려는 특성을 갖고 있음을 의미한다. 마지막으로 곡률 크기를 나타내는 함수  $f_g(q)$ 는 정점  $q$ 에서의 근사 곡률 그 자체를 의미한다. 식 (5)에서 세 가중치  $w_z, w_d, w_g$ 는 대응하는 특징 함수의 가중치를 나타내며 본 논문에서는 각각  $w_z=0.43, w_d=0.43$ 과  $w_g=0.14$ 로 주었다. 그 이유는  $\text{cost}(p, q)$ 가 정점  $p$ 에서  $q$ 로 이동하는데 소요되는 비용이므로  $p$  자체가 가지고 있는 기하특성 여부인 라플라시안 제로 교차와  $p$ 에서  $q$ 로 이동하려는 특성을 반영한 곡률 방향이 중요한 역할을 하고 있음을 실험을 통하여 알 수 있었으며 정점  $q$ 에서의 곡률 크기는 상대적으로 영향을 그리 많이 끼치지 않음을 알 수 있었기 때문이다.

4.2 정점의 이동

4.1절에서 계산된 비용함수를 이용하여 주어진 정점  $p$ 로부터 어느 정점으로 이동할 것인지를 살펴보자. 본 논

문에서는 이를 처리하기 위한 세 가지 방법을 제시한다.

첫 번째로 고려할 수 있는 방법은 정점  $C_v$ 로부터 이웃한 정점들에 대해 4.1절에서 논의한 비용함수를 모두 구하여 0보다 큰 비용함수가 있으면 가장 큰 비용함수를 갖는 이웃 정점을 다음으로 이동할 정점으로 선택한다. 만약 이웃한 모든 정점에 대해 구해진 비용함수가 0보다 작으면 현재 정점  $C_v$ 가 삼각형 메쉬에서 주요 특징을 나타내고 있으므로 더 이상 다른 정점으로 이동하지 않고 종료한다. 만약 다음으로 이동할 정점이 선택되면 그 정점에 대해 종료할 때까지 위의 과정을 반복 적용한다(그림 2(a)).

첫 번째 기법에서는 주어진 정점  $C_v$ 에 인접한 정점만을 고려하여 다음 정점을 선택하므로 주요 특징을 표현하는 위치로 옮겨가는데 시간이 많이 소요될 수 있다. 이를 개선하기 위해  $C_v$ 에서 이웃한 정점들 중 가장 멀리 떨어져 있는 거리  $F_d$ 를 구하여, 한 번 이동할 때  $C_v$ 로부터  $F_d$  거리에 있는 모든 정점을 고려하여 비용함수가 가장 큰 정점을 다음 정점으로 선택한다. 삼각형 메쉬상의 정점  $C_v$ 로부터의 거리는  $C_v$ 에서 가장 짧은 길로 갈 때의 거리를 의미한다. 마찬가지로  $F_d$  범위 내에 0보다 큰 비용함수가 없으면 다른 정점으로의 이동을 멈춘다. 그림 2(b)에서 표시된 구 내부에 속하는 정점들이 선택된 정점으로부터 이동가능한 정점들이다.

위의 방법 역시 매우 조밀하게 구성된 메쉬에 대해 그리 좋은 성능을 보이지 못하므로 또 다른 방법으로 현재의 정점  $C_v$ 로부터  $k$  수준 이웃 범위의 정점들을 고려하여 다음으로 이동할 정점을 선택하는 방법을 고려할 수 있다. 정점  $C_v$ 로부터 인접한 정점들을 이웃범위 1에 있는 정점들이라 하고, 이웃범위 1에 있는 정점들로부터 방문되지 않는 이웃한 정점들을 이웃범위 2에 놓여진 정점들이라 한다. 같은 방법으로 정점  $C_v$ 로부터 이웃범위  $k$ 에 놓여진 정점들을 정의할 수 있다. 이웃 범위  $k$ 를 정한 후, 현재 정점  $C_v$ 로부터  $k$  범위 내에 있는

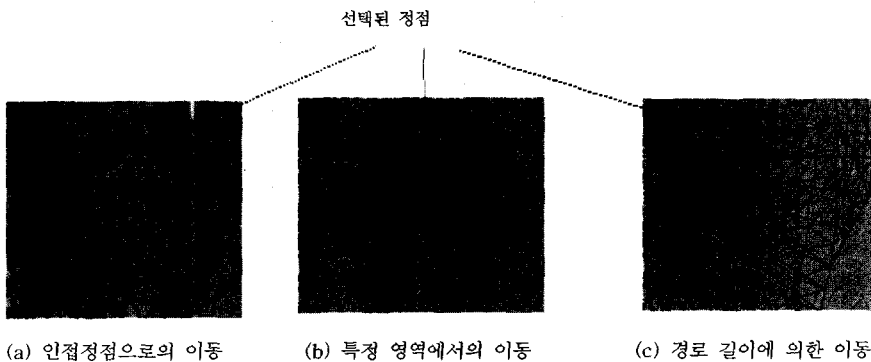


그림 2 비용함수에 따른 정점 이동 방법

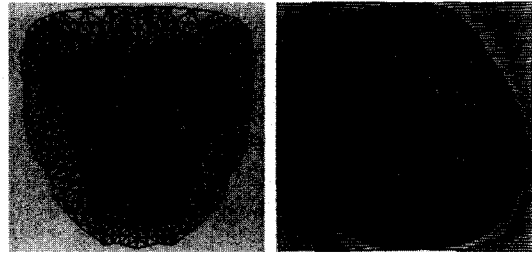
모든 정점에 대해 비용함수를 고려한다. 고려된 정점들 중 가장 큰 비용함수를 갖는 정점을 다음으로 이동할 정점으로 선택하고 0 보다 큰 정점이 없으면 항해를 멈춘다. 그림 2(c)가 이웃 범위 k가 2로 선택되었을 때 이동 가능한 정점들이 표시되어 있다.

5. 구현 결과

본 논문에서 제시한 기하학적 스내핑 기법을 우리는 MFC와 OpenGL를 사용하여 PC 환경에서 구현하였으며, 본 논문에서 제시된 기법들을 얼굴과 치아의 삼각형 메쉬 모델에 적용하여 보았다.

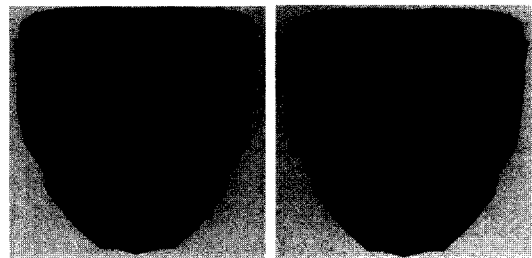
그림 3의 (a)와 (b)가 각각 얼굴과 치아에 대한 삼각형 메쉬 모델을 보여주고 있다. 이러한 모델들중 얼굴 모델을 구성하는 모든 정점에 대해 제 3.1절에서 제시된 Lee 등[9]이 제시한 식 (1)과 Kwak 등[8]이 제시한 식 (3)을 이용하여 구한 삼각형 메쉬를 구성하는 정점에 대한 근사 곡률을 구하여 정규화한 후 그 크기를 빨간 색깔로 표시하여 나타내면 각각 그림 4(a)와 (b)와 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 구해진 곡률은 연속성이 없고 특히 일부분에서 잡음이 있음을 알 수 있다. 이러한 문제점을 제거하기 위해 그림 4(a)와 (b)에 대해 식 (4)를 이용하여 근사 곡률에 대해 블러링을 적용하였고 그 적용 결과가 각각 그림 5의 (a)와 (b)와 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 볼 주변, 눈 주변 및 입술 주변에서 발생했던 근사 곡률의 불연속성이 많이 제거되었음을 가시적으로 알 수 있었다.

얼굴 메쉬 모델에 대한 근사 곡률 블러링 적용 결과인 그림 5(a)를 가지고 사용자에 의해서 선택된 정점에 대해 4.2절에서 제시한 세 가지 방법을 이용한 기하학적 스내핑 결과가 어떻게 나타나는지를 살펴보자. 그림 6의 (a)는 4.2절에서 제시된 첫 번째 방법을 사용하여 입력된 정점으로부터 한번 이동했을 때 얻어진 정점을 보여주고 있고, (b)는 다섯 번 반복하여 이동된 정점을 보여주고 있고, (c)는 더 이상 움직이지 않는 최종적 스내핑



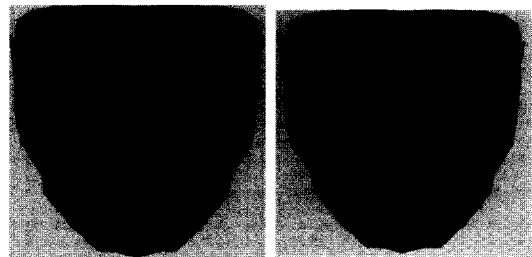
(a) 얼굴 모델 (b) 치아 모델

그림 3 3차원 삼각형 메쉬 모델



(a) Lee 등[10]기법 (b) Kwak 등[9]의 기법

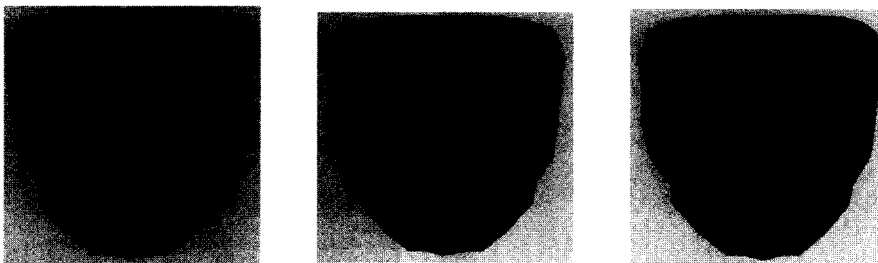
그림 4 근사 곡률 계산 결과



(a) 그림 4(a)에 대한 결과 (b) 그림 4(b)에 대한 결과

그림 5 근사 곡률 블러링 적용 결과

결과를 보여주고 있다. 그림 7이 각각 4.2절에서 제시된 세 가지 방법을 적용하여 얻어진 최종 기하학적 스내핑



(a) 한번 이동 결과

(b) 다섯 번 이동 결과

(c) 최종 결과

그림 6 4.2절에 제시된 첫 번째 기법에 의한 기하학적 스내핑 결과

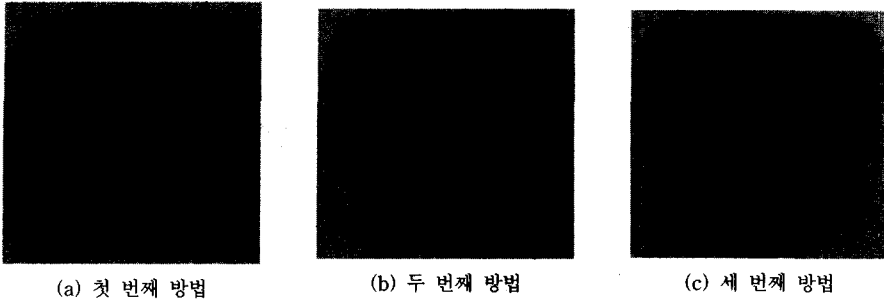


그림 7 기하학적 스네핑에서의 정점의 이동

의 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 방법에 의해 얻어진 최종 결과가 그림 7(a)이고, 두 번째 방법에 얻어진 그림 7(b)는 네 번의 이동으로 최종 위치에 도착했고, 그림 7(c)은  $k=3$ 으로 정하였을 때 두 번의 이동으로 최종 위치에 도착하였다. 그림에서 분홍색 점이 사용자로부터 선택된 점이고 파란색 점이 기하학적 스네핑에 의해 처리되는 점이다. 그림에서 분홍색 점이 사용자에 의해 선택된 점이고 파란색 점이 단계별 기하학적 스네핑을 처리한 후 선택된 점을 의미한다. 그리고 파란색 굵은 실선이 선택된 정점에서 기하학적 스네핑이 처리되면서 이동한 경로를 나타낸다.

**6. 기하학적 스네핑을 이용한 기하학적 특징 추출**

일반적으로 2차원 영상에서 경계를 찾고자 하는 에지 검출 문제는 매우 중요한 문제이며, 이 문제를 해결하기 위해 다양한 방법[12-14]들이 제시되었다. 유사하게 3차원 삼각형 메쉬에도 이미지와 같이 주요 기하학적 특징이 존재한다. 예를 들어 얼굴 메쉬 모델에서는 입술 경계, 눈의 경계, 코의 경계가 그 예이다. 3차원 메쉬 모델에서 이러한 기하학적 특징을 찾기 위한 한 방법으로 기하학적 스네이크(geometric snake)가 Lee 등[9]에 의해 제시되었다. 그들은 2차원 이미지에서 에지를 추출하기 위해 널리 알려진 스네이크 알고리즘을 메쉬에 적용하기

위해 사용자에 의해 설정된 부분의 메쉬를 2차원 평면으로 사상(mapping)시킨 후 2차원에서 제시된 스네이크 모델을 적용하여 에지를 추출하였고, 추출된 결과를 3차원으로 복원하여 기하학적 특징으로 추출하였다. 따라서 기하학적 스네이크 방법을 적용하여 메쉬상의 기하학적 특징을 찾기 위해서는 위에서 설명한 바와 같은 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 이번 장에서는 본 논문에서 제시한 기하학적 스네핑 처리 과정을 3차원 메쉬에 직접적으로 적용하여 그 메쉬에 나타나는 기하학적 특징을 찾는 방법을 제시한다. 먼저 얼굴 삼각형 메쉬 모델에 적용하여 찾은 기하학적 특징의 결과를 가지적으로 보이며, 다음으로 치아 재건 시스템에서 중요하게 사용되는 치아의 3차원 메쉬 모델에서 치아의 주요 기하학적 특징을 추출한 결과를 제시한다. 그리고 기하학적 스네핑을 적용하여 찾은 기하학적 특징의 문제점이 무엇인지를 논의한 후 간단한 해결 방법을 제시한다.

**6.1 얼굴 모델에서의 기하학적 특징 추출**

2차원 얼굴 영상에서 주요 특징을 나타내는 경계로는 잘 아는 바와 같이 눈의 경계, 입술의 경계, 코 경계와 눈썹 주변 경계 등 다양하게 나타난다. 3차원 얼굴 메쉬 모델에서도 2차원 얼굴 영상에서와 유사하게 이들 특징을 제3장에서 논의한 근사 곡률과 곡률 블러링을 통하여 표현할 수 있다. 그림 8의 영상이 그 결과이며 가지

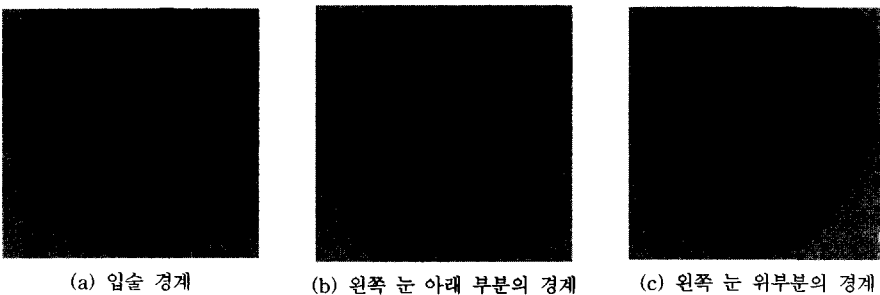


그림 8 얼굴 모델에서의 기하학적 특징 찾기

적인 관점에서 2차원 영상에서의 주요 경계 특징이 그림 8에서도 표시되고 있음을 알 수 있다. 이러한 기하학적 특징을 본 논문에서 제안한 기하학적 스내핑을 이용하여 찾을 수가 있으며 그 결과가 그림 8(a), (b) 그리고 (c)이다. 그림 8(a)가 얼굴 모델에서 입술의 경계를 찾기 위해 기하학적 스내핑을 적용한 결과이다. 이 그림에서 사용자는 가장 왼쪽 정점을 선택하였고 선택된 점으로부터 기하학적 스내핑을 반복 적용하여 만든 결과가 붉은 실선으로 연결된 다각선이다. 역시 같은 방법으로 얼굴에서 왼쪽 눈 아래부분과 위 부분의 경계를 추출하기 위해 기하학적 스내핑을 적용하여 보았다. 그 결과가 각각 그림 8(b)와 그림 (c)와 같았다. 그림 8에서 분홍색 점이 사용자에게 의해 선택된 점이고 파란색 점이 기하학적 스내핑을 적용한 최종 결과를 표시하고 있다. 그리고 파란색 실선이 기하학적 스내핑을 단계별로 적용했을 때의 중간 결과들을 보여주고 있다. 이들 중간 결과가 바로 3차원 메쉬 모델에서의 주요 기하학적 특징이다.

**6.2 치아 모델에서의 기하학적 특징 추출**

일반적으로 치의학 분야에서 상악과 하악의 교합 적용에 의해 치아 표면은 반대편에 위치한 치아와 교합이 일어난다. 교합시 반대편 치아와 닿는 부분을 교합 면이라 하며 교합 면에서 봉우리처럼 튀어나온 부분을 교두라 하고, 교두로부터 내려오는 부분을 능선이라 한다. 그리고 치아 표면에서 불규칙하게 오목한 함몰 부위를 열구라 하고, 이들 열구 중에서 가장 깊고 작은 점 모양의 쪽 들어간 부분을 피트라 한다[15](그림 9(a) 참조). 인공 치아의 정확한 모델링을 위해서는 좀더 정확한 치아의 교두, 능선, 열구 및 피트와 같은 치아의 기하학적 특징을 찾을 수 있어야 한다. 이번 절에서는 본 논문에서 제시한 기하학적 스내핑을 적용하여 추출한 결과를 제시한다. 그림 9(b)가 그림 9(a) 모델에 대해 근사 곡

률을 구한 후 블러링 결과를 보여 주고 있다. 그림 9(c)와 그림 9(d)가 추출된 교두와 능선 결과를 붉은 실선으로 보여주고 있다.

**6.3 추출된 기하학적 특징의 문제점 및 해결 방법**

3차원 삼각형 메쉬에 대해 기하학적 스내핑 기법을 이용하여 추출된 메쉬상의 주요 기하학적 특징 정보는 선택된 정점에서 이동된 정점들을 열린 다각선 혹은 닫힌 다각선이다. 이들 다각선을  $C = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_k)$ 라 하자. 그러나 이들 다각선이 그래프상의 정점들을 연결하는 선분들의 집합이기 때문에 계단 모형의 기하학적 특징이 추출될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 계단 모양을 제거하기 위해 본 논문에서는 두 가지 형태의 곡선을 먼저 생성한다. 첫 번째 유형의 곡선은 처음 정점과 끝 정점을 고정시키고 다른 정점들을 근사하는 BSpline 곡선[16,17]이다. 두 번째 유형의 곡선은 사용자에게 의해 선택된 정점들은 통과되고 다른 정점들은 근사되는 스플라인 곡선이다[16]. 이렇게 생성된 곡선에서 처음 시작 정점과 끝 정점은 항상 메쉬의 정점에 속하므로 이들 정점으로부터 시작하여 메쉬의 표면을 따라가면서 곡선과 교차하는 점들을 구하여 이들 정점들을 연결하는 다각선을 최종적으로 사용자가 의도한 기하학적 특징으로 선택한다.

**6. 결론**

본 논문에서는 3차원 삼각형 메쉬상에서 선택된 정점이 메쉬상의 주요 특징을 나타내는 정점으로 자연스럽게 이동하는 기하학적 스내핑을 제안하였다. 특히 이렇게 제안된 기하학적 스내핑 기법은 3차원 얼굴 모델과 치아 모델에서 주요 기하학적 특성을 찾는 데 응용될 수 있음을 알았다.

향후 연구 과제로는 사용자에게 의해 선택된 여러 개의 정점이 주어질 때, 이들 정점들간의 상호 관계가

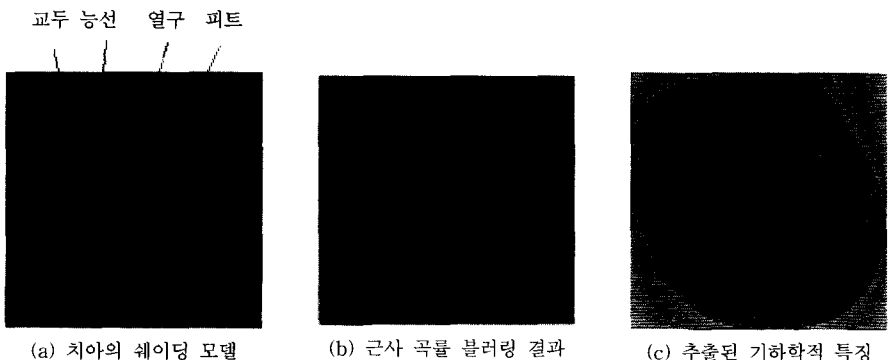
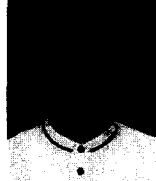


그림 9 치아 모델에서의 기하학적 특성 찾기

고려된 다중 정점의 기하학적 스내핑에 관한 연구가 요구된다. 더욱이 기하학적 스내핑을 이용하여 원하는 메쉬 모델에서의 주요 기하학적 특징을 찾기란 그리 쉽지 않다. 따라서 좀더 정확하고 빠르게 3차원 삼각형 메쉬에서의 주요 기하학적 특징을 찾을 수 있는 기법에 관한 연구가 요구된다.

### 참 고 문 헌

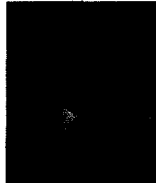
- [1] Bier, E., and M. Stone, "Snap-Dragging," *Proc. of SIGGRAPH '86*, pp.223-240, ACM Press, 1986.
- [2] Sutherland, I. *Sketchpad: A Man Machine Graphical Communication System*, Ph.D. Thesis, MIT, 1963.
- [3] Bier, E., "Snap-Dragging in Three Dimensions," *Proc. of Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.193-204, ACM Press, 1990.
- [4] Stork A., "An Algorithm for Fast Picking and Snapping using a 3D Input Device and 3D Cursor," *CAD Tools and Algorithms for Product Design*, pp.113-127, 1998.
- [5] Gleicher, M., "Image Snapping," *ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH'95)*, pp.183-190, 1995.
- [6] Gleicher, M., *A Differential Approach to Graphical Manipulation*, Ph.D. Carnegie Mellon University, 1994.
- [7] Greg Turk, "Re-tiling polygonal surfaces," *Computer Graphics (SIGGRAPH 92' Proceeding)*, Vol.26, No.2, pp. 55-64.
- [8] Kwak, J., E. Lee and K.H. Yoo, "Mesh Simplification using New Mean Curvatures," *Proc. of Japan-Korea Computer Graphics 2002*, Kanazawa, Aug. 2002.
- [9] Lee, Y. and S. Lee, "Geometric Snakes for Triangular Meshes," *Graphics Forum*, Oct. 2002.
- [10] A. Rosenfeld and E. Johnston. "Angle Detection in Digital Curves," *IEEE Transactions on Computers*, Vol.22, pp.875-878, 1973.
- [11] Smith A. D. C., *The folding of the human brain: from shape to function*, University of London, PhD Dissertations, 1999.
- [12] Falcao, A.X., et. al, "User-Steered Image Segmentation Paradigms: Live Wire and Live Lane," *Graphical Models and Image Processing*, Vol.60, pp.223-260, 1998.
- [13] Kang H. W. and S.Y. Shin, "Enhanced Lane : Interactive Image Segmentation by Incremental Path Map Construction," *Graphical Models*, 2002.
- [14] Mehnert A and Paul Jackway, "An Improved Seeded Region Growing Algorithm," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 18, pp.1065-1071, 1997.
- [15] 윤창근, 강동완, 정승미, *최신 고정성 보철학*, 도서출판 종이, 1999.
- [16] Hearn D. and M. P. Baker, *Computer Graphics*, Prentice-Hall, 1994.
- [17] Yamaguchi, F., *Curves and surfaces in Computer Aided Geometric Design*, Springer-Berlag, 1988.



#### 유 관 회

1985년 전북대학교 전산통계학과(학사)  
1988년 한국과학기술원 전산학과(석사)  
1995년 한국과학기술원 전산학과(박사)  
1988년~1997년 (주)데이콤 종합연구소  
선임연구원, 1997년~현재 충북대학교 컴  
퓨터교육과, 정보산업공학과 및 컴퓨터·

정보통신연구소 교수. 2003년~현재 미국 카네기멜론대학교  
로보틱스연구소 방문교수. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 인공  
치아모델링, 3차원게임 등임



#### 하 종 성

1984년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)  
1986년 한국과학기술원 전산학과(석사)  
1996년 한국과학기술원 전산학과(박사)  
1986년~1989년 (주)현대전자산업 근무  
1990년~현재 우석대학교 컴퓨터공학과  
교수. 2001년 미국 조지워싱턴대학교 방

문교수. 관심분야는 응용계산기하학, 컴퓨터그래픽스, CAD/  
CAM 등임