

계층 메쉬를 이용한 빠른 평면 형상 변형

유광석^o 최정주

아주대학교

{arthur^o, jungju}@ajou.ac.kr

Fast Planar Shape Deformation using a Layered Mesh

Kwangseok Yoo^o Jung-Ju Choi

Ajou University

요약

본 논문에서는 2차원 입력 형상에 대하여 계층 메쉬를 이용한 빠르고, 품질 저하가 적은 평면 형상 변형 기법을 제시한다. 입력으로 주어진 2차원 형상의 내부와 경계를 조밀하게 샘플링한 정점의 집합으로 구성된 형상 메쉬와, 입력 형상을 근사적으로 둘러싸는 형상 메쉬의 일부 정점으로 구성된 제어 메쉬를 구성한다. 이때, 형상 메쉬 정점은 제어 메쉬의 정점에 대한 평균값 좌표로 표현한다. 사용자의 형상 변형 입력에 대하여 기존의 비선형 최소사승법을 사용한 메쉬 최적화 문제를 풀어 제어 메쉬 정점의 변형될 위치를 구하고, 형상 메쉬는 변형된 제어 메쉬의 정점으로부터 평균값 좌표를 이용하여 최종적인 형상의 변형을 빠르게 계산한다. 형상 메쉬는 입력 형상을 정확히 표현하기 위해 많은 수의 정점으로 구성되는 반면에 제어 메쉬는 상대적으로 적은 수의 정점으로 구성된다. 계산 양이 많은 최적화 방법은 제어 메쉬에만 적용되기 때문에 전체 수행시간은 매우 빠르지만, 제어 메쉬의 품질 저하에 따라 형상 변형의 품질 또한 저하된다. 본 논문에서는 형상 변형의 결과를 조절하고 품질 저하를 보정하기 위해서 사용자 제한에 방위 제어를 포함시켜 형상 변형의 강성도를 조절하는 방법을 제시한다. 실험적인 결과에 의하면 본 논문에서 제시한 방법은 비교적 적은 수의 정점을 사용하여 형상 변형의 수행속도가 빠르면서, 변형의 시각적인 품질은 부드럽게 유지된다. 본 논문의 결과는 휴대폰이나 태블릿 PC와 같이 계산속도가 느린 임베디드 시스템에서 형상 변형을 이용한 2차원 애니메이션 제작과 같은 응용문제에 효과적으로 사용될 수 있다.

Abstract

We present a trade-off technique for fast but qualitative planar shape deformation using a layered mesh. We construct a layered mesh that is embedding a planar input shape; the upper-layer is denoted as a control mesh and the other lower-layer as a shape mesh that is defined by mean value coordinates relative to the control mesh. First, we try to preserve some shape properties including user constraints for the control mesh by means of a known existing nonlinear least square optimization technique, which produces deformed positions of the control mesh vertices. Then, we compute the deformed positions of the shape mesh vertices indirectly from the deformed control mesh by means of simple coordinates computation. The control mesh consists of a small number of vertices while the shape layer contains relatively a large number of vertices in order to embed the input shape as tightly as possible. Since the time-consuming optimization technique is applied only to the control mesh, the overall execution is extremely fast; however, the quality of deformation is sacrificed due to the sacrificed quality of the control mesh and its relativity to the shape mesh. In order to change the deformation behavior and consequently to compensate the quality sacrifice, we present a method to control the deformation stiffness by incorporating the orientation into the user constraints. According to our experiments, the proposed technique produces a planar shape deformation fast enough for real-time applications on limited embedded systems such as cell phones and tablet PCs.

키워드: 형상 변형, 변형 에너지 최적화, 변형 제어

Keywords: shape deformation, deformation energy optimization, deformation control

1. 서론

최근 사용자 제작 콘텐츠(UCC; User Created Contents)로 불리는 개인 미디어가 많은 사람들의 주목을 받고 있다. 개인 미디어의 발달 추이에 따라서 일반 사용자들도 자신만의 개성을 담은 아바타(avatar)를 만들고 간단한 자세(posture)를 추가하여 단순한 스토리를 표현하기 시작했다. 그러나 일반 사용자들은 움직임(motion)을 표현하는 숙련된 기술이 부족하여 애니메이션과 같은 콘텐츠의 제작이 쉽지 않다. 일반적으로 사용되는 3차원 형상 변형과 같은 기술은 제작 과정이 복잡하고 숙련된 작업을 필요로 하며, 개인 미디어로 활용되는 휴대기와 같은 기기에서 좋은 품질을 생성하기에는 성능이 좋지 않다. 최근에는 2차원 형상을 대상으로 직관적인 형상 변형에 대한 연구[1, 2, 3]가 이루어지면서 소수의 제어점을 이용하여 캐릭터의 동작을 제어할 수 있게 되었다.

2차원 삼각형 메쉬로 표현된 형상의 변형은 메쉬의 일부 정점을 제어점으로 선택하여 이동하면 제어점으로 선택되지 않은 점들이 특정한 제한 조건을 만족하는 위치를 계산하는 문제이다. 변형에 관한 연구는 크게 표면 변형(surface deformation)과 공간 변형(space deformation) 기법으로 나누어 볼 수 있다 [4]. 표면 변형 기법은 변형시 물체의 세밀한 특징을 보존하도록 에너지 함수를 정의하고 사용자의 제한을 추가하여 최적화를 수행하여 메쉬 정점의 위치를 계산한다. 공간 변형 기법은 형상을 둘러싼 공간을 사용자가 변형하고, 변형된 공간으로부터 간접적으로 형상의 변형을 빠르게 얻는다. 표면 변형 기법은 국소적인 세밀함이 형상 변형 후에도 잘 유지되는 장점이 있으며, 공간 변형 기법은 계산이 간단하여 수행 속도가 빠른 장점이 있다.

2차원 형상 변형은 응용 분야의 특성 상 변형의 결과가 시각적으로 부드러워야 하며, 실시간 사용자 응답이 가능한 정도의 빠른 수행 속도를 보장해야 한다. 또한 간단한 조작으로 형상 변형의 결과를 조절할 수 있어야 사용자가 의도하는 목적에 맞게 다양한 동작을 쉽게 제작할 수 있다. 이러한 요구 조건은 서로 상충되는 목표이기 때문에, 형상 변형의 품질과 수행 속도 목표를 동시에 이루기는 어렵다. 예를 들어, Igarashi [1], Weng [2], Guo [3] 등은 메쉬 기반의 에너지 최적화를 통해 형상을 변형시키는 방법을 제안하였다. 이때 형상을 정의하는 정점의 개수가 많아지면 고품질의 변형 결과를 얻을 수 있으나, 수행 속도가 급격히 느려지는 특징을 가지고 있다. 따라서 에너지 함수의 정의를 개선하여 수행 속도를 높이고, 최적화 기법을 개선하여 품질을 높이는 다양한 방법으로 상충되는 목표를 이루기 위하여 노력해 왔다.

본 논문에서는 기존의 표면 변형 기법에서 사용하는 비선형 메쉬 최적화의 연구결과 [2]를 기초로, 비선형 최소 자승 최적화에 사용되는 행렬의 크기를 줄여서 매우 빠른 수행 속도를 보이면서도 시각적 품질을 비교적 효과적으로 유지하는 빠른 형상 변형 기법을 제안한다. 먼저 입력되는 2차원 형상에 대

하여 적은 수의 정점과 간선으로 구성된 메쉬를 생성하여, 사용자 입력에 따라서 표면 변형 기법에서 사용하는 형상 변형 에너지 최적화를 이용하여 형상을 변형한다. 이렇게 변형된 메쉬의 결과를 공간 변형 기법의 공간 변형 결과로 사용하여, 입력 형상의 내부와 경계를 조밀하게 샘플링한 정점으로 구성된 메쉬의 최종적인 정점 위치를 계산한다. 제안하는 방법은 형상 변형의 표면 변형 기법과 공간 변형 기법의 장점을 절충(trade-off)한 방법으로 변형의 품질을 크게 손상시키지 않으면서 속도를 개선한 방법이다. 아울러 기존 표면 변형 기법과는 달리, 변형 품질을 제어하기 위한 간단한 방법을 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 제안하는 방법은 계산 속도가 느린 임베디드 시스템 등에서 형상 변형을 이용한 2차원 애니메이션 제작과 같은 응용에 효과적으로 사용될 수 있다.

2. 관련연구

표면 변형은 에너지를 형상의 세밀한 특징이 보존되도록 변화장(gradient field)으로 정의하고 그로부터 표면을 재구성한다[5, 6]. 사용자는 목적에 맞도록 유도장(guidance field)을 조작하고 최적화 방법을 사용하여 경계조건을 만족하는 메쉬를 구한다. 표면 방법은 높은 품질의 결과를 얻을 수 있지만 최적화에 많은 시간이 소모된다. 공간 변형은 물체를 둘러싼 공간을 사용자가 변형하고, 변형된 공간으로부터 물체의 형상을 매우 빠르게 얻는다 [4]. 물체 고유의 형상은 주위 공간의 좌표로 정의될 수 있는데 공간 자체를 변형시키면 메쉬도 그에 따라 변형된 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 간접적인 방법으로 메쉬의 변형을 이끌어 내기 때문에 사용자가 직관적으로 변형의 결과를 예측하거나 메쉬 자체의 구조적 특징을 보존하기 어렵다.

Igarashi 등[1]은 메쉬 위에 몇 개의 제어점을 지정하여 2차원 형상을 변형시키는 방법을 제안했다. 메쉬 위의 점을 제어점으로 선택하여 사용자 입력에 따라서 이동시키고 제어점으로 지정되지 않은 점들을 움직일 때, 변화하는 삼각형들의 크기 변화를 최소화하는 최적화 문제를 선형적인 문제로 변환하여 해결하였다. 비선형 문제를 선형화하여 해결하는 과정에서 차선(suboptimal)의 결과를 얻게 된다. 실험적인 결과에 의하면 차선의 해를 얻기 위하여 조밀한 메쉬로 구성할 경우 많은 계산 시간을 필요로 하는 것으로 알려져 있다. Weng 등[2]은 표면에 라플라시안 좌표만을 사용할 경우, 이상 현상이 발생하는 것에 유의하여 외곽에는 2차원 라플라시안 좌표, 내부에는 평균값 좌표와 간선의 길이를 사용하고 사용자 위치 제한 조건을 추가하여 에너지 함수를 정의하였다. 비선형 최소 자승 최적화를 통해 주어진 에너지 함수를 최소화하여 정점의 위치를 구하는 방법을 제시하였다. 시각적으로 우수한 형상 변형 결과를 빠른 수행시간에 얻을 수 있으나, 입력 형상을 조밀한 메쉬로 구성할 경우 수행속도가 급격히 느려지는 단점을 가지고 있다. Guo 등[3]은 Weng 등[2]의 방법을 기초로 간선의

길이와 정점 위치 제한만을 에너지 함수로 사용하여 비선형 최소 자승 최적화에 사용되는 행렬의 크기를 줄여, 형상 변형 수행 속도를 개선하였다.

공간 변형의 경우 가장 단순하면서 수행 속도가 빠른 방법 중의 하나는 자유 형상 변형(free form deformation) 방법이다 [7]. 자유 형상 변형 방법은 입력 형상을 포함하는 격자구조를 설정하고, 격자 위의 점 위치를 변형하여 격자를 변형하고 이에 따라 간접적으로 형상을 변형하는 방법을 사용한다. 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. Schaefer 등[8]은 이미지 변형에 이동 최소자승법(moving least square method)을 이용하였다. 입력되는 2차원 형상이 이미지 혹은 이미지의 일부인 경우, 이미지를 격자로 구성된 공간으로 구성한 뒤 격자의 점들로 제어 점을 구성하고, 강제 변형과 유사한 결과를 갖도록 하였다. 그러나 메쉬의 구조를 반영하지 않고 이미지 전체에 대한 공간을 변형하기 때문에 몇몇 경우에 의도하지 않은 결과가 나타난다. 보다 간편하고 빠른 시간에 좋은 결과를 얻기 위한 방법으로 형상을 둘러싸는 외곽 다각형(cage)의 조작을 이용하여 형상의 내부를 부드럽게 변형시키는 여러 방법들이 연구되었다 [9, 10, 11, 12, 13]. 외곽 다각형만을 이용한 변형으로는 사용자가 내부의 정점제한을 통한 조작이 어렵지만 비교적 빠른 수행 시간이 장점이다. 대표적으로 사용되는 평균값 좌표(mean value coordinates)는 일반화된 무게중심좌표(barycentric coordinates)의 하나로 다각형 내부의 한 점을 다각형의 각 정점에 대한 계수로 표현할 수 있고 빠르게 수행된다[9, 10]. 또한 닫힌 형식(closed form)으로 표현되고 외곽다각형의 외부의 정점에 대해서도 좌표계가 정의된다. 그러나 특정한 외곽 다각형에 대해서 국소성(locality)이 떨어지는 결과를 얻을 수 있다. 반면에 조화 좌표(harmonic coordinates)는 평균값 좌표에 비해 더 좋은 국소성을 제공하여 좋은 품질을 얻을 수 있지만 메모리와 계산시간의 자원을 더 소모한다[11]. 또한 외곽 다각형만을 이용한 변형으로는 사용자가 내부의 정점 제한을 통해 형상 변형 결과를 정밀하게 조절할 수 없다는 단점이 있다.

3. 형상 변형

본 논문에서는 2차원 입력 형상에 대하여 적은 수의 정점으로 구성된 제어 메쉬(control mesh)와 상대적으로 많은 수의 정점으로 구성된 형상 메쉬(shape mesh)로 2계층 메쉬를 구성한다. 이때, 형상 메쉬의 모든 정점들의 위치는 제어 메쉬의 정점들에 대해서 평균값 좌표를 사용하여 상대적으로 표현된다. 제어 메쉬에 대해서 대략적인 형상 변형 결과를 얻기 위해서 형상 변형 에너지를 정의하고 에너지를 최소화하기 위해서 비선형 최적화 방법을 사용한다. 마지막으로 변형된 제어 메쉬의 정점들에 대한 형상 메쉬 정점의 평균값 좌표를 보존함으로

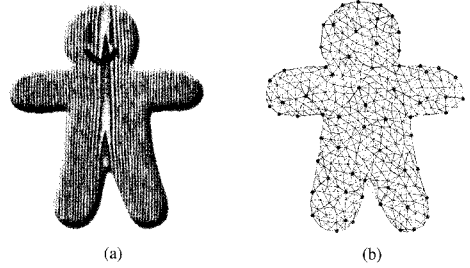


그림 1: 계층 메쉬 구성의 예. (a) 입력 형상, (b) 붉은 색의 제어 메쉬와 푸른 색의 형상 메쉬로 구성된 계층 메쉬.

써 형상 메쉬의 변형된 정점들의 위치를 구한다.

3.1 계층 메쉬의 구성

그림 1은 입력 형상에 대해서 제어 메쉬 $M_c = (V_c, E_c)$ 와 형상 메쉬 $M_s = (V_s, E_s)$ 를 표현한 2계층 메쉬를 구성한 예이다. V_c 와 E_c (V_s 와 E_s)는 각각 M_c (M_s)의 정점 및 간선 집합이다. V_c 는 M_c 의 윤곽선(silhouette)을 이루는 정점들의 집합 ∂V_c 와 내부 정점들의 집합 Ω_{V_c} 로 나뉜다. 마찬가지로 E_c 는 윤곽선의 정점 ∂V_c 만을 연결하는 간선 집합 ∂E_c 과 내부 정점 Ω_{V_c} 를 연결하는 간선 집합 Ω_{E_c} 로 구성된다. 제어 메쉬 M_c 와 형상 메쉬 M_s 는 다양한 샘플링 방법들을 이용하여 입력 형상으로부터 독립적으로 구성될 수 있다 [2, 3]. 본 논문에서는 형상을 최대한 자세히 표현하도록 많은 수의 정점 V_s 로 형상 메쉬 M_s 를 생성한다. 제어 메쉬는 형상 메쉬의 정점 V_s 로부터 적은 수의 정점들을 자동 혹은 수동으로 샘플링하여 구성한다(그림 1 참조). 형상 메쉬와 제어 메쉬가 구성되면 형상 메쉬의 정점들은 제어 메쉬의 일부 정점들에 대한 평균값 좌표로 표현한다. 형상 메쉬 정점 $v_i \in V_s$ 에 대해서 v_i 를 포함하거나 가장 가까운 제어 메쉬의 삼각형을 찾고 삼각형에 간선 인접한 삼각형들을 찾는다. 이때, 형상 메쉬 정점 v_i 는 인접 삼각형의 정점들 $v_{i,j}$ 에 대하여 $v_i = \sum_j w_{i,j} v_{i,j}$ 와 같이 표현되므로, 형상 메쉬 정점 v_i 의 평균값 좌표 $w_{i,j}$ 는 다음과 같이 정의된다 [9].

$$\begin{aligned} w_{i,j} &= \frac{\lambda_{i,j}}{\sum_{j=1,2,\dots,6} \lambda_{i,j}}, \\ \lambda_{i,j} &= \frac{\tan(\alpha_{i,j}/2) + \tan(\alpha_{i,j+1}/2)}{\|v_{i,j} - v_i\|}, \end{aligned} \quad (1)$$

이때 $\alpha_{i,j}$ 는 두 벡터 $v_{i,j} - v_i$ 와 $v_{i,j+1} - v_i$ 사이의 각을 의미한다(그림 2 참조).

3.2 제어 메쉬 변형

형상 변형 에너지는 입력 형상에 대한 변형으로 발생하는 왜곡의 양을 측정하는데 사용한다. Weng 등은 형상 변형 에너지를 외곽선에 대한 라플라시안 좌표, 내부 정점에 대한 평균값

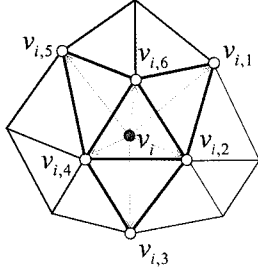


그림 2: 형상 메쉬의 정점 v_i 를 인접한 제어 메쉬 정점 $v_{i,j}$ 에 대해 정의한 평균값 좌표 구성의 예

좌표, 내부 간선 길이, 사용자 정점 제한의 4가지로 구성하고 비선형 최소자승법을 사용하여 최적화 하는 방법을 제안하였다. 이번 장에서 Weng 등의 형상 변형 에너지와 최적화 방법을 간략히 소개한다 (보다 자세한 사항은 참고문헌 [2] 참조).

라플라시안 좌표 제한은 윤곽선의 한 정점과 이웃한 윤곽선의 정점 사이의 상대적 위치를 보존하기 위해 사용된다. 평균값 좌표와 간선 길이 제한은 형상 내부 삼각형의 정점 위치와 크기를 보존하기 위하여 사용된다. 형상을 변형하기 위해서 사용자는 위치를 제한하기 위한 정점들을 선택하고 정점들의 위치를 새롭게 변형될 위치로 움직인다. 모든 에너지를 더하여 형상 변형 에너지를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\|LV - \delta(V)\|^2 + \|MV\|^2 + \|HV - e(V)\|^2 + \|CV - U\|^2 \quad (2)$$

이때, L, M, H, C 는 각각 라플라시안 좌표 행렬, 평균값 좌표 행렬, 간선 길이 행렬, 사용자 위치 제한 행렬이며, $\delta(V)$ 와 $e(V)$ 는 각각 정점의 라플라시안 좌표와 간선길이이다.

사용자가 지정한 제한 조건으로 적절한 형상 변형을 생성하기 위해, 제어 메쉬의 정점들 V_c 에 대해 다음 형상 변형 에너지를 최소화 한다.

$$\min_{V_c} \|AV_c - b(V_c)\|^2, \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} L \\ M \\ H \\ C \end{pmatrix}, \quad b(V_c) = \begin{pmatrix} \delta(V_c) \\ 0 \\ e(V_c) \\ U \end{pmatrix}.$$

본 논문에서는 행렬 L 과 M, H, C 의 열의 크기를 $\|V_c\|$ 로 확장하기 위해 0인 요소들을 추가하였다. 행렬 C 의 행의 크기 (사용자 위치 제한 정점의 개수)를 c 라 할 때, 행렬 A 의 평균적인 행의 크기는 대략 $4 \times |V_c| - |\partial V_c| + c$ 이다. Weng 등은 비선형 최소 자승 문제(nonlinear least squares problem)를 해결하기 위해 다음과 같은 반복적 가우스-뉴턴 해법을 사용한다.

$$\min_{V_c^{k+1}} \|AV_c^{k+1} - b(V_c^k)\|^2, \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} L \\ M \\ H \\ C \end{pmatrix}, \quad b(V_c^k) = \begin{pmatrix} \delta(V_c^k) \\ 0 \\ e(V_c^k) \\ U \end{pmatrix}.$$

V_c^k 는 k 번째 반복으로부터 얻은 정점의 위치이고 V_c^{k+1} 은 $k+1$ 번째 반복으로부터 얻은 정점의 위치이다. 행렬 A 는 반복 계산에 종속되어 있지 않으므로 변형 전에 먼저 계산될 수 있다. $b(V_c^k)$ 는 다음 식에서 V_c^{k+1} 를 계산하기 위해 매 반복수 행마다 계산되어야 한다.

$$V_c^{k+1} = (A^T A)^{-1} A^T b(V_c^k). \quad (5)$$

3.3 형상 메쉬 변형

형상 변형 에너지 최적화는 제어 메쉬에 대해서만 수행된다. 최적화 수행 시간은 행렬 A 의 크기에 비례하기 때문에 제어 메쉬의 정점 수의 제곱에 비례한다. 즉, 정점의 수가 더 적을 수록 에너지 최적화는 더 빠르게 수행된다. 그러나 정점의 수가 적어지면 형상 변형의 시각적 품질은 빠르게 감소하게 된다. 이런 시각적 품질 저하는 형상 메쉬 정점의 평균값 좌표를 보존함으로써 완화될 수 있다. 제어 메쉬는 에너지 최적화에 의해 변형되고, 형상 메쉬는 제어 메쉬의 국소적 공간 위에 정의된 평균값 좌표를 이용하여 구한다. 이를 통해서 근사적이지만 입력 형상의 품질을 국소적으로 보존할 수 있다 [10].

3.4 형상 변형 제어

형상 변형은 사용자의 정점 선택과 정점의 목표 위치 지정으로 수행된다. 사용자가 제한할 정점은 제어 메쉬상의 정점에서 선택할 수 있는데, 제어 메쉬 정점의 수가 적기 때문에 사용자가 조작할 때 세밀한 조절이 어려운 단점이 있다. 제어 메쉬의 정점 $v_{i,j} \in M_c$ 과 형상 메쉬의 정점 $v_i \in M_s$ 에 대해서, 형상 메쉬의 한 정점은 평균값 좌표에 의해 $\sum_j w_{i,j} v_{i,j} = v_i$ 와 같이 표현된다. 이런 관계를 이용하여 식 (3)의 행렬 C 는 사용자 제한 정점의 평균값 좌표를 표현한 비중 행렬(weight matrix) C_w 로 대체될 수 있다. 따라서 사용자는 많은 수로 구성된 형상 메쉬의 정점을 선택할 수 있고 형상 변형의 세밀한 조정이 가능하다.

형상 변형 기술에 기반한 최적화 방법의 단점 중 하나는 형상 변형에 대한 조절이 미흡하다는 것이다. Yang 등 [14]은 강성도를 통해 형상 변형의 결과를 조절하는 방법을 제안했다 (그림 3(a) 참조). 그러나 강성도는 수치적으로 정의 되기 때문에 형상 변형의 직관적인 조절 방법을 제공하지 못한다. 따라서 강성도 수치 조절로 형상 변형의 결과를 예측하기가 쉽지 않다. 일반적으로 메쉬 기반의 형상 변형에서 사용자는 몇 개의 정점을 선택하고, 정점을 변형하고자 하는 위치로 옮긴다. 사용자 정점 제한은 단지 위치만을 제한 조건으로 명시하여

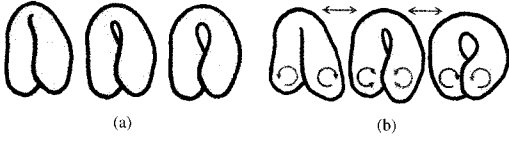


그림 3: 형상 변형의 제어. (a) 강성도(왼쪽부터 1,2,6) 수치를 이용한 제어, (b) 사용자 제한에 방위 제한 조건을 추가하여 제어.

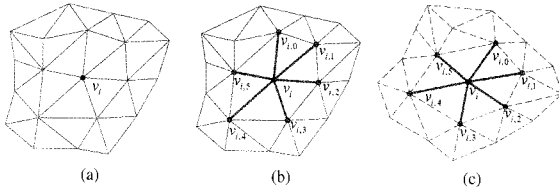


그림 4: 회전각을 통한 형상 변형의 방위 조절. (a) 회전각 설정 전의 사용자 제어점 v_i , (b) 현재 사용자 제어점 v_i 의 인접 점들 $v_{i,j}$ 를 사용자 제어점에 추가, (c) 새로 추가된 사용자 제어점 $v_{i,j}$ 를 v_i 에 대하여 설정된 회전각 만큼 회전 이동하여 형상 변형의 사용자 제한 조건으로 사용.

왔다. 본 논문에서는 Yang 등과 같이 형상 변형의 강성도를 조절하면서 직관적인 제어가 가능하기 위해 사용자 위치 제한에 방위 제한 조건을 명시하도록 방법을 확장한다(그림 3(b) 참조). 회전 성분을 형상 변형 에너지에 포함하는 대신, 직접 최적화 방법에 적용함으로써 특정 점에 대해서 쉽게 방위 변화 효과를 얻을 수 있다. 사용자 제한 점 v_i 에 대해서 θ_i 만큼 회전하기 위해서 v_i 에 인접한 점들 $v_{i,j}$ 를 모두 찾은 후 v_i 를 중심으로 θ_i 만큼 회전하여 $v_{i,j}$ 의 새로운 위치를 명시한다(그림 4 참조). 본 논문에서는 사용자 점 제한으로 모든 $v_{i,j}$ 의 색인(index)을 행렬 A 에 추가하고 새 위치를 U 에 추가한다. 결과적으로 행렬 A 를 근소하게 확장하여 3.2장에서 기술한 최적화 방법을 그대로 사용할 수 있다. 일반적으로 삼각형 메쉬에서 임의의 점에 대하여 간선 인접한 점들의 평균적인 개수(valence number)는 6이므로, c 가 초기에 선택된 사용자 제한 점의 수라고 할 때 행렬 A 에 추가되는 행의 개수는 평균적으로 $6 \times c$ 이다.

4. 실험 결과

본 논문에서는 실험을 위해 PC(2.4GHz quad core CPU, 2GBytes memory)와 타블렛 PC(1GHz RISC CPU, 512MBytes memory)환경에서 제어 메쉬에 대해 Weng 등의 비선형 최적화에서 10회 반복적 가우스-뉴턴 방법을 적용하여 최적의 해를 계산한 후, 형상 메쉬를 평균값 좌표를 사용하여 재계산한 방법과 전체 형상 메쉬에 대해서만 최적화를 수행했을 때를 비교하였다. 2계층 메쉬를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우를

비교하기 위한 예제는 그림 5와 표 1에서 제시하였다. 표 1은 메쉬 정보와 수행 시간, 평균값 좌표와 간선 길이에 대한 상대적 오차(relative RMS errors)를 보여준다. 2계층 메쉬를 사용하여 행렬의 크기를 원래 크기의 8%로 줄이면 수행 시간은 대략 이전보다 10배 이상 빨라진다. 수행 시간에서 최적화 시간이 차지하는 비중은 대략 90%이며 형상 메쉬의 정점에 대해서 평균값 좌표를 계산하는 것은 최적화 수행보다 상대적으로 빠르다. 2계층 메쉬를 사용한 경우는 사용하지 않은 경우보다 10배 이상 더 빠르고 상대적 오차는 평균적으로 최대 2배 이하로 증가하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 계산 능력이 제한된 임베디드 기기에서 실시간 수행이 가능할 만큼 충분히 빠른 속도를 제공한다.

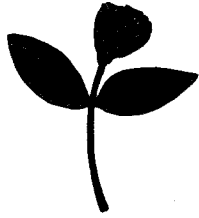
5. 결론

본 논문에서 2계층 메쉬를 이용한 최적화 방법을 기반으로 하는 빠른 평면 형상 변형에 대한 절충적(trade-off) 방법을 제안했다. 우선, 제어 메쉬는 잘 알려진 최적화 방법에 의해 변형되고 형상 메쉬는 제어 메쉬의 상대적 위치를 보존하면서 변형된다. 사용자 점 위치 제한에 방위를 명시함으로써 기하학적으로 형상 변형을 조절하는 방법을 제안했다. 실험 결과에 따르면, 제안한 방법은 잘 알려진 최적화 방법에 호환되며 상대적으로 시각적 품질을 보존하면서 매우 빠른 수행 속도를 보였다. 또한 휴대폰이나 타블렛 PC와 같은 계산 능력이 제한된 기기에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

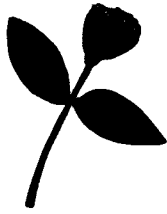
본 논문에서 제안한 방법은 시각적 품질이 제어 메쉬의 구조에 따라 영향을 받는 단점을 가지고 있다(그림 6 참조). 형상 메쉬를 아무리 정밀하게 구성 하여도, 최적화에 사용되는 제어 메쉬를 적절히 샘플링하지 못한 경우 변형의 품질이 낮아질 가능성이 존재한다. 특히 제어 메쉬의 윤곽선 밀도를 작게 샘플링할 경우, 변형 후 입력 형상의 윤곽선을 따라서 시각적 품질이 급격히 떨어지는 현상이 발생한다(그림 6). 본 논문의 결과들은 형상 메쉬로부터 제어 메쉬를 구성할 때, 제어 메쉬의 윤곽선의 샘플링 밀도를 수동적으로 제어 메쉬의 내부 샘플링 밀도에 비하여 높게 선택하는 방법으로 변형 품질을 가급적 유지하려고 노력하였다. 입력의 형상 메쉬로부터 제어 메쉬를 구성하는 일반적인 방법이나 최선의 결과를 얻기 위한 적절한 방법을 찾는 추가적인 연구가 필요하다. 아울러 본 논문에서 제시한 방법을 형상 메쉬에 대하여 다계층 메쉬 구조로 일반화 하는 연구가 본 연구의 직접적인 확장 연구 주제이다.

감사의 글

위 연구는 2009학년도 아주대학교 일반연구비 지원에 의하여 연구되었음.



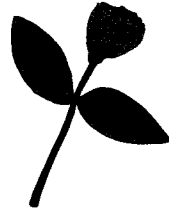
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



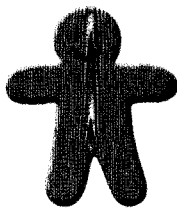
(g)



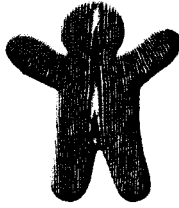
(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

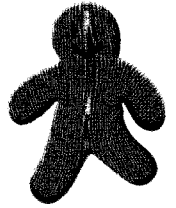
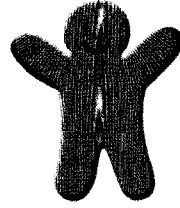


그림 5: 입력 형상 5a, 5d, 5g, 5j에 대해서 그림 5b, 5e, 5h, 5k는 2계층 메쉬를 이용한 결과를, 그림 5c, 5f, 5i, 5l는 조밀한 메쉬를 이용한 결과를 나타낸다.

형상	매쉬 정보					수행 측정					오차		
	$ \partial V_c $	$ \Omega_{V_c} $	$ V_S $	$ \partial E_c $	$ \Omega_{E_c} $	N_r	N_c	T_p	$T_r(\text{PC})$	$T_r(\text{Tablet})$	ϵ_M	ϵ_θ	ϵ_Ω
그림 5b	71	53	440	71	227	702	248	699.13	0.16	31.57	0.021	0.071	0.041
그림 5c	142	298	0	142	1033	2946	880	62873.60	2.04	407.37	0.012	0.078	0.029
그림 5e	89	25	424	89	161	550	228	450.76	0.14	26.00	0.032	0.114	0.067
그림 5f	212	212	0	212	845	2538	848	44829.1	1.61	272.05	0.021	0.101	0.042
그림 5h	62	32	355	62	155	498	188	283.72	0.09	19.62	0.028	0.153	0.068
그림 5i	122	233	0	122	818	2396	760	26367.40	1.33	236.55	0.017	0.137	0.047
그림 5k	37	27	420	37	115	358	128	83.63	0.05	10.28	0.058	0.221	0.121
그림 5l	108	312	0	108	1041	2922	840	53857.00	1.93	370.84	0.044	0.273	0.097

표 1: 형상 변형의 수행 시간과 품질. N_r 과 N_c 는 행렬 A 의 행과 열의 크기이고 T_p 과 T_r 는 각각 전체 시간(ms)과 1회 반복당 수행시간(ms). ϵ_M 과 ϵ_θ , ϵ_Ω 는 각각 평균 값 좌표, 외곽선의 간선 길이, 내부 간선 길이에 대한 상대적 오차(relative RMS errors).

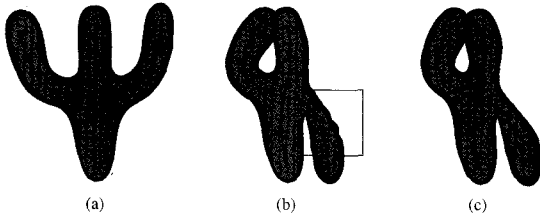


그림 6: 제어 매쉬 구성에 따른 결과의 차이. (a) 입력 형상, (b) 제어 매쉬의 윤곽선을 선기계 샘플링한 형상 변형 결과, (c) 윤곽선을 조밀하게 샘플링한 형상 변형 결과.

참고 문헌

- [1] T. Igarashi, T. Moscovich, and J. F. Hughes, "As-rigid-as-possible shape manipulation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 1134–1141, 2005.
- [2] Y. Weng, W. Xu, Y. Wu, K. Zhou, and B. Guo, "2D shape deformation using nonlinear least squares optimization," *The Visual Computer*, vol. 22, no. 9, pp. 653–660, 2006.
- [3] H. Guo, X. Fu, F. Chen, H. Yang, Y. Wang, and H. Li, "As-rigid-as-possible shape deformation and interpolation," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 19, no. 4, pp. 245–255, 2008.
- [4] D. Cohen-Or, "Space deformations, surface deformations and the opportunities in-between," *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 2–5, 2009.
- [5] W.-W. Xu and K. Zhou, "Gradient domain mesh deformation: a survey," *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 6–18, 2009.
- [6] O. Sorkine, D. Cohen-Or, Y. Lipman, M. Alexa, C. Rössl, and H.-P. Seidel, "Laplacian surface editing," in *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, 2004, pp. 175–184.
- [7] T. W. Sederberg and S. R. Parry, "Free-form deformation of solid geometric models," in *SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1986, pp. 151–160.
- [8] S. Schaefer, T. McPhail, and J. Warren, "Image deformation using moving least squares," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, pp. 533–540, 2006.
- [9] M. S. Floater, "Mean value coordinates," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 20, no. 1, pp. 19–27, 2003.
- [10] K. Hormann and M. S. Floater, "Mean value coordinates for arbitrary planar polygons," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 4, pp. 1424–1441, 2006.
- [11] P. Joshi, M. Meyer, T. DeRose, B. Green, and T. Sanocki, "Harmonic coordinates for character articulation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 71, 2007.
- [12] Y. Lipman, D. Levin, and D. Cohen-Or, "Green coordinates," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, pp. 1–10, 2008.
- [13] J. Manson and S. Schaefer, "Moving least squares coordinates," *Computer Graphics Forum (Proceedings of the Symposium on Geometry Processing)*, vol. 29, no. 5, pp. 1517–1524, 2010.
- [14] W. Yang, J. Feng, and X. Jin, "Shape deformation with tunable stiffness," *The Visual Computers*, vol. 24, no. 7, pp. 495–503, 2008.

〈저자소개〉



유광석

- 2005년 아주대학교 미디어학부 학사
- 2007년 아주대학교 미디어학과 석사
- 2007년~현재 아주대학교 정보통신공학과 박사과정
- 관심분야 : 형상 변형, 캐릭터 애니메이션



최정주

- 1990년 한국과학기술원 전산학과 학사
- 1992년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석사
- 1997년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2002년~현재 아주대학교 미디어학부 부교수
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 비시실적 애니메이션 및 렌더링, 영상처리, 그래픽시스템