



## 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

3D 모델의 형상변형  
방법에 관한 연구

Shape Deformation of 3D Models

2016 년 8 월

서울대학교 대학원

컴퓨터공학부

장 준 영

# 3D 모델의 형상 변형 방법에 관한 연구

지도교수 김 명 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2016 년 4 월

서울대학교 대학원  
컴퓨터공학부  
장 준 영

장준영의 공학석사 학위논문을 인준함  
2016 년 6 월

위 원 장                신영길                (인)

부위원장                김명수                (인)

위      원                서진욱                (인)

## 초 록

본 논문에서는 3D 모델의 형상 변형 과정에서 사용 목적에 따라 적용 가능한 서로 다른 네 가지 방법을 제시한다. 먼저 쿼드 모델에서 직사각형 모양으로 영역을 선택하고, 이를 베지에 패치로 근사하여 변형하는 방법을 소개한다. 베지에 패치의 변형은 컨트롤 포인트의 움직임으로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 임의의 점을 움직이는 동작도 컨트롤 포인트들의 움직임으로 나타내었다. 모델 위에 원하는 궤적을 그려 무늬를 만들어내는 3D 브러시 기능은 그런 궤적을 중심 곡선으로 하는 베지에 곡면을 만들어 정해진 함수에 따라 정점을 변형하는 방식으로 구현할 수 있다. 또한 뿔 모양을 만들어 원래 메시와 합성하는 기능, 여러 특징점들을 이용하여 표준 얼굴 모델을 3D 스캐너 등을 통해 만들어진 모델과 유사하게 만드는 얼굴 정합 기능을 구현하였다.

**주요어 :** 베지에 곡면, 형상 변형, 3D 브러시, 얼굴 정합

**학 번 :** 2014-22690

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 관련 연구 .....	4
제 3 장 모델 변형 방법 .....	6
3.1 직사각형 모양의 영역 변형 .....	6
3.1.1 쿼드메시 모델과 변형 영역의 선택 .....	7
3.1.2 베지에 곡면으로의 근사 .....	9
3.1.3 선택 영역의 변형 .....	11
3.2 브러시 기능 .....	13
3.2.1 중심곡선 fitting .....	13
3.2.2 베지에 곡면 근사 .....	14
3.2.3 브러시 변형 함수 .....	15
3.2.4 날 모양 살리기 .....	16
3.3 뿔 합성 기능 .....	17
3.3.1 Sweep-based 모델 .....	18
3.3.2 뿔 모델 합성 .....	19
3.4 얼굴 정합 .....	21
3.3.1 특징점 정의 .....	21
3.3.2 일반화된 Barycentric 좌표 .....	22
3.3.3 얼굴 정합 .....	23
제 4 장 결론 .....	25
참고문헌 .....	26
Abstract .....	28

## 그림 목 차

[그림 3.1] 쿼드메시로 만들어진 표준모델 .....	7
[그림 3.2] 선택한 영역 .....	8
[그림 3.3] 불규칙적인 점들 .....	9
[그림 3.4] 16개의 샘플링 포인트 .....	10
[그림 3.5] 직사각형 모양의 영역 변형 .....	12
[그림 3.6] 모델위에 그리는 궤적과 변형 가능 영역 .....	13
[그림 3.7] 4종류의 브러시 .....	15
[그림 3.8] 중앙 곡선 부분에 점 추가여부에 따른 결과의 차이 .....	17
[그림 3.9] 뿔 모양 인터페이스 .....	18
[그림 3.10] 뿔의 캡 모양 변형 .....	18
[그림 3.11] 합성하는 뿔 모양과 합성 후의 모습 .....	20
[그림 3.12] 22개 특징점들의 위치 .....	22
[그림 3.13] 얼굴 정합 과정 .....	24

# 제 1 장

## 서론

3D 모델링 소프트웨어는 전체적인 모양을 디자인하는 기능과 함께 사용자가 원하는 부분을 세밀하게 수정할 수 있는 기능도 가지고 있다. 기본적으로 모델을 변형하기 위해서는 변형하려는 부분의 정점들을 움직여야 한다. 가장 간단한 변형 방식으로 3D 모델링 소프트웨어들은 각각의 정점을 하나씩 움직이는 기능을 제공한다.

그러나 해상도가 높은 모델을 정점 하나하나씩 변형하는 것은 너무 비효율적이므로, 여러 정점들을 동시에 변형하는 방법을 생각해야 한다. 이를 위해 변형하고자 하는 영역을 선택하게 되고 이들의 정점들을 동시에 변형해야 하는데, 모든 정점들을 동일한 벡터만큼 이동시키는 것은 자연스럽지 않다. 따라서 지정한 방법에 따라 선택된 영역에 존재하는 각각의 정점들을 서로 다른 거리만큼 이동시키는 방법을 생각해볼 수 있다.

본 논문에서는 변형하려는 목적에 따라 4가지의 서로 다른 변형 방법을 구현하였다. 그 방법으로는

- 1) 쿼드메시 모델의 직사각형 영역을 선택하고 3차 베지에 곡면의 컨트롤 포인트를 이용한 변형
- 2) 붓으로 그리는 것과 유사하게 사용자가 그리는 궤적을 이용한 변형
- 3) 빨과 같은 모양을 만들어서 붙이는 방법

4) 표준적인 얼굴 모델을 스캔되어있는 모델로 정합하는 방법이다.

쿼드메시 모델을 사용하면 변형하고자 하는 영역을 직사각형 모양으로 선택할 수 있다. 이렇게 선택된 영역을 베지에 곡면으로 근사하면 베지에 곡면의 컨트롤 포인트들을 구할 수 있고, 이들을 이용한 변형 방식을 생각해볼 수 있다. 컨트롤 포인트들을 통해 베지에 곡면을 변형하면 원래 모델의 선택 영역의 정점들도 매칭된 베지에 곡면에서의 매개변수를 이용하여 이동할 상대적인 위치를 찾을 수 있다.

미리 선택된 브러시를 가지고 사용자가 원하는 모양대로 그릴 수 있게 하는 3D 브러시 툴과 같은 기능도 소개한다. 이 기능은 탈과 같이 얼굴 모형 위에 그림을 그릴 때 사용할 수 있는 기능으로, 사용자가 마우스와 같은 입력장치를 통해 얼굴 위에 궤적을 그리면 그 모양대로 모델을 변형한다. 이 기능은 사용자가 그리는 궤적을 중심으로 일정한 폭의 영역을 선택하여 지정된 함수를 통해 변형하는 것으로 생각할 수 있다.

빨이나 장식 등을 붙이는 작업도 존재한다. 빨의 경우는 원래 모델을 단순히 길게 늘여서 만들 수도 있으나, 이 경우 빨이 있는 위치에서의 해상도가 낮아지게 된다. 이를 해결하기 위해 빨 부분에서 remesh를 하여 부분적으로 해상도를 높이는 방법도 있으나 [5], 빨 모양의 모델을 미리 만들어 놓고 원래 모델과 합성하는 것도 생각해볼 수 있다. 이 방법은 잡아 늘이는 것과 같은 직관적인 인터페이스를 이용하는 것으로서, 다른 방법으로는 만들기 힘든 복잡한 장식도 쉽게 만들 수 있다는 장점이 있다.

마지막으로 표준적인 사람 외형을 스캐너를 통해 얻은 모형과 맞추는 얼굴 정합 기능도 구현하였다. 얼굴 정합 과정에서 가장 중요한 부분은 눈, 코, 입 등의 특징점들로서, 이들의 위치가 정확하게 일치하도록 변형해야 한다. 나머지 점들은 특징점의 좌표들을 보간하여 구할 수 있는데, 이를 위해 일반화된 barycentric 좌표를 사용할 수 있다. 이동 후에 각각의 점들을 다시 스캔된 얼



굴 모델에 맞게 움직이는 국부적인 작업을 통하여 좀 더 정합이 잘 이루어지도록 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 방법들의 이론적 배경과 구현 결과, 그리고 각 기능의 특징들을 구체적으로 소개한다.

## 제 2 장

### 관련 연구

3D 모델의 변형을 지원하는 대표적인 소프트웨어들로서는 Autodesk사의 3DS MAX와 Maya, 그리고 Blender Foundation의 Blender 등이 있다. 이러한 3D 모델링 소프트웨어들이 제공하는 공통된 변형 방식이 있는데, 물체를 큐브와 같은 단순한 모형으로 둘러싸고 큐브의 변형을 이용하여 원래 물체를 변형하는 자유 변형 기능이 대표적이다. Chen et al. [1]은 매개변수 곡면을 이용한 자유 변형 방법을 개발하였다.

본 논문에서는 범용적으로 사용할 수 있는 3D 형상변형 방법으로 직사각형 모양의 영역 변형을 제시한다. 이를 위해서 쿼드메시로 이루어진 모델을 사용하는데, 쿼드메시를 사용하면 변형할 영역을 간단하게 선택할 수 있고, 충돌 감지도 빠르게 할 수 있다는 장점이 있다 [2]. 쿼드메시 모델은 디자이너가 모델을 디자인할 때 미리 Quad-Layout 형태로 만들어서 사용할 수도 있고, Boier-Martin et al. [3]이 제안하는 방법을 이용하여 일반적인 메시 모델을 쿼드메시로 변환하여 사용할 수도 있다.

다른 변형 방법인 3D 브러시에서는 사용자가 모델 위에 그리는 궤적을 중심 곡선으로 변환하는 과정이 필요하다. 사용자가 모델 위에 그린 점들의 집합을 베지에 곡선으로 fitting하는 작업을 하게 되면 베지에 곡선으로 이루어진 중심 곡선을 구할 수 있다. Gálvez et al. [4]은 최소자승법을 이용해 정점

들을 베지에 곡선으로 fitting하는 과정을 개발하였다.

빨과 장식 등을 붙일 때는 정도가 심한 변형을 하기 때문에 빨 부분의 해상도가 떨어지게 된다. 이를 해결하는 방법으로 François와 Cuillère [5]가 제시하는 remeshing 방법이 있다. 하지만 본 논문에서는 복잡한 장식 등에도 적용 가능하도록 겹치는 부분을 제거하고 생긴 구멍에 hole-filling을 하여 하나의 메시로 합치도록 구현하였다. Hole-filling에 대한 robust한 알고리즘으로는 Zhao et al. [6]과 Cohen, Tekumalla [7]가 제안한 방법 등이 있지만, 빨합성에서 생성되는 구멍은 장식과 모델의 크기에 따라 형태가 정해져있기 때문에 단순한 알고리즘을 적용할 수 있다.

얼굴 정합에 대한 이전연구들 또한 많이 진행되었다. Nair과 Cavallaro [8]는 점 분포 모델을 이용하여 얼굴 인식을 한다. Tena et al. [9]은 표준적인 얼굴 정합 방식을 구현하고, 고해상도/저해상도로 여러 번에 나누어 정합을 하는 등 약간의 수정을 통해 성능을 높였다. 본 논문에서는 얼굴의 특징점들이 인식되어있을 때, 모델의 해당하는 점들을 스캔한 데이터로 옮기는 작업에서 일반화된 barycentric 좌표 [10]를 사용하였다.

## 제 3 장

### 모델의 변형 방법

이 장에서는 모델을 변형하기 위한 네 가지 방법을 제시하고, 각각에 대한 이론적 설명과 구현한 결과를 보인다.

#### 3.1 직사각형 모양의 영역 변형

사각형들과 그 사각형들의 그룹으로 이루어진 퀴드메시 모델로부터 직사각형 모양의 영역을 선택한다. 이 영역은 퀴드메시에 이미 존재하는 사각형들의 그룹을 직접 선택하거나, 퀴드메시의 특징을 이용해 직사각형의 대각선에 해당하는 두 점을 이용해 구할 수 있다. 선택된 영역을 근사하는 베지에 곡면을 구할 수 있고, 각각의 정점들이 근사된 베지에 곡면에서 해당되는 매개변수를 구한다. 베지에 곡면의 컨트롤 포인트를 조정하여 선택 영역의 정점들을 변형하는 것을 구현하고, 컨트롤 포인트가 아닌 선택 영역 위의 임의의 점을 이동하고 싶을 때 이에 해당하는 컨트롤 포인트들의 움직임으로 나타내는 방법을 제시한다.

### 3.1.1 쿼드메시 모델과 변형 영역의 선택

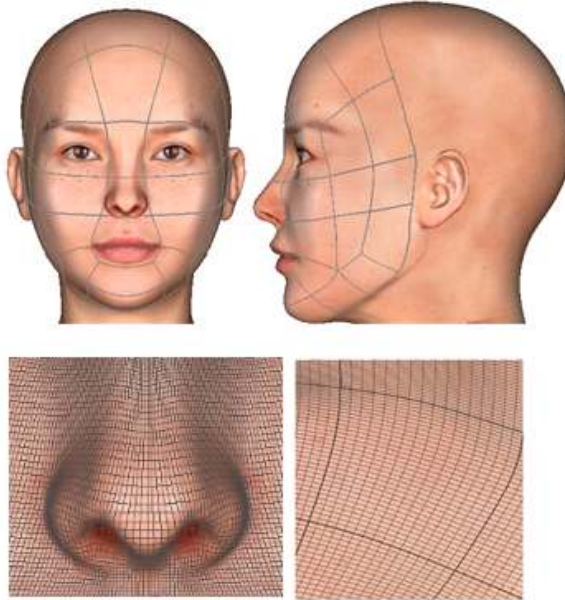


그림 3.1 쿼드메시로 만들어진 표준모델

그림 3.1의 모델은 모든 면이 사각형으로 이루어져있으며, 얼굴의 앞쪽 부분은 총 36개의 그룹으로 이루어져 있다. 각각의 그룹은 줄 하나에 존재하는 면의 개수가 같은, ‘직사각형’ 모양을 이룬다. 직사각형 그룹에 존재하는 면들은 그룹 내에서  $m$ 행과  $n$ 열을 가지고 있는 것으로 볼 수 있다.

변형 영역은 그룹과 비슷하게, 줄 하나에 존재하는 면의 수가 같은 직사각형 모양으로만 잡기로 하였다. 이렇게 정의하면 간단하게 하나의 그룹 전체를 변형 영역으로 삼을 수 있다. 그룹은 눈, 코, 입, 뺨 등과 같이 얼굴의 일부 부위를 나타내도록 만들었기 때문에, 특정한 부위를 변형하고 싶은 경우에 유용하게 사용할 수 있다.

또한 하나의 그룹 전체를 선택하지 않고 자유롭게 영역을 잡고 싶은 경우

가 있는데, 여러 그룹에 광범위하게 걸친 변형 영역을 잡거나 한 그룹 내에서 좀 더 작은 영역을 선택하여 세밀하게 조절하고자 하는 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우는 사용자가 직사각형의 한 대각선의 끝점에 위치한 두 꼭짓점을 선택하면 나머지 두 점을 찾아 직사각형을 이루게 하여 구현하였다. 내부에 일부 불규칙적인 점을 지나지 않는 경우에 한해서 이러한 영역 선택이 가능한데, 이러한 경우에는 변형 영역의 내부에 있는 모든 점들이 4개의 간선들과 연결되어 있어, 상하좌우의 방향을 명확하게 찾을 수 있다. 선택한 꼭짓점 중 한 점에서는 상하, 다른 점에서 좌우로 움직여 교차하는 점들을 찾으면 직사각형의 네 경계를 구할 수 있다.

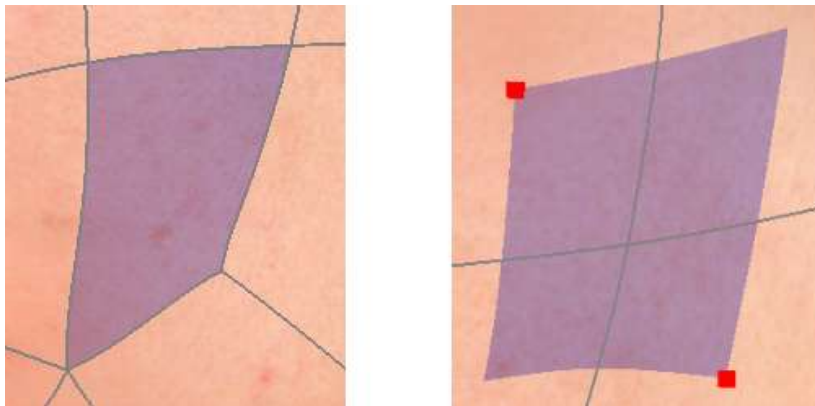


그림 3.2 선택한 영역. 왼쪽-그룹 하나를 선택 / 오른쪽-두 점을 선택하여 그 둘을 끝 점으로 하는 영역을 잡음

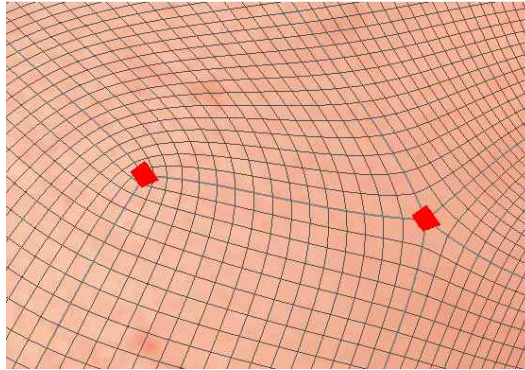


그림 3.3 불규칙적인 점들. 왼쪽은 3개의 간선, 오른쪽은 5개의 간선이 공유한다.

불규칙적인 점은 그림 3.3처럼 공유하는 간선의 수가 4개가 아닌 정점이다. 이 점을 포함하는 영역을 잡는 경우에는 한 줄에 면의 수가 같지 않게 되기 때문에 고려하지 않았다. 하지만 쿼드메시 모델을 잘 구성하면 이러한 점의 수를 줄일 수 있고, 목과 같이 일반적으로 변형을 잘 하지 않는 부위에만 중점적으로 불규칙적인 점을 만들어 변형이 불가능한 영역이 되는 것을 최소화할 수 있다.

### 3.1.2 베지에 곡면으로의 근사

3차 베지에 곡면은 다음과 같이 컨트롤 포인트  $\mathbf{b}_{i,j}$ 로 정의할 수 있다.

$$\mathcal{S}(u,v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) \mathbf{b}_{i,j}$$

여기서  $B_i^3(u) = \binom{3}{i} u^i (1-u)^{3-i}$  는 Bernstein-Bezier 함수이다.

3.1.1절에서 선택한 영역을 베지에 곡면으로 근사하기 위해서 일부 점을 샘플

플링하였다.  $u, v$ 가 각각 0, 1/3, 2/3, 1인 지점에서 점들을 샘플링하여 총 16개의 점들  $p_{i,j}$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ )을 구할 수 있다.  $m$ 행  $n$ 열로 이루어진 영역에서 샘플링 포인트들은 0,  $m/3, 2m/3, m$ 번째 행과 0,  $n/3, 2n/3, n$ 번째 열에 위치한 점의 위치로 얻을 수 있다. 선택해야 하는 점의 위치가 정수로 나누어서 떨어지지 않는 경우에는 그림 3.4와 같이 주변 점들을 보간하여 좌표를 구할 수 있다.

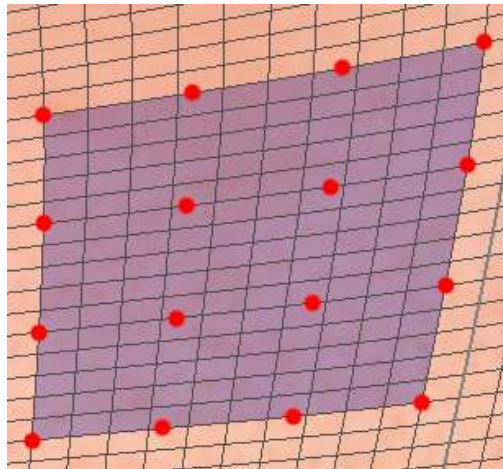


그림 3.4 16개의 샘플링 포인트

$p_{i,j} = \mathcal{S}(i/3, j/3)$ 의 좌표를 공식에 대입하여 16개의 식을 얻을 수 있고, 이를 연립하여 16개의 컨트롤 포인트들을 구할 수 있다. 연립하는 과정이 복잡하므로 각각의 행에서 4개의 샘플링 점을 지나는 베지에 곡선의 컨트롤 포인트들을 구한 후, 각 열에서 앞서 구한 컨트롤 포인트들을 지나는 베지에 곡선을 구하는 방식을 사용하였다. 이 공식을 정리하면 다음과 같다.



$$\begin{aligned}
\mathbf{p}'_{i,0} &= \mathbf{p}_{i,0} \\
\mathbf{p}'_{i,1} &= \frac{1}{6}(-5\mathbf{p}_{i,0} + 18\mathbf{p}_{i,1} - 9\mathbf{p}_{i,2} + 2\mathbf{p}_{i,3}) \\
\mathbf{p}'_{i,2} &= \frac{1}{6}(2\mathbf{p}_{i,0} - 9\mathbf{p}_{i,1} + 18\mathbf{p}_{i,2} - 5\mathbf{p}_{i,3}) \\
\mathbf{p}'_{i,3} &= \mathbf{p}_{i,3} \\
\mathbf{b}_{0,i} &= \mathbf{p}'_{0,i} \\
\mathbf{b}_{1,i} &= \frac{1}{6}(-5\mathbf{p}'_{0,i} + 18\mathbf{p}'_{1,i} - 9\mathbf{p}'_{2,i} + 2\mathbf{p}'_{3,i}) \\
\mathbf{b}_{2,i} &= \frac{1}{6}(2\mathbf{p}'_{0,i} - 9\mathbf{p}'_{1,i} + 18\mathbf{p}'_{2,i} - 5\mathbf{p}'_{3,i}) \\
\mathbf{b}_{3,i} &= \mathbf{p}'_{3,i}
\end{aligned}$$

### 3.1.3 선택 영역의 변형

컨트롤 포인트로부터 베지에 곡면으로의 변환은 선형변환이기 때문에, 다음 공식과 같이 컨트롤 포인트들이 움직인 벡터만을 가지고 곡면 위의 점들이 움직이는 위치를 알아낼 수 있다.

$$\Delta \mathcal{S}(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) \Delta \mathbf{b}_{i,j}$$

$i$ 행  $j$ 열에 위치한 점은 베지에 곡면 위에서  $(i/m, j/n)$ 의  $u$ - $v$  좌표를 갖는다. 위 공식의  $u, v$ 에 이 값들을 대입해주면 베지에 곡면의 컨트롤 포인트의 변화를 통해 각 정점들이 변형 위치를 알아낼 수 있다.

베지에 곡면의 16개의 컨트롤 포인트 중 경계 부분의 12개는 주변의 메쉬 와도 연결되어 있다. 따라서 변형하려는 영역 내에서만 변형을 하게 되면 주변의 메쉬와 연속성이 깨지게 되기 때문에, 가운데 4개만 조정할 수 있게 하였다.

모델링 툴에서는 베지에 곡면의 컨트롤 포인트를 직접 움직여 변형하는 방

법도 가능하지만, 선택된 영역의 임의의 점을 잡고 그 점을 원하는 위치로 움직이는 것도 필요할 수 있다. 이를 구현하기 위해 사용자가 원하는 움직임에 따라 컨트롤 포인트들의 변화 양을 알아내야 한다. 베지에 곡면의 가운데 4개의 점을 최대한 적은 양 만큼 이동하기 위해서 다음의 공식을 적용했다.

$$\Delta \mathbf{b}_{i,j} = \frac{B_i^3(u)B_j^3(v)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 B_i^3(u)B_j^3(v)} \Delta S(u,v)$$

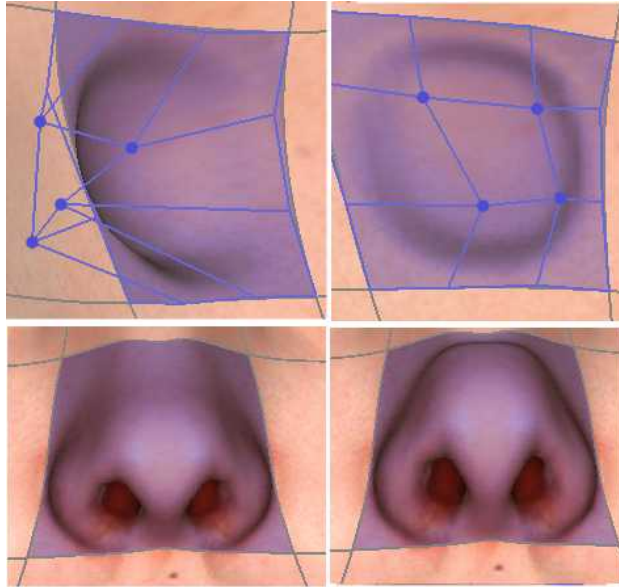


그림 3.5 직사각형 모양의 영역 변형

## 3.2 브러시 기능

브러시 기능은 탈과 같은 모양을 만들 때 사용할 수 있는 기능으로, 사용자가 그리려고 하는 붓의 모양을 선택하고 모델 위에 궤적을 그려 변형하는 기능이다. 붓의 모양은 함수로 정의되며, 붓의 궤적을 중심으로 일정한 폭을 가지는 베지에 곡면을 만들어 이 곡면을 변형할 수 있다. 중심곡선을 베지에 곡선으로 fitting하는 과정을 통해 함수로 정의하여 일정한 폭을 가지는 베지에 곡면을 만들 수 있다.

모델을 변형하기 위해서는 모델 위의 정점들에 대하여 베지에 곡면 위에서 매개변수를 구하고, 주어진 함수에 맞도록 변형해야 한다. 이렇게 정점들을 움직이기만 하면 중심축을 따라서 날카로운 칼날 모양이 생성되도록 변형하는 것이 아니기 때문에, 칼날 모양이 필요한 부분에 정점들을 새로이 추가하여 이를 해결하였다.

### 3.2.1 중심곡선 fitting

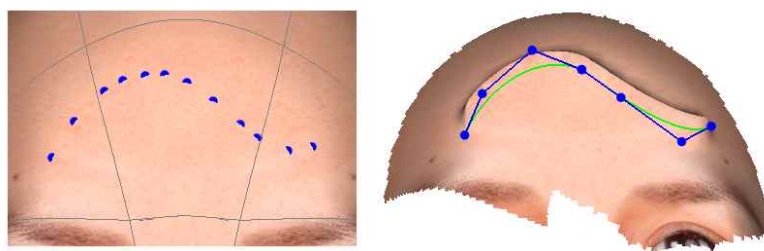


그림 3.6 왼쪽-모델 위에 그리는 궤적 / 오른쪽-궤적을 중심으로 만들어진 변형 가능 영역

사용자가 모델 위에 궤적을 그리면, 일정한 간격으로 점을 추출하여 총  $N+1$ 개의 점  $d_i$ 를 얻을 수 있다. 중심곡선 fitting은 이렇게 얻은 정점 리스트를 가장 잘 근사하는 3차 베지에 곡선을 구하는 과정이다.

구하려는 3차 베지에 곡선의 컨트롤 포인트를  $b_0, b_1, b_2, b_3$ 이라 하면,  $b_0$ 와  $b_3$ 은 각각 0번째,  $N$ 번째 점의 위치로 결정할 수 있고  $b_1$ 과  $b_2$ 를 오차가 가장 작은 쪽으로 정하면 된다. 오차는 각각의 점들  $d_i$ 로부터 전체 커브  $C(u_i)$ 까지의 최단거리 제곱의 합으로 구할 수 있다. 이 값을 최소화하기 위해 오차를  $b_1, b_2$ 의  $x, y, z$ 성분으로 편미분한 값이 0이 되도록 하여 구했다.

### 3.2.2 베지에 곡면 근사

중심이 되는 베지에 곡선을 구했으면, 그 주변에 일정한 폭을 가지는 베지에 곡면을 생각할 수 있다. 베지에 곡면을 얼굴 위를 감싸도록 구성하는 것이 좋지만, 브러시는 비교적 작은 영역을 변형하기 때문에 중심 곡선에 해당하는 부위에 수직하도록 구성하기만 해도 된다.

3D 모델의 각 정점에서 베지에 곡면까지 가장 가까운 점을 BVH 구조를 이용하여 효율적으로 구할 수 있다 [2]. 중심곡선까지의 거리에 따라 -1부터 1까지의 값을 가지는  $u$ , 가장 가까운 중심곡선상의 점 위치에 따라 0부터 1까지의 값을 가지는  $v$ 를 곡면의 변형을 위한 매개변수 값으로 사용할 수 있다.

### 3.2.3 브러시 변형 함수

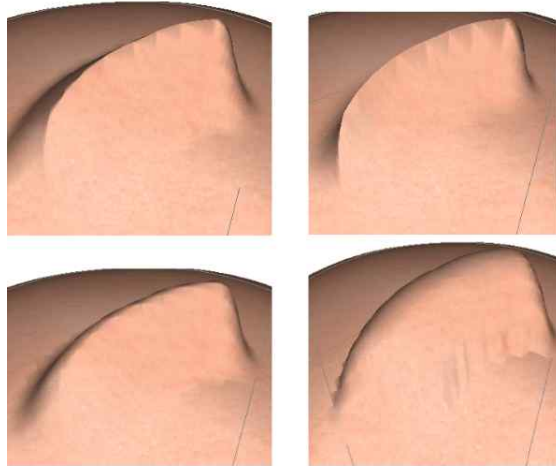


그림 3.7 4종류의 브러시. 왼쪽 위부터  
Triangle, Spike, S shape, Circle

브러시의 모양은 4종류로 구성했다. 각각 Triangle, Spike, S shape, Circle 이라는 이름을 가지고 있으며, 그림 3.7에 나타나 있다.

각각의 브러시들은 폭을 담당하는 매개변수인  $u$  값에 따라 튀어 나오는 높이  $h$ 를 결정하는 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{Triangle} &: h = 1 - |u| \\ \text{Spike} &: h = (1 - |u|)^3 \\ \text{S shape} &: h = (\cos(u\pi) + 1)/2 \\ \text{Circle} &: h = \sqrt{1 - w^2} \end{aligned}$$

궤적의 처음부터 끝까지 움직이는 위치를 나타내는 매개변수  $v$ 는 일반적으로 높이에 아무런 관련이 없다. 하지만  $0 \leq v \leq 1$ 인 범위에서만 위의 공식을

이용하여 변형에 적용하고 그 밖의 범위에서는 변형하지 않게 되면 경계 부분에서 매끄럽지 못한 모양이 생기게 된다. 따라서 이 부분을 다음과 같은 공식으로 부드럽게 보간하였다. 변수  $k \in [0, 0.5]$ 는 폭이나 높이와 같이 사용자가 지정할 수 있는 값으로, 브러시의 양 끝에서 보간하는 길이의 비율이다.

$$h^* = \begin{cases} h \cdot \frac{\cos(1-v/k)+1}{2} & (h \leq k) \\ h \cdot \frac{\cos(1-(1-v)/k)+1}{2} & (h \geq 1-k) \\ h & (k < h < 1-k) \\ 0 & (\textit{otherwise}) \end{cases}$$

### 3.2.4 날 모양 살리기

Triangle과 Spike 등의 브러시 함수는  $u=0$ 일 때 미분 불가능하므로,  $u=0$ 에 해당하는 중앙 부분에서 날카로운 모양이 생겨야 한다. 그러나 모델의 각 정점들의 매개변수를 구하고 이를 브러시 함수에 따라 변형하는 과정만으로는 그러한 모양을 얻을 수 없다. 이를 해결하기 위해 날카로워야 하는 부분과 기존 모델의 간선이 만나는 지점에 정점들을 추가할 수 있다.

변형하고자 하는 모든 정점들과 연결된 간선에서, 양 끝 정점들의  $u$ 값인  $u_1, u_2$ 를 구할 수 있다. 하나의 값이 0보다 크고 다른 하나는 0보다 작다면 이 사이에 중앙의 날카로운 부분을 만드는 정점이 추가되어야 함을 의미하며,  $u_2$ 와  $u_1$ 의 절대값으로 내분하는 정점을 찾아 추가한다.

이렇게 정점들을 추가한 결과는 그림 3.8과 같다.

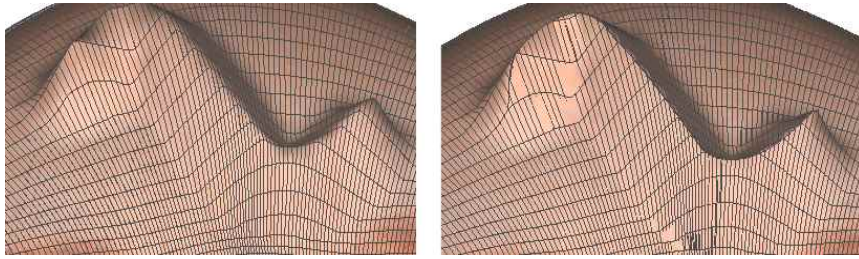


그림 3.8 중앙 곡선 부분에 점 추가여부에 따른 결과의 차이.  
 왼쪽-점을 추가하지 않음 / 오른쪽-점을 추가

### 3.3 뿔 합성 기능

지금까지의 변형에서는 주로 모델에 있는 정점들을 이동시키고, 브러시 기능에서만 날카로운 모양을 만들기 위해 새로운 정점들을 약간 추가하였다. 이렇게 변형을 하게 되면 매우 길게 잡아 당겨 뿔을 만드는 것과 같은 심한 변형에 대해서는 변형된 부분의 해상도가 상대적으로 낮아지게 된다. 이 절에서는 뿔 모델을 만들고, 이를 원래의 모델과 합성하는 방식으로 해상도 문제를 해결하는 방법을 소개한다. 뿔의 형상은 스위프 모델로 만들어, 모양과 폭, 크기 등을 조절할 수 있게 하였다. 두 모델 사이에 겹치는 부분의 면들을 모두 제거하고, 이들 사이의 간격을 메우는 과정을 통해 새로이 추가되는 뿔을 원래의 모델에 합성하여 하나의 연결된 모델로 만들었다.

#### 3.3.1 Sweep-based 모델

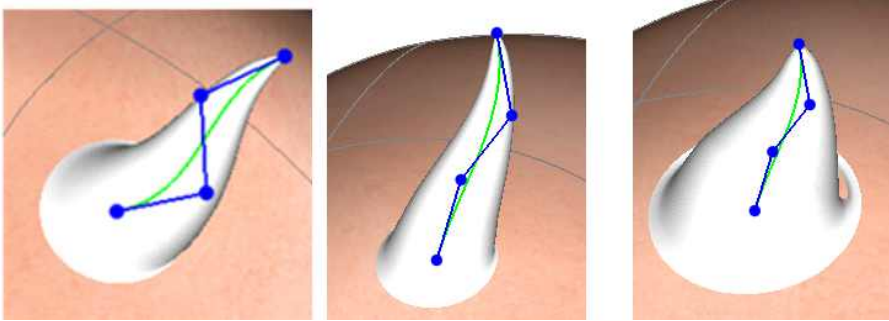


그림 3.9 변형 가능한 뿔 모양

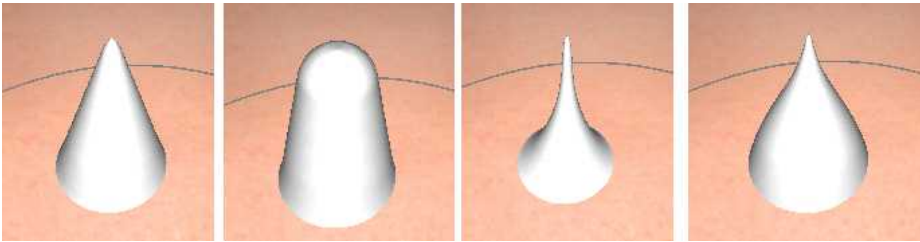


그림 3.10 뿔의 캡 모양 변형

스윙 모델은 중심곡선을 따라 단면을 나타내는 곡선이 이동하면서 만들어지는 모델이다. 단면곡선  $C(u)$ 에  $L(t)$ 의 선형변환을 적용한 결과를 중심곡선  $T(t)$ 에 더해주면 다음과 같은 스윙 곡면의 식을 얻을 수 있다.

$$S(u,t) = L(t) \cdot C(u) + T(t)$$

$L(t)$ 는 회전과 확대/축소를 적용하는 변환이다. 회전은 단면 곡선이 중심곡선의 진행 방향  $T(t)$ 에 수직하도록 하도록 정의한다. 그리고 만들려는 뿔의 모양에 따라 단면곡선을  $r(t)$ 배만큼 확대/축소시키도록 선형변환을 하였다.

스윙 모델을 사용하기 때문에, 중심곡선을 나타내는 베지에 곡선을 수정하거나 너비, 높이 등을 조절할 수도 있으며(그림 3.9), 캡의 모양을 수정할 수도



있다(그림 3.10).

### 3.3.2 뿔 모델 합성

합성을 위해서는 얼굴 모델과 뿔 모델 사이에 겹치는 부분을 제거하고, 제거한 부분에 생긴 간격을 메우는 작업인 hole-filling을 해야 한다. 얼굴 모델과 스윙 모델로 만들어진 뿔 사이에 겹치는 부분을 구하기 위해 뿔 모델에서  $t=0$ 인 경우의 단면을 생각할 수 있다. 이 단면의 모양을 가지고 얼굴 모델과 수직인 방향으로 진행하는 기둥을 생각하면, 이 기둥의 내부에 들어오는 얼굴 모델 위의 정점들을 알아낼 수 있다. 완전히 겹치는 내부의 정점들뿐만 아니라 약간 바깥 부분까지 제거하는 것이 매끄럽게 연결하는데 좋기 때문에, 단면의 크기를 약간 키워서 겹치는 부분을 구했다.

Hole-filling의 과정은 다음과 같다. 크기가 큰 구멍은 반으로 갈라 채워적으로 양쪽의 구멍을 채운다. 작은 구멍의 경우는 인접한 세 정점을 연결한 삼각형들로 채우는데, 먼저 오목한 부분이 없도록 삼각형들을 추가하고, 볼록한 모양에서는 가장 각도가 작은 부분부터 채워 최대한 길쭉한 삼각형 모양이 없도록 할 수 있다. 큰 구멍과 작은 구멍의 구분은 12개 이상의 간선을 가졌는지 여부로 구분하는 것이 좋다.

뿔 합성에서 생기는 구멍의 형태는 일정하게, 두 모델 사이에 고리 형태로 존재한다. 위의 Hole-filling 알고리즘은 구멍을 구성하는 간선들이 하나로 연결된 상태에서 작동하는데, 뿔 합성에서 생성되는 구멍은 바깥쪽과 안쪽의 두 간선 그룹으로 나누어져 있다. 따라서 가장 가까운 거리에 있는 바깥쪽/안쪽의 정점 쌍을 연결하여 hole-filling 알고리즘을 사용하면 된다.

Hole-filling을 통하여 합성한 결과는 그림 3.11과 같다. 뿔의 텍스처는 얼굴

모델의 해당하는 부분의 정점들을 평균하여 결정하였다.

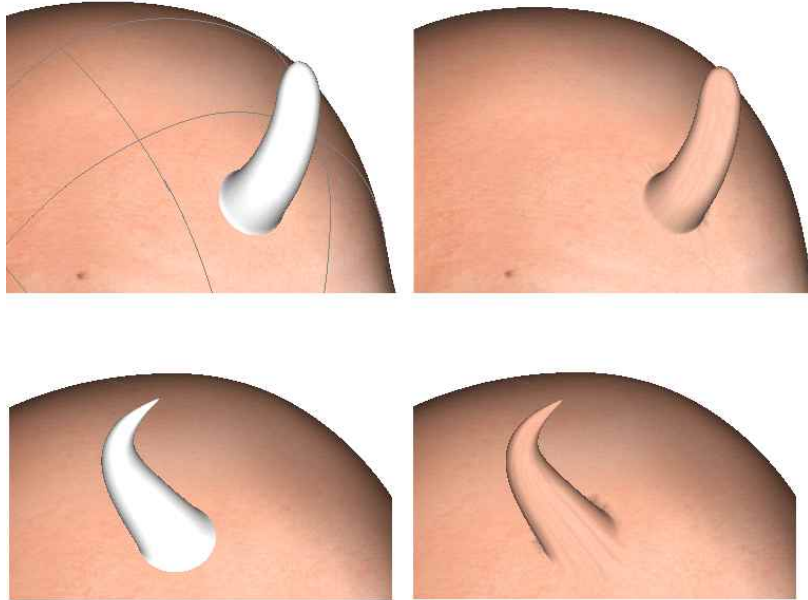


그림 3.11 합성하는 뿔 모양과 합성 후의 모습

## 3.4 얼굴 정합

얼굴 정합은 얼굴 표준모델을 변형하여 다른 얼굴 모델과 유사하게 만드는 과정이다. 일반적으로 3D 스캐너는 얼굴의 앞쪽만 스캔이 가능한데, 이 모습을 유지하면서 얼굴 뒤쪽은 표준적인 형태의 얼굴 모델과 합성하는 방식으로 활용 가능하다. 이 과정에는 눈, 코, 입 등의 위치를 얻어내는 얼굴 특징점 감지와 이 좌표를 이용해 실제로 모델을 변형하는 두 단계가 있는데, 얼굴 특징점의 감지는 이전의 연구결과들을 활용할 수도 있고, 사용자가 직접 눈, 코, 입의 위치를 지정하는 방법을 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 두 모델의 특징점들이 이미 구해져 있을 때 그 대응관계를 이용하여 실제로 변형하는 것을 구현하였다.

### 3.4.1 특징점 정의

표준 얼굴 모델과 스캔된 모델들에서 일치시켜야 하는 정점들의 대응 관계를 구하기 위해 비교적 찾아내기 쉬운 위치의 정점들을 두 모델에서 찾아내었다. 그림 3.11과 같이 눈 주변의 4개의 위치, 코를 이루는 삼각형, 입의 양 끝, 이마, 턱, 양쪽 뺨까지 총 22개의 정점들의 대응관계를 찾아, 이를 특징점으로 정의하였다.

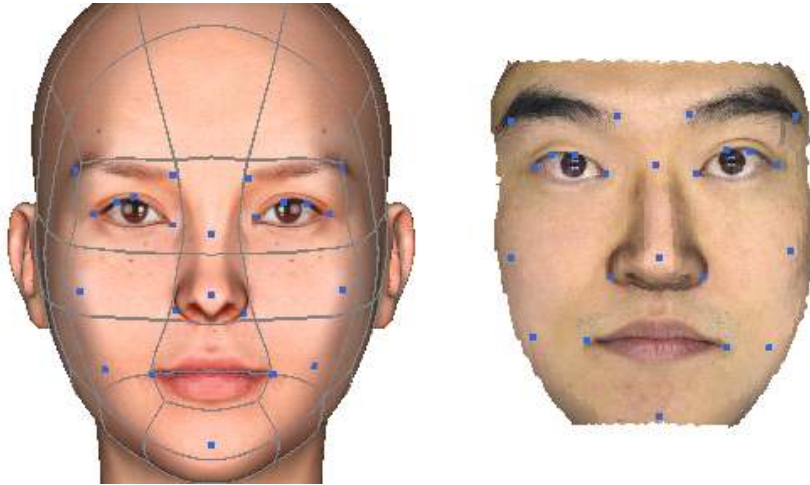


그림 3.12 22개 특징점들의 위치

### 3.4.2 일반화된 Barycentric 좌표

표준모델의 22개의 점들이 스캔된 모델의 22개의 점들로 움직일 수 있는 변형을 구하기 위하여 일반화된 barycentric 좌표를 사용하였다. 즉, 표준모델의 모든 정점을 특징점들의 선형 결합으로 나타내고, 이를 스캔데이터의 특징점들을 선형 결합한 위치로 옮기는 과정이다. 이를 통하여 특징점들은 대응되는 모델의 특징점으로 옮길 수 있고, 나머지 점들은 특징점의 좌표들을 조금씩 보간한 위치로 옮겨지게 된다.

2차원에서의 barycentric 좌표는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 기준점들을 시계방향으로 배치하여 하나의 다각형을 형성하고, 각각의 위치를  $v_i$ 라고 한다. 이제 임의의 정점  $v$ 로부터  $v_i v_{i+1}$ 의 각도를  $\alpha_i$ ,  $|v v_i| = r_i$ 라고 정의했을 때,  $v$ 에 해당하는 좌표  $w_i$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_i = (\tan(\alpha_{i-1}/2) + \tan(\alpha_i/2))/r_i$$

### 3.4.3 얼굴 정합

2차원에서의 일반화된 barycentric 좌표를 구하기 위해서, 얼굴 모델을 정면 방향으로 투영한 좌표들을 생각하였다. 표준모델의 정면은  $+z$  방향이기 때문에,  $x, y$ 로만 이루어진 2차원 좌표를 생각할 수 있다. 또한, 스캔된 모델의 정면도 두 눈과 턱의 특징점이 만드는 평면과 수직한 방향으로 정의하여 이 방향으로 투영한 2차원 좌표를 구할 수 있다.

일반화된 barycentric 좌표를 이용한 변형을 하면, 정면 방향으로의 높이 정보가 살아나지 않는다. 하지만 표준모델에서의 원래 정점의 위치를 알고 있기 때문에, 이 위치와 barycentric 좌표만을 가지고 구한 위치의 차이를 구하게 되면 높이를 알 수 있다. 따라서 이 높이만큼 스캔 모델로 정합한 후에 스캔 모델의 정면 방향으로 더해주면 된다.

이러한 과정 후에도 일부 특징들이 살아나지 않을 수 있다. 특히 정의한 13개의 특징점들로 부터 멀리 떨어진 부분이 튀어나온 경우에는 정확하게 정합이 이루어지 않는다. 예를 들어 볼살이 없는 표준모델을 가지고 변형하는 경우에는 스캔된 모델에 존재하는 볼살을 표현할 수 없다. 볼살 부근에 특징점의 수를 단순히 늘리면 디테일이 살아날 수는 있지만, 이 부분은 특징점을 찾는 알고리즘을 사용하기 힘든 위치이므로 오차가 커질 위험이 있다. 그 대신, 표준모델 각각의 정점들을 국부적으로 스캔된 모델에 가까워지도록 변형하였다. 이미 얼굴의 특징을 나타내는 점들은 위치가 맞춰진 상태이기 때문에, 이마의 위치에 눈을 맞추려 하는 등 부자연스러운 변형은 일어나지 않는다. 국부적으로 변형을 한 이후에는 스캔된 범위를 벗어나는 위치의 점들이 이상하게 변형되는 문제가 있을 수 있기 때문에, 범위를 벗어나는 부분들의 정점은

원래 모델의 위치와 보간하고, 나온 결과를 smoothing하여 결과를 얻었다.

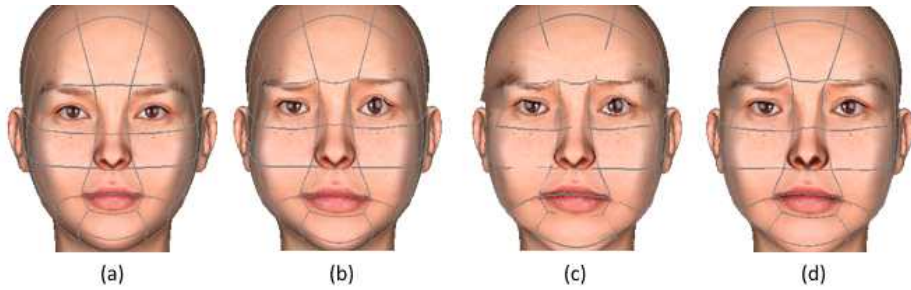


그림 3.13 얼굴 정합 과정. (a) 표준모델 (b) Barycentric 좌표를 이용한 변형 (c) 국부적 변형 (d) Smoothing을 적용

## 제 4 장

### 결론

본 논문에서는 네 가지의 방법으로 3D 모델의 변형을 구현하였다. 첫 번째는 쿼드메시에서 직사각형 모양으로 변형 영역을 선택하여 베지에 곡면으로 근사하여 변형하는 방법이다. 이 방식은 가장 구현하기 간단하고, 빠른 속도로 변형이 가능한 특징이 있다. 두 번째는 3D 브러시 기능으로, 중심 곡선을 그려주면 주변에 일정한 폭으로 베지에 곡면을 만들어 정해진 함수로 변형시키는 기능이다. 기존의 3D 모델링 방법들과 비교하여, 중심축의 부분에 아주 날카로운 칼날모양을 살릴 수 있다는 장점이 있다. 세 번째는 뿔 합성 기능으로, 원래의 모델과 만들어진 뿔 모델을 합성하고 두 모델 사이의 간격을 hole-filling을 통해 메우는 기능이다. 이는 매우 큰 변형을 하는 경우 해상도가 떨어지는 문제도 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 복잡한 모양의 다른 장식도 붙일 수 있는 장점이 있다. 뿔은 스위프 모델로 만들어, 캡의 모양이나 크기, 너비 등을 아주 쉽게 조절할 수 있게 하였다. 마지막의 방법은 얼굴 정합으로서, 특징점들의 대응관계를 알고 있을 때 표준모델을 변형하여 스캔된 모델과 유사하도록 만들 수 있다. 이를 이용하여 앞면만 존재하는 3D 스캔 얼굴모델을 전체 머리 모양을 가지는 3D 두상모델로 완성하여 만드는 데 활용할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] B.-Y. Chen, Y. Ono, H. Johan, M. Ishii, T. Nishita, and J. Feng : 3D Model Deformation along a Parametric Surface, *Proceeding of Visualization, Imaging, and Image Processing*, 2002
- [2] Y. Kang, J. Jang, and M. Kim : Deformable Quad Mesh for Accelerated Geometric Operations, *한국컴퓨터그래픽스학회 KCGS 학술대회 논문집*, pp 73-74, 2015
- [3] I. Boier-Martin, H. Rushmeier, and J. Jin : Parameterization of triangle meshes over quadrilateral domains, *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pp. 193-203, 2004
- [4] A. Gálvez, A. Iglesias, A. Cobo, J. Puig-Pey, and J. Espinola : Bézier Curve and Surface Fitting of 3D Point Clouds Through Genetic Algorithms, Functional Networks and Least-Squares Approximation, *Computational Science and Its Applications*, pp. 680-693, 2007
- [5] V. François, JC Cuillière : 3D automatic remeshing applied to model modification, *Computer-Aided Design*, pp. 433-444, 2000
- [6] W. Zhao, S. Gao, and H. Lin : A robust hole-filling algorithm for triangular mesh, *The Visual Computer*, Vol 23, Issue 12, pp 987-997, 2007



- [7] E. Cohen, L.S. Tekumalla : A hole-filling algorithm for triangular meshes, *School of Computing*, University of Utah, 2004
  
- [8] P Nair, A Cavallaro : 3-D face detection, landmark localization, and registration using a point distribution model, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol 11, Issue 4, pp 611-623, 2009
  
- [9] J.R. Tena, M. Hamouz, A. Hilton, and J. Illingworth : “A validated method for dense non-rigid 3D face registration”, *IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance*, pp 81, 2006
  
- [10] M. Meyer, A. Barr, H. Lee, and M. Desbrun : Generalized Barycentric Coordinates on Irregular Polygons, *Journal of Graphics Tools*, Vol 7 Issue 1, 2002

## Abstract

# Shape Deformation of 3D Models

장준영(Jang Junyeong)

컴퓨터공학부(Computer Science & Engineering)

The Graduate School

Seoul National University

We present algorithms for deforming 3D models using bicubic Bézier surface approximation. When we select a rectangular on a quadrilateral mesh model to deform, the area is approximated by a bicubic Bézier surface path. The selected area can be deformed by the control points of the Bézier surface. We present 3D brush tools, which create different patterns around a central curve using Bézier surfaces generated around the curve. We have also developed a shape merging technique using horn models by replacing certain areas by the horns using hole-filling. We have also implemented face registration by matching feature points of the face.

keywords : Bézier Surface, Shape Deformation, 3D Brush, Face  
Registration

*Student Number* : 2014-22690