

# 스윙기반 자유형상변형

윤승현<sup>o</sup>, 김명수

서울대학교 컴퓨터공학부

shyun@3map.snu.ac.kr mskim@cse.snu.ac.kr

## Sweep-based Free-Form Deformation

Seung-Hyun Yoon<sup>o</sup> and Myung-Soo Kim

School of Computer Science and Engineering

Seoul National University

### 요약

본 논문에서는 스윙곡면(sweep surface)을 기반으로 복잡한 3차원 물체의 형상을 변형하는 새로운 자유형상 변형(free-form deformation)기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 방법은 기존의 격자점(control lattices)을 조정하는 체적기반의 방법에 비해 스윙기반의 절차적(procedural) 모델링 기법의 직관성을 활용하여 사용자에게 보다 효율적인 형상변형 기법을 제공한다. 3차원 물체의 정점들은 스윙곡면의 단면(cross-section)에 바인딩(binding)되어 곡면의 변화에 따라 형상변형을 한다. 본 논문에서 제시한 스윙기반 형상변형 기법은 3차원 물체를 부분적으로 변형하는 기법과 계층구조를 기반으로 전반적인 형상을 변형하는 기법으로 구분된다. 부분적인 형상변형 기법은 스윙곡면을 구성하는 성분의 다단계(multi-level) 표현을 통하여 사용자에게 다중해상도(multi-resolution) 형상변형 기능을 제공한다. 계층구조에 기반한 형상변형 기법은 복잡한 3차원 물체를 위상구조에 따라 여러 계층으로 분할하고, 각 부분의 형상을 근사하는 스윙곡면들을 생성한다. 분할된 각 부분의 정점(vertices)들은 해당 스윙곡면에 바인딩되어 스윙곡면의 단면의 변화를 따르게 된다. 이러한 상황에서 스윙곡면들은 3차원 물체의 계층구조에 따라서 서로 상호작용(interaction)을 하게 되고, 결과적으로 3차원 물체의 각 부분은 상호반응적 형상변형을 한다. 이러한 계층구조에 기반한 상호반응적 형상변형 기법은 사용자의 의도에 부합하는 보다 사실적이고 기능적인 형상변형을 가능하게 한다. 본 논문에서는 다양한 3차원 물체에 대한 실험을 통해 제시된 방법의 효율성을 입증한다.

## 1. 서론

자유형상변형(free-form deformation) 기법은 여러 가지 다른 모델링 기법을 통하여 만들어진 3차원 물체에 대해 일관된 형상변형을 지원하는 효과적인 기술로서 컴퓨터그래픽스 분야에서 Sederberg와 Parry [1]에 의해 처음 소개되었다. 일반적으로 FFD는 이미 존재하는 3차원 물체를 둘러싸는 볼륨을 구성하고, 그 볼륨을 변형함으로써 3차원 물체의 형상을 변형시킨다. 반면에 스윙은 단면곡선을 정의하고, 시간에 따른 단면곡선의 공간상의 위치와 방향(orientation)을 명시하여 3차원 물체를 모델링 하는 매우 직관적인 모델링 기술로 알려져 있다. 본 논문에서는 이러한 절차적(procedural) 모델링 기술의 장점을 형상변형에 적용하여 복잡한 3차원 물체의 형상을 변형시키는 스윙기반 자유형상변형 기법을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 크게 다중해상도의 변형을 지원하는 국소적 변형기법과 계층적 구조를 갖는 스윙곡면에 기반한 상호반응적 형상변형 기법으로 구분된다. 다중해상도를 지원하는 국소적 변형기법은 스윙곡면과 3차원 물체의 부분적인 매개화를 통해, 곡면과의 거리에 기반하여 3차원 물체에 적절한 변형가중치(influence weight)를 부여하여 국소적인 형상변형을 한다. 또한 이 방법은 스윙곡면의

구성성분에 대한 다중해상도 표현을 통하여 다중해상도 형상변형을 지원한다. 볼륨기반의 FFD기법들([1], [2], [3])에서 사용자는 공간상의 격자점들을 조정하여 물체의 형상을 변형한다. 초기 격자점의 구조는 평행육면체로 제한되었으나, Coquillart [2]와 MacCracken [3]을 통해 임의의 형상과 위상구조를 갖도록 확장되었다. 그러나 이러한 방법들은 사용자가 원하는 형상변형을 얻기 위해서는 여전히 직관적이지 못한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 절차적 모델링 기법의 직관성을 최대한 활용하여 사용자에게 보다 쉽고 편리한 기능을 제공하는 형상변형 기법을 제시한다. 변형될 물체의 형상을 근사하는 스윙곡면에 물체의 정점들을 바인딩 한 후, 스윙곡면을 구성하는 성분들을 독립적으로 변형하여 사용자가 의도하는 형상변형을 얻을 수 있다. 그림 10는 3차원 bunny 모델의 귀 부분을 근사하는 스윙곡면을 변형한 결과들이다. 기존의 FFD방법들에서 격자점들은 3차원 공간상에서 구조와 위상의 제약으로 인해 계층적인 구조를 갖는 것이 매우 어려웠다. 본 논문에서는 복잡한 형상을 갖는 3차원 물체를 계층적인 구조를 갖는 여러 개의 스윙곡면들로 근사하고 물체의 위상구조에 따라 스윙곡면들 사이에 적절한 제약조건을 부여하여 상호반응적 형상변형을 지원하는 기법을 제시한다. 그림 7의 teapot 모델은 body, spout 그리고 handle의

계층적 구조로 구성되어 있다. Teapot의 각 부분은 키 단면 곡선들(key cross-sections)을 보간하는 스윕곡면들로 표현된다. 스윕곡면을 변형에 따라 teapot의 대응되는 부분의 형상이 변형된다. 그림 8은 body, spout 그리고 handle 부분의 스윕곡면들이 서로 상호작용 없이 독립적으로 변형된 결과이다. 그림 11은 각 부분의 스윕곡면들 사이에 계층적 구조를 갖고 상호반응적으로 변형된 결과들이다. 그림 11의 (b)에서 상위 계층에 해당하는 body의 변형은 하위계층의 형상을 변형하고, (c)에서 handle의 형상변형은 상위계층인 body의 형상변형을 유도하게 된다. 이와 같이 각 스윕곡면들이 계층적 구조를 갖고 위상구조에 따라 상호반응적으로 변형되기 위해서는 각 스윕곡면의 키 단면들이 상위계층의 스윕곡면에 적절한 형태로 바인딩 되어야 한다. 기존의 FFD방법들로 계층적 구조를 갖고 상호작용하는 형상변형을 지원하기 위해서는 사용자가 격자점의 각 정점들에 대해 다른 점들과의 관계를 명시해야만 하는 매우 어렵고 번거로운 작업을 해주어야 한다.

본 논문에서 제시한 방법의 주요한 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 절차적 모델링 기술의 직관성을 형상변형 기법에 활용하는 자유형상변형 기법을 제안하였다.
- 스윕곡면과 3차원 물체의 부분적인 바인딩을 통하여 다중해상도를 지원하는 국소적 형상변형 기법을 제안하였다.
- 계층적 분할 구조를 갖는 복잡한 3차원 물체에 대하여 상호반응적 형상변형 기법을 제안하였다.

본 논문은 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 자유형상변형(FFD) 기법에 대한 이전연구들을 소개하고, 3절에서는 스윕기반의 절차적 모델링 기법의 특성과 모델링 예제를 통해 형상변형 기법에 대한 활용가능성에 대하여 설명한다. 4절에서는 스윕곡면과 3차원 물체의 부분적인 바인딩과 변형가중치를 통해 다중해상도를 지원하는 국소적인 형상변형 기법에 대해 자세히 설명하고, 5절에서는 복잡한 3차원 물체에 대하여 계층적 구조를 갖는 스윕곡면의 생성과 상호작용을 통한 형상변형 기법에 대해 설명한다. 그리고 6절에서는 본 논문에서 제시한 방법을 통해 얻어진 다양한 형상변형의 결과들을 소개하고, 끝으로 7절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. 관련연구

자유형상변형 기법(FFD)들은 크게 격자점을 이용한 체적기반의 기법들([1], [2], [3], [4], [5])과 곡선위의 움직이는 좌표계(moving frame)를 이용한 방법들([8], [9], [10]) 그리고 곡면을 기반으로 한 방법들([11], [12], [13], [14])로 구분된다.

체적기반의 FFD는 Sederberg와 Parry [1]에 의해 처음 소개되었다. Sederberg와 Parry [1]는 평행육면체 형상의 격자구조를(lattices)를 사용하여 변형될 3차원 물체를 둘러싸는 체적(volume)을 생성하고, 물체의 모든 정점들을 체적기반으로 매개화(parametrization)하여 격자점을 변형함에 따라 물체의 형상을 변형하는 방법을 제시하였다. Sederberg와

Parry [1]가 사용한 평행육면체 형상의 격자구조는 수치적으로 안정적이고 효율적인 정점의 매개화를 가능하게 하지만, 변형될 물체의 형상과 아무런 연관성을 주지 못해 사용자에게 직관적인 형상변형의 기능을 제공하지 못하는 한계성을 보였다. Coquillart [2]와 MacCracken [3]는 평행육면체의 격자구조를 변형하고자 하는 물체를 고려하여 임의의 형상과 위상구조를 갖도록 확장하여 사용자에게 변형될 물체의 형상과 유사한 격자구조를 제공하였다. 그러나 Coquillart [2]와 MacCracken [3]는 정점의 매개화를 위해 수치적 근사방법을 사용했기 때문에 안정성과 계산의 효율성에 한계를 가지고 있다. Hsu [4]와 Hu [5]은 사용자가 격자점을 기반으로 형상을 변형하는 대신 물체의 정점을 직접 제어하는 기술을 제안하였다. 정점의 변화는 연립방정식의 해법을 통하여 대응되는 격자점의 변화를 유도하게 된다. Chang [8]은 자유형상변형을 위해 일반화된 de Casteljau 접근법을 사용해 공간을 변형하는 방법을 제안하였다. 또한 Lazarus [9]는 곡선에 기반하여 움직이는 좌표계를 사용한 형상변형 기법을 제안하였다. Singh [10]는 Lazarus [9]의 방법을 확장하여 비대칭적 형상변형을 가능하게 하였다. 이와 같이 공간상의 곡선 위의 움직이는 좌표계를 기반으로 한 형상변형 기법들은 사용자에게 보다 직관적인 기법을 제공하였다. Feng [11]과 Chen [13]은 부드럽게 매개화된 곡면을 이용한 자유형상변형 기법을 제안하였고, Singh [12]와 Cobayashi [14]는 단순화된 메쉬구조를 사용하여 물체의 정점들을 삼각형 메쉬의 상대적 좌표계로 매개화하고 적당한 가중치에 따라 블렌딩(blending)하여 형상을 변형하는 기법을 제안하였다. 이러한 방법들은 모두 곡면에 기반한 방법들로서 사용자는 여전히 곡면 혹은 단순화된 메쉬를 조정하는 문제점을 갖게 된다. Hua와 Qin [15]은 스칼라(scalar) 필드(field)를 갖는 공간을 구성하고 물체의 정점들을 스칼라 필드의 레벨(level)값에 따라 매개화하고, 스칼라 필드의 변형을 통한 형상변형 기법을 제안하고, 다양한 스칼라 필드를 생성하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 스윕기반의 형상변형 기법은 움직이는 좌표계를 기반으로 한 방법과 곡면을 기반으로 한 방법의 특성을 활용하여 절차적 모델링 기법의 직관성을 형상변형에 적용한 방법이라고 할 수 있다.

## 3. 스윕기반 모델링 기법

스윕(sweep)에 기반한 모델링은 절차적(procedural) 기법으로서 2차원 평면상의 단면곡선(cross-sectional curve)을 정의하고, 시간에 따른 위치와 방향(orientation)을 명시함으로써 3차원 물체를 모델링하는 기술이다. 이와 같은 절차적 모델링 기법은 사용자에게 매우 직관적인 방법으로 3차원 물체를 표현하는 방법을 제공하고, 4절의 정점바인딩(vertex binding)과 같은 기하학적 문제해결을 위한 절차적 해법을 가능하게 한다. 일반적으로 스윕곡면의 단면곡선은 위치에 따라 다양하게 변한다. Chang [16]은 시간에 따라 변하는 B-spline으로 표현된 등위(contour)곡면을 사용하여 스윕곡면을 NURBS 곡면으로 표현하였다. 본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 단면곡선을 표현하기 위해 스윕곡면을 식(1)과 같이 매개화하는 방법을 제시한다. 식(1)에서  $C(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 단면곡선  $O_t(\theta)$ 의 위치를 나타내고, 행렬  $R(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 단면곡선의 방향을 나타낸다. 단면곡선  $O_t(\theta)$ 는  $t$ 와  $\theta$ 에 따라  $r(\theta, t)$ 로 주어지는 반지름을 가지게 되어 다양

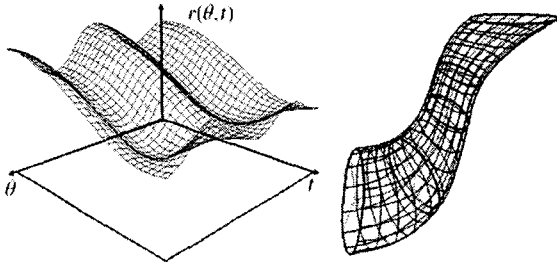


그림 1: 스윙곡면으로 모델링 된 teapot의 spout.

한 형상의 단면을 표현하게 된다.

$$S(\theta, t) = C(t) + R(t) \cdot O_i(\theta) \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{11}(t) & r_{12}(t) & r_{13}(t) \\ r_{21}(t) & r_{22}(t) & r_{23}(t) \\ r_{31}(t) & r_{32}(t) & r_{33}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(\theta, t) \cos \theta \\ r(\theta, t) \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$O_i(\theta)$ 가 부드러운 폐곡선이 되기 위해서는 식(2)을 만족해야 한다.

$$\begin{cases} r(0, t) = r(2\pi, t) \\ r'(0, t) = r'(2\pi, t), \forall t \in [0, 1]. \end{cases} \quad (2)$$

또한, 식(1)로 정의된 스윙곡면의 체적(volume)은 식(3)을 이용하여 간단하게 구할 수 있다.[6]

$$\int A(t) < N(t), C'(t) > dt \quad (3)$$

식(3)에서  $A(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 단면곡선  $O_i(\theta)$ 의 넓이를 나타내고,  $N(t)$ 는 식(1)에서 행렬  $R(t)$ 의 세번째 열,  $[r_{13}(t) \ r_{23}(t) \ r_{33}(t)]^T$ 을 나타낸다. 그림 1은 위에서 정의된 스윙곡면을 사용하여 모델링된 teapot의 spout부분과 해당되는 반지름 함수  $r(\theta, t)$ 를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 3차원 물체를 근사하는 스윙곡면을 생성하기 위해 다음과 같은 보간(interpolation)방법을 사용한다. 먼저 3차원 물체의 주요한 형상변화가 일어나는 부분들을 키 단면(key cross-section)들로 설정한다. 키 단면들이 결정되면 각 단면들의 중심의 위치를 보간하는 3차 B-spline곡선  $C(t)$ 를 생성하고, 키 단면들의 방향을 보간하는 2차 쿼터니온(quaternion) 곡선  $Q(t)$ 를 만들게 된다. 식(1)의  $R(t)$ 는 정규화된  $\frac{Q(t)}{\|Q(t)\|}$ 를 사용하여 생성된다. 그리고 각 키 단면들에서 일정한 각도로  $\theta$ 에 따라서 반지름의 길이를 구하여,  $\theta$ 와  $t$ 에 따라 보간하여  $r(\theta, t)$ 를 생성한다. 사용자는 보간될 키 단면들의 위치와 방향 그리고 단면의 반지름을 조절함으로써 다양하게 변형된 스윙곡면을 얻게 된다. 또한 스윙을 구성하는 키 단면들은 이전 키 단면에 대한 상대적인 위치와 방향정보를 유지한다. 이러한 계층적 구조를 이용하면 형상변형에 있어서 특정한 키 단면의 변화는 하위 키 단면들의 위치와 방향에 영향을 줄 수 있다. 그림 2의 (a)는 스윙곡면으로 모델링된 인체형상의 몸통부분을 나타내고, (b)는 스윙곡면의 세 번째 키 단면만을 회전하여 곡면을 변형한 결과이다. 그림 2은 스윙기반의 절차적 모델링 기법의 직관성을 잘 보여주는 예라고 할 수 있다.

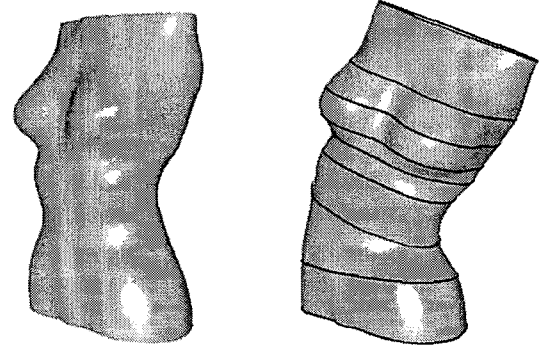


그림 2: 스윙기반의 모델링 및 변형: (a)스윙곡면으로 모델링된 인체형상 곡면, (b)세 번째 키 단면만을 변형하여 얻어진 새로운 형상.

## 4. 국소적 다중해상도 변형

그림 2를 통해서 스윙곡면은 매우 직관적인 모델링 기술로 활용될 수 있다는 것을 보았다. 여기서는 이러한 직관적인 모델링 기술을 국소적인 형상변형에 활용하는 방법에 대해 설명한다.

### 4.1 정점의 단면바인딩(cross-sectional binding)

스윙에 기반한 형상변형을 위해서는 먼저 3차원 물체의 각 정점들은 스윙곡면의 단면에 바인딩 되어야 한다. 일반적으로 공간상의 한 점  $v_i$ 를 곡면  $S(u, v)$ 에 바인딩 하는 것은 식(4)와 같은 두 개의 변수로 구성된 비선형 연립방정식의 해를 구해야 한다.

$$\begin{cases} < v_i - S(u, v), \frac{\partial S}{\partial u}(u, v) > = 0 \\ < v_i - S(u, v), \frac{\partial S}{\partial v}(u, v) > = 0 \end{cases} \quad (4)$$

그러나 스윙곡면의 경우, 절차적 모델링 기법의 특성을 활용하면 식(4)를  $t$ 와  $\theta$ 에 관한 독립된 두 개의 비선형 방정식으로 분리하여 수치적 안정성과 계산의 효율성을 얻을 수 있다. 그림 3에서 공간상의 한 점  $v_i$ 에 대하여 바인딩 될 단면의 파라미터  $t_i$ 를 식(5)를 이용하여 구한다.

$$< v_i - C(t_i), N(t_i) > = 0 \quad (5)$$

식(5)을 통해  $t_i$ 를 구하면 식(6)을 이용하여 단면의  $R(t_i)$ 좌표계를 기준으로 표현된  $v_i$ 의 상대좌표  $\hat{v}_i$ 를 구한다.

$$\hat{v}_i = R(t_i)^T (v_i - C(t_i)) \quad (6)$$

$v_i$ 의 좌표가 구해지면,  $\theta_i = \tan^{-1}(\frac{v_{i,y}}{v_{i,x}})$ 를 구하고, 스윙곡면으로부터의 거리  $d_i$ 는 식(7)을 통하여 구한다.

$$d_i = \|\hat{v}_i\| - \|S(\theta_i, t_i) - C(t_i)\| \quad (7)$$

따라서, 3차원 물체의 모든 정점들은 바인딩 파라미터  $(\theta_i, t_i, d_i)$ 를 가지게 되고, 변형된 스윙곡면으로부터 새로운

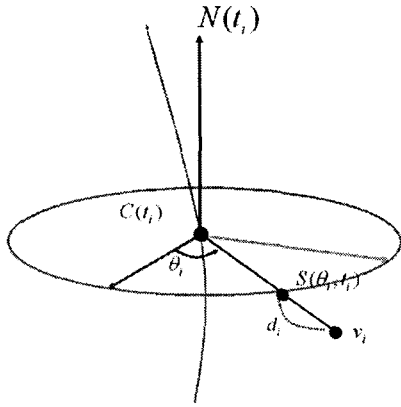


그림 3: 2단계 정점 바인딩

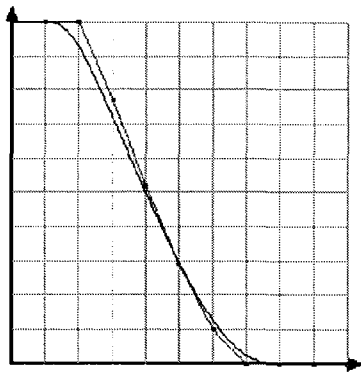


그림 4: 변형가중치함수

위치는 식(8)을 사용하여 결정된다.

$$v_i = C(t_i) + R(t_i) \begin{bmatrix} (r(\theta_i, t_i) + d_i) \cdot \cos\theta \\ (r(\theta_i, t_i) + d_i) \cdot \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 4.2 변형가중치(influence weight)

국소적 형상변형을 위해서는 스윙곡면 내부에 포함되는 정점들( $d_i < 0$ )에 대하여 적절한 변형 가중치(influence weight)를 설정해 주어야 한다. 정점  $v_i$ 에 대한 변형 가중치  $w_i$ 는 식(9)을 사용하여 구한다.

$$w_i = f(u), 0 \leq u = \frac{r(\theta_i, t_i) + d_i}{r(\theta_i, t_i)} \leq 1 \quad (9)$$

여기서  $f(u)$ 는 그림 4와 같이 B-spline으로 디자인된 곡선이다. 사용자는  $f(u)$ 의 조정점을 실시간으로 바꿈으로써, 정점  $v_i$ 에 부여될 변형 가중치를 조절할 수 있다. 그림 5는 스윙곡면에 바인딩된 내부의 정점들에 대하여 변형 가중치를 적용한 결과를 정점의 밝기를 사용하여 나타낸 것이다. 결과적으로 스윙곡면으로 부터의 거리에 따라 부드러운 변형가중치가 할당된다.

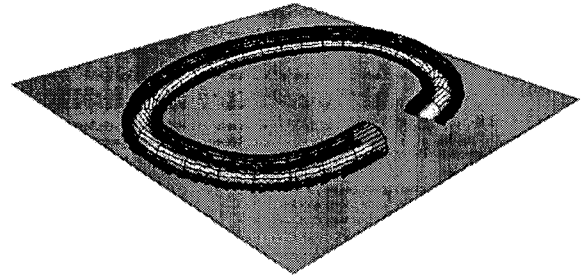


그림 5: 국소적인 형상변형을 위한 스윙과 변형 가중치

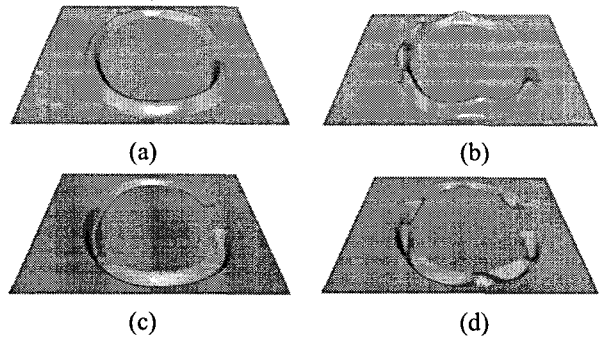


그림 6: 국소적 다중해상도 형상변형: (a) 1단계에서 스윙곡면을 변형한 결과. (b) 3단계에서 스윙곡면을 변형한 결과. (c) 1단계에서 스윙곡면을 변형한 결과. (d) (b)가 (c)에 적용된 결과.

#### 4.3 국소적 다중해상도 변형

사용자는 3차원 물체에 대하여 변형을 원하는 부분에 3절에서 제시한 방법으로 모델링된 스윙곡면을 위치시킨다. 스윙곡면의 위치가 정해지면 4.1절에서 제안된 절차적 바인딩 알고리즘을 통해 3차원 물체의 모든 정점들은 스윙곡면의 단면에 바인딩 된다. 국소적인 형상변형을 위해서는 스윙곡면의 내부에 포함된 정점들에 대하여 4.2절에서 제시한 방법에 따라 적절한 변형 가중치가 할당되어야 한다. 그림 5는 국소적인 형상변형을 위해 모델링된 스윙과 정점들에 부여된 변형 가중치를 나타낸다. 사용자는 스윙곡면을 구성하는 성분들의 다중해상도 표현 [7]을 통해 다단계의 해상도로 물체의 형상을 변형할 수 있다. 그림 6은 다중해상도 표현을 통해 모델링된 스윙곡면을 이용하여 국소적 형상변형을 수행한 결과들이다. 그림 6의 (a)는 그림 5의 스윙곡면을 위로 당겨 부분적인 형상변형을 수행한 결과이고, (b)는 (a)의 변형 후, 높은 해상도에서 더 국소적인 변형을 한 결과이다. (c)는 (b)의 변형 후, 다시 (a)와 같은 해상도에서 스윙곡면을 아래로 당겨 부분적인 형상변형을 한 결과이고, (d)는 (c)의 변형 후, 해상도만 높은 결과이다. (d)에서 볼 수 있듯이 (b)의 변형결과가 (d)에 적용된 것을 확인할 수 있다.

### 5. 상호반응적 형상변형

복잡한 3차원 물체의 각 부분들은 계층적 구조로 분할 될

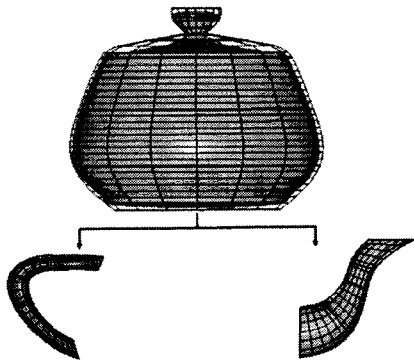


그림 7: Teapot 모델의 계층 구조와 스윕곡면

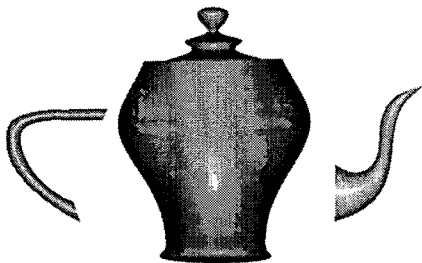


그림 8: 독립적으로 변형된 각 부분의 형상

수 있다. 그림 7은 teapot 모델의 각 부분에 대한 계층적 구조와 분할된 부분을 근사하는 스윕곡면들을 나타낸 것이다. Teapot 모델의 body, handle 그리고 spout 부분들을 근사하는 스윕곡면은 각각 9개, 7개, 5개의 키 단면들을 보간하여 생성되었다. 사용자는 teapot의 각 부분을 근사하는 스윕곡면의 키 단면들을 변형하여 teapot 모델의 형상을 변형할 수 있다. 이러한 형상변형은 전역적 변형으로 4절에서와 달리 모든 정점들이 변형 가중치 1을 가진다. 그림 8은 teapot의 각 부분들을 독립적으로 변형한 결과들이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 각 부분의 형상변형은 서로 독립적이기 때문에 다른 부분의 형상변형에 영향을 주지 못하게 되어 teapot의 위상구조를 변경하게 된다. 사용자는 이러한 계층적 구조로 분할된 3차원 물체를 변형하는데 있어서, 각 부분의 형상변형은 다른 부분과 상호작용을 통해서 이루어 지기를 바라게 된다. 이러한 계층적 구조를 기반으로 한 상호반응적 형상변형 기법을 위해서는 각 부분을 근사하는 스윕곡면들 사이에 위상구조에 따른 적절한 연결관계가 결정되어야 한다.

### 5.1 계층적 스윕곡면

본 논문에서 제시한 스윕곡면은 키 단면들을 보간하여 만들어지기 때문에, 각 스윕곡면의 키 단면들을 상위계층의 스윕곡면에 바인딩하여 스윕곡면들 사이에 연결구조를 줄 수 있다. 키 단면의 바인딩은 4절에서 제시한 정점의 바인딩에 추가적으로 상위계층 스윕곡면의 단면에 대한 방향정보가 포함되어야 한다. 그림 9에서  $K_i$ 를 하위계층의 키 단면들 중의 하나라고 가정하면,  $K_i$ 는 3차원 공간에서 위치  $p_i$ 와 방향을

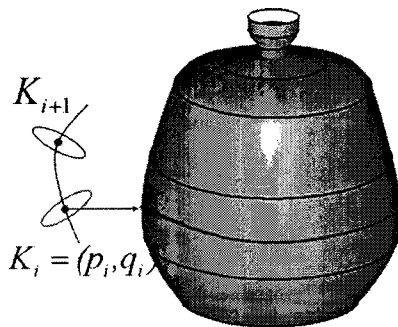


그림 9: 키 단면의 스윕 바인딩

나타내는 단위쿼터니온  $q_i$ 로 표현될 수 있다.  $p_i$ 는 4.1절에서 제시한 정점의 바인딩 방법을 통해 상위계층 스윕곡면에 대하여  $p_i = (\theta_i, t_i, d_i)$ 로 표현될 수 있다. 또한  $K_i$ 의 상대적인 방향을 나타내는  $\hat{q}_i$ 는 식(10)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\hat{q}_i = q(t_i)^{-1} \cdot q_i \quad (10)$$

식(10)에서  $q(t_i)$ 는 식(1)의 성분  $R(t_i)$ 에 해당하는 단위쿼터니온 표현이다. 식(10)과  $p_i = (\theta_i, t_i, d_i)$ 를 사용하여,  $K_i = (\theta_i, t_i, d_i, \hat{q}_i)$ 와 같이 상위계층 스윕곡면의 단면에 대하여 상대적으로 표현할 수 있다. 상위계층의 스윕곡면이 변형될 경우, 하위계층의 키 단면  $K_i$ 의 위치  $p_i$ 와 방향  $q_i$ 는 식(11)을 이용하여 구할 수 있다.

$$p_i = C(t_i) + R(t_i) \cdot \begin{bmatrix} (r(\theta_i, t_i) + d_i) \cdot \cos\theta \\ (r(\theta_i, t_i) + d_i) \cdot \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$q_i = q(t_i) \cdot \hat{q}_i$$

여기서  $q(t_i)$ 는  $R(t_i)$ 를 단위쿼터니온으로 표현한 것이다. 상위계층에 해당하는 스윕곡면은 식(11)를 통해서 얻어진 키 단면들을 보간하여 새롭게 생성된다.

### 5.2 상호작용을 통한 형상변형

스윕곡면들의 계층적 구조는 트리(tree)의 형태로 표현될 수 있다. 그림 7은 teapot의 계층구조를 트리형태로 표현한 예이다. Teapot의 body 부분을 근사하는 스윕곡면은 트리의 루트노드(root node)가 되고, 분할된 각 부분을 근사하는 스윕곡면들은 하위노드들로 표현된다. 트리의 루트노드를 제외한 모든 노드들은 5.1에서 제시한 방법을 통해 상위노드에 바인딩 되어야 한다. 하위노드가 상위노드에 바인딩 될 때, 3차원 물체의 위상구조에 따라 두 가지 형태로 구분될 수 있다. 그림 7의 handle은 상위노드인 body에 대하여 루프(loop)형태의 위상구조로 연결되어 있고, spout는 가지(branch)형태의 위상구조로 연결되어 있다. 루프형태의 위상구조로 연결된 노드가 상위노드에 바인딩 될 경우, 모든 키 단면들은 5.1에서 제시한 방법을 통해 상위노드에 바인딩 되어야만 상위노드와의 위상구조를 유지하면서 형상변형을 할 수 있다. 반면에 가지형태의 위상구조를 가진 노드는 상위노드에 대하여 첫 번째 키 단면만을 바인딩하면 된다. 가지형태의 위상구조를 가진 노드는 루프형태의 위상구조를 갖는 노드와 비교할 때,

같은 계층에 속하더라도 위상구조를 유지하면서 보다 자유로운 형상변형을 할 수 있다. 복잡한 3차원 물체의 경우 보다 복잡한 형태의 트리구조가 형성되지만, 모든 노드들은 위에서 제시한 두 가지 형태로 상위노드와 바인딩 될 수 있다. 이와 같이 3차원 물체의 계층구조에 따라 각 부분을 근사하는 스윕곡면이 트리의 노드로 표현되고 적절한 바인딩 형태를 갖고 상위노드에 바인딩 되면, 각 부분의 스윕곡면은 서로 상호작용을 하며 형상변형을 할 수 있다. 스윕곡면들 사이의 상호작용을 규정하는 규칙들은 아래와 같이 요약될 수 있다.

- 규칙(1): 현재 변형되는 노드의 하위노드들은 바인딩 형태에 따라 모두 변형되어야 한다.(Forward Deformation)
- 규칙(2): 현재 변형되는 노드가 루프형태로 바인딩 된 경우, 상위노드의 변형을 통해 현재노드의 변형을 만들어 낸다.(Backward Deformation)
- 규칙(3): 규칙(1)과 규칙(2)를 적용할 때, 각 노드 사이의 상대적 체적 비율을 유지한다.

규칙(1)과 규칙(2)는 스윕곡면들 사이에 상호작용에 있어서 일관된 위상구조를 유지하기 위해 필요한 규칙이다. 규칙(1)은 트리구조에서 현재 노드의 하위노드들을 검색하면서 각 노드의 바인딩 형태에 따라서 각 노드의 스윕곡면의 키 단면들의 위치와 방향을 결정하여, 이를 보간하는 새로운 스윕곡면을 생성하면 된다. 규칙(2)는 역방향 변형을 위한 규칙으로서 예를 들면, teapot 모델의 루프형태로 바인딩 된 handle을 변형시킬 경우, 직접적으로 handle을 변형하는 것은 상위노드인 body와의 위상구조를 변경시킨다. 따라서 handle의 상위노드인 body의 형상변형을 통하여 원하는 handle의 변형을 얻게 된다. 본 논문에서는 이러한 역방향 변형을 위하여 target tracking 방법을 사용하여 반복적으로 body의 형상을 조금씩 변형하였다. 규칙(3)은 사용자의 의도를 반영하여 보다 기능적이고 효율적인 형상변형을 하기 위한 규칙이다. 규칙(3)은 현재 변형되는 노드의 체적 변화율을 식(3)을 통해 계산하고, 체적 변화율에 고려하여 상위 혹은 하위노드의 목표체적을 결정한다. 그리고 상위 혹은 하위노드의 모든 키 단면들의 반지름을 수치적 방법을 통해 결정하여, 결과적으로 3차원 물체의 각 부분은 항상 일정한 체적비를 유지하며 변형을 한다. 규칙(3)은 사용자가 선택적으로 지정할 수 있는 규칙이어서 이러한 규칙 이외에도 다양한 제한조건을 부여하여 보다 복잡한 상호작용을 수반한 형상 변형을 가능하게 할 수 있다.

## 6. 실험결과

그림 10은 본 논문에서 제시한 방법을 기반으로 bunny 모델의 형상을 변형한 결과들이다. 그림 10의 (a)는 변형 전 bunny 모델과 귀 부분을 근사하는 스윕곡면을 나타내고, (b)는 스윕곡면의 키 단면을 회전하여 귀 부분의 형상을 굽힌 결과이다. (c)는 스윕곡면의 키 단면의 반지름을 조절한 결과이고, (d)는 스윕곡면의 키 단면의 위치를 조절한 결과이다. 그림 11은 teapot 모델의 상호반응적인 형상변형 결과를 보여주고 있다. 그림 11의 (a)는 변형 전 teapot 모델을 나타내

고, (b)는 body 부분의 스윕곡면을 변형하여 하위계층인 handle과 spout부분의 형상이 변형된 결과이다. (c)는 handle 부분을 수직방향으로 잡아당긴 결과로서 규칙(2)에 의해 상위계층인 body 스윕의 변형을 유도함으로써 handle 부분의 원하는 변형을 얻어낸 결과이다. (d)는 규칙(3)을 적용하여 body 부분이 변형될때 하위계층인 handle과 spout 부분의 체적이 함께 바뀐 결과를 보여주고 있다.

## 7. 결론

본 논문에서는 복잡한 3차원 물체에 대하여 스윕곡면을 기반으로 한 새로운 형상변형 기법을 제안하고, 다양한 실험결과를 통하여 제안된 기법의 효율성을 보였다. 절차적 모델링 기법의 장점을 형상변형 기술에 적용하여 사용자에게 보다 편리하고 직관적인 변형 기법을 제공하였고, 기존의 FFD방법들에서 격자구조의 구조적 제약으로 지원하지 못하던 계층적 구조에 기반한 상호반응적 형상변형 기법을 제안하였다. 물체를 계층구조로 분할하고, 각 부분을 근사하는 스윕곡면들을 계층의 위상구조에 따라 적절한 형태로 바인딩함으로써 상호작용을 가능하게 하였으며, 결과적으로 사용자의 의도가 반영된 보다 사실적이고 기능적인 형상변형을 가능하게 하였다. 또한 사용자로 하여금 선택적으로 규칙을 명시할 수 있도록 하여 다양한 형태의 상호작용의 가능성을 제시해 주었다. 본 논문에서 제안된 기법은 3차원 물체를 모델링하고 변형하는데 있어서 많은 시간과 노력을 덜어 줄 수 있는 효율적인 도구로 사용될 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] T.Sederberg and S. Parry, "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models," *Computer Graphics*, vol. 20, pp. 151-160, 1986.
- [2] S. Coquillart, "Extended Free-Form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling," *Computer Graphics*, vol. 24, no. 4, pp. 187-196, 1990.
- [3] R. MacCracken and K. Joy, "Free-Form Deformations with Lattices of Arbitrary Topology," *Computer Graphics*, pp. 181-189, 1995.
- [4] W. Hsu and H. Kaufman, "Direct Manipulation of Free-Form Deformation," *Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, pp. 177-184, 1992.
- [5] S. Hu, H. Zhang, C. Tai and J. Sun, "Direct Manipulation of FFD," *Visual Computer*, vol. 17, pp. 370-379, 2001.
- [6] S. Sheynin, A. Tuzikov and P. Vasiliev, "Volume computation from nonparallel cross-section measurement," *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 13, no. 1, pp. 174-176, 2004.
- [7] D. Forsey and R. Bartels, "Hierarchical B-spline Refinement", *Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH)*, vol. 22, no. 4, pp. 205-212, 1986.

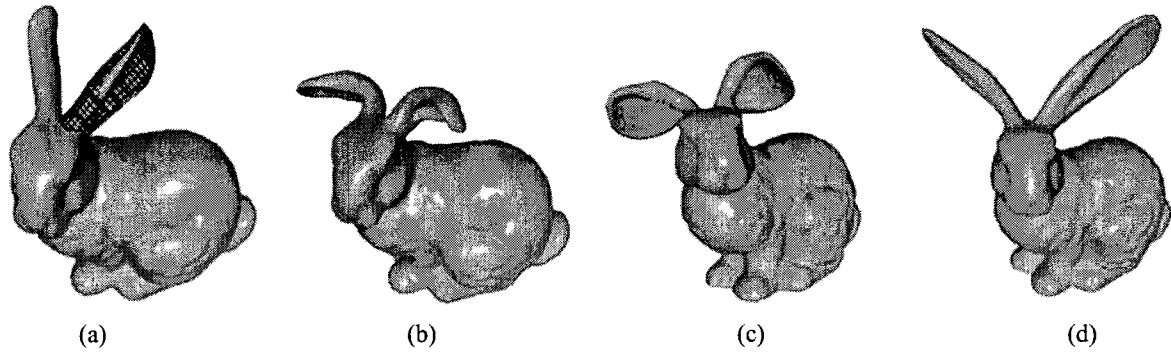


그림 10: bunny 모델의 형상변형: (a)변형 전 bunny 모델, (b)키 단면을 회전한 결과, (c)키 단면의 반지름을 조절한 결과, (d)키 단면의 위치를 조절한 결과

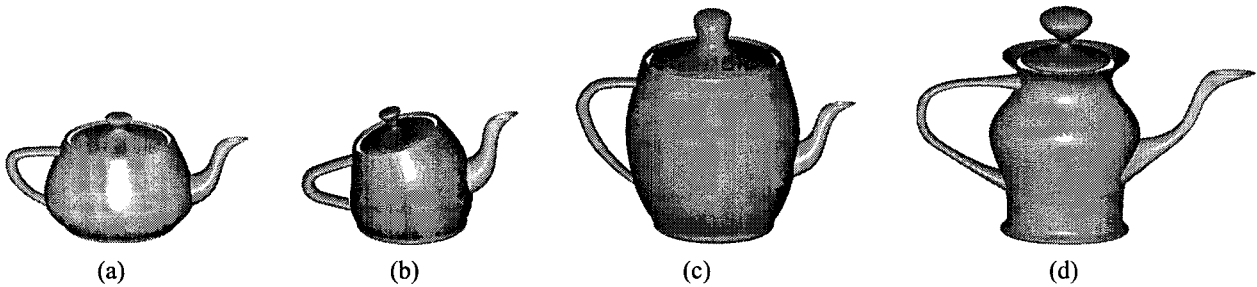


그림 11: teapot 모델의 상호반응적 형상변형: (a)변형 전 teapot 모델, (b)body부분을 변형하여 규칙(1)이 적용된 결과, (c)handle부분을 변형하여 규칙(2)가 적용된 결과, (d)규칙(3)을 적용하여 체적 변화율이 유지된 결과.

- [8] Y. Chang and A. Rookwood, "A Generalized de Casteljau Approach to Free-Form Deformation," *Proc. SIGGRAPH*, pp. 257-260, 1994.
- [9] F. Lazarus, S. Coquillart and P. Jansene, "Axial deformations: an intuitive deformation technique," *Computer Aided Design*, vol.26, no.8, pp.607-613, 1994.
- [10] K. Singh and E. Fiume, "Wires: A Geometric Deformation Technique," *Computer Graphics*, pp. 405-414, 1998.
- [11] J. Feng, L. Ma and Q. Peng, "A New Free-Form Deformation Through the Control of Parametric Surfaces," *Computers and Graphics*, vol. 20, no. 4, pp. 531-539, 1996.
- [12] K. Singh and E. Kokkevis, "Skinning Characters using surface-oriented Free-Form Deformations," *Proc. Graphics Interfaces*, 2000.
- [13] B. Chen, Y. Ono, H. Johan, M. Ishii, T. Nisihita and J. Feng, "3D Model Deformation Along a Parametric Surface," *Proc. International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, pp. 282-287, 2002.
- [14] K. Kobayashi and K. Ootsubo, "t-FFD: Free-Form Deformation by using Triangular Mesh," *Proc. Solid Modeling and Application*, 2003.
- [15] J. Hua and H. Qin, "Free-Form Deformations via Sketching and Manipulating the Scalar Fields," *Proc. Solid Modeling and Application*, 2003.
- [16] Tae-Ick Chang, Joo-Haeng Lee, Myung-Soo Kim, and Sung Je Hong, "Direct Manipulation of Generalized Cylinders based on Ration Motion," *Visual Computer*, vol.18, no.5, pp.228-239, 1998.