한국 CAD/CAM 학회 논문집
제 12권 제 5호 2007년 10월 pp. 330-343

학술논문

결함이 있는 점집합 곡면의 형상 및 외관 수정

박세연*, Xiaohu Guo*, 신하용***, Hong Qin****

Shape and Appearance Repair for Incomplete Point Surfaces

Seyoun Park*, Xiaohu Guo**, Hayong Shin*** and Hong Qin****

ABSTRACT

In this paper, we present a new surface content completion system that can effectively repair both shape and appearance from scanned, incomplete point set inputs. First, geometric holes can be robustly identified from noisy and defective data sets without the need for any normal or orientation information. The geometry and texture information of the holes can then be determined either automatically from the models' context, or manually from users' selection. After identifying the patch that most resembles each hole region, the geometry and texture information can be completed by warping the candidate region and gluing it onto the hole area. The displacement vector field for the exact alignment process is computed by solving a Poisson equation with boundary conditions. Out experiments show that the unified framework, founded upon the techniques of deformable models and PDE modeling, can provide a robust and elegant solution for content completion of defective, complex point surfaces.

Key words : Hole filling, Cut-and-Paste, Active contour method, Poisson Equation

1. 서 론

3차원 데이터를 얻는 기술의 발달에 따라 많은 디지털 모델들이 3차원 측정 장비로부터 얻어지고 있다. 그러나 기술의 발전에도 불구하고, 곡면의 데이터에서 부분적으로 얻어지지 못하는 부분이 생기며, 곡면의 완성 과정은 전체 역공학 프로세스에서 매우 중요한 단계라고 할 수 있다. 대체로 결함은 불체간의 충돌, 낮은 반사도, 또는 측정 위치의 제약 등 측정 과정에서 생성되나, 때로는 고미술품과 같이 오랜 시간에 의해 손상되어, 측정 모델 자체가 결함을 가지고 있는 경우도 존재할 수 있다. 또한 측정 후에 곡면을 수정하는 과정에서 의도적으로 큰 홀을 만들 수 있으며, 이 모든 경우에 결함을 자동적으로 찾아서 수정하는 단계가 필요하다. 실제로 결함수정 작업은 만족스러운 결과를 얻기가 쉽지 않으며, 좋은 결과를 얻는다 하더라도 사람의 노력을 상당히 요하는 작업 중 하나이다. 특히 홀의 크기가 주변 특징형상(feature)의 크기보다 상대적으로 크거나, 실물 자체에 큰 결함이 있다면(예: 손상된 조각상), 단순히 홀의 경계로부터 부드럽게 메꾸는 방법으로는 좋은 결과를 얻기 힘들다.

이상적으로는, 본 연구에서 지향하는 일반적인 곡면 수정을 위한 시스템은 다음과 같은 기능을 가져야 한다:

- 곡면의 법선과 같은 정보나, 특별한 정밀도, 샘플링 밀도와 같은 조건이 없는 일반적인 측정 점데이터를 다룰 수 있는 능력;
- 결함이 있는 점집합을 다룰 수 있는 강건성;
- 곡면이 manifold라는 가정 하에서 자동적으로 홀을 찾는 기능. 만약 곡면이 manifold가 아니라면, 홀을 찾는 과정은 최소한 사용자의 개입 하에 반자동으로 이루어져야 한다;
- 결함이 있는 점집합의 형상과 외관을 모두 자동으로 수정하는 기능;
- 홀은 형상과 외관 모두 원형 모델의 경계로부터 구별이 최소화 되도록 메워져야만 한다. 만약 측정된 모델이 충분한 context 정보를 가지고 있다면 모델의 특성을 그대로 변형시켜서 자동적으로

*교신저자, 학생회원, 한국과학기술원 산업공학과
**University of Texas at Dallas
***종신회원, 한국과학기술원 산업공학과
****State University of New York at Stony Brook
- 논문투고일: 2006. 03. 27
- 심사완료일: 2007. 07. 23

홀이 메꿔질 수 있으나[24], 그렇지 못한 경우에는 사람에 의해 도움을 받아야 한다.

본 연구에서는 결함이 있는 점집합의 *형상(shape)*과 *외관(appearance* 또는 *texture)* 모두 수정이 가능한, 자동적이면서 사용자와의 상호작용을 위한 기능도 제공하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템의 주요한 아이디어는 A. Sharf 등이 제안한 방법과 비슷하며[24], 이는 결함이 있는 점곡면을 수정하기 위해 모델 자체나 또는 다른 모델로부터 얻어진 형상과 외관의 context 정보를 자동적인 잘라내기-붙여넣기 과정을 통해 직접 이용하는 것이다. 입력 모델은 법선 벡터나 방향성(orientation) 정보가 없다는 가정 하에, 2-manifold 모델로부터 측정된, 잡음이 있을 수 있는 점 데이터를 취한다. 이 점군은 먼저 모든 점들의 방향성을 결정하여 내/외부 관계를 가리기 위해 변형가능모델(deformable-model)을 기반으로 한 영역 분할 방법으로 전처리 과정을 거치며, 이는 H. Xie 등[31]이 제안한 방법을 사용하였다. 이를 위해서는 거리장(distance field)이 필요하며, 거리장을 계산하기 위해 점군 데이터를 octree를 이용하여 분할하였다. 홀은 부호가 없는(unsigned) 거리장의 모든 안장점들을 조사함으로써 자동적으로 찾을 수 있다. 본 연구에서 사용된 자동적인 홀 감지 알고리즘은 각 octree 셀에 분포된 점들의 밀도를 조사하는 기존의 방법보다 훨씬 정확하다. 이 과정을 거치고 나면, A. Sharf 등[24]의 context-based 곡면 완성 방법을 확장하여 모델의 형상과 외관을 동시에 수정한다.

그러나 [24]에서 수행한 바와 같이 볼륨으로 감싼 후, 거리 값을 계산하여 형상의 유사성을 판별하는 대신, 곡면 패치의 곡률과 색 정보만을 가지고 유사성을 분석하는 방법을 제안한다. 특별히, 우리는 곡률을 이용한 "디지털 특성치"을 곡면 형상으로부터 추출하여, 그것을 홀이 있는 지역과 가장 비슷한 context를 가진 패치를 판별하는 데 사용한다. 곡률을 이용한 형상 특성치는 본질적인 곡면의 형상을 수치화 한 것이며, 이는 형상 비교를 위해 다른 속성들에 비해 좋은 비교수치라 할 수 있다. 마지막으로, 홀 영역에 맞도록 '변형된' 형상과 외관을 얻기 위해 편미분 방정식(특히 포아송 방정식)을 푼다. 다른 볼륨을 이용한 편미분 방정식(Partial differential equation, PDE)을 근간으로 한 방법들에 비해 본 연구에서 제안하는 계산 방법은 더 효율적이며 강건하다.

본 논문의 내용을 개략적으로 소개하면, 먼저 형상과 외관 정보를 하나의 통합된 프레임워크에서 자동적으로 수정이 되도록 하는 것이다. 이는 국부적인 매개변수화 과정을 통해서 이루어 질 수 있으며, 국부적인 매개변수화는 패치의 유사도를 비교하고, 두 패치를 정렬하며, 매개변수 도메인에서 2D 포아송 해석을 통해 복사하고자 하는 패치를 변형시킬 수 있는 기반이 된다. 따라서 본 연구에서는 각 octree 셀을 위상적으로 디스크와 동일한 패치를 이룰 때까지 단계를 나누어 매개변수화를 수행한다. 국부 매개변수화 후에 유사성을 더 쉽게 비교하고, 포아송 방정식을 풀어 형상과 외관 정보를 변형시키기 위해 패치를 정렬한다. 그러나 이 때, 복잡한 곡면 패치(또는 genus 1 이상의 패치)에는 이러한 매개변수를 이용한 방법은 유용하지 않을 수 있다. 또 수정될 모델이 충분한 context 정보를 가지고 있지 않을 때에는 자동적인 패치 선택이 전반적으로 의미 있는 결과를 주지 못할 것

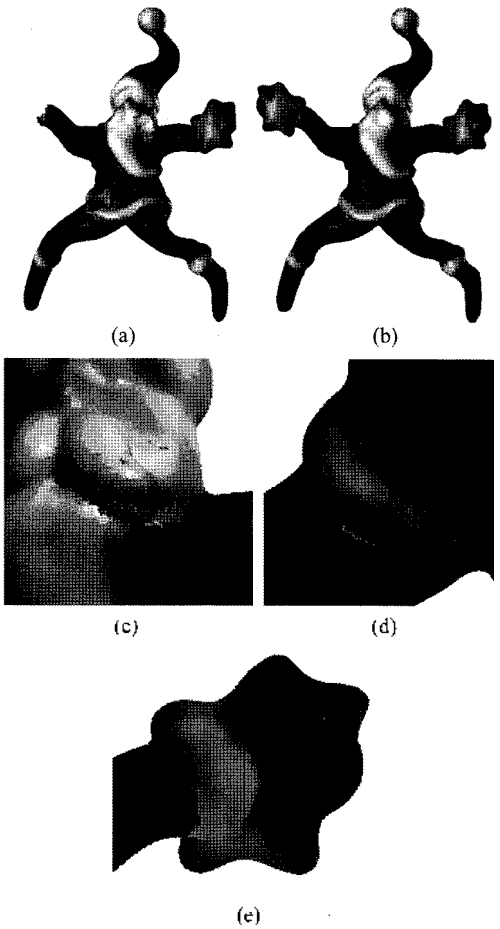


Fig. 1. 산타클로스 모델의 형상과 외관 수정: (a) 입력 점집합으로부터 자동적인 홀 감지, (b) 모델의 context에 맞게 형상과 외관 모두 수정. (c, d, e) 각 수정된 홀을 확대한 모습. 경계가 매끄럽게 연결된 것을 확인할 수 있다.

이다(Fig. 1의 산타클로즈 모델에의 손 참조). 따라서 본 연구에서 개발한 시스템은 전체 곡면 완성 과정에서 사용자의 개입을 허용하도록 개발되었다.

2. 기존 연구

측정된 점집합을 곡면으로 완성하는 작업은 자연스럽게 곡면 재구성 알고리즘들과 연결될 필요가 있다. 본래의 점집합은 alpha shape[9,21], crusts[1], 또는 ball[3]과 같은 방법들을 이용하여 보간 될 수 있다. 그 외에도 H. Hoppe 등[11]은 점군으로부터 곡면을 재구성하기 위해 부호가 있는 거리장을 사용하였다. D. Levin[18]은 보간이나, 불규칙한 데이터를 고르게 하기 위해 이동-최소제곱법을 사용했으며, J. C. Carr 등[5]은 점집합을 곡면으로 맞추기 위해 차원이 큰 밀집된 선형시스템을 도입했으며, 이를 위해 radial basis functions(RBFs)을 사용하였다. Y. Ohtake 등[21]은 큰 규모의 점군으로부터 조각화된(piecewise) 음함수 곡면을 구성하기 위해 Multi-level Partition of Unity Implicits를 제안하였다.

점집합을 곡면으로 재구성하는 방법의 또 다른 분류는 활성 윤곽선 방법(active contour method, 또는 변형가능모델, deformable-model)로 불리며[14,30,33,34], 이는 컴퓨터 비전 분야에서 매우 활발하게 활용되어 왔다. 이런 방법의 장점으로는, 변형 가능한 모델들이 잡음이 있는 데이터에도 매우 잘 적용된다는 것이다. 이 논문에서 우리는, 홀의 위치를 찾기 위해 이러한 활성 윤곽선 방법을 활용하였다.

곡면 완성 과정은 특별한 편미분 방정식을 품으로써 수행될 수도 있다. J. Davis 등[7]은 등방 볼륨 발산을 통해 홀을 채우는 문제에 대해서 다루고 있다. 또한 T. Masuda[16]의 경우에는 부호를 가진 거리장을 이차 근사를 통해 해결하고 있다. J. Verdera 등[27]은 이미지 inpainting 알고리즘으로부터 편미분 방정식을 형상 정보에 맞게 유도하여 홀을 채우는 음함수 곡면을 사용하였다. U. Clarenz 등[6]은 평균곡률의 제곱의 적분값을 최소화하는 최적화 과정을 통해 곡면을 수정하였다.

대부분의 홀을 메우는 방법들은 볼륨을 이용한 방법들이며, 이는 볼륨영역의 내부와 외부 사이의 경계를 암시적으로 곡면으로써 얻어내는 것이다. T. Ju[13]는 계층적 격자를 이용한 내/외부 볼륨을 구성하여, 홀을 둘러싸는 half-edge loop의 윤곽을 가지고서 다각형 메쉬를 수정하는 방법을 제안하였다. J. Podolak 등[20]은 공간을 atomic 볼륨으로 나누고, 각 볼륨을 내부 또는 외부가 되도록 결정하는 그래프를 활용하였다. 그러나 모델의 외관속성(texture)의 경우 3D 볼륨에 포함되지 못하는 곡면의 본질적인 속성이므로, 볼륨을 이용하는 방법들은 외관을 수정하는 데는 바람직하지 못하다.

위의 모든 방법들이 홀 영역을 채우기 위해 경계영역으로부터 보간을 하여 부드러운 곡면 패치를 생성하는 반면, context를 기반으로 한 방법들은 모델의 context 정보에 따라 모델을 수정한다. 다시 말해, 경계영역을 부드럽게 잇는 것 뿐 아니라, 홀 내부에 새 부직인 형상이 들어가야 하는 경우에는 알맞은 형상을 만들어낸다. 이와 관련하여 V. Savchenko 등[25]은 홀의 경계곡선을 고르게 한 후 조정점들을 이용하여 주어진 곡면의 빠진 부분들을 향해 주어진 형상을 변형시키는 방법을 제안하고 있다. A. Sharf 등[24]은 홀 영역과 비슷한 패치를 자동적으로 선택하여 메우는 방법을 소개하고 있다. 또한 V. Kraevoy 등[15]은 수정해야 하는 메쉬와 원형이 되는 모델의 매핑과정을 통해서 홀을 채운다. 이 때 두 모델은 같은 위상을 가져야만 한다. M. Pauly 등[19]은 3D 모델의 데이터베이스로부터 context 모델을 추출하여, 결함이 있는 측정데이터에 맞게 변형한다. 본 연구에서 접근한 방법은 개념적으로 A. Sharf 등[24]의 context를 기반으로 한 자동적인 홀필링 방법과 비슷하다. 그러나 [24]에서 채택한 볼륨을 이용한 접근방법과는 다르게, 우리는 곡면 자체의 본질적인 성질들(곡률과 색)을 이용하고 있으며, 또한 형상뿐 아니라 외관 정보도 자동적으로 수성될 수 있다.

3. 시스템 개요

본 연구에서 개발한 곡면 완성 시스템은 크게 다음의 3 가지 부분으로 구성되어 있다.

1. **결함 감지**: 잡음과 결함을 가진 점집합을 입력으로 하여, 각 점의 방향성을 정하고 잡음을 제거하기 위해 변형가능모델을 근간으로 하는 방법을 사용한다; 또한 이와 동시에, 홀들은 이 단계에서 자동적으로 찾아진다.

2. **곡면 패치 선택**: 이 단계에서는 octree를 이용하여 찾아진 홀과 가장 유사한 곡면 패치를 찾는다; 이 과정을 자동으로 하기 위해, 곡률을 기반으로 한 "디지털 특성치"를 각 부분 패치에 대해 계산하고(5.2절 참조), 이를 이용하여 형상과 외관을 정량적으로 비교한다; 만약 사용자가 곡면 패치를 직접 선택할 필요가 있다면, 좀 더 정확한 과정을 위해 불(boolean) 연산

을 제공한다.

3. 포아송 해석: 이 과정에서는, 가장 비슷한 곡면 패치와 그에 따른 경계곡선을 colored ICP(iterative closest point) 방법(6.1절 참조)을 이용하여 홀 영역에 정렬시킨다; 그리고 마지막으로, 형상과 색 정보를 차례로 포아송 방정식을 이용하여(6.2절 참조) 홀 영역에 맞도록 변형한다.

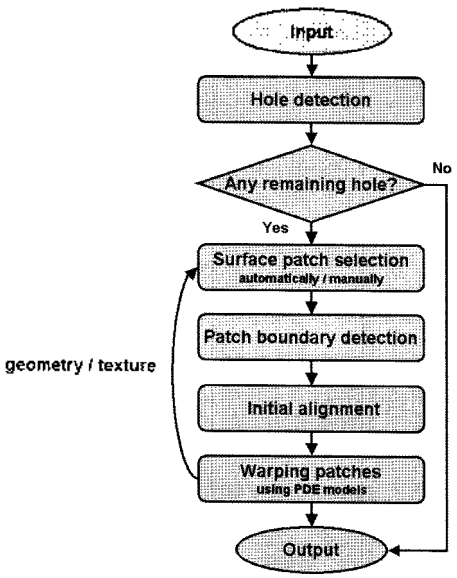


Fig. 2. 곡면 완성 시스템의 전반적인 프레임워크와 데이터 파이프라인.

위의 Fig. 2는 본 연구에서 개발한 곡면완성시스템의 전반적인 파이프라인을 보여준다. 이 그림에는 나타나 있지 않으나, 전반적으로 효율적인 계산을 위해 3가지의 데이터구조를 미리 구성하여 사용하고 있다. 첫째는 octree 구조로, 입력으로 들어온 점집합을 이용하여 octree 구조를 구성한다. 또한, octree와 비슷하긴 하나 정확한 거리장 계산을 위해 계층적인 볼륨 격자를 생성한다. 마지막으로, 모든 단계로, 자주 사용되는 이웃점들을 찾는 계산을 빨리 하기 위해 kd-tree를 사용하였다.

4. 홀 detection

주어진 원래의 측정된 점곡면을 수정하기에 앞서, 첫 단계에서 활성 윤곽선(active contour) 방법을 이용한 전처리과정을 거치게 된다. 법선이나 방향성에 관한 정보가 없는 잡음과 결함을 가진 점집합을 입력으로 하여, H. Xie 등[31]이 소개한 방법을 활용하여 각 점들의 방향성을 정하고, outlier와 잡음을 제거한다. 이 절에서는, 특히 [31]에서 사용한 활성 윤곽선 방법을 간략하게 소개하고, 어떻게 이를 이용하여 홀을 찾아낼 수 있는지를 소개하겠다.

입력으로 주어진 점집합 D가 2-manifold라고 가정하면, 이는 자연스럽게 내부와 외부로 구분되는 볼륨으로 이루어진 공간으로 나누어질 수 있으며, 활성 윤곽선 방법은 곡면의 내부와 외부를 구분하기 위해 자주 사용되는 방법이다. 홀로 인하여 결함이 생기는 것을 막기 위해, 대부분의 변형가능한 모델들은 특성한 strain 에너지를 최소화 하는 방법을 이용하나, H. Xie 등은[31] 홀의 양쪽(내부와 외부)에서 두 종류의 활성 윤곽곡선을 발생시키는 다른 방법을 취하고 있다. 곡면에 의해 경계를 가지게 되는 공간 영역은 반드시 적어도 내부의 한 점 이상에서 (부호가 없는) 거리장의 국부적 최대값을 가지게 된다. 이 모든 부분 최대값을 가지는 점에서 활성 윤곽선을 하나씩 발생시켜서(3차원에서는 곡면을 이룸) 확장시킨다. 확장시키는 방법은, 모든 활성 윤곽선들이 곡면으로부터 서로 같은 거리를 유지하도록, 일정 속도로 확장시킨다. 이렇게 곡면에 가까워져 가던 활성 윤곽선들은 마침내 곡면, 또는 홀의 중심에서 충돌하게 된다. Fig. 3은 이러한 활성 윤곽선의 기본 아이디어를 설명하고 있다. 실제로는 바깥의 경계가 되는 부분 최대값 에서도 활성 윤곽선을 생성하여(Fig. 3(c)) 이들을 곡면으로부터 모두 같은 거리가 되도록 곡면을 향하여 키워 나가기나 함몰시킨다. 결과적으로 마지막 단계에서 활성 윤곽선 사이에 끼어 있는 영역, 특히 내부에서 발생한 활성 윤곽선과 외부에서 발생한 활성 윤곽선에 의해 충돌이 일어난 영역이 전체 곡면을 이루게 된다(Fig. 3(d)).

지금까지의 내용은 H. Xie 등[31]이 소개한 점집합으로부터 곡면을 찾아내는 과정이며, 본 연구에서는 이

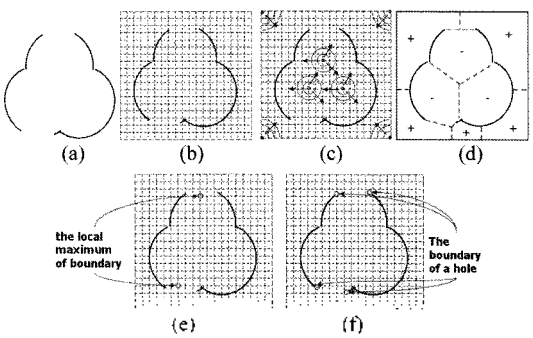
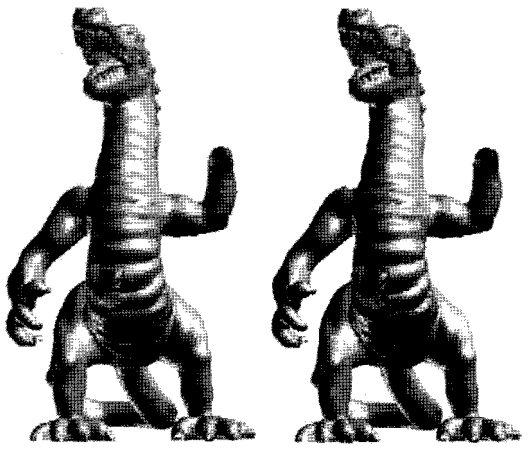


Fig. 3. 자동적인 홀감지를 위한 active contour 방법.

를 이용하여 홀 영역을 함께 찾아낸다. 이 때 홀 영역은 내부와 외부 사이에 끼어 있는 영역 중 점집합을 포함하지 않는 영역이 되며, 홀의 중심은 거리장에서 안장점이 되는 점이다(Fig. 3(e)).

위의 방법을 실제로 구현함에 있어서, 연속적인 거리장은 볼륨 격자를 이용하여 이산화되었으며, 각 격자점들은 내부에 입력 점을 포함하고 있는 가장 가까운 격자로부터 블록단위의 거리로써 정의된 거리를 가지게 된다. 활성 윤곽선에 있는 모든 점들을 곡면까지의 거리에 의해 합을 이용하여 정렬한 후, 가장 멀리 있는 점을 가장 먼저 확장한다. 이는 활성 윤곽선의 모든 영역이 곡면으로부터 거의 같은 거리를 유지하며 확장될 수 있도록 하는 것이다. 활성 윤곽선들이 충돌할 때, 각 격자 점에 대해 거리를 측정하고, 만약 거리가 부분 최대값 이 된다면, 이 격자 점은 홀의 중심이 된다. 이러한 볼륨을 이용한 접근방법은 계층적 구조를 도입함으로써 성능이 좀 더 개선될 수 있다(계층적 구조를 이용한 계산 방법에 대한 자세한 내용은 [31] 참조). 앞에서 기술한 방법의 성능은, 볼륨 격자의 한 축이 n개의 격자를 가질 때 $O(n^3 \log n)$의 시간이 걸리는 것으로 알려져 있다. 마지막으로, 이 단계에서는 후에 사용될 법선 벡터들을 principal component analysis(PCA)를 통해 계산해 둔다.

위와 같은 방법으로 찾아질 수 있는 홀의 형상과 그 복잡도에는 특별한 제한이 없으며, 다만 홀의 중심에서 측정된 거리장의 값이, 해당 active contour의 중심에서 측정된 값보다 큰 경우는 홀을 자동으로 찾지 못할 수 있다.



(a) (b)

Fig. 4. 용 모델의 자동 홀 감지: (a) 3개의 복잡한 홀을 가진 원형 모델; (b) 홀(파란색)이 자동으로 찾아짐.

홀 Υ이 찾아지고 나면, 홀의 경계가 되는 격자가 포함하고 있는 점들을 찾음으로써 경계 영역 $\partial\Upsilon$을 찾을 수 있다. 먼저 각 점 $\mathbf{p} \in \Gamma$을 주변의 이웃 점들의 근사 평면에 투영시킨다. 만약 이웃 점이 존재하지 않는 팬 영역의 각도가 일정 값 이상이라면 이 점 $\mathbf{p}$를 홀의 경계 $\partial\Upsilon$에 속한다고 판단할 수 있다. Fig. 4는 결함이 있는 용 모델의 자동적인 홀 감지 결과를 보여준다.

5. 곡면 패치 선택

점집합으로부터 홀을 판별한 후에는, 홀이 부드럽게 메꿔지도록 경계와 일정 수준 이상의 연속성을 유지하면서, 주변 영역과 구별이 가지 않도록 메꿔져야 한다. 그러나 홀 내부에는 아무 정보도 없기 때문에 홀이 없는 다른 영역으로부터 context 정보를 얻어와 사용하는 것이 좋다. 만약 본래의 모델이 충분한 context 정보를 가지고 있다면, 홀은 이를 이용하여 자동적으로 형상과 외관 모두 보완될 수 있다. 이를 위해서, 본 연구에서는 홀을 둘러싼 영역과 비슷한 다른 영역의 점들을 복사하여 이동, 회전, 변형시킴으로써 홀을 메꾸는 방법을 제안한다.

전체적인 매개변수화 과정이 없이는, 곡면은 홀과 비슷한 영역을 찾고 선택할 수 있도록 하는 자연적인 공간 상의 구조를 가지기 힘들다. 이 어려움을 해결하기 위해, 점집합을 감싸는 볼륨 구조(이 논문에서는 계층적인 octree 구조를 사용했다)를 적절한 패치가 있는 곳과 찾는 방법을 정의할 수 있도록 재정렬 해야만 한다.

이 논문에서는, octree 구조에 의해 분할된 국소 곡면 패치들의 형상과 외관을 모두 비교하기 위해 국부적인 매개변수화를 수행하는 것을 제안한다. 5.1절에서는 부분 매개변수화 방법에 대해 서술할 것이다. 곡면 패치의 유사성은 5.2절에서 곡률을 이용한 특성치를 계산하는 방법을 근간으로 다루어질 것이다. 또한, 자동적인 방법은 사람의 시각에서 인제나 최고의 해답을 주지는 않기 때문에, 사용자의 개입이 때때로 필요하며, 이는 5.3절에서 논의될 것이다. 향후 설명할 곡면 패치 선택은 형상과 외관에 대해 각각 따로 이루어진다.

5.1 패치 비교를 위한 국부적 매개변수화

국소 곡면 패치 $\Gamma_i \subset \Gamma$ 형상과 외관을 모두 비교하기 위해, 특정 단계 λ에서 octree 셀에 포함된 각 곡면 패치에 대해 부분 매개변수화를 수행한다. λ는 홀

이 존재하는 가장 높은 단계가 되며 이는 각 cell에 포함된 곡면 패치가 디스크와 위상이 동일해야 한다는 조건을 만족해야 한다. 그렇지 않으면 본 논문에서 제안하는 방법에서는 genus 1 이상의 곡면 패치에 대해서는 매개변수 매핑을 할 수 없다. 만약 곡면 패치가 홀을 포함하지 않는다면, 매개변수화를 하는 몇몇 기존 연구가 존재하며, 본 논문에서 선택한 방법은 M. Zwicker 등[34]이 제안하는 뒤틀림을 최소화 하는 방법이다.

함수 $X: [0,1]\times[0,1] \rightarrow \Gamma_i$ 를 매개변수 도메인 D_i에서 곡면 패치 Γ_i로의 매핑이라고 하자. 그러면 매개변수 매핑은 식 (1)의 비용함수를 최소화하는 문제가 된다.

$$C(X) = \sum_{j \in M} \{X(\mathbf{s}_j) - \mathbf{p}_j\}^2 + \varepsilon \int_{D_i} \gamma(\mathbf{s}) d\mathbf{s} \qquad (1)$$

여기에서 $\gamma(\mathbf{s}) = \int_\theta \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} X_s(\theta, r) \right)^2 d\theta$, 그리고 $\mathbf{s} = (u, v)^T \in D_i$, $\mathbf{p} \in \Gamma_i$ 이다. 식 (1)의 첫 번째 항은 제약에 의해 주어진 매개변수화 과정의 오차의 제곱합이고, 두 번째 항은 $\gamma(\mathbf{s})$을 적분함으로써 측정된 외곡량이다. X의 역함수를 $U: \Gamma_i \rightarrow [0,1]\times[0,1]$ 라 하자. 실제는 이 매개변수 함수 U를 얻고자 하는 것이며, 식 (1)을 최소화 하는 U를 계산하는 방법은 [34]에서 참고할 수 있다.

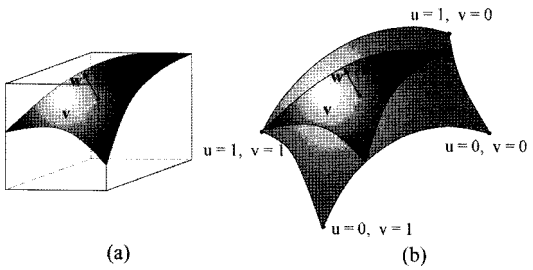


Fig. 5. (a) 한 octree 셀 내의 부분 곡면 패치; (b) "4면으로 구성된" 곡면 패치로의 자동적인 확장과 국부 매개변수화.

이 때, octree 셀들이 world 좌표계에 대해 정렬되어 있기 때문에 셀 내부의 곡면 패치는 임의의 모양을 가질 수 있다. 예를 들어, Fig. 5(a)에서의 곡면의 모양은 3변을 가진다. 이는 매개변수화를 할 때, 매개변수 도메인이 사각 평면을 이루기 때문에 바람직하지 않다. 이를 해결하기 위해 이러한 곡면의 경우 부분적으로 4변을 가지는 곡면으로 수정한다. 먼저 각 곡면 패치를 그 무게중심을 중심 $\mathbf{o}$으로 하고, PCA를 통해 국소 좌표계를 계산한다. 그리고 나서, $\mathbf{p}$가 4면 곡면에 속하는지 계산하기 위해, 사용자로부터 정의된 매개변수 L을 이용하여 $\overrightarrow{\mathbf{op}} \cdot \mathbf{u} \le L$ 과 $\overrightarrow{\mathbf{op}} \cdot \mathbf{v} \le L$, 두 조건을 만족하는지 조사한다($\overrightarrow{\mathbf{op}} = \mathbf{p} - \mathbf{o}$). 위의 두 조건을 모두 만족하면 $\mathbf{p}$가 4면 곡면에 속한다고 할 수 있다. 이 과정을 $\mathbf{o}$로부터 시작하여 이웃 점들로 확장해 가면서 해당 조건을 만족하면 점을 모은다.

만약 곡면 패치가 홀을 가지고 있다면, 식 (1)에서 홀 경계영역 $\partial\Upsilon$ 에서는 그 왜곡의 정도를 측정하기가 힘들다. 따라서, Γ_i을 매개변수화 할 때, 내부에 홀이 있는 경우는 $\partial\Upsilon$ 을 참조 평면에 투영시켜 매개변수의 값을 고정시킨다(Fig. 6 참조).

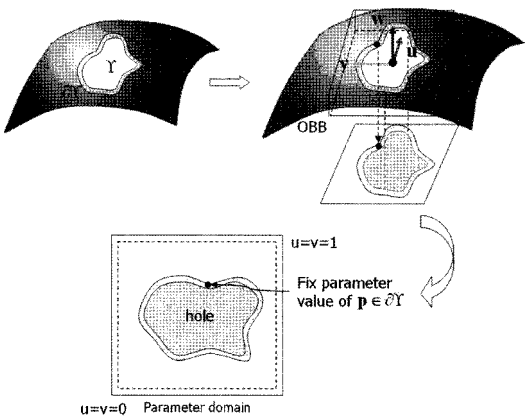


Fig. 6. 홀을 포함하는 패치의 국부 매개변수 매핑.

5.2 자동 패치 선택

국부적인 매개변수 매핑 후에는, 곡률과 색 정보에 기반하여 특성치를 계산함으로써(5.2.1절) 곡면 패치를 비교할 수 있다. 가장 유사한 것으로 선택된 패치는 직접 곡면에 대해 보아송 방정식을 풀어서(6절) 홀에 맞게 변형될 수 있다.

5.2.1 유사 패치 판별

매개변수화 후에는, 국소 패치들을 홀 영역과 비교해야 한다. 그러나 홀 내부에는 아무런 형상/외관 정보가 없으므로 비교할 수 있는 정보가 없다. 따라서 홀 내부를 직접 비교할 수 없고, 홀을 둘러싸는 바깥 영역과, 선택된 패치에서 해당 영역을 서로 비교하기로 한다(Fig. 7 참조). 그러나, 이 때, 비교하는 매개변수 평면은 회전에 대한 자유도를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 비교 전 단계로서 각 곡면 패치를 24개의 각도, 즉 $i \times 15^\circ$, $i = 0, 1, \ldots, 23$ 단위로 회전시킨 매개변수 평면을 따로 미리 계산하여 저장한다. 실제로는 대칭성에 의해 각 octree 셀마다 6개의 회전된

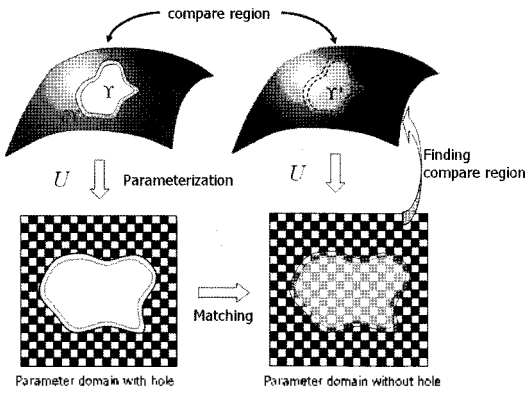


Fig. 7. 홀 영역 바깥 부분의 곡면 패치 비교.

매개변수 평면만을 저장하면 된다. 텍스처의 전처리를 위해 사용되는 이와 비슷한 방법을 [28, 29]에서 찾아볼 수 있다.

비슷한 패치를 찾기 위해, 앞에서 설명한 바와 같이 형상 비교를 위해서는 곡률을, 외관 비교를 위해서는 (R, G, B) 색 비교를 수행한다. 이 때, 주어진 패치의 형상과 색 정보를 나타내는 몇 가지 특성치를 선택하는데, 이 때 형상을 위해서는 곡률과 관련된 6개의 값으로 구성된 특성치 벡터 $(f_1,\ldots,f_6)^T$를 사용하며, 이는 (2)과 같이 정의된다.

$$f_1=\frac{\sum_j \kappa_{1j}}{n_i},\ f_2=\max_j\{\kappa_{1j}\},f_3=\min_j\{\kappa_{1j}\}$$
$$f_4=\frac{\sum_j \kappa_{2j}}{n_i},\ f_5=\max_j\{\kappa_{2j}\},f_6=\min_j\{\kappa_{2j}\} \quad (2)$$

여기에서 κ_{1j}는 $\mathbf{p}_j\in\Gamma_i$의 최대 곡률, κ_{2j}는 $\mathbf{p}_j$의 최소 곡률, n_i는 Γ_i에 포함된 점의 개수이다. 텍스처에 대해서는 9개의 값으로 구성된 특성치 벡터 $(g_1,\ldots,g_9)^T$을 사용하며, 이는 R, G, B 각각의 평균, 최대, 최소값을 차례로 사용한다.

그 다음 단계는 주어진 홀 패치 Υ_k, $(k\in\{0,\ldots,n_h\})$를 가지고, 홀이 없는 다른 곡면 패치 Γ_i, $(i=0,\ldots,n_2)$와 위와 같은 방법으로 계산된 특성치를 이용하여 유사도를 계산하는 일이다. 두 곡면 패치의 j번째 특성치가 얼마나 가까운가를 나타내는 유사도 함수 $S(f_j^{\Upsilon_k},f_j^{\Gamma_i})$ (짧게 S_j)는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$S_j=\left(1-\frac{d_j}{d_{\max,j}}\right)^r \quad (3)$$

여기서 $f_j^{\Upsilon_k}$는 패치 Υ_k의 j번째 특성치값, $d_j=\left|f_j^{\Upsilon_k}-f_j^{\Gamma_i}\right|$, $d_{\max,j}=\max_j\{d_j\},j=0,\ldots,n_i$을 나타낸다. $d_{\max,j}$는 S를 [0, 1]로 정규화하기 위한 변수이며, r은 d_j에 대한 S의 민감도를 나타내고, 간단히 $r=2$로 계산하였다.

두 곡면 패치 간의 유사도는 각 특성치의 유사도를 가중치와 곱한 합으로 계산하였으며, 이 때 가중치는 따로 최적화 하지 않고 단순히 모두 같은 값을 가지도록 특성치 개수에 따른 평균값으로 하였다.

$$\text{similarity}(\Upsilon_k,\Gamma_i)=\frac{\sum_j w_j S_j}{\sum_j w_j} \quad (4)$$

Υ_k에 대해 각 곡면 패치의 유사도 값을 계산한 후에는 Υ_k을 메꾸기 위해 가장 높은 유사도 값을 가지는 패치 Γ_i를 찾을 수 있다. 그러나, 위와 같이 계산한 결과가 사람의 시각에서 보았을 때 항상 최상의 결과를 내준다는 보장이 없기 때문에, 본 시스템에서는 가장 높은 유사도를 가지는 몇 개의 후보를 결과로 제공하고, 사용자가 그 중 하나를 Γ_i로써 선택할 수 있게 하였다. 또한 비슷한 곡면 패치가 형상과 외관에 대해 동일한 것일 필요는 없으므로, 따로 계산하여 찾는다.

5.3 수동 패치 선택

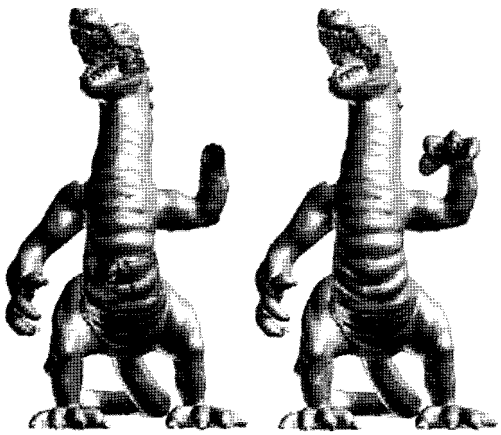
국부적 매개변수 매핑에 기반하여 자동으로 선택하는 방법은 곡면 패치들이 상대적으로 편평하고 단순한 경우에 잘 적용된다. 그러나 Fig. 8의 용 모델의 손과 같이 복잡한 형상의 경우 매개변수화를 하면 심한 왜곡이 생길 수 있다. 또한 어떤 모델은 충분한 context 정보가 존재하지 않을 수도 있고, octree 구조에 따라 곡면 패치를 찾기 때문에 전역해라고 볼 수 없다. 예를 들어, Fig. 1의 경우 octree를 이용한 방식은 사용자의 개입 없이는 산타클로즈의 손에 알맞은 패치를 찾을 수 없다. 따라서 본 시스템에서는 사용자의 상호작용을 가능하게 하는 기능을 제공한다.

곡면 패치 상에 위치한, 사용자에 의해 그려진 폐곡선 C가 존재하고, 이 곡선은 주어진 점집합을 정확히 두 그룹으로 나눈다고 하자. 여기서 찾고자 하는 바는 C에 의해 나뉘어진 두 그룹이다. 순수한 점들 사이에는 어떤 연결관계도 없기 때문에, 먼저 Γ와 C를 4절에서 사용된 볼륨 격자에 담는다. 먼저 C가 지나는 격자들을 찾고, 그곳에서 시작하여 반대 방향으로 곡면을 포함하는 격자들만을 방문한다. 이는 tangential flow 방법과 비슷하며, E.N. Mortensen 등[17]도 2D에서 비슷한 방법을 제안하고 있다. 입력으로 들어온 점집합이 2-manifold라는 가정 하에 이 front propagation은 실험적으로 잘 동작하였다. Fig. 8은 사용자의

개입이 들어간 곡면 완성 예제를 보여준다.

5.4 Boundary detection

6절에서 소개될 과정은 경계 영역을 이용하여 이동, 회전, 그리고 변형을 통해 선택된 복사 영역을 홀로 메우게 된다. 따라서 이 단계에 앞서, 선택된 Γ_f의 b경계 영역 $\partial\Gamma_f$가 찾아져야 한다. 이는 4절에서 홀의 경계영역 를 찾는 방법과 동일한 방법이 사용될 수 있으나, 이 때 여러 개의 분리되어야 하는 경계가 존재할 수 있다는 문제점이 있다. 점 $\mathbf{p}_1$과 $\mathbf{p}_2$가 서로 다른 경계 곡선에 속하면 $dist(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) > r$을 만족한다고 하자. 여기서 $dist(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$은 $\mathbf{p}_1$과 $\mathbf{p}_2$ 사이의 유클리드 거리이며 r은 사용자에 의해 정의된 값이다. 그러면 Euclidean minimum spanning tree (EMST)를 구성하여 r 보다 큰 에지를 잘라내고 난 후의 연결된 점들이 하나의 경계곡선을 이루게 된다.



(a) (b)

Fig. 8. 사용자의 개입에 의한 용 모델의 수정: (a) 사용자는 모델의 context에 따라 가장 비슷한 영역(주황색 영역)을 선택한다; (b) 수정된 모델.

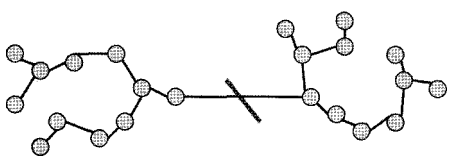


Fig. 9. EMST와 boundary 곡선의 분리.

6. 편미분방정식을 이용한 홀필링

홀을 채우는 단계는 크게 두 단계로 이루어 지며, 첫 단계는 선택된 복사 영역을 이용하여 홀을 채우기 전에, 강체 변환을 통해 홀 영역으로 알맞게 방향성을 정렬(6.1절)하는 것이다. 그러나 정렬 후에 두 경계가 정확히 일치하지 않으며, 복사하려는 패치와 홀 영역의 크기가 동일하지 않기 때문에 갭이 생기거나 남는 부분이 생길 수 있고, 이는 강체 변환만으로는 해결되지 않는다. 이 문제는 남아있는 변위장을 포아송 방정식을 풂으로써 해결할 수 있다(6.2, 6.3절). 변위장은 일반적으로 포아송 방정식에 기초하여 이러한 부분이 부드럽게 변형되지만, 복사하려는 패치의 정보 자체가 포아송 방정식에서 guidance vector로 주어지고, 이를 최소 제곱법으로 해결하므로, 형상과 외관의 세부 정보나 날카로운 형상 등은 최대한 보존된다. 홀을 채우는 단계 역시 형상과 외관에 대하여 차례로 두 번 수행한다. 이렇게 함으로써 우리는 어떤 형상의 홀에 대해서도 경계에서 최소 G1 연속성을 유지하는 홀필링을 가능하게 하였다.

6.1 초기 정렬

홀 내부에는 아무런 정보도 없기 때문에, 그 주변의 정보를 사용할 수 밖에 없으며 복사 영역을 홀에 정렬하기 위해서 $\partial\Gamma_f$로부터 $\partial\Upsilon$로의 변환을 사용한다. 여기에서 $\partial\Upsilon$는 홀의 정확한 경계곡선이 아닌 경계곡선 주변의 띠 모양의 경계 영역을 뜻하며, $\partial\Gamma_f$ 역시 Γ_f에 대해 같은 영역을 뜻한다. 본 연구에서는 점집합의 정합에 많이 사용되며, 두 띠 모양의 영역의 정합에도 좋은 결과를 주는 iterative closest point (ICP) 방법을 사용한다. 그러나 ICP는 두 점집합이 멀리 떨어져 있을 때는 좋은 결과를 주지 못하므로, 먼저 두 점집합을 둘러싸는 OBB의 중심과 좌표축을 먼저 계산하여 일치시킨 후에 사용한다. 또한 복사 영역이 뒤집어지지 않았는지 판단하기 위해 두 점집합의 법선 벡터의 방향이 일치하는 지 확인한다. $\mathbf{T}$를 강체 변환을 나타내는 (4×4) 행렬, $\mathbf{q}_j \in \partial\Gamma_f$를 $\mathbf{p}_j \in \partial\Upsilon$의 가장 가까운 점이라고 하자. 그러면 두 점집합 사이의 거리는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$d(\partial\Upsilon, \partial\Gamma_f) = \sum_j \|\mathbf{p}_j - \mathbf{q}_j\|^2 \tag{5}$$

전통적인 ICP는 식 (6)을 만족하는 행렬 $\mathbf{T}$를 찾는 것이다.

$$\min_{\mathbf{T}} d(\partial\Upsilon, \mathbf{T}\partial\Gamma_f) \tag{6}$$

비슷한 과정이 두 점 $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1, r_1, g_1, b_1)^T$, $\mathbf{p}_2 = (x_2, y_2, z_2, r_2, g_2, b_2)^T$ 사이의 거리가 색 정보를 추가적으로 반영하도록 수정함으로써 텍스쳐의 정렬

에도 적용될 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 *Colored ICP*[12]와 비슷한 식 (7)의 거리척도를 사용한다.

$$d_6(\mathbf{p}_1,\mathbf{p}_2)=\begin{bmatrix}(x_1-x_2)^2+w_1(r_1-r_2)+\\(y_1-y_2)^2+w_2(g_1-g_2)+\\(z_1-z_2)^2+w_3(b_1-b_2)\end{bmatrix}^{1/2} \tag{7}$$

w_i의 값은 실험을 통하여 $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ 을 사용하였다.

초기의 정렬을 단지 가장자리 영역만을 사용하기 때문에 항상 모델의 context에 맞는 답을 주지는 않는다(예를 들어, Fig. 1에서 산타클로즈 모델은 대칭변환이 필요하다). 정렬이 전체적인 context에 들어맞지 않는다면, 사용자는 자동적인 정렬 과정 후에 회전, 이동, 또는 대칭변환을 본 시스템을 통해 수행할 수 있다.

6.2 포아송 방정식

편미분 방정식(PDE)은 많은 가시적 계산(visual computing)분야에서 응용되어 왔다. PDE 방법은 그래픽 물체를 경계제약조건을 이용하여, 특정한 elliptic PDE의 해로써 모델링하는 것이다. PDE 모델은 모델의 내부 정보를 복구하기 위해 단지 경계조건 만을 이용하며, 에너지 최소화 성질뿐만 아니라 높은 연속성을 제공한다. 이를 본 연구에 적용하면 높은 유사도를 가지는 곡면의 형상과 외관을 이용하여 PDE를 풂으로써 홀 패치를 부드럽게 메울 수 있다.

본 문제를 해결함에 있어, 두 점집합을 경계조건을 이용하여 부드럽게 잇기 위해 우리는 식 (8)과 같이 Dirichlet 경계조건을 가지는 포아송 방정식을 선택하였고[23,32], 이는 이차 편미분 방정식 이번서, 계산이 다른 편미분 방정식에 대해 상대적으로 효율적인 방법이다.

$$\nabla^2 f = \mathrm{div}\mathbf{h} \text{ over } \Omega, \text{ with } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega} \tag{8}$$

여기서 $\mathbf{h}$는 guidance 벡터장이며, $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$, div$\mathbf{h}$는 $\mathbf{h}$의 발산이다. 위의 포아송 방정식 (8)은 식 (9)의 최소화 문제의 해임이 증명될 수 있다.

$$\min_f \int_\Omega \|\nabla f-\mathbf{h}\|^2, \text{ with } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega} \tag{9}$$

만약 guidance 벡터장 $\mathbf{h}$가 guidance 함수 g의 그레이디언트라면(즉, $\mathbf{h} = \nabla g$ 라면), 일종의 보정 함수 $\tilde{f} = f - g$ 를 정의할 수 있다. 이를 적용하면 포아송 방정식은 식 (10)와 같이 경계조건을 가지는 라플라스 방정식이 된다.

$$\nabla^2 \tilde{f} = 0 \text{ over } \Omega, \text{ with } \tilde{f}|_{\partial\Omega} = (f^* - g)|_{\partial\Omega} \tag{10}$$

본 연구에서는, 위의 guidance 함수로써 복사하려는 곡면 패치의 형상과 색 정보를 사용한다(Fig. 10 참조).

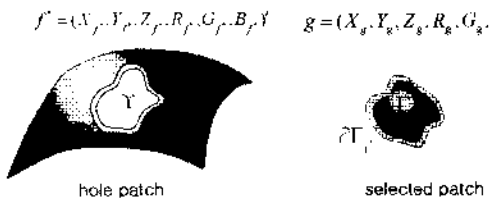


Fig. 10. 가장 비슷한 것으로 판별된 패치는 홀에 맞게 포아송 방정식을 통해 변형되고, 이 때 guidance 함수 는 선택된 패치의 형상과 색 정보가 된다.

6.3 포아송 해석

식 (10)의 라플라스 방정식은 도메인을 선택된 곡면 패치와 홀 패치의 각 점 샘플로 이산화 함으로써 점곡면에 대해 직접 적용할 수 있다. 경계조건을 위해서는, $\partial\Gamma_f$ 에 속하는 각 점 $\mathbf{p}$를 $\partial\Upsilon$의 가장 가까운 점에 매핑한다.

식 (10)의 이산화란, 바로 풀고자 하는 도메인의 이산화를 뜻하며, 라플라스 연산자 $\nabla^2\tilde{f}$ 의 이산화를 의미한다. 이러한 라플라스 연산자는 식 (11)의 *scale-dependent umbrella operator*[8]를 사용해서 근사화될 수 있다.

$$U(\mathbf{p}_i) = \sum_{j=0}^{n} \varepsilon_{\mathbf{p}_i,\mathbf{q}_j} (\tilde{f}(\mathbf{q}_j) - \tilde{f}(\mathbf{p}_j)) \tag{11}$$

여기서 n은 $\mathbf{p}_i$에 이웃하는 점의 개수이며, $\mathbf{q}_j \in$

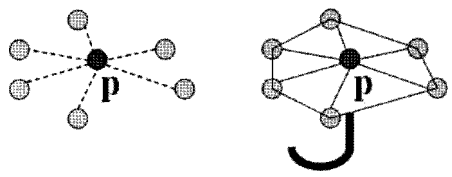


Fig. 11. 각 점에서 라플라시안을 계산하기 위한 umbrella operator.

$N(\mathbf{p}_i)$, 그리고 가중치 $\varepsilon_{\mathbf{p}_i,\mathbf{q}_j}$ 는 $\dfrac{1}{\|\mathbf{q}_j-\mathbf{p}_i\|}/\sum_{k=0}^{n}\dfrac{1}{\|\mathbf{q}_k-\mathbf{p}_i\|}$ 로 점들의 거리에 반비례 하도록 계산된다.

식 (11)에 Γ_f 에 속하는 각 점의 위치와 색을 대입함으로써 sparse linear system $\mathbf{A}\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{b}$ 을 도출할 수 있고, 이는 본 연구에서는 수치적으로 conjugate gradient 방법을 사용하여 해결하였다.

7. 예 제

앞에서 소개한 방법들은 Xeon 2.80GHz의 CPU와 2GB 램으로 구성된 마이크로소프트사의 윈도우즈 XP 환경의 PC에서 개발/테스트 되었다. 우리는 몇 개의 예제들을 테스트 해 보았으며 Table 1에 이 예제들의 성능이 기록되어 있다. Fig. 12는 하나의 큰 홀을 가지는 측정된 부처 모델을 형상과 외관 모두 매끄럽게 수정한 예제를 보여주고 있다. Fig. 13은 날카로운 형상을 가진 rocker arm 예제의 세부형상이 context 정보를 이용하여 자연스럽게 메워진 모습을 보여준다. Fig. 14 역시 주름과 같이 복잡한 형상이 context정보를 이용하여 자연스럽게 복원되었으며, Fig. 16도 마찬가지로 복잡한 형상이 살아 있도록 복구된 모습을

Table 1. 성능 측정

모델	점 개수	홀	매개변수 여부	감지	필링
부처	13,942	1	No	131s	16s
카멜레온	99,835	1	Yes	193s	108s
용	52,982	3	No	53s	32s
이성모델	123,369	3	No	62s	89s
Iphigenie	144,622	3	Yes	104s	361s
남성모델	145,177	6	Yes	153s	653s
Rocker arm	39,501	1	Yes	103s	87s
산타	71,438	3	No	67s	78s

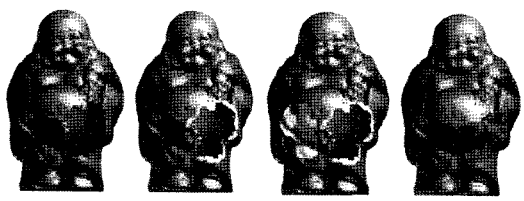


Fig. 12. 사용자의 개입에 의한 부처모델의 수정: (a) 하나의 큰 홀을 가진 입력 점집합; (b) 자동적인 홀 감지 (홀의 경계: 밝은 영역); (c) (형상을 위해) 선택된 곡면 패치가 흰색으로, 그 경계는 짙은 색으로 나타나 있다; (d) 최종 결과.

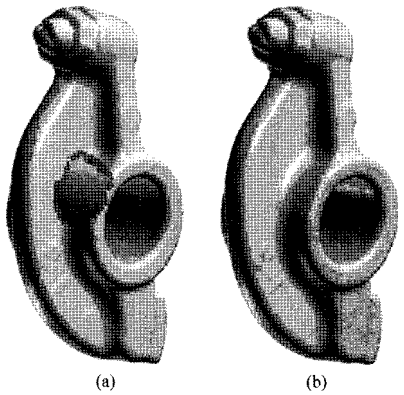


Fig. 13. Rocker arm 모델의 날카로운 형상을 자동으로 수정: (a) 1개의 홀을 가진 원형 점집합; (b) 모델의 context 로부터 날카로운 형상특징 수정.

Fig. 14. 국부 매개변수화을 기반으로 한 Iphigenie 모델의 자동적인 수정: (a) 몇 개의 홀을 가지고 있는 원형 점집합; (b) 자동적인 홀 감지(진한색은 홀의 경계); (c) 모델은 부분 매개변수화에 기반하여 context 정보로부터 자연스럽게 수정되었다.

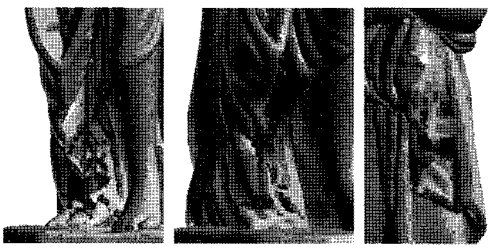
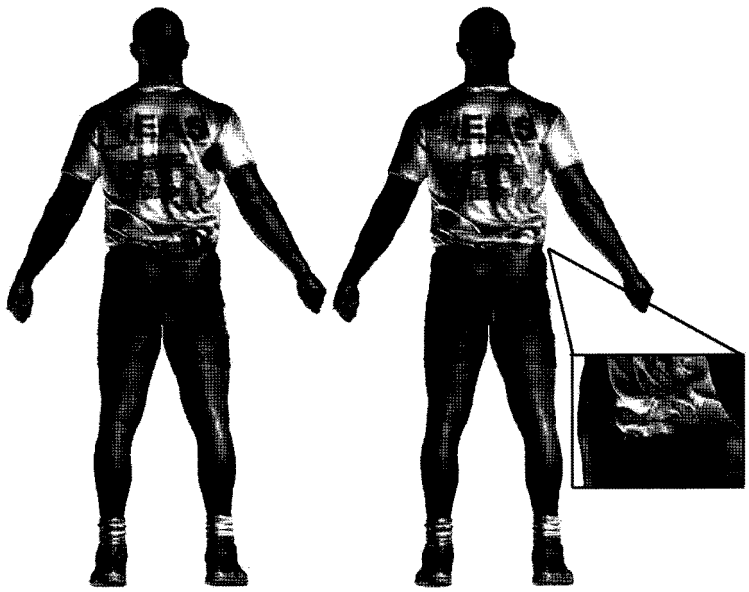


Fig. 15. Fig. 14의 홀이 메꿰진 영역을 확대하여 본 모습; (a) 모델의 좌측 아래에 있는 홀의 필링 결과; (b) 동일한 홀을 모델의 좌측방향에서 바라본 모습; (c) 우측 가운데에 위치한 큰 홀이 메워진 모습.

보여준다. 모든 예제들은 모델이 가지고 있는 context 정보를 복사하여 이용하였다.

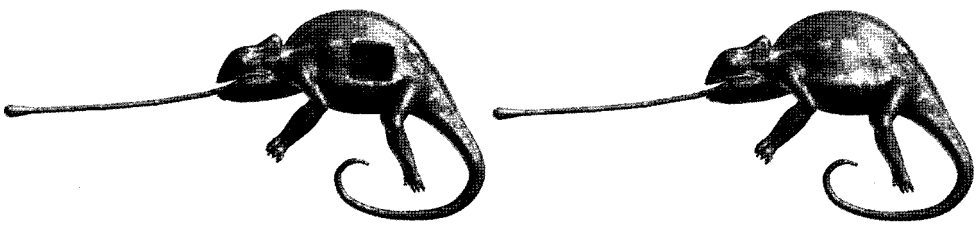
8. 결 론

이 논문에서 우리는 형상과 외관을 모두 수정할 수 있는 새로운 곡면 완성 시스템을 개발하였다. 전체 모델 수정 과정은 홀 감지, 자동적인/수동적인 패치 선택, 잘라내기-붙여넣기 방법을 통한 홀필링으로 구성되어있다. 첫 번째로 우리는 활성 윤곽선방법을 활용하여 잡음이나 결함에도 잘 맞는 홀 감지 방법을 개발하였다. 홀에는 전체 모델이 manifold 모델로부터 추출되었다는 가정 외에는 어떠한 가정도 하고 있지 않으며, 홀이 놓여있는 곡면은 임의의 복잡도를 가질 수 있다. 예를 들어, Fig. 14, Fig. 16의 주름진 영역과 같이 매우 복잡한 형상을 띠고 있을 수도 있다. 홀의 경계곡선 또한 홀의 근처에 위치한 점들의 모임으로써, 일반적으로 매우 거친 형상을 하고 있다. 우리의 시스템은 이러한 홀에 대해 자동적으로 context를 기반으로 하여 형상과 외관을 동시에 수정할 수 있으며, 먼저 두 곡면 패치의 경계를 맞추어 정렬하고, 포아송 방정식을 풂으로써 홀 영역을 채워나간다. 포아송 방정식은 경계에서 최소한 G1 이상의 연속성을 유지하면서 내부의 세밀한 특징형상을 살릴 수 있도록 한다. 또한 자동적인 패치 선택, 정렬, 그리고 변형 과정을 위해서 국부 매개변수화 방법이 활용되었다. 다른 기존연구들과 비교해 볼 때, 이 논문에서 제안하는 방법은 형상 뿐만 아니라 외관까지



(a) (b)

Fig. 16. 국부 매개변수화에 기반한 자동적인 형상과 외관 수정: (a) 원형 모델의 홀이 자동적으로 감지된 모습; (b) 형상과 외관 모두 국부적 매개변수화 방법을 이용하여 수정되었다.



(a) (b)

Fig. 17. 카멜레온 모델의 형상과 외관의 자동적인 수정: (a) 빨간색 점들은 홀 주변의 경계 영역을 나타낸다; (b) 복잡한 외관정보가 매개변수화 방법을 이용하여 모델의 context에 맞게 수정되었다.

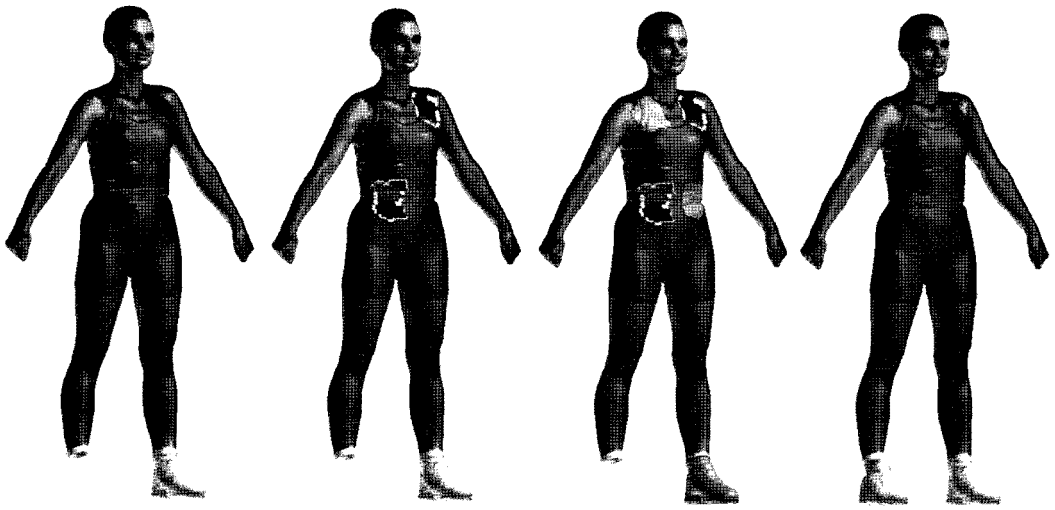


Fig. 18. 사용자의 개입에 의한 여성 모델의 완성: (a) 3개의 복잡한 형상의 홀을 가진 원형 모델; (b) 자동적인 홀 감지(노란색 영역은 홀 경계); (c) 형상복원을 위해 사용자에 의해 선택된 곡면 패치; (d) 최종 결과.

수정할 수 있다는 장점이 있고, 또한 2D 포아송 방정식을 풀기 때문에 다른 볼륨을 이용하는 방법에 비해 상대적으로 효율적이다. 이 곡면 완성 시스템은 모델의 재구성이나 형상 모델링과 같은 분야에 활용될 수 있을 것으로 고려된다.

참고문헌

1. Amenta, N., Bern, M. and Kamvysselis, M., "A New Voronoi based Surface Reconstruction Algorithm", *Proc. SIGGRAPH '98*, pp. 415-421, 1998.
2. Bajaj, C. L., Bernardini, F. and Xu, G., "Automatic Reconstruction of Surfaces and Scalar Fields from 3D Scans", *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 109-118, 1995.
3. Bernardini, F., Mittleman, K., Rushmeier, H., Silvam, C. and Taubin, G., "The Ball-pivoting Algorithm for Surface Reconstruction", *IEEE TVCG*, Vol. 4, pp. 349-359, 1999.
4. Biermann, H., Martin, I., Bernardini, F. and Zorin, D., "Cut-and-paste Editing of Multiresolution Surfaces", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 21, No. 3, pp. 312-321, 2002.
5. Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C. and Evans, T. R., "Reconstruction and Representation of 3d Objects with Radial Basis Functions", *Proc. SIGGRAPH*, pp. 67-76, 2001.
6. Clarenz, U., Diewald, U., Dziuk, G., Rumpf, M. and Rusu, R., "A Finite Element Method for Surface Restoration with Smooth Boundary Conditions", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 5, pp. 427-445, 2004.
7. Davis, J., Marschner, S. R., Garr, M. and Levoy, M., "Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion", *Proc. Intl. Symposium 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 428-438, 2002.
8. Desbrun, M., Meyer, M., Schröder, P. and Barr, A. H., "Implicit Fairing of Irregular Meshes Using Diffusion and Curvature Flow", *Proc. SIGGRAPH*, pp. 317-324, 1999.
9. Edelsbrunner, H. and Mucke, E. P., "Three-dimensional Alpha Shapes", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 13, No. , pp. 43-72, Jan. 1994.
10. Fu, H., Tai, C. and Zhang, H., "Topology-Free Cut-and-Paste Editing over Meshes", *Proc. Geometric Modeling and Processing*, pp. 173-182, 2004.
11. Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W., "Surface Reconstruction from Unorganized Points", *Proc. SIGGRAPH*, pp. 71-78, 1992.
12. Johnson, E. and Kang, S. B., "Registration and Integration of Textured 3-D Data", *Proc. Intl. Conf. Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 234-241, 1997.
13. Ju, T., "Robust Repair of Polygonal Models", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 888-895, 2004.
14. M. Kass A. W. and Terzopoulos, D., "Snakes: Active Contour Models", *Int. J. Comput. Vis.*, Vol. 1, No. 4, pp. 321-331, 1987.
15. Kraevoy, V. and Sheffer, A., "Template-based Mesh Completion", *Proc. Eurographics Symp. Geometry Processing*, pp. 13-22, 2005.
16. Masuda, T., "Filling the Signed Distance Field by

Fitting Local Quadrics," *Proc. Intl. Symp. 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 1003-1010, 2004.
17. Mortensen, E. N. and Barrett, W. A., "Interactive Segmentation with Intelligent Scissors", *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 60, No. 5, pp. 349-384, 1998.
18. Levin, D., "The Approximation Power of Moving Least-squares", *Mathematics of Computation*, Vol. 67, Issue 224, pp. 1517-1531, 1998.
19. Pauly, M., Mitra, N. J., Giesen, J., Gross, M. and Guibas, L. J., "Example-based 3d Scan Completion", *Proc. Eurographics Symp. Geometry Processing*, pp. 23-32, 2005.
20. Podolak, J. and Rusinkiewicz, S., "Atomic Volumes for Mesh Completion", *Proc. Eurographics Symp. Geometry Processing*, pp. 33-41, 2005.
21. Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G. and Seidel, H. P., "Multi-level Partition of Unity Implicits", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 463-470, July 2003.
22. Page, D. L., Koschan, A., Sun, Y., Pail, J. and Abidi, M. A., "Robust Crease Detection and Curvature Estimation of Piecewise Smooth Surfaces from Triangle Mesh Approximations Using Normal Voting", *Proc. Intl. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 162-167, 2001.
23. Perez, P., Gangnet, M. and Blake, A., "Poisson Image Editing", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 313-318, July 2003.
24. Sharf, A., Alexa, M. and Cohen-Or, D., "Context-based Surface Completion", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, pp. 878-887, Aug. 2004.
25. Savchenko, V. and Kojekine, N., "An Approach to Blend Surfaces", *Proc. Computer Graphics International*, 2002.
26. Taubin, G., "Estimating the Tensor of Curvature of a Surface from a Polyhedral Approximation", *Proc. Intl. Conf. Computer Vision*, pp. 902-907, 1995.
27. Verdera, J., Caselles, V., Bertalmio, M. and Sapiro, G., "Inpainting Surface Holes", *Proc. Intl. Conf. Image Processing*, 2003.
28. Wang, B., Wang, W., Yang, H. and Sun, J., "Efficient Example-based Painting and Synthesis of 2d Directional Texture", *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 10, No. 3, pp. 266-277, 2004.
29. Soler, C., Cani, M. P. and Angelidis, A., "Hierarchical Pattern Mapping", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 21, No. 3, pp. 673-680, 2002.
30. Whitaker, R. T., "A Level-set Approach to 3d Reconstruction from Range Data", *Int. J. Comput. Vis.*, Vol. 3, pp. 203-231, Sep. 1998.
31. Xie, H., McDonnell, K. and Qin, H., "Surface Reconstruction of Noisy and Defective Data Sets", *Proc. Visualization*, pp. 259-266, 2004.
32. Yu, Y., Zhou, K., Xu, D., Shi, X., Bao, H., Guo, B. and Shum, H. Y., "Mesh Editing with Poisson-based Gradient Field Manipulation", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, pp. 644-651, Aug. 2004.
33. Zhao, H. K., Osher, S. and Fedkiw, R., "Fast Surface Reconstruction Using the Level Set Method", *Proc. IEEE Workshop on Variational and Level Set Methods*, pp. 194, 2001.
34. Zwicker, M., Pauly, M., Knoll, O. and Gross, M., "Pointshop3d: An Interactive System for Point-based Surface Editing", *Proc. SIGGRAPH*, pp. 322-329, 2002.

박 세 연

2002년 2월 KAIST 산업공학과 학사
2004년 2월 KAIST 산업공학과 석사
2004년 3월~현재 산업공학과 박사과정
관심분야: general geometric modeling, point-based modeling, computational geometry, Bio-CAD

신 하 용

1985년 서울대학교 산업공학과 학사
1987년 KAIST 산업공학과 석사
1991년 KAIST 산업공학과 박사
1991~1993년 LG생산기술원 선임연구원
1993~1997년 (주)큐빅테크 연구소장
1997~2001년 DaimlerChrysler Senior Specialist
2001~2003년 KAIST 산업공학과 조교수
2003년~현재 KAIST 산업공학과 부교수
관심분야: geometric modeling, tool path generation, process planning, computational geometry

Xiaohu Guo

2001년 B.S. degree in Computer Science, University of Science and Technology of China
2004년 M.S. degree in Computer Science, State University of New York at Stony Brook
2006년 Ph.D. degree in Computer Science, State University of New York at Stony Brook
2006~현재 Assistance Professor of Computer Science at University of Texas at Dallas
관심분야: computer graphics, geometric & physics-based modeling, computer animation and simulation, scientific visualization, virtual reality, computer vision

Hong Qin

1986년 B.S. degree in Computer Science, Peking University in Beijing, China
1989년 M.S. degree in Computer Science, Peking University in Beijing, China
1995년 Ph.D. degree in Computer Science, University of Toronto
1995년~1997년 Assistant Professor of Computer and Information Science and Engineering at the University of Florida
1997년~2001년 Assistant Professor of Computer Science at State University of New York at Stony Brook
2001년~2006년 Associate Professor Computer Science at State University of New York at Stony Brook
2006년~현재 Full Professor of Computer Science at State University of New York at Stony Brook
관심분야: geometric modeling, graphics, physics-based simulation, computer-aided geometric design, human-computer interaction