

질량-스프링 시스템을 이용한 이미지 모핑의 빠른 겹침 제거 연구

최도원[†], 황치정^{**}

요 약

이미지 모핑의 실제적인 시뮬레이션을 위해서는 빠르고 안정적인 이미지 변형모델이 필수적이다. 질량-스프링 시스템은 실시간 변형의 애니메이션 분야에서 널리 사용되고 있지만, 큰 변형이 요구되는 이미지 모핑에서는 불안정한 특성을 보인다. 논문에서는 이미지 변형의 안정적인 결과를 얻기 위해, 메시상의 각 노드의 x 와 y 성분 변위 값을 계산하는 얇은 막 질량-스프링 시스템을 내부적으로 사용한다. 얇은 막 질량-스프링 시스템의 방향 제한 때문에, 안정적이고 더 넓은 범위에서 부드럽게 이미지가 변형된 결과를 얻을 수 있다. 일대일 변형은 이미지 모핑에서 중요한 분야 중의 하나이다. 본 논문에서는 이미지의 변형과정에서 발생하는 겹침을 빠르게 제거하는 방안의 중점을 둔다. 겹침을 빠르게 제거하기 위해, 겹침이 발생한 노드의 이웃 4개 또는 8개 노드에 외부 힘을 자동으로 부가하는 방안을 제안한다. 4개 또는 8개의 이웃 노드에 외부 힘을 부가하는 경우는 2개의 이웃 노드에 외부 힘을 부가하는 경우에 비해 겹침의 제거 속도가 크게 향상된다.

A Study on the Fast Removal of Overlaps in Image Morphing Using Mass-Spring System

Do Won Choi[†], Chi Jung Hwang^{**}

ABSTRACT

A fast and stable deformation model is essential for realistic simulation of image morphing. In order to stabilize deformation, we used two internal thin plate mass-spring systems that compute the displacements of the x - and y -components of all nodes on the mesh. The deformation results are globally smoother and more stable due to the direction limitation of thin plate mass-spring systems. One-to-one deformation is one of the important issues in image morphing. We focus on fast removing overlaps in the process of deformation. To rapidly remove overlaps, the external forces are set automatically on four or eight neighboring nodes. The speed of removing overlaps is faster when external forces are set on four or eight neighbouring nodes than when on two neighbouring nodes.

Key words: Image Morphing(이미지 모핑), Mass-Spring System(질량-스프링 시스템), Removing Overlaps(겹침 제거)

※ 교신저자(Corresponding Author): 황치정, 주소:대전
유성구 궁동 220번지 충남대학교 컴퓨터공학과(305-764),
전화: 042)821-5449, FAX: 042)822-9959, E-mail: cjhwang
@cnu.ac.kr

접수일: 2011년 7월 25일, 수정일: 2011년 9월 15일

완료일: 2011년 9월 23일

[†] 정희원, 국방과학연구소 연구원
(E-mail: dwchoi@add.re.kr)

^{**} 정희원, 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
(E-mail: cjhwang@cnu.ac.kr)

1. 서 론

이미지 모핑(Image Morphing)은 원본 이미지(source image)를 목표 이미지(target image)로 자연스럽게 변형시키는 기술로 영화나 뮤직 비디오 등에서 폭넓게 사용되고 있다. 원본 이미지와 목표 이미지가 주어진 경우, 애니메이터(animater)는 두 이미지 위에 점, 직선, 곡선 등을 사용하여 두 이미지의 상호 대응하는 특징을 표시한다. 이 특징들은 내부 처리단계를 거치면서 위치를 보간하여 원본 이미지와 목표 이미지의 변형을 계산하는데 사용된다. 이미지 모핑에서는 이들 변형된 원본 이미지와 목표 이미지들을 사용하여 색 보간(color interpolation)을 통해서 최종적으로 이미지 모핑에 사용되는 중간 단계의 변형 이미지들을 생성한다[1].

현재까지 이미지 모핑을 위해 많은 알고리즘들이 제안되어 왔다. 가장 보편적인 접근 방법으로는 메시 워핑(mesh warping), 필드 워핑(field warping), 에너지 기반 워핑(energy-based warping)이다. 그러나 이들 알고리즘들은 애니메이터가 특징을 표시하는데 많은 부담을 주거나 또는 정교한 변형 결과를 얻기 위해 많은 연산시간을 필요로 하는 문제점을 가진다.

본 논문에서는 빠른 속도로 시뮬레이션이 가능한 모델을 생성하기 위하여 실시간 변형의 애니메이션 분야에서 널리 적용되고 있는 질량-스프링 시스템(Mass-Spring System)을 사용한다. 이미지 모핑에 적용된 질량-스프링 시스템은 $M \times N$ 의 가상 질량으로 구성된 메시(mesh)이며 메시의 각 질량은 이웃 질량들과 질량이 없는 스프링(spring)과 감쇠기(damper)로 상호 연결된다. 일부의 노드(질량)가 질량-스프링 시스템 상에서 새로운 위치로 움직일 때 스프링 네트워크의 작용으로 각 노드들은 새로운 위치로 조정된다. 그러나 큰 변형이 요구되는 경우에는 질량-스프링 시스템이 쉽게 와해되거나 사용자가 원하지 않는 지그 재그 패턴들이 발생한다. 이러한 문제점들을 극복하고 안정된 변형결과를 얻기 위해 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템(Thin Plate Mass-Spring System)을 사용한다[2,3]. 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템은 메시의 각 노드의 x 와 y 성분의 변위를 계산하는데 각각 사용된다. 얇은 막 질량-스프링 시스템은 일반 질량-스프링 시스템과 동일한

구조를 가지지만 노드의 이동 방향과 노드에 추가되는 외부 힘(external force)의 방향이 질량-스프링 시스템의 표면에 수직 방향으로 제한된다. 이러한 방향 제한은 질량-스프링 시스템을 안정화 시키고, 더 넓은 범위의 부드러운 변형 결과를 가져 오며, 노드와 외부 힘의 방향을 쉽게 관리할 수 있다는 장점을 가진다.

겹침(overlap)은 급격하게 그리고 큰 변형이 요구되는 메시의 변형에서 많이 발생한다. 겹침이 발생하면 이미지의 손실이 발생하고 변형의 일대일 속성(One-to-one property)을 만족할 수 없게 된다. 본 논문에서는 메시의 겹침을 방지하기 위하여 겹침을 빠르게 검출하고 이를 효과적으로 제거하는 방안을 제안한다. 겹침의 검출에는 야코비안 결정자(Jacobian determinant)를 사용하며 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 이를 바로 계산하는 과정을 보인다. 메시에서 겹침이 검출되면, 겹침을 빠르게 제거하기 위해 겹침이 발생한 노드의 4개 또는 8개의 이웃 노드에 외부 힘을 추가하는 방안을 제안한다. 노드에 추가되는 외부 힘의 크기는 얇은 막 질량-스프링 시스템의 변위 차에 비례하여 자동으로 설정되며, 겹침이 제거될 때 까지 외부 힘은 반복적으로 적용된다.

다음 장에서는 이미지 모핑과 질량-스프링 시스템 그리고 겹침 제거 관련 연구에 대해서 간단하게 살펴본다. 3장에서는 질량-스프링 시스템의 개요와 얇은 막 질량-스프링 시스템이 적용되는 과정과 장점에 대해 기술한다. 4장에서는 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 겹침의 검출과 제거방안에 대해 설명한다. 5장에서는 실험결과를 설명하고 결론으로 마무리한다.

2. 관련 분야

현재까지 이미지 모핑을 위해 많은 알고리즘들이 제안되어 왔다. 가장 보편적인 접근 방법으로는 메시 워핑, 필드 워핑, 에너지 기반 워핑이다. 메시 워핑[4]은 이미지의 특징을 표시하기 위해 비균일 메시지를 사용한다. 이 방법은 빠르고 변형에 좋은 결과를 보이지만 이미지의 특징을 표현하는데 큰 단점을 가지고 있다. 필드 모핑[5]은 사용자 인터페이스를 간단히 하기 위해서 특징 표현 방법으로 상호 대응하는 직선을 사용한다. 원본 이미지와 목표 이미지 위에

표현된 상호 대응하는 직선들은 두 이미지 사이의 좌표적인 매핑을 정의한다. 대응 직선의 근접도에 따른 점들의 매핑은 직선으로부터 거리에 의해 결정된다. 다수의 직선이 대응하는 경우 필드모핑은 모든 대응 직선의 매핑의 가중 합을 사용하여 각 점의 위치를 결정한다. 그러나 이 방법은 고스트(gost)라고 불리는 예상치 못한 변형이 발생하는 부작용이 있다. 에너지 최소화 방법[6,7]은 애니메이터의 부담을 줄이기 위해서 특징 표시 방법으로 점, 직선, 곡선을 사용한다. 이 방법은 대응하는 특징으로부터 C^1 또는 C^2 연속이고 일대일 속성을 만족하는 변형 함수를 유도한다. 일대일 속성은 변형된 이미지에서 겹침이 발생하지 않는 것을 보장한다. 이 방법은 좋은 성능을 보장하지만 계산에 많은 비용이 소요된다는 단점을 지닌다.

최근에는 객체 중심의 모핑(object-space morphing)에 관한 연구도 만화 애니메이션 분야 등에서 진행되고 있다. 객체 중심 모핑[8-10]은 이미지 전체 보다는 이미지 객체를 이산적으로 표현하고 이미지의 원본 객체를 목표 객체로 자연스럽게 변형한다. 객체 중심 모핑은 원본 이미지와 목표 이미지가 크게 상이할 경우에도 자연스러운 이미지 모핑을 구현할 수 있다는 장점을 가지지만, 이미지 객체와 배경이 분리된다는 점과 객체의 외형 중심으로 모핑이 이루어 지는 단점도 가진다.

본 논문에서는 전체 이미지를 대상으로 빠른 속도로 모핑 시뮬레이션이 가능한 모델을 생성하기 위해서 실시간 변형의 애니메이션 분야에서 널리 적용되고 있는 물리 기반 모델(physical-based model)인 질량-스프링 시스템을 사용한다. 질량-스프링 시스템은 크고 복잡한 모델링에 적용하여도 사용자의 반응에 실시간으로 응답이 가능하다. 질량-스프링 시스템은 의류 애니메이션[11,12], 얼굴 애니메이션[13], 수술 훈련 시스템에서 부드러운 조직 애니메이션[14-16] 등의 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 본 논문의 이미지 모핑에 적용된 질량-스프링 시스템은 $M \times N$ 의 가상 질량으로 구성되는 메시이다. 메시의 각 질량은 이웃 질량들과 질량이 없는 스프링과 감쇠기로 상호 연결된다. 질량-스프링 시스템에서 보다 안정적인 변형결과를 얻기 위해 본 논문에서는 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템을 내부적으로 사용한다. 이 구조는 표면에 분포되어 있는 데이터를

보간하기 위해서 일반적으로 폭넓게 사용되고 있는 방법인 얇은 막 스플라인(Thin plate spline, TPS)과 유사한 구조이다[17,18].

급격하게 그리고 큰 변형이 요구되는 메시에서는 겹침 현상이 쉽게 발생한다. 메시에서 겹침이 발생하면 이미지가 손실되고, 변형의 일대일 속성을 만족시킬 수 없기 때문에 이미지 모핑에서 겹침을 방지하는 것이 중요한 사항이다. 질량-스프링 시스템에서 겹침을 방지하기 위해 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 노드와 그것의 반대편 에지(edge)에 비선형 에지 반발 스프링[19]을 추가하여 겹침을 방지하는 방안이 제안되었다. 추가되는 스프링의 힘은 노드와 반대편 에지의 수직거리에 기초하여 작용한다. 겹침을 방지하기 위해 움직이는 노드에 페널티 힘(penalty force)[20,21]을 추가하는 방안이 제안되었다. 어떤 노드가 그것의 반대편 에지에 너무 근접하게 되면 그 노드의 위치에 페널티 함수를 적용하여 겹침을 방지한다. 그러나 이 방법들은 겹침이 발생한 노드에 추가된 하나의 스프링 또는 페널티 힘이 주변에 이웃하는 다수의 노드들을 충분히 밀어내지 못하는 문제점을 가진다. 이미지 모핑 분야에서는 겹침을 검출하기 위해서 야코비안 결정자가 많이 사용되어 왔다. [6,22]에서는 겹침을 검출한 후 겹침이 발생한 노드 또는 그 이웃의 두 개 노드의 위치를 조정하여 겹침을 제거한다. 그러나 겹침을 제거하기 위해, 겹침이 발생한 노드의 위치를 조정하는 것은 그 노드가 애니메이터가 원하는 위치로 정확하게 이동하지 못하는 문제점이 발생한다. 또한 겹침이 발생한 노드의 이웃하는 2개 노드의 위치를 조정하여 겹침을 제거하는 것은 질량-스프링 시스템에서 많은 계산이 요구된다는 문제점을 가진다. [9]에서는 2D 이미지에서 3D 객체를 표현하기 때문에 겹침이 발생하는 경우 겹침을 허용한다. 객체 형태에 깊이(depth) 값을 적절히 부여하고 은선 제거 알고리즘(hidden-line removal algorithm)을 적용하여 겹침이 자연스럽게 표현되도록 한다. 그러나 이것은 이미지 모핑에서 겹침이 허용되는 경우에는 적용이 가능하지만 겹침이 바람직하지 않거나 또는 반드시 제거되어야 하는 경우에는 겹침을 제거하는 알고리즘이 도입되어야 하는 문제점을 가진다.

이 논문에서는 질량-스프링 시스템을 이용한 이미지 모핑에서 겹침을 빠르게 검출하고 제거하는 방법을 제안한다. 겹침 검출방법인 야코비안 결정자를

얇은 막 질량-스프링 시스템에서 바로 계산되는 과정을 설명하고, 겹침을 검출한 후 겹침을 빠르게 제거하기 위해 겹침이 발생한 노드의 이웃 4 또는 8개 노드에 외부 힘을 부가하는 방안을 제안한다. 노드에 부가되는 외부 힘의 크기는 노드의 변위 차에 비례하여 자동으로 설정되며, 이 외부 힘은 겹침이 모두 제거될 때까지 반복적으로 적용된다.

3. 질량-스프링 시스템 구조

이미지 모핑에 적용된 질량-스프링 시스템은 $M \times N$ 의 가상 질량들의 메시로 구성된다. 각 노드는 그 이웃 노드와 질량이 없는 스프링과 감쇄기로 연결된다. 이미지 모핑에서는 원본 이미지와 목표 이미지가 같은 크기로 주어지고, 또한 생성되는 중간 이미지들도 모두 같은 크기이기 때문에 질량-스프링 시스템의 최 외곽 노드들은 모두 고정된 것으로 간주한다.



그림 1. 이미지 모핑을 위한 질량-스프링 시스템 구조

질량-스프링 시스템은 다음과 같은 라그랑즈 식(Lagrange's equation)으로 표현된다.

$$m_i \ddot{x}_i + \gamma_i \dot{x}_i + k_i x_i = f_i + g_i \quad (1)$$

여기서 x_i , \dot{x}_i , 그리고 \ddot{x}_i 는 각각 노드 i 의 위치(position), 속도(velocity), 그리고 가속도(acceleration) 벡터이다. 변수 m_i , γ_i , 그리고 k_i 는 노드 i 의 질량(mass), 감쇄(damping), 그리고 스프링(stiffness) 상수를 나타내는 스칼라 값이다. 변수 g_i 는 노드 i 와 연결된 스프링들을 통해 노드 i 에 적용되는 스프링 힘(spring force) 벡터이다. f_i 는 노드 i 에 가해지는 외부 힘을 나타낸다[23].

스프링 힘 g_i 를 계산하기 위해, 먼저 각 노드의 초

기 상태에서 정지상태 r 에서 스프링의 길이를 계산해야 한다. 노드 위치가 x_1 과 x_2 이고 속도가 v_1 과 v_2 인 경우 두 노드 사이의 스프링 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$g_1 = - \left[k_1 (|\Delta x| - r) + \gamma_1 \left(\frac{\Delta v \cdot \Delta x}{|\Delta x|} \right) \right] \frac{\Delta x}{|\Delta x|} \quad (2)$$

$$g_2 = -g_1$$

여기서 $\Delta x = x_1 - x_2$ 는 두 노드사이의 실제 거리를 의미한다. $\Delta v = v_1 - v_2$ 는 두 노드의 속도 차를 의미한다. 그리고 Δx 와 Δv 는 벡터 값을 가진다. 연산자 \cdot 는 두 벡터의 내적을 나타낸다.

외연적 오일러 스킴(explicit Euler scheme)은 질량-스프링 시스템을 사용하는 다양한 분야의 시뮬레이션에서 많이 사용되어 왔다. 외연적 오일러 적분(Explicit Euler integration)은 간단하면서도 계산 효율이 높다는 장점을 가진다[24]. 시간 $t + \Delta t$ 에서 노드의 위치 $x_i(t + \Delta t)$ 와 속도 $v_i(t + \Delta t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + a_i(t) \Delta t \quad (3)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t + \Delta t) \Delta t \quad (4)$$

여기서 a_i 는 노드 i 의 가속도 벡터이다. 그리고 Δt 는 시간 간격이다.

질량-스프링 시스템에서 사용자가 이동하기를 원하는 제어 노드(control node)를 새로운 위치로 이동하면, 상호 연결되어 있는 스프링 네트워크는 각 노드들에 영향을 주어 각 노드들의 새로운 위치를 결정한다. 그러나 급격하게 그리고 큰 범위의 변형이 요구되는 경우에는 제어 노드에 부착된 스프링이 주변의 이웃 노드들을 충분히 밀어내지 못하는 문제점이 발생한다.

그림 2는 제어 노드가 서서히 오른쪽으로 이동할 때 질량-스프링 시스템이 반응하는 모습을 보여준다. 그림 2의 (b)는 제어 노드가 이동하는 중간 상태로 제어 노드의 오른쪽에 부착된 스프링이 이웃 노드들을 오른쪽으로 밀어내어 메시의 형태를 변형시킨다. 그러나 그림 2의 (c)는 제어 노드가 오른쪽으로 더 진행하면서 질량-스프링 시스템이 와해된 모습이다. 이는 제어 노드의 오른쪽에 부착된 스프링이 이웃 노드들을 충분히 밀어내지 못하여 메시의 형태가 와해되고 사용자가 원하지 않는 지그 재그 패턴을

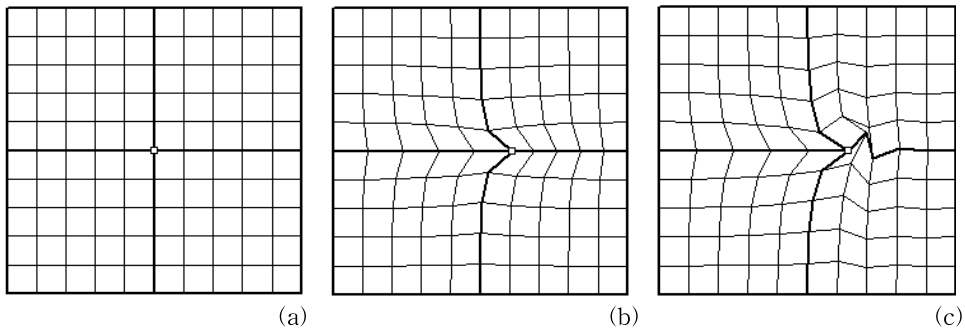


그림 2. 질량-스프링 시스템에서 제어 노드가 오른쪽으로 이동하는 예: (a) 초기 상태; (b) 중간 상태; (c) 마지막 상태

발생시킨다. 이와 같은 문제점을 극복하고 메시에서 변형을 안정시키기 위하여, 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템을 사용한다. 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템을 이용하여 메시를 변형하는 과정은 그림 3과 같다. 애니메이터가 메시 상에서 제어 노드의 이동을 표시하면 제어 노드가 이동해야 할 x 와 y 성분의 변위 값을 계산한 다음, 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템의 해당하는 제어 노드의 위치를 변위 값만큼 z 축으로 각각 이동시킨 후, 질량-스프링 시스템에서 각 노드들의 x 와 y 성분의 변위 값을 계산한다. 메시의 노드들의 최종 위치는 각 노드의 초기 위치에 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 계산된 x 와 y 성분의 변위 값을 더한 결과로 결정된다. 얇은 막 질량-스프링 시스템의 구조는 일반 질량-스프링 시스템 구조와 동일하지만 제어 노드의 이동과 노드에 부가되는 외부 힘은 얇은 막 질량-스프링 시스템의 표면에 수직 방향으로 제한된다.

각 노드의 x 와 y 성분의 변위를 계산하는 과정에서

얇은 막 질량-스프링 시스템의 각 노드에 연결된 스프링은 압축되지 않고 늘어난다. 이것은 질량-스프링 시스템을 이용한 변형에서 많은 장점을 제공한다. 먼저, 질량-스프링 시스템의 스프링들이 강하게 압축될 때 발생하는 지그재그 패턴과 시스템이 쉽게 와해되는 문제가 제거되어 질량-스프링 시스템을 안정화 시킨다. 질량-스프링 시스템의 스프링이 압축될 때보다 늘어날 때 더 넓은 범위의 이웃 노드에 영향을 미치기 때문에 메시의 더 넓은 부분이 변형되는 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로, 제어 노드의 이동 방향과 외부 힘의 방향이 질량-스프링 시스템의 표면에 수직으로 제한되기 때문에 이들의 관리가 용이하다.

그림 4는 하나의 제어 노드가 오른쪽으로 이동할 때, 4개의 제어 노드가 중심으로 이동할 때, 그리고 밖으로 이동 할 때 일반 질량-스프링 시스템을 사용한 결과와 얇은 막 질량-스프링 시스템을 사용한 결과를 비교한 것이다. 일반 질량-스프링 시스템을 사

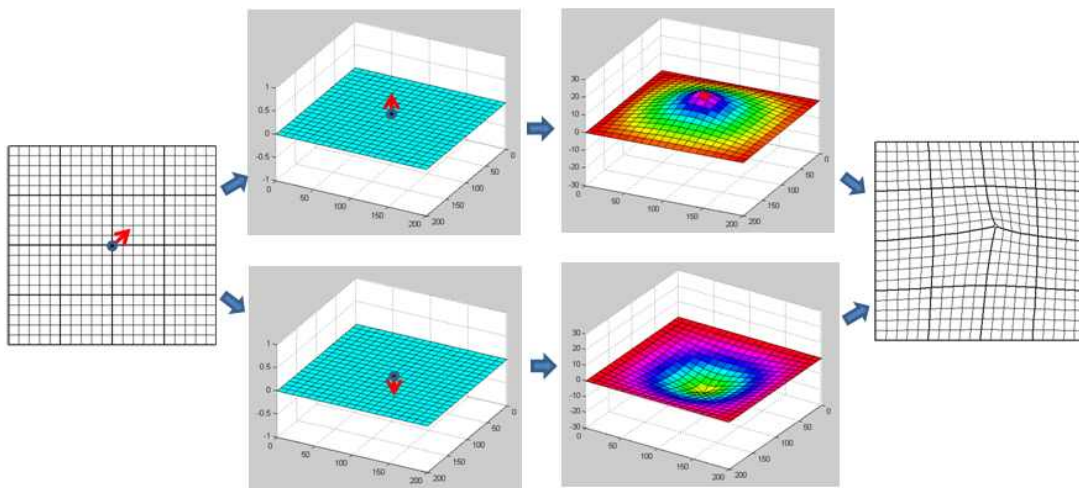


그림 3. 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템을 사용한 메시의 변형과정

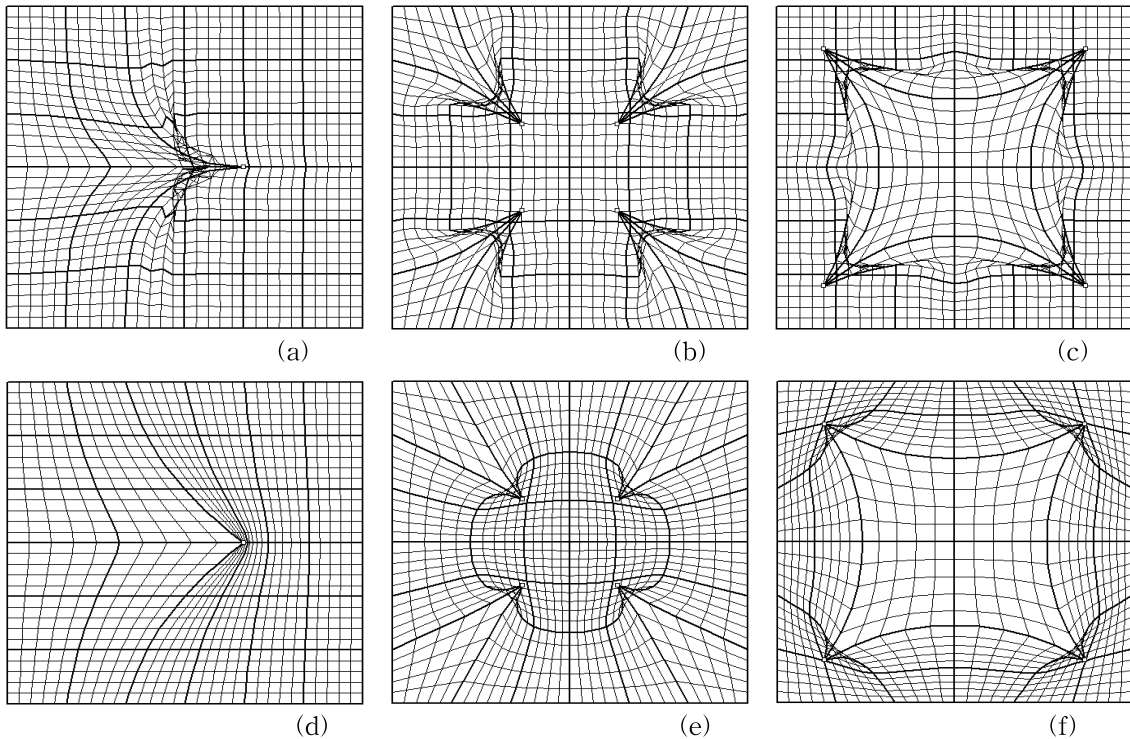


그림 4. 변형결과 비교: (a)~(c) 일반 질량-스프링 시스템; (d)~(f) 얇은 막 질량-스프링 시스템

용한 경우에 비해 얇은 막 질량-스프링 시스템을 사용한 경우 더 안정적이고 광범위하게 부드럽게 변형되었음을 알 수 있다.

4. 겹침의 검출과 제거

메시에서 겹침이 발생하면 이미지의 중요한 부분이 손실되고 변형의 일대일 속성을 만족하지 못하게 된다. 야코비안 결정자는 메시에서 겹침을 검출하는 좋은 방법들 가운데 하나로 많이 사용되어 왔다. 메시에서 겹침이 발생하면 야코비안 결정자 J 는 음수의 값을 가진다[6,22,25].

$$J = \frac{\partial(u,v)}{\partial(x,y)} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \tag{5}$$

그림 5는 메시의 중앙에 있는 노드의 위치에 따른 겹침 검출과 미검출 지역을 표현한다. 중심 노드가 푸른색으로 표시된 미검출 지역에 위치하면 야코비안 결정자 J 는 0이상의 양수 값을 가지나 그 이외의 지역에 위치한 경우에는 J 는 음수 값을 가진다.

얇은 막 질량-스프링 시스템이 xy 평면 위에 있다고 가정하면, 두 개의 얇은 막 질량-스프링 시스템의 z 축의 값은 각각 x 와 y 성분의 변위 값을 나타낸다.

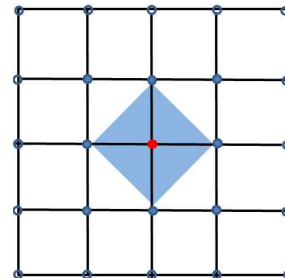


그림 5. 중앙 노드의 겹침 미검출 지역.

그러므로 야코비안 결정자 J 는 다음과 같이 얇은 막 질량-스프링 시스템으로부터 계산이 가능하다.

$$J = \frac{\partial(u,v)}{\partial(x,y)} = \frac{\partial(x+a)}{\partial x} \frac{\partial(y+b)}{\partial y} - \frac{\partial(x+a)}{\partial y} \frac{\partial(y+b)}{\partial x} \tag{6}$$

$$J = (1 + \frac{\partial a}{\partial x})(1 + \frac{\partial b}{\partial y}) - \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial b}{\partial x} \tag{7}$$

여기에서 a 와 b 는 x 와 y 성분의 변위 값이다. 식 (7)의 4개 항($\frac{\partial a}{\partial x}, \frac{\partial b}{\partial y}, \frac{\partial a}{\partial y}, \frac{\partial b}{\partial x}$)은 얇은 막 질량-스프링 시스템의 z 축 값인 변위 값의 차이므로, 야코비안 결정자 J 는 얇은 막 질량-스프링 시스템으로부터 직접 계산된다.

메시의 변형과정에서 겹침이 발생한 경우, 겹침을

제거하기 위해서는 음수의 야코비안 결정자 J 값을 양수로 변화시켜야 한다. J 값을 양수로 변화시키는 방안으로는 겹침이 발생한 노드의 위치를 조정하는 경우와 그 이웃 노드의 위치를 조정하는 경우로 나누어 고려할 수 있다. 일반적으로 이미지 모핑에서 겹침이 발생하는 노드는 애니메이터가 새로운 위치로 이동을 지시한 제어 노드인 경우가 많다. 그러므로 겹침을 제거하기 위해 겹침이 발생한 제어 노드의 위치를 강제로 조정하는 것은 제어 노드가 애니메이터가 원하는 위치로 정확히 이동하는 것을 방해한다. 본 연구에서는 제어 노드를 정확한 위치로 이동시키면서 겹침을 제거하기 위해 겹침이 발생한 노드의 이웃 노드의 위치를 조정한다. 겹침을 빠르게 제거하기 위해 질량-스프링 시스템에서 겹침이 발생한 노드의 이웃 4개 또는 8개 노드에 외부 힘을 추가하는 방안을 제안한다. 이들 외부 힘은 식 (7)의 4개 항이 가지는 값을 줄여 빠르게 겹침을 제거한다. 식 (7)의 4개 항들이 가지는 값이 줄어서 각각 0에 근접하게 되면, 야코비안 결정자 J 의 값은 1에 근접하기 때문에 겹침이 제거되는 것은 명확한 사실이다. 겹침이 발생한 노드에 연결된 이웃 노드에 가해지는 외부 힘의 크기는 다음과 같이 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 변위 값의 차에 비례하여 자동으로 설정된다.

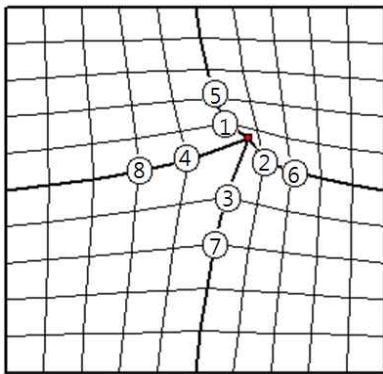


그림 6. 겹침이 검출된 노드에 외부 힘이 추가되는 이웃 노드의 위치

$$f_j = \beta \Delta d k_s \tag{8}$$

여기서 k_s 는 스프링 상수이다. Δd 는 겹침이 검출된 노드와 그 이웃 노드 사이의 변위 값의 차를 나타낸다. β 는 외부 힘의 크기를 제어한다. 외부 힘 f_j 의 방향은 얇은 막 질량-스프링 시스템의 표면에 수직으로 제한된다. 그림 6은 겹침이 발생한 노드에 외부

힘이 추가되는 4개 및 8개의 이웃 노드의 위치를 나타낸다.

제안하는 겹침의 검출과 제거 방법은 다음과 같다.

1. 얇은 막 질량-스프링 시스템을 초기화하고 최대 반복 실행 횟수(max_iterations)를 설정한다. 각 노드의 외부 힘을 0으로 설정한다. 겹침 검출과 제거 함수를 수행하는 간격(j_step)을 설정한다.
2. 애니메이터가 명시한 제어 노드의 최초 위치와 목표 위치로부터 제어노드의 x 와 y 성분의 변위 값인 a_0 과 b_0 을 계산한다.
3. x 와 y 성분의 변위 값 계산을 위한 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 제어 노드 위치를 z 축 방향으로 a_0 과 b_0 값으로 각각 이동한다.
4. for ($i = 1 ; i \leq \text{max_iterations} ; i = i + 1$) {
 식 (3)을 이용하여 각 노드의 속도를 계산한다.
 식 (4)를 이용하여 각 노드의 위치를 계산한다.
 if (($i \bmod j_step$) = 0) {
 식 (7)을 이용하여 각 노드의 J 값을 계산한다.
 노드 중에서 J 값이 음수인 경우에는 그 노드의 이웃 노드에 외부 힘을 추가한다.
 }
 }
 5. 각 노드의 J 값을 계산한다. 만약 J 값이 음수인 노드가 있으면, 4번으로 이동하고 아닌 경우에는 6번으로 이동한다.
 6. 각 노드의 최초 위치 값에 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 계산한 x 와 y 성분의 변위 값을 더하여 메시의 각 노드의 새로운 위치를 결정한다.

질량-스프링 시스템 각 노드의 초기 외부 힘은 0으로 설정되어 있으므로 겹침이 검출되면 이웃 노드에 추가되는 외부 힘은 야코비안 결정자가 양수 값을 가질 때까지 반복적으로 적용되어 값이 증가된다. 그림 7의 (a)는 4개의 제어 노드가 가운데로 이동할 때의 결과를 나타낸다. 겹침이 발생한 노드는 붉은색으로 표시하였으며 제어 노드와 그 주변 노드에서 겹침이 발생했음을 알 수 있다. 그림 7의 (b)와 (c)는 x 와 y 성분을 위한 두 개의 내부 얇은 막 질량-스프링 시스템의 모습을 보여준다. 제어 노드 주변의 표면이 매우 가파른 것을 알 수 있다. 그림 7의 (d)는 제안한 겹침 검출과 제거방법이 적용된 결과를 나타낸다. 그

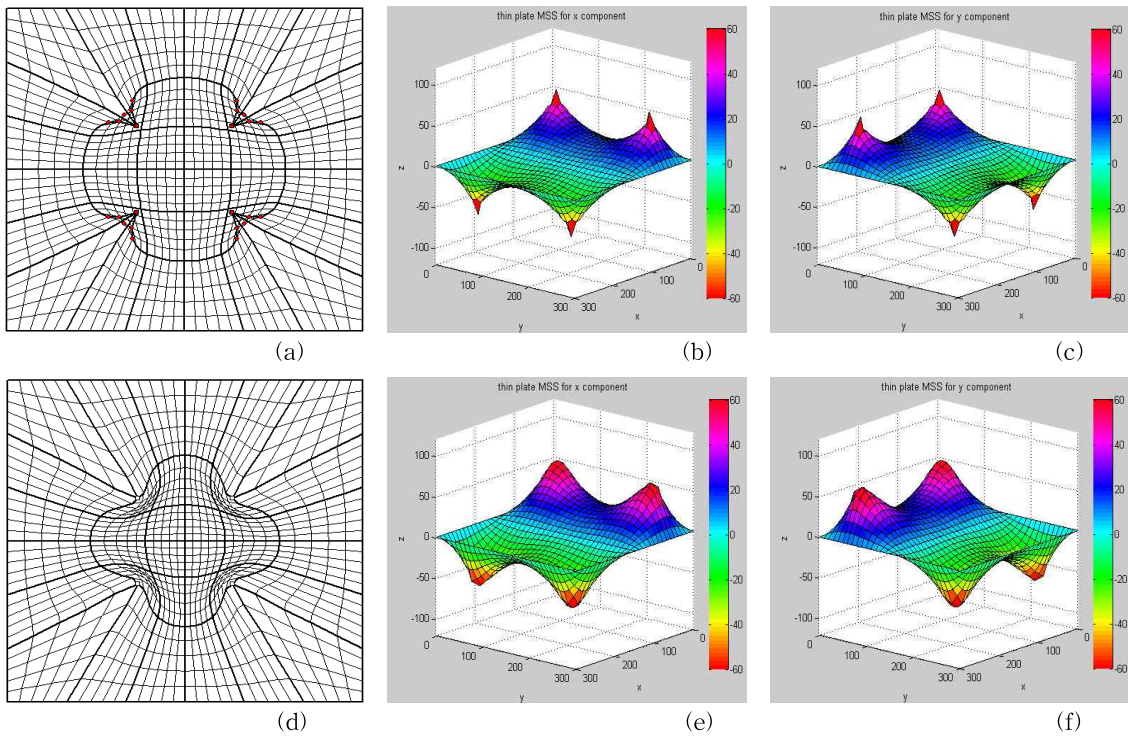


그림 7. 겹침 검출과 제거: (a)~(c) 겹침 검출 후 변형된 메시와 얇은 막 질량-스프링 시스템; (d)~(f) 겹침 제거 후 변형된 메시와 얇은 막 질량-스프링 시스템

그림 7의 (e)와 (f)는 이 때 x 와 y 성분을 위한 얇은 막 질량-스프링 시스템의 모습이다. 제어 노드 주변의 표면이 부드러워진 것을 알 수 있다. 이것은 겹침을 제거하기 위해 겹침이 발생한 노드의 이웃 노드에 외부 힘을 추가하여 변위 차를 줄였기 때문이다. 그

림 8의 (c)~(g)는 겹침 검출 후 겹침이 제거되는 내부과정을 확대하여 보여준 것이다. 겹침이 발생한 노드는 겹침 제거과정에서 주변으로 확산되며 점진적으로 소멸되어 겹침이 완전히 제거된다.

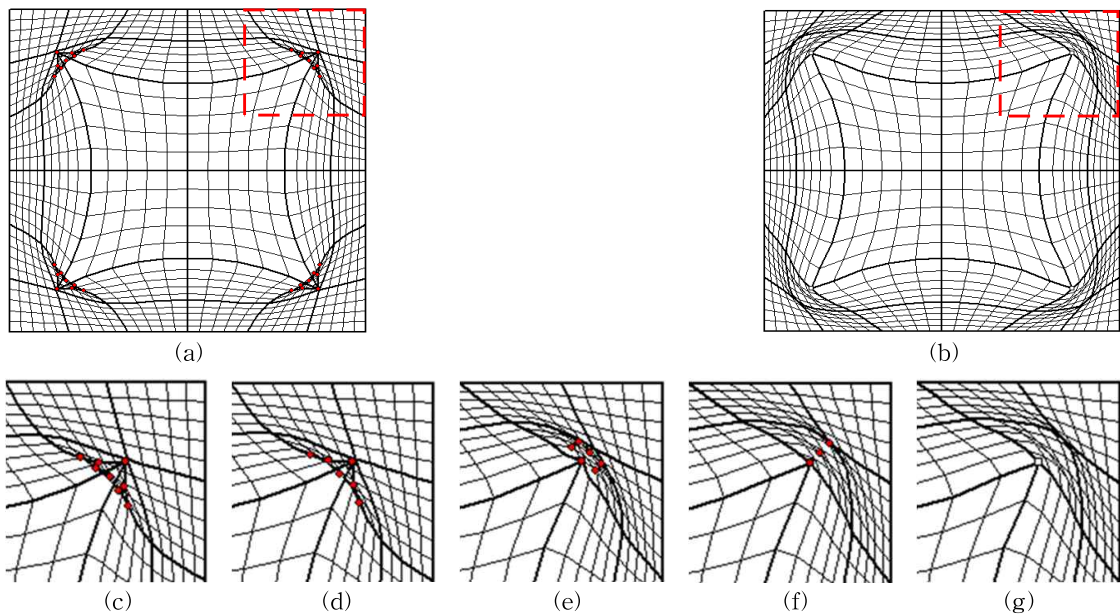


그림 8. 겹침의 제거과정: (a) 겹침 제거 전; (b) 겹침 제거 후; (c)~(g) 겹침 제거 진행과정(부분 확대).

5. 실험결과

겹침의 검출과 제거방법의 효과를 평가하기 위해서, 급격하고 큰 변형이 요구되는 경우에 대해 실험을 수행하였다. 그림 9는 제어 노드가 중심으로 그리고 밖으로 이동 할 때, 겹침의 검출과 제거방법이 적용되어 겹침이 모두 제거된 결과이다. 그림 9의 (a)와 (d)는 겹침이 발생한 노드의 이웃 2개 노드에 외부 힘을 부가한 경우이다. 그림 9의 (b)와 (e) 그리고 (c)와 (f)는 각각 이웃 4개와 8개 노드에 외부 힘을 부가한 경우이다.

메시의 변형정도를 알기 위해 메시의 변형률을 다음과 같이 정의한다.

$$R = \frac{1}{L} \sum \frac{|l - l_0|}{l_0} \tag{9}$$

여기에서 L 은 메시의 노드들 사이의 직선들의 전체 수이다. l_0 는 초기의 직선의 길이이고 l 은 최종 직선의 길이이다[12]. 그림 9의 (a), (b), 그리고 (c)의 변형률은 각각 0.423, 0.439, 0.449이다. 그림 9의 (d), (e), 그리고 (f)인 경우에는 각각 0.359, 0.370, 0.377이다. 변형률은 기존 2개에 비해 4 또는 8개의 이웃 노

드에 외부 힘을 부가한 경우가 더 높았다.

그림 10은 겹침을 제거하는 속도를 비교한 것이다. 기존의 이웃하는 2개 노드에 외부 힘을 부가하는 것에 비해 제안하는 4 또는 8개의 이웃 노드에 외부 힘을 부가 할 때 제거 속도가 크게 향상된 것을 알 수 있다.

제안한 질량-스프링 시스템을 이용하여 이미지 모핑을 구현하였다. 원본 이미지와 목표 이미지를 읽어 들인 후 애니메이터는 원본 이미지와 목표 이미지 위에 특징을 표시한다. 특징 표시에는 점, 직선, 곡선이 사용된다. 직선과 곡선은 내부적으로 적당한 간격으로 샘플링 하여 점으로 처리한다.

그림 11의 (a)와 (b)는 51×51 메시의 원본 이미지와 목표 이미지 위에 특징을 명시한 결과이다. 그림 11의 (c)와 (d)는 각각 원본 이미지와 목표 이미지에 대해 이미지 워핑(image warping)을 수행 한 결과이다. 여기에는 제안하는 겹침의 검출과 제거방법이 적용되었다. 그림에서 원본 이미지의 제어 노드와 목표 이미지의 제어 노드들이 애니메이터가 원하는 위치로 정확히 이동되었음을 알 수 있다. 그림 12의 첫 번째 줄의 이미지들은 왼쪽에서 시작하여 오른쪽으

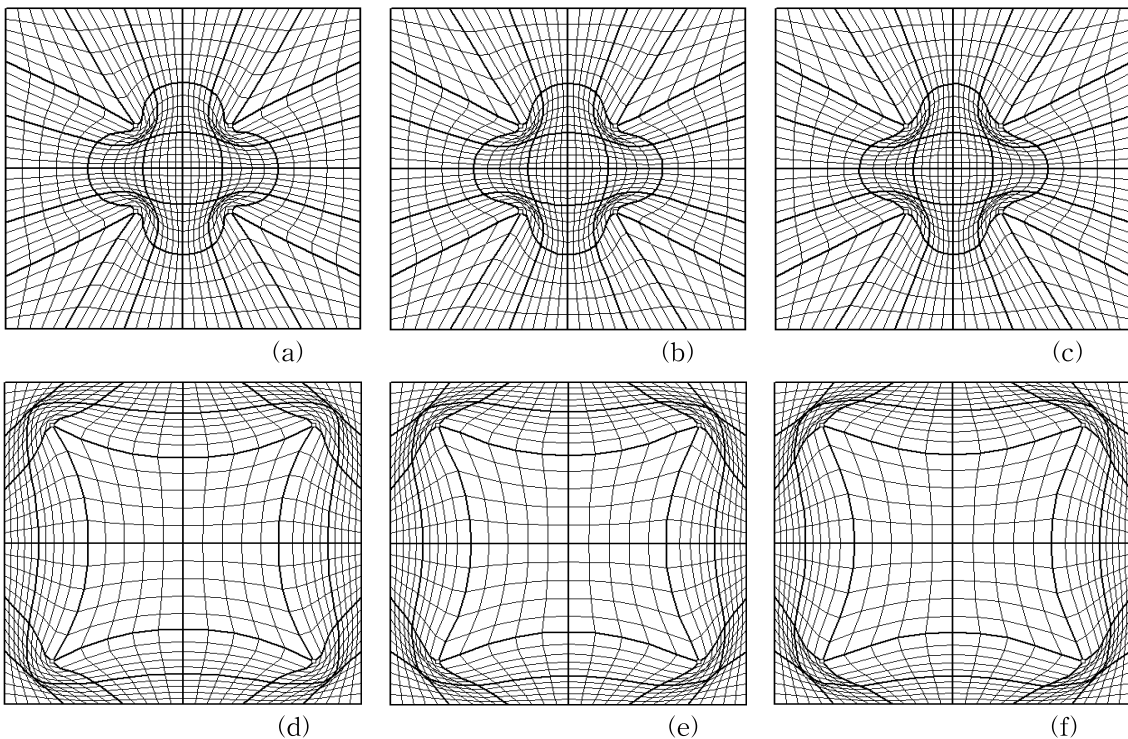


그림 9. 변형 결과 비교: (a)와 (d) 외부 힘이 2개의 이웃 노드에 부가된 경우; (b)와 (e) 4개의 이웃 노드에 부가된 경우; (c)와 (f) 8개의 이웃 노드에 부가된 경우

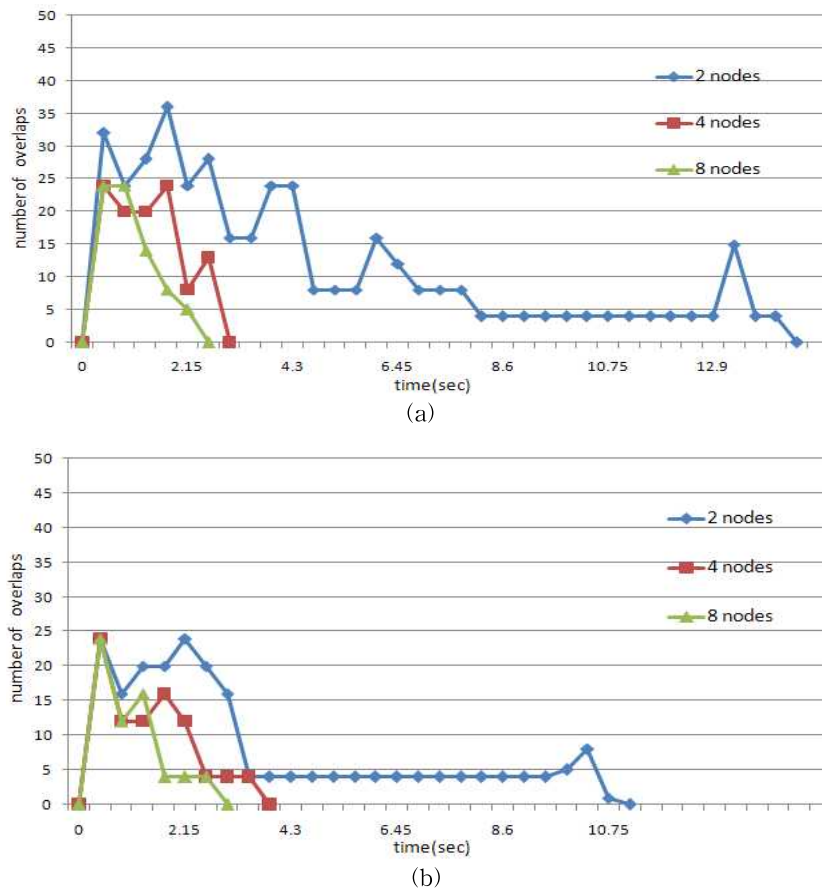


그림 10. 겹침 제거 속도 비교: (a) 그림 9의 (a)~(c)인 경우; (b) 그림 9의 (d)~(f)인 경우.

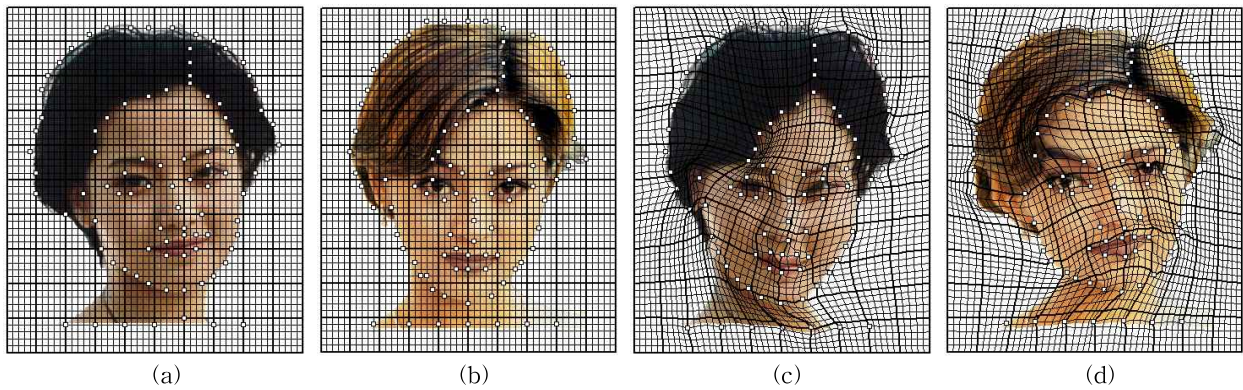


그림 11. 특징 표시: (a)와 (b) 원본과 목표 이미지 : (c)와 (d) 원본과 목표 이미지 워핑

로 진행 하는 원본 이미지의 워핑 결과이다. 세 번째 줄의 이미지들은 오른쪽에서 시작하여 왼쪽으로 진행되는 목표 이미지의 워핑 결과이다. 가운데 줄의 이미지들은 원본 이미지와 목표 이미지의 워핑 결과 이미지를 상호 혼합(cross-dissolve)한 결과이다. 가운데 이미지들은 첫 번째 줄과 세 번째 줄의 이미지들에 대해 각각 [1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0]과 [0.0, 0.2,

0.4, 0.6, 0.8, 1.0]의 가중치를 부여한 후 더한 결과이다. 이미지 모핑에서는 최종적으로 가운데 줄의 이미지를 빠른 속도로 디스플레이하여 원본 이미지가 목표 이미지로 자연스럽게 변경되게 한다. 이미지 모핑 프로그램은 PC(Intel Core(TM)2) Quad CPU 2.5GHz)에서 구현되었다. 그림 12의 원본 이미지 워핑과 목표 이미지 워핑의 10개의 변형된 메시를 계산

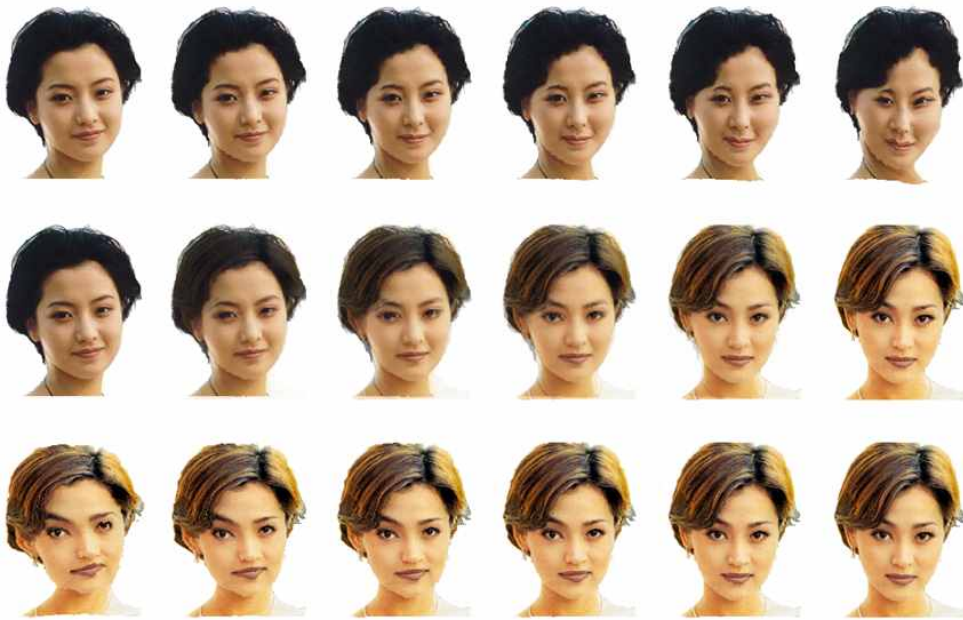


그림 12. 이미지 모핑의 예

하는데 32초가 소요되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 질량-스프링 시스템을 이용한 이미지 모핑의 빠르고 안정적인 시뮬레이션에 대해 기술하였다. 질량 스프링 시스템을 이용한 메시 변형의 안정된 결과를 얻기 위하여, 내부적으로 2개의 얇은 막 질량-스프링 시스템을 사용하였다. 얇은 막 질량-스프링 시스템을 이용한 변형이 일반적인 질량-스프링 시스템을 이용한 것 보다 많은 장점을 가지며, 안정적이고 더 부드러운 결과를 가진다는 것을 실험 결과로 확인하였다. 메시에서 겹침이 발생하면 이미지 변형의 일대일 속성을 만족할 수 없다. 본 논문에서는 얇은 막 질량-스프링 시스템에서 겹침을 빠르게 검출하고 제거하는 방안을 제시했다. 겹침 검출에 사용된 야코비안 결정자는 얇은 막 질량-스프링 시스템의 변위 값으로부터 바로 계산되는 과정에 대해 설명했다. 겹침을 빠르게 제거하기 위해 겹침이 발행한 노드의 이웃 4개 또는 8개 노드에 외부 힘을 자동으로 추가하는 방안을 제안하였다. 겹침을 제거하는 속도는 2개의 이웃 노드에 외부 힘을 추가할 때에 비해 4개 또는 8개의 이웃 노드에 외부 힘을 추가할 때 크게 향상된다는 것을 실험결과로 확인하였다. 외부 힘은 얇은 막 질량-스프링 시스템의 변위 차에

의해 자동으로 계산되어 노드에 부가되고 겹침이 제거될 때까지 반복적으로 적용된다. 제안하는 겹침의 검출과 제거 방법의 효용성은 이미지 모핑을 포함한 다양한 경우에 적용하고 실험결과로 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. Wolberg, "Recent Advances in Image Morphing," *IEEE in Proc. Int. Conf. Comput. Graph.*, pp. 64-71, 1996.
- [2] DW. Choi and CJ. Hwang, "Image Morphing Using Mass-Spring System," *The 2011 International Conference on Computer Graphics and Virtual Reality*, in press, 2011.
- [3] DW. Choi and CJ. Hwang, "A Fast Overlap Control in Image Morphing Using Mass-Spring System," *The 4th International Conference on Image and Signal Processing*, in press, 2011.
- [4] G. Wolberg, *Digital Image Warping*. IEEE Computer Society Press: Los Alamitos, CA, 1990.
- [5] T. Beier, and S. Neely, "Feature-based image metamorphosis," *in Proc. SIGGRAPH*, Vol. 26, pp.35-42, 1992.

- [6] SY. Lee, KY. Chwa, J. Hahn, and SY. Shin, "Image Morphing Using Deformation Techniques," *J. Vis. Comput. Anim.*, Vol.7, No.1, pp. 3-23, 1996.
- [7] SY. Lee, KY. Chwa, and SY. Shin, "Image Metamorphosis Using Snakes and Free-Form Deformations," *Proc. SIGGRAPH'95*, pp. 439-448, 1995.
- [8] M. Alexa, D. Cohen-Or, and D. Levin, "As-Rigid-As-Possible Shape Interpolation," *Proc. of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 157-164, 2000.
- [9] T. Igarash, T. Moscovich, and J. F. Hughes, "As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation," *ACM Trans. on Graphics* 24, 3, pp.1134-1141, 2005.
- [10] S. Schaefer, T. McPhail, and J. Warren, "Image Deformation Using Moving Least Squares," *Proc. of ACM SIGGRAPH 2006*, pp.533-540, 2006.
- [11] D. Baraff, and A. Witkin, "Large Steps in Cloth Simulation," *Proc. 25th Ann. Conf. Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'98)*, pp.43-54, 1998.
- [12] X. Provot, "Deformation Constraints in a Spring-Mass Model to Describe Rigid Cloth Behavior," *In Graphics Interface*, pp.147-154, 1995.
- [13] K. Kähler, J. Haber, and HP. Seidelm, "Geometry-Based Muscle Modeling for Facial Animation," *Proc. Graphics Interface Conf.*, pp. 37-46. 2001.
- [14] W. Mollemans, F. Schutyser, J. Cleynenbregel, and P. Suetens, "Fast Soft Tissue Deformation with Tetrahedral Mass Spring Model for Maxillofacial Surgery Planning Systems," *Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI'04)*, pp.371-379, 2004.
- [15] S. Zhang, L. Gul, P. Huang, and J. Xu, "Real-Time Simulation of Deformable Soft Tissue Based on Mass-Spring and Medial Representation," *Proc. First Int'l Workshop Computer Vision for Biomedical Image Applications (CVBIA'05)*, pp. 419-426, 2005.
- [16] J. Brown, S. Sorkin, JC. Latombe, K. Montgomery, and M. Stephanides, "Algorithmic Tools for Real-Time Microsurgery Simulation," *Medical Image Analysis*, Vol.6, No.3, pp. 289-300, 2002.
- [17] FL. Bookstein, "Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations," *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Intelligence*, Vol.11, No.6, pp. 567-585, 1989.
- [18] N. Arad, N. Dyn, D. Reisfeld, and Y. Yeshurun, "Image Warping By Radial Basis Functions: Application To Facial Expressions," *CVGIP: Graphical Models and Image Processing.*, 56(2), pp. 161-172, 1994.
- [19] L. Cooper and S. Maddock, "Preventing Collapse Within Mass-Spring Damper Models of Deformable Objects," *The 5th Int. Conf in Central European Comput. Graphics and Vis.*, 1997.
- [20] CCL. Wang, SSF. Smith, and MMF. Yuen, "Surface Flattening Based on Energy Model," *Computer-Aided Design*, 34, pp. 823-833, 2002.
- [21] J. Li, D. Zhang, G. Lu, Y. Deng, X. Wen, and Y. Sakaguti, "Flattening Triangulated Surfaces Using a Mass-Spring Model," *Int.J Adv Manuf Technol.*, 25, pp.108-117, 2005.
- [22] B. Tiddeman, N. Duffy, and G. Rabey, "A General Method for Overlap Control in Image Warping," *Computers and Graphics*, Vol. 25, No.1, pp. 59-66, 2001.
- [23] YJ. Choi, M. Hong, MH. Choi, and MH. Kim, "Adaptive Surface-Deformable Model with Shape-Preserving spring," *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16, pp. 69-83, 2005.
- [24] Y. Bhasin, A. Liu. "Bounds for Damping that Guarantee Stability in Mass-Spring Systems," *Medicine Meets Virtual Reality*, 2006.
- [25] GH. Meisters and C. Olech, "Locally one-to-

one Mappings and a Classical Theorem on Schlicht Functions,” *Duke Mathematics Journal*, 30, pp. 63-80, 1988.



최도원

1992년 2월 중앙대학교 전자계산학과 학사
2001년 8월 충남대학교 전산학과 석사
2008년 3월~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정

1993년 3월~현재 국방과학연구소 연구원
관심분야: 영상처리, 수치해석



황치정

1975년 서강대학교 수학과 학사
1979년 서강대학교 수학과 석사
1981년 뉴욕주립대학 수학과 석사
1985년 University of Connecticut 전산학 석사

1987년 University of Connecticut 전산학 박사
2006년~2010년 충남대학교 차세대정보기술 SW인력양성사업단(BK21) 단장
1988년~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야: 영상처리, 패턴인식