평균값 좌표를 이용한 빠른 2차원 형상 변형

유 광석[O] 최 정주 신 현준
아주대학교
{arthur[O], jungju, joony}@ajou.ac.kr

Fast 2D Shape Deformation using Mean Value Coordinates

Kwang-Seok Yoo[O] Jung-Ju Choi Hyun Joon Shin
Ajou University

요 약

본 논문에서는 평균값 좌표(mean value coordinates)를 이용하여 두 개의 메쉬 구조에 기반한 2차원 형상변형 기법을 제시한다. 먼저 입력으로 주어진 2차원 형상의 내부와 경계를 조밀하게 샘플링한 정점의 집합으로 구성된 형상 메쉬(shape mesh)와, 입력 형상을 근사적으로 둘러싸는 정점과 형상 메쉬의 일부 정점으로 구성된 제어 메쉬(control mesh)를 구성한다. 형상 메쉬 정점은 제어 메쉬의 정점에 대한 평균값 좌표로 표현한다. 사용자의 형상 변형 입력에 대하여 비선형 최소 자승 최적화 문제를 풀어 변형될 제어 메쉬 정점의 위치를 구하고, 형상 메쉬는 변형된 제어 메쉬의 정점으로부터 평균값 좌표를 이용하여 최종적인 형상의 변형을 계산한다. 일반적으로 형상 변형 문제는 입력되는 형상의 정점의 개수가 증가함에 따라서 그 수행 속도가 급격히 느려지며, 정점의 개수를 줄이면 변형에 의한 시각적 품질이 급격히 감소한다. 실험적인 결과에 의하면 본 논문에서 제시한 방법은 비교적 적은 수의 정점을 사용하여 형상 변형의 수행속도가 빠르면서, 변형의 시각적인 품질은 부드럽게 유지된다. 본 논문의 결과는 핸드폰과 같이 계산속도가 느린 임베디드 시스템에서 형상 변형을 이용한 2차원 애니메이션 제작과 같은 응용문제에 효과적으로 사용될 수 있다.

1. 서 론

2차원 형상 변형은 골격 구조가 명시적으로 주어지지 않은 2차원 캐릭터의 자세를 만들거나, 입력 영상을 간단히 변형하여 특수한 효과를 얻는데 사용할 수 있는 유용한 방법이다. 이러한 형상 변형은 간단한 조작을 통해서 수행될 수 있어야 하고, 변형의 결과는 시각적으로 부드러워야 하며, 실시간 사용자 응답(real-time user interactive)이 가능한 정도의 빠른 수행 속도를 보장해야 한다. 그러나 일반적으로 이러한 목표는 서로 상충되기 때문에, 최적화된 해결책을 찾기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.

최근 Weng 등은 라플라시안 좌표, 평균값 좌표, 간선(edge) 길이, 위치 제한 조건을 이용하여 에너지 함수를 정의하고, 2차원 형상 변형을 비선형 최소 자승 최적화 문제를 풀어 해결하는 방법을 제시하였다[1]. 입력된 형상의 내부와 경계를 각각 샘플링 하여 메쉬를 구성하고 정의된 에너지 함수에 따라서 메쉬 정점 및 간선의 개수에 비례하는 행렬식을 구성한다. 구성된 행렬식을 반복적인 가우스-뉴턴 방식을 이용하여 비선형 최소 자승 최적의 해를 찾는다. 이들의 연구결과는 기존의 방법들에 비하여 시각적 품질이 우수하고 비교적 수행 속도가 빠른 장점을 가지고 있다. 그러나, 이러한 방법은 입력 형상에 대하여 구성하는 메쉬의 정점과 간선 개수 합의 제곱에 비례하여 문제 해결 속도가 저하되는 단점을 가지고 있다. 반면에 수행 속도를 개선하기 위하여 적은 정점을 갖는 메쉬를 구성하게 되면 형상 변형 후의 시각적 품질이 빠르게 저하되는 현상이 발생한다.

본 논문에서는 Weng 등의 연구결과를 기초로, 매우 빠른 수행 속도를 보이면서도 시각적 품질을 비교적 효과적으로 유지하는 빠른 형상 변형 기법을 제시한다. 먼저 입력되는 2차원 형상에 대하여 적은 수의 정점과 간선으로 구성된 제어 메쉬를 생성하여 Weng 등이 제시한 방법으로 제어 메쉬를 사용자 입력에 따라서 변형한다. 입력 형상의 내부와 경계를 조밀하게 샘플링한 정점으로 구성된 메쉬의 정점을 제어 메쉬의 정점에 대한 평균값 좌표로 표현하여 최종의 형상 변형을 계산한다. 본 논문의 결과는 제어 메쉬 만을 최적화할 때 관찰되는 이상현상(artifacts)이 발생하지 않으면서 수행속도가 매우 빨라, 계산 속도가 느린 임베디드 시스템 등에서 형상 변형을 이용한 2차원 애니메이션 제작과 같은 응용에 효과적으로 사용할 수 있다.

2. 관련연구

형상변형을 위한 가장 단순하면서 빠른 방법 중의 하나는 자유 형상 변형(free form deformation) 방법이다[2]. 자유 형상 변형 방법은 입력 형상을 포함하는 격자구조를 설정하고, 격자 위의 점 위치를 변형하여 격자를 변형하고 이에 따라 간접적으로 형상을 변형하는 방법을 사용한다. 그러나 자유 형상 변형

방법은 형상이 변형되는 구조적인 특징을 잘 반영하지 못하는 단점을 가지고 있어서, 암시적으로 골격 구조를 갖는 캐릭터와 같은 형상을 변형할 경우 좋은 시각적 품질을 보이지 못하는 단점을 가지고 있다.

보다 구조적이고 직관적인 형상 변형을 수행하기 위해서 사용자는 형상 위에 구조적 특징에 따라서 제어점을 지정하고, 제어점의 위치를 조정하여 원하는 변형의 결과를 얻는 방법을 사용할 수 있다. 입력되는 2차원 형상이 이미지 혹은 이미지의 일부인 경우, 이미지 위의 점들로 제어점을 구성하고, 형상을 골격 구조를 갖는 강체 변환과 유사한 결과를 갖도록 변형하는 방법이 제시되었다[3].

골격 구조를 갖는 캐릭터의 변형에 적합한 형상 변형 방법으로 입력 형상의 내부와 경계를 샘플링 하여 메쉬를 구성하고, 구성된 메쉬의 일부 정점을 제어하여 전체 메쉬의 변형을 구하는 방법이 제시되었다[1, 4]. 이러한 방법들은 공통적으로 메쉬 변형에 대한 에너지 함수를 정의하고, 에너지 함수를 다양한 방법으로 최적화하여 메쉬 변형을 구한다. 에너지 함수는 메쉬 정점의 위치를 원하는 위치로 이동하기 위한 제한 요소(constraints)와 형상의 국소적 모양을 유지하기 위한 제한 요소로 이루어져 있다.

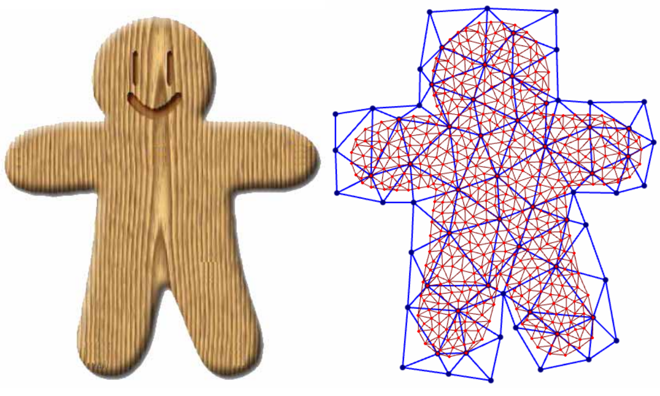
Igarashi 등은 메쉬 위에 몇 개의 제어점을 지정하여 2차원 형상을 변형시키는 방법을 제안했다[4]. 메쉬 위의 제어점을 점을 사용자 입력에 따라서 이동시키고, 제어점으로 지정되지 않은 점들을 움직일 때 변화하는 삼각형들의 크기 변화를 최소화하는 최적화 문제를 선형적인 문제로 변환하여 해결한다. 비선형 문제를 선형화하여 해결하는 과정에서 차선(suboptimal)의 결과를 얻게 된다. 실험적인 결과에 의하면 차선의 해를 얻기 위하여 상대적으로 많은 계산 시간을 필요로 하는 것으로 알려져 있다.

Weng 등은 2차원 라플라시안 좌표, 평균값 좌표, 간선의 길이, 위치 제한 조건을 이용하여 에너지 함수를 정의하고 비선형 최소 자승 최적화를 통해 에너지 함수를 최소화하는 정점의 위치를 구하는 방법을 제시하였다[1]. 비선형 최적화 문제를 비선형적으로 해결하여 물리적, 시각적으로 우수한 형상 변형 결과를 보이면서도, Igarash 등의 기존 연구결과에 비하여 빠른 수행 속도를 보이는 장점을 가지고 있다. 그러나, Weng 등의 연구 결과는 입력 형상을 조밀한 메쉬로 구성할 경우 수행속도가 급격히 느려지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 적은 수의 정점으로 구성된 제어 메쉬에 대하여 Weng 등의 연구 결과를 바탕으로 최적의 해를 구하고, 조밀한 형상 메쉬에 대하여 최적의 해를 바탕으로 형상 변형의 결과를 완성한다. 따라서 본 논문의 연구결과는 최적(optimal)의 형상 변형 결과를 얻기 위한 방법이 아니다. 본 논문에서는 적은 수의 정점을 가진 메쉬를 이용한 형상 변형에서 발생하는 내부 형상의 불연속성(discontinuity)이 발생하지 않고, 차선의 결과를 얻지만 수행 속도는 매우 빠른 형상 변형 기법을 제시한다.

3. 형상 변형을 위한 메쉬의 구성 및 전처리

입력되는 2차원 형상에 대하여 제어 메쉬 M_C 와 형상 메쉬 M_S 를 그림 1과 같이 구성한다. 형상 메쉬는 입력 형상의 내부와 경계를 따라서 정점을 샘플링하여 구성한다. 이때 형상 메쉬는 다음과 같이 표현된다. $M_S = (V_S, E_S)$, 여기서 V_S 는 형상 메쉬의 정점 집합, E_S 는 간선 집합을 나타낸다. 비슷한 방법으로 제어 메쉬는 $M_C = (V_C, E_C)$ 와 같이 표현되고, 이때 V_C 는 제어 메쉬의 정점 집합, E_C 는 간선의 집합이다. 제어 메쉬의 정점집합 V_C 는 형상의 외부에 존재하는 정점들로 구성되어 제어 메쉬의 단순 윤곽 다면체(simple silhouette polygon)를 구성하는 정점 집합 V_{CP} 와 형상의 내부 혹은 경계에 존재하는 정점들로 구성된 V_{CG} 로 분할된다. 비슷한 방법으로 간선 집합 E_C 는 V_{CP} 를 연결하는 간선 집합 E_{CP} 와 나머지 간선 집합 E_{CG} 로 분할된다.



(가) (나)

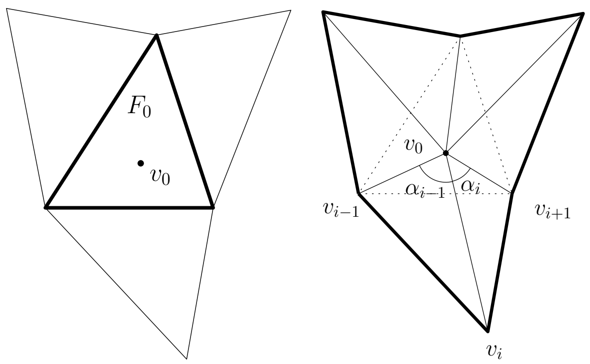
그림 1. (가) 입력 형상에 대한, (나) 제어 메쉬(푸른색)와 형상 메쉬(붉은색)의 구성.

제어 메쉬와 형상 메쉬가 구성되면 전처리 단계에서 형상 메쉬의 모든 정점 V_S 의 평균값 좌표를 제어

메쉬의 정점 V_C 에 대하여 계산한다 (그림 2 참조). 먼저 임의의 정점 $v_0 \in V_S$ 에 대하여 v_0 를 포함하는 제어 메쉬의 삼각형 F_0 를 구하고, F_0 와 간선 인접(edge adjacent)한 삼각형들을 구한다(그림 2(가) 참조). F_0 와 인접 삼각형들을 구성하는 정점을 v_i 라 하면 v_0 의 평균값 좌표 w_i 는 다음과 같다[5].

$$\lambda_i = \frac{\tan(\alpha_i/2) + \tan(\alpha_{i+1}/2)}{\|v_i - v_0\|}$$
$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_j \lambda_j} \quad (1)$$

이때, α_i 는 두 벡터 $\overrightarrow{v_0 v_i}$ 와 $\overrightarrow{v_0 v_{i+1}}$ 사이의 각을 의미한다.



(가) (나)

그림 2. 형상 메쉬의 정점 v_0 의 제어 메쉬 정점 집합에 대한 평균값 좌표 구성의 예

4. 형상 변형 에너지 함수와 최적화

본 논문에서는 입력되는 2차원 형상에 대하여 적은 수의 정점으로 구성된 제어 메쉬의 형상 변형에 Weng 등의 연구 결과를 그대로 사용한다. 본 장에서는 제어 메쉬의 형상 변형에 사용할 에너지 함수와 에너지 함수의 최적화 방법을 기술한다.

4.1 라플라시안 좌표

제어 메쉬의 윤곽선을 이루는 정점 집합 V_{CP} 에 대한 변형이 발생했을 때, 라플라시안 좌표를 보존하는 제한 조건을 유지하도록 에너지 함수를 정의한다. 점 $v_i \in V_{CP}$ 에 대한 라플라시안 좌표 δ_i 는 인접한 정점 v_{i+1} 과 v_{i-1} 의 평균과의 차로 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_i = L(v_i) = v_i - (v_{i+1} + v_{i-1})/2,$$

변형이 발생했을 때, 정점의 라플라시안 좌표값을 보존하기 위해서는 다음의 에너지 함수를 최소화하면 된다.

$$\sum_{v_i \in V_{CP}} \|L(v_i) - \delta_i\|^2$$

위 식을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\|LV - \delta(V)\|^2 \quad (2)$$

4.2 평균값 좌표

제어 메쉬의 정점 집합 V_{CG} 의 평균값 좌표를 변형 중에 보존하는 제한 조건을 유지하도록 에너지 함수를 정의한다. 정점 $v_i \in V_{CG}$ 와 간선으로 연결된 정점 $v_j \in V_C$ 에 대한 평균값 좌표 $w_{i,j}$ 는 식(1)과 같은 방법으로 계산한다.

평균값 좌표의 특성에 따라 다음과 같은 성질을 만족한다.

$$v_i - \sum_{(i,j)\in E_C} w_{i,j} v_j = 0, \quad v_i \in V_{CG}$$

위의 식은 행렬식 $MV = 0$ 의 형태로 나타낼 수 있다. 변형이 일어나는 동안 평균값 좌표 변화를 최소화하기 위해서는 다음의 에너지 함수를 최소화하면 된다.

$$\|MV\|^2 \quad (3)$$

4.3 간선 길이

정점의 평균값 좌표는 이웃한 정점들 사이의 각으로 정의되기 때문에 두 정점을 연결하는 간선의 길이가 변화하여도 평균값 좌표는 변화하지 않는다. 따라서 평균값 좌표의 유지와 더불어 제어 메쉬의 간선 길이를 유지하도록 하면 형상 변형 도중 국소적인 변화를 최소화할 수 있다. 형상 변형 도중, 간선 $(i,j) \in E_{CG}$ 의 길이 변화에 대한 에너지 함수는 다음과 같다.

$$\sum_{(i,j)\in E_{CG}} \|(v_i - v_j) - e(v_i, v_j)\|^2$$
$$e(v_i, v_j) = \frac{\tilde{l}_{i,j}}{l_{i,j}}(v_i - v_j)$$

여기서, $l_{i,j}$ 는 현재 간선 (i,j) 의 길이이고, $\tilde{l}_{i,j}$ 는 원본 제어 메쉬 상의 원래 길이를 의미한다. 위의 에너지 함수를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\|HV - e(V)\|^2 \tag{4}$$

4.4 제어점 위치 제한

사용자는 제어 메쉬 위의 정점 중 일부를 제어점으로 설정하고 제어점의 위치를 이동시켜 형상을 변형한다. 지정된 제어점이 사용자가 입력한 목표 위치로 이동하기 위해서는 제어점의 현재 위치와 목표 위치 사이의 차이를 최소화하면 된다. 이에 해당하는 에너지 함수는 다음과 같다.

$$\|CV - U\|^2 \tag{5}$$

여기서 U 는 제어점의 목표 위치 벡터이다.

4.5 형상 변형 에너지

식(2)-(5)에서 정의한 에너지 함수를 모두 합하여 형상 변형 에너지를 다음과 같이 정의한다.

$$\|LV - \delta(V)\|^2 + \|MV\|^2 + \|HV - e(V)\|^2 + \|CV - U\|^2 \tag{6}$$

이 에너지 함수를 최소화한다는 것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_V \|AV - b(V)\|^2$$
$$A = \begin{pmatrix} L \\ M \\ H \\ C \end{pmatrix}, b(V) = \begin{pmatrix} \delta(V) \\ 0 \\ e(V) \\ U \end{pmatrix} \tag{7}$$

이때 행렬 A 는 원본 제어 메쉬에 의해 결정되지만 b 는 현재 점의 위치 V 에 의해 결정되므로 이것은 비선형 최소 자승 문제(nonlinear least squares problem)가 된다. 이 문제를 해결하기 위해 다음과 같이 반복적 가우스-뉴턴 해법을 사용할 수 있다[6].

$$\min_{V^{k+1}} \|AV^{k+1} - b(V^k)\|^2 \tag{8}$$

V^k 가 k 번째 반복으로 얻어진 값일 때 V^{k+1} 은 $k+1$ 번째 반복으로 얻어지는 점의 위치이다.

$$V^{k+1} = (A^T A)^{-1} A^T b(V^k) = Gb(V^k)$$

이때 행렬 G 는 초기의 제어 메쉬에 의하여 결정되므로 매 반복마다 $b(V^k)$ 를 계산하면 에너지 함수를 최소화하는 제어 메쉬 정점의 위치 V^{k+1} 을 얻을 수 있다. 이때 최초의 정점 위치 V^0 는 제어 메쉬 정점의 초기 위치이다.

식(7)에서 사용되는 행렬의 크기는 입력으로 주어지는 제어 메쉬 M_C 에 따라서 $(\|V_C\| + \|E_C\| + k) \times \|V_C\|$ 로 결정된다. 이때 k 는 제어점으로 지정된 정점의 개수이다. 이러한 문제의 해결에는 행렬 크기의 제곱에 비례하여 증가하므로, 입력 메쉬의 크기가 증가하면 계산 량이 빠르게 증가하는 특징이 있다.

4.6 형상 메쉬의 변형

계산 속도를 빠르게 하기 위해서 입력 메쉬의 정점 및 간선의 수를 줄이면 시각적 품질이 급격히 감소한다. 그 이유로는 형상 변형을 이루는 에너지 함수가 국소적 특징의 변화를 최소화하는 방향으로 작성되었기 때문이다. 따라서 적은 수의 정점으로 이루어진 메쉬를 에너지 함수를 최적화 하여 변형하려 하면, 정점 사이의 간격이 멀어 국소적 최적화 결과가 정점과 정점의 중간에서는 잘 적용되지 않는다. 그러므로 국소적 특징을 최소화 하는 에너지 함수를 적용하기 위해서는 비교적 조밀하게 샘플링된 메쉬를 사용하여 변형을 하여야 한다.

본 논문에서는 이러한 국소적인 형상을 유지하려는 성질을 형상 메쉬의 정점을 평균값 좌표를 유지하여 해결하였다. 전처리 단계에서 형상 메쉬의 모든 정점은 제어 메쉬의 정점에 대한 평균값 좌표로 표현된다 (식(1) 참조). 제어 메쉬의 형상 변형 결과 제어 메쉬의 정점 위치에 변화가 생기면 형상 메쉬의 정점은 전처리 단계에서 계산된 평균값 좌표를 이용하여 형상 변형의 최종적인 위치가 계산된다.

이러한 형상 메쉬의 변형 방법은 형상 변형 에너지 함수 식(6)에서 메쉬에 변형이 일어났을 때 발생하는 평균값 좌표의 변화 에너지 항을 0으로 만들어 주게 된다. 즉 형상 메쉬 정점의 평균값 좌표를 유지하면 에너지 함수를 최적화할 수는 없으나, 에너지 함수를 줄이는 방향으로 변형의 결과를 얻을 수는 있게 된다.

5. 실험 결과

본 논문에서 제시한 방법을 AMD Athlon 3200+ 1.8GHz CPU와 2.0GBytes 환경에서 15회 반복적으로 가우스-뉴턴 방법을 적용하여 최적의 해를 구하였다. 일반적으로 제어 메쉬 만을 사용하여 형상 변형을 수행하면 면의 크기가 크기 때문에 삼각형의 경계면에서 불연속성이 발생하여, 형상 변형의 시각적 품질이 우수하지 못하였다(그림 3,4,5의 (나) 참조).

그러나 형상 메쉬의 정점에 대하여 평균값 좌표를 유지하도록 하면 경계면에서의 불연속성이 없어져 형상 변형 후의 시각적 품질이 우수한 특징을 보인다 (그림 3,4,5의 (다) 참조). 기존에 Weng 등이 제시한 모든 정점과 간선에 대하여 최적화 문제를 해결하여 형상 변형을 수행한 결과(그림 3,4,5의 (라) 참조)와 비교하여 변형의 결과는 정확히 일치하지 않지만 시각적인 품질은 비슷한 수준으로 유지됨을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 방법은 입력 형상에 대하여 적은 정점과 간선으로 이루어진 제어 메쉬를 생성하고, 제어 메쉬의 형상 변형을 수행하는 도중 국소적 변화를 에너지 함수로 표현하고, 에너지 함수를 비선형 최소 자승 최적화 방법을 사용하여 해결한다. 형상 변형의 시각적 품질을 유지하기 위하여, 입력 형상의 내부와 경계를 조밀하게 샘플링한 형상 메쉬의 평균값 좌표를 유지하도록 하였다. 평균값 좌표의 유지는 최적화 문제를 해결하는 것에 비하여 매우 빠르게 수행될 수 있으며, 제어 메쉬의 크기가 작기 때문에 최적화 문제도 빠르게 해결할 수 있다. 평균적으로 형상 메쉬의 10%정도로 이루어진 제어 메쉬를 최적화 하고, 평균값 좌표를 유지한 경우 70배 정도의 수행시간 개선 효과를 보였다 (표 1 참조).

표 1. 형상 변형의 평균 수행시간: 전처리 시간의 단위는 초, 수행시간의 단위는 밀리 초이다.

모델	Character		Flower		Stick	
	그림 3(다)	그림 3(라)	그림 4(다)	그림 4(라)	그림 5(다)	그림 5(라)
$\lVert V_{CP} \rVert$	32	91	44	119	24	59
$\lVert V_{CG} \rVert$	34	441	76	611	19	170
$\lVert V_S \rVert$	532	-	730	-	229	-
$\lVert E_S \rVert + \lVert E_C \rVert$	198	1593	225	2190	126	685
전처리	0.71	1021	1.08	3963	0.17	498
수행시간	8.75	586.5	11.60	1164.04	3.6	106.74
차이값	1.46%		1.16%		7.9%/ 4.6%	

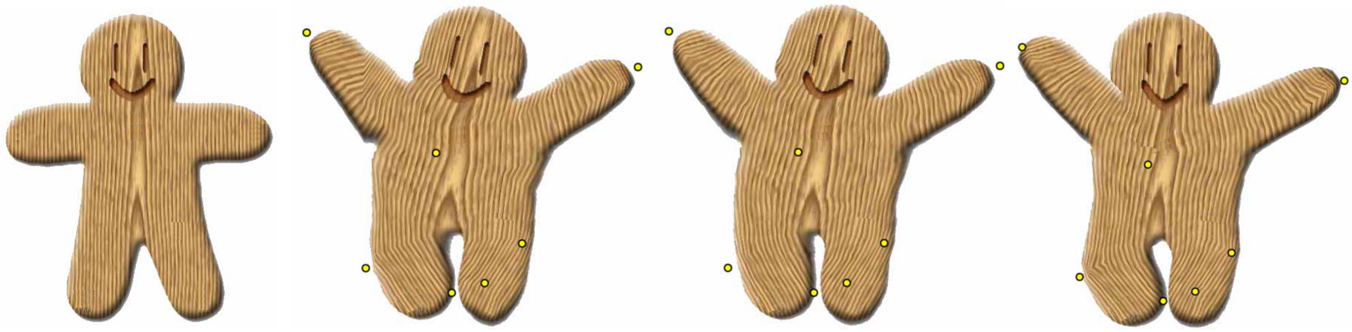
5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 2차원 형상 입력에 대하여 시각적으로 부드러우면서 빠른 계산 속도를 갖는 형상 변형 기법을 제시하였다. 형상 변형의 문제를 해결하기 위하여 비선형 최소 자승 최적화 방법을 사용하면 좋은 품질의 형상 변형 결과를 얻을 수 있으나, 계산 속도는 입력 형상으로부터 구성되는 메쉬의 정점 및 간선의 수에 따라서 급격히 증가한다. 따라서 본 논문에서는 적은 수의 정점과 간선으로 구성된 제어 메쉬를 구성하여 최적화 문제의 해결을 수행하였다. 적은 수의 정점으로 구성된 메쉬의 최적화를 통하여 형상 변형을 수행할 경우 관찰되는 불연속성은 조밀하게 샘플링된 형상 메쉬의 평균값 좌표를 유지하여 해결하였다. 실험적인 결과에 의하면 시각적으로 불연속성을 없애면서 수행속도는 대단히 빠른 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문의 연구결과는 계산 속도가 느린 핸드폰과 같은 임베디드 시스템에서 형상 변형을 이용한 2차원 애니메이션 제작과 같은 응용 문제에 적용될 수 있다.

본 논문에서 제시된 형상 변형 기법은 입력 형상을 샘플링한 모든 정점에 대하여 최선의 형상 변형 결과를 얻기 위한 방법이 아니다. 오히려 차선의 형상 변형 결과를 얻으면서 수행 속도는 매우 빨라야 하는 제한이 있는 경우의 실제적인 응용 문제를 해결하기 위한 방법이다. 그러나, 평균값 좌표를 유지하는 것이 가장 좋은 차선책인가에 대한 물음에 명확한 답을 밝히지 못하였다. 또한 실험의 결과는 제어 메쉬를 구성하는 방식에 따라서 형상 변형의 결과가 달라지는 문제를 가지고 있다. 이는 형상 변형의 목표를 알고 있을 경우 제어 메쉬를 원하는 형식으로 구성할 수 있는 자유도를 사용자에게 주는 것이지만, 특정한 목표를 위한 제어 메쉬의 적절한 구성 방법은 밝히지 못하였다.

참고문헌

[1] Y. Weng, W. Xu, Y. Wu, K. Zhou, and B. Guo, "2D shape deformation using nonlinear least squares optimization," Visual Computer, 22(9), pp.653-660, 2006.
[2] T. Sedergerg and S. Parry, "Free-form deformation of solid geometric models," In Proceedings of SIGGRAPH'86, pp.151-160, 1986.
[3] S. Schaefer, T. McPhail, and J. Warren, "Image deformation using moving least squares," ACM Transactions on Graphics, 25(3), pp.533-540, 2006.
[4] T. Igarashi, T. Moscovich, and J. Hughes, "As-rigid-as-possible shape manipulation," ACM Transactions on Graphics, 24(3), pp.1134-1141, 2005.
[5] M. Floater. "Mean value coordinates," Computer Aided Geometric Design, 20(1), pp.19-27, 2003.
[6] K. Madsen, H. Nielsen, and O. Tingleff, Methods for non-linear least squares problems, Technical Report, Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 1999.

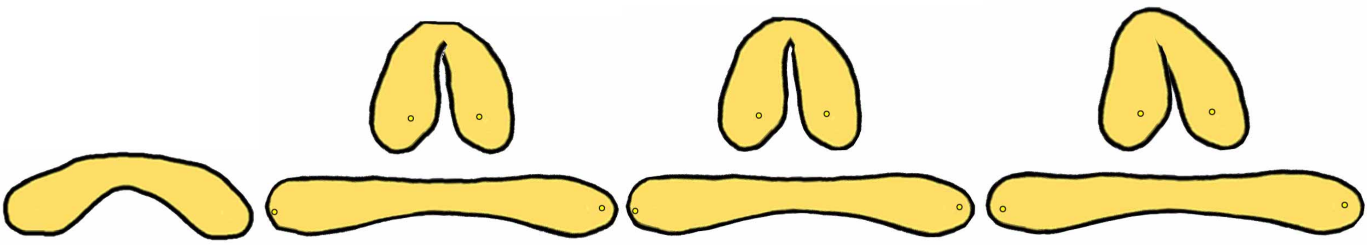


(가) (나) (다) (라)

그림 3 (가) 입력 형상, (나) 제어 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (다) 제어 메쉬와 형상 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (라) 형상 메쉬의 최적화를 통한 형상 변형 결과.

(가) (나) (다) (라)

그림 4 (가) 입력 형상, (나) 제어 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (다) 제어 메쉬와 형상 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (라) 형상 메쉬의 최적화를 통한 형상 변형 결과.



(가) (나) (다) (라)

그림 5 (가) 입력 형상, (나) 제어 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (다) 제어 메쉬와 형상 메쉬를 이용한 형상 변형 결과, (라) 형상 메쉬의 최적화를 통한 형상 변형 결과.