다양체 기반의 변위곡면

윤승현†, 김명수††
서울대학교 컴퓨터공학부
shyun@3map.snu.ac.kr†, mskim@cse.snu.ac.kr††

A Surface Displaced From a Manifold

Seung-Hyun Yoon† and Myung-Soo Kim††
School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요 약

본 논문에서는 다양체 (manifold) 구조와 스칼라 변위함수 (scalar displacement function)에 기반한 새로운 변위곡면 (displaced surface)의 표현기법을 제안한다. 변위곡면은 제어메쉬 (control mesh)의 각 정점에서 변위된 국소적 패치들 (displaced local patches)을 블렌딩 (blending)함으로써 생성된다. 제안된 변위곡면은 점 군 (point cloud)의 형태로 주어진 기하학적 모델을 근사하기 위해서 사용된다. 점 군의 데이터로터 제어메쉬가 생성되고, 점 군의 점들이 제어메쉬의 국소적 패치들 (local patches)에 사영 (projection)되어 각 패치들로 부터의 스칼라 변위함수가 구해지고, 이러한 변위함수들을 최적화 하여 높은 정밀도를 갖는 최종적인 곡면을 생성된다. 점 군의 형태로 주어진 다양한 모델에 대한 실험 결과를 통해서 제안된 근사기법의 효율성과 정밀도가 입증된다. 본 논문에서 제안된 표현 기법은 다 단계 (multi-level) 변위함수를 통해 다중해상도 표현 (multi-resolution representations)과 골격기반 형상변형 (skeleton-driven deformation)등과 같은 다양한 응용들에 효율적으로 사용된다.

1. 서론

최근들어, 스캐닝 (scanning)기술의 눈부신 발전에 힘입어, 실 세계로부터 정확하고 상세한 (detailed) 기하학적 데이터를 얻기가 용이해 졌다. 그러나, 현재의 스캐닝 시스템은 점 군이나 다각형 메쉬형태의 이산적 데이터만을 제공하고 있다. 이러한 데이터들은 비정규성 (irregularity), 불연속성 (discontinuity) 그리고 방대한 데이터의 양 (huge size)과 같은 문제점으로 인해 실제 다양한 응용들에 적용하기 힘든 한계성을 갖는다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 다양한 메쉬처리 (mesh processing) 기법들이 개발되었다. 대표적인 방법들로는 단순화 (simplification), 평탄화 (smoothing), 메쉬재구성 (remeshing) 그리고 메쉬최적화 (mesh optimization)등의 방법들이 있다 [4, 9, 10]. 그러나, 이러한 방법들은 전적으로 이산적인 데이터들만을 다루며, 기하모델링 및 처리에서 유용한 해석적 (analytic) 표현을 제공하지 못하는 단점이 있다.

Cook [1]은 부드러운 기반곡면 (base surface)위에 변위함수 (displacement function)을 적용함으로써 상세한 형상을 표현하는 독창적인 변위곡면 (displaced surface)을 소개하였다. Krishnamurthy 와 Levoy [15]는 B-spline 곡면을 사용하여 기반곡면을 생성하고, 변위벡터 (displacement vector)를 이용하여 상세한 형상을 표현하였다. 그러나, 이러한 방법은 기반곡면과 변위함수의 경계에서 불연속성의 문제를 갖게 된다. 최근들어, Lee [16]등은 서브디비전 (subdivision) 곡면과 스칼라변위를 이용한 변위곡면을 제안하였다. 이 방법은 서브디비전 곡면의 특성으로 인하여 불연속성과 같은 문제점을 갖지는 않았지만, 여전히 해석적 표현을 제공하지는 못하였다.

본 논문에서는, Ying과 Zorin [19]에 의해서 제안된 다양체 (manifold) 구조에 기반한 새로운 변위곡면을 제안한다. 먼저 주어진 제어메쉬 (control mesh)의 각 정점에서 이웃한 정점들을 보간하는 국소적 패치 (local patch)와 스칼라 변위함수 (scalar displacement function)을 생성한다. 최종 변위곡면은 제어메쉬의 각 정점에서 정의된 패치에 스칼라 변위함수를 적용하고, 이들을 블렌딩함으로써 생성된다.

제안된 변위곡면의 효율성을 보이기 위해서 점 군 (point cloud)의 형태로 주어진 상세한 모델에 대하여 새로운 근사기법이 제안된다. 이러한 근사기법은 제안된 변위곡면의 해석학적 특성과 스칼라 거리함수의 최적화를 기반으로 한다. 제안된 변위곡면은 다 단계 (multi-level) 변위함수를 통한 다중해상도 표현 (multi-resolution representations)과 골격기반 형상변형 (skeleton-driven deformation)등과 같은 다양한 응용들에 효율적으로 사용된다.

본 논문에서 제시한 기법의 주요 장점들은 다음과 같이 요약된다.

- 다양체 기법과 스칼라 변위함수에 기반한 새로운 변위 곡면의 표현기법을 제안한다.
- 제안된 변위곡면의 효율성을 입증하기 위하여, 점군의 형태로 주어진 상세한 기하학적 모델에 대한 정밀한 근사기법이 제시된다.
- 제안된 변위곡면은 다 단계 변위함수를 통한 다중해상도 표현 및 골격기반의 형상변형과 같은 다양한 응용들에 활용될 수 있다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 변위곡면과 다양체를 이용한 곡면생성 기법들에 대한 이전 연구들을 소개하고, 3절에서는 본 논문에서 제안된 변위곡면에 대한 자세한 내용을 설명한다. 주어진 점 군 데이터 모델에 대한 근사기법은 4절에서 소개된다. 다양한 모델에 대한 실험결과와 응용들이 5절에서 제시되고, 끝으로 6절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 관련연구

본 절에서는 변위곡면 (displaced surface)을 사용하는 대표적인 근사기법들과 다양체 (manifold) 구조에 기반한 곡면 생성 기법들에 대한 이전연구들에 대하여 소개한다.

변위곡면을 이용한 근사기법. Krishnamurthy 와 Levoy [15]는 B-spline 패치 (patch)와 변위함수 (displacement function)를 사용하여 임의의 메쉬모델을 근사하는 방법을 최초로 소개하였다. 이 방법은 좋은 결과를 보였지만, 패치들의 가장자리에서 불연속성 (discontinuity)의 문제를 야기하였다.

Lee [16] 등은 서브디비젼 (subdivision) 기반의 변위곡면을 제안하였다. 그들은 서브디비젼 곡면 모델을 생성하고 곡면의 단위 법선 방향의 스칼라 변위 (scalar displacement)를 사용하였다. 변위곡면은 통합된 서브디비젼 기반하에 생성되었으나, 이 방법 또한 변위곡면에 대한 해석적 (analytic) 표현을 제공하지 못하였다.

Jeong과 Kim [13]은 점 군 (point cloud) 데이터로 부터 서브디비젼 기반의 변위곡면을 생성하는 기법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 제한된 위상구조 (genus 0)를 갖는 모델에 대해서만 적용할 수 있었다. 최근 이러한 방법을 확장하여, Kim과 Kim [14]은 임의의 위상구조를 갖는 물체에 대한 서브디비젼 기반의 변위곡면을 생성하는 기법을 제안하였다. 이 방법은 점 군의 데이터를 근사하기 위해서 버터플라이 (butterfly) 서브디비젼 기법과 최소자승법 (moving least-squares)을 사용하였다.

다양체 기반의 곡면 생성. Grim 과 Hughes [7]는 임의의 위상구조를 갖는 곡면을 생성하기 위해서 다양체의 개념을 사용하였다. 그 후 이러한 기법은 곡면의 매개화 [5]와 점 군 데이터에 대한 곡면의 근사 [6]에 사용되었다.

Cotrina와 Pla [2]는 C^k 곡면을 생성하기 위하여 비정규 (irregular) 정점에 대한 정규한 별 모양의 형상 (regular star-shaped configuration)과 중첩된 차트들(charts) 사이의 다항식 기반의 전이함수 (transition function)을 제안하였다. 생성된 곡면은 가장자리에서 B-spline의 표현을 갖고 일반화된 B-spline 곡면으로 보여질 수 있다. 자유 곡면 생성에 대한 보다 일반적인 접근법이 Cotrina [3] 등에 의해 제안되었다. 그들은 3가지 형태의 일반적인 곡면 생성 알고리즘을 제안하였으나, 복잡한 전이함수가 사용되었다.

보다 단순한 곡면생성 기법이 Ying과 Zorin [19]에 의해서 제안되었다. 그들은 제어메쉬 (control mesh)의 각 정점들에 대해 복소평면에서의 차트를 정의하고, 그들간의 전이함수 (transition function)를 간단한 해석적 표현으로 유도하였다. 이 방법은 C^∞의 연속성과 국소적 형상을 지원하였으며, 생성된 곡면은 외관상 매우 만족스러운 결과를 보였다.

최근들어, 새로운 개념의 다양체 스플라인 (manifold spline)이 Gu [8] 등에 의해 소개되었다. 이 방법은 임의의 위상구조를 갖는 제어메쉬 위에서 정의된 다양체 스플라인에 대한 이론과 계산적 기반를 제공하였으며, 제어메쉬위에 정의된 삼각형 B-spline 곡면의 생성에 대한 실용적인 알고리즘을 제시하였다.

3. 변위곡면의 생성

본 논문에서는 Ying과 Zorin [19]에 의해서 제안된 다양체 (manifold) 구조를 사용한다. 제어메쉬 (control mesh)의 각 정점들에 대해서 차트 (chart)가 정의되고, 차트위에서 단순한 이차식의 국소적 패치 (local patch)와 스칼라 변위함수 (scalar displacement function)가 정의된다. 변위곡면 (displaced surface)은 중첩된 차트들 사이의 변위된 국소적 패치들 (displaced local patches)을 블렌딩(blending) 함으로써 생성된다.

국소적 패치. 먼저 $\mathbf{v}_i$를 제어메쉬의 한 정점이라고 하고 (그림 1(a)) U_i를 해당되는 차트라고 하자. 아래의 다항식 표현을 사용하여, 국소적 패치 $P_i(s,t)$를 각 각의 차트 U_i위에 생성한다. 국소적 패치는 제어메쉬의 $\mathbf{v}_i$의 이웃한 정점들의 위치를 근사함으로써 생성된다.

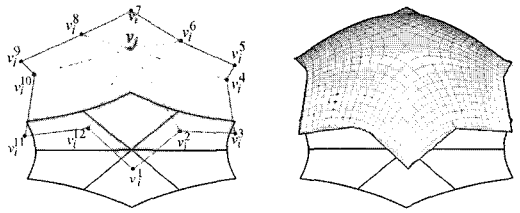
$$P_i(s,t) = \begin{bmatrix} s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{c}_{1,1} & \vec{c}_{1,2} & \vec{c}_{1,3} \\ \vec{c}_{2,1} & \vec{c}_{2,2} & \vec{c}_{2,3} \\ \vec{c}_{3,1} & \vec{c}_{3,2} & \vec{c}_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서 $\vec{c}_{j,k} = \begin{bmatrix} x^i_{j,k} & y^i_{j,k} & z^i_{j,k} \end{bmatrix}^T$ 이다.

식 (1)의 계수 벡터 $\vec{c}_{j,k}$는 제한조건 $P_i(0,0) = \mathbf{v}_i$를 만족하면서 다음과 같은 식을 최소화 함으로써 결정된다:

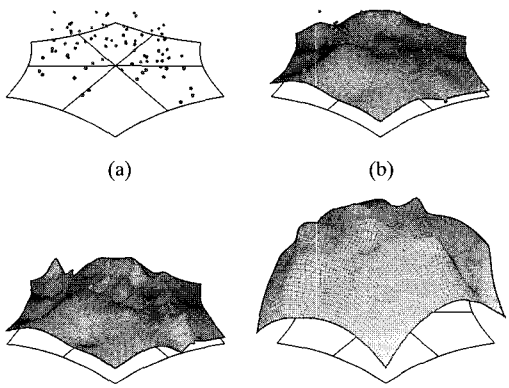
$$L(\vec{c}_{1,1}, \cdots, \vec{c}_{3,3}) = \sum_{k=1}^{2d} \|\mathbf{v}_i^k - P_i(s_k, t_k)\|^2, \quad (2)$$

여기서 d는 정점 $\mathbf{v}_i$의 밸런스 (valence)를 나타내고, $\mathbf{v}_i^k$는 정점 $\mathbf{v}_i$의 k번째 이웃한 정점을 나타낸다. 이 식의 제한조건은 각 차트의 원점에 할당된 정점 $\mathbf{v}_i$의 위치를 보간하기 위해 계수 $\vec{c}_{3,3}$를 $\mathbf{v}_i$로 정해준다. 그림 1(a)는 정점 $\mathbf{v}_i$ 주위의 제어메쉬의 정점들을 나타내고, 그림 1(b)는 정점 $\mathbf{v}_i$의 중심위치를 보간하는 국소적 패치를 나타낸다.



(a) (b)

그림 1: 국소적 패치(local patch): (a) 조정메쉬의 정점들, (b) 조정메쉬의 이웃한 정점들을 근사하는 국소적 패치.



(a) (b)

(c) (d)

그림 2: 변위함수(displacement functions): (a) 임의의 변위값들, (b) 낮은 단계의 변위함수, (c) 높은 단계의 변위함수, (d) 변위된 국소적 패치 $S_i(s,t)$.

스칼라 변위함수. 일단 국소적 패치가 모든 차트에 대해서 생성되면, 스칼라 변위함수 $d_i(s,t)$가 국소적 패치와 점 군 (point cloud)의 데이터 사이의 거리들을 보간함으로써 각 차트 U_i에서 생성된다. 이러한 데이터는 비정규적 (irregular) 형태를 갖기 때문에, 다 단계 B-spline함수에 기반한 비정규 데이터 (scattered-data) 보간방법 [17]이 사용된다. 그림 2(a)는 차트 U_i에 할당된 임의의 스칼라 변위들을 나타내고, 그림 2(b)와 (c)는 각 각 다른 단계의 변위함수들 $d_i(s,t)$을 나타낸다. 그림 2(d)는 이러한 거리함수 $d_i(s,t)$를 국소적 패치 $P_i(s,t)$에 적용한 변위된 국소적 패치 (displaced local patch) $S_i(s,t)$를 나타낸다. 변위된 정점의 위치는 다음과 같은 식을 통해서 계산된다:

$$S_i(s,t) \quad = \quad P_i(s,t) + d_i(s,t) \cdot N_i(s,t), \qquad (3)$$

여기서 $N_i(s,t)$ 는 국소적 패치 $P_i(s,t)$의 단위 법선벡터를 나타낸다.

변위곡면의 생성. 지금까지 각 각의 차트에 대하여 국소적 패치와 스칼라 변위함수을 생성하였다. 본 논문에서는 블렌딩된 부드러운 곡면을 생성하기 위해서 Ying과 Zorin [19]에 의해서 제안된 전이함수와 블렌딩 함수를 사용한다. 블렌딩 함수는 차트의 중심에서 최대값 1 을 갖고 가장자리에서 최소값 0을 갖기 때문에, 국소적 패치의 보간특성 (interpolation property)는 블렌딩된 곡면에서도 유지된다.

최종적인 변위곡면은 국소적 패치에 스칼라 변위함수를 적용하고, 이를 블렌딩 함으로써 얻어진다. 차트 U_i의 주어진 매개변수 z에 대하여 변위곡면위의 점 $D_i(z)$는 식 (4)으로부터 계산된다. 먼저 매개변수 z를 포함하고 있는 모든 중첩된 차트들 $\{U_j\}$를 찾는다. 그리고 각 각의 차트 $\{U_j\}$에서 전이함수 $\theta_{i,j}(z)$를 이용하여 해당되는 전이매개변수 (transition parameter)를 찾는다. 국소적 패치로 부터 변위된 점 $S_j(z)$는 식 (3)로 부터 계산된다. 끝으로, 모든 변위된 점들은 블렌딩 함수 $w_j(\theta_{i,j}(z))$를 사용하여 부드럽게 블렌딩 되어 최종적인 변위곡면을 생성한다:

$$D_i(z) \quad = \quad \sum_{j \in J_z} w_j(\theta_{i,j}(z)) \cdot S_j((\theta_{i,j}(z)), \qquad (4)$$

여기서 z는 국소적 차트 U_i의 매개변수이고, $J_z = \{j | z \in U_j\}$는 인덱스의 집합이고, $w_j(\cdot)$ 가중치의 합이 1이 되는 (partition of unit) 블렌딩 함수이다.

4. 점 군 데이터에 대한 근사

본 절에서는 점 군 (point cloud)의 형태로 주어진 기하학적 모델을 본 논문에서 제안된 변위곡면 (displaced surface)을 사용하여 근사하는 새로운 알고리즘을 제시한다. 근사기법은 세 단계로 진행된다. 먼저 점 군의 데이터로부터 제어메쉬를 생성한다. 점 군의 각 점들은 근처의 국소적 패치 (local patch)에 사영 (projection)되어 사영매개변수 (projection parameter)와 초기 변위값을 갖게 된다. 마지막으로, 이러한 변위값들은 근사오차를 최소화하기 위해서 조절되고, 전체적인 근사 오차를 최소화 하는 최적의 변위함수가 결정된다. 본 논문에서는 제어메쉬를 생성하기 위해서는 기존의 방법들을 이용하였고, 두번째와 세번째 단계에 대한 측면에 중점을 두었다.

제어메쉬. 주어진 점 군 데이터로부터 좋은 제어메쉬를 생성하는 많은 진보된 알고리즘들 [9, 13, 14, 16]이 연구되었다. 본 연구에서는 제어메쉬를 생성하기 위해서 이러한 기존의 기법들을 기반으로 제작된 상용 소프트웨어 패키지 [12]를 사용하였다. 그림 4(a)와 5(a)는 일반적인 점군의 데이터를 나타내고, 그림 4(b)와 5(b)는 이러한 상용소프트웨어를 이용하여 만들어진 제어메쉬를 나타낸다.

점 군의 사영. 일단 제어메쉬가 생성되면 제어메쉬의 각 정점에서 국소적 패치를 생성한다. 기존의 방법들 [13, 14, 16]은 제어메쉬를 이용하여 기반곡면 (base surface)를 생성

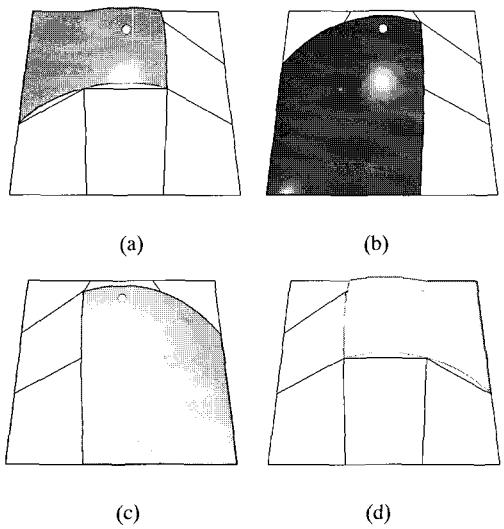


그림 3: 국소적 패치들에 대한 점군의 사영.

하고, 기반곡면으로부터 법선의 방향으로의 대상모델 (target model)까지의 변위를 샘플링 하였다. 그러나 이러한 방법은 대상모델이 다각형 (polygon)화 되어 있어야 하며, 점군의 데이터에는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 방법과는 반대로, 점 군의 각 점 $\mathbf{p}_i$들을 가까운 국소적 패치에 사영하여, 이로부터 스칼라 변위함수를 생성하는 방법을 사용한다. 이러한 방법은 기존의 방법에 비해, 좀 더 정확한 결과를 보장하며 대상 모델의 다각형 정보를 필요로 하지 않는다. 사각형의 제어메쉬를 사용한다고 가정하면, 점군 데이터의 한 점 $\mathbf{p}_i$는 네 개의 패치들 $P_j, j = 0, 1, 2, 3$에 사영될 것이다. 패치에 대한 이차 다항식의 곡면 표현은 이러한 사영의 계산을 매우 용이하게 한다. 그림 3는 점 $\mathbf{p}_i$와 사영될 네 개의 국소적 패치들을 나타낸다.

점 $\hat{\mathbf{p}}_i$을 점 $\mathbf{p}_i$의 제어메쉬상의 가장 가까운 면에 대한 사영된 점이라고 하면, 그 면에서 사영된 점 $\hat{\mathbf{p}}_i$로 부터 가장 가까운 정점 $\mathbf{v}_0$를 찾는다. 정점 $\mathbf{v}_0$에 대응되는 국소적 패치를 $P_0(s,t)$라고 하자. 사영된 점의 매개변수에 대한 초기치 (s_0^0, t_0^0)는 해당되는 면에 사영된 점 $\hat{\mathbf{p}}_i$의 좌표로 부터 구해진다. 이 초기치로 부터 정확한 사영 매개변수 (projection parameter) $(\hat{s}_0, \hat{t}_0)$는 Newton 반복법을 사용하여 구한다.

일단 첫 번째 사영될 패치에 대한 사영 매개변수 $(\hat{s}_0, \hat{t}_0)$가 구해지면, 나머지 세 개의 사영 매개변수 $(\hat{s}_j, \hat{t}_j), j = 1, 2, 3$는 전이함수 (transition function) $\theta_{i,j}$를 사용하여 초기화 되고, 몇 단계의 Newton 반복법의 과정을 통해서 구해지게 된다. 사영 매개변수의 안정성과 정확성을 보장하기 위하여 차트의 범위를 벗어나는 매개변수는 제거된다.

스칼라 변위값 $\hat{d}_j, j = 0, 1, 2, 3$는 각 각의 패치 $P_j(\hat{s}_j, \hat{t}_j)$에서 점 $\mathbf{p}_i$까지의 거리로 계산된다. 이러한 값들은 사영 매개변수 $(\hat{s}_j, \hat{t}_j), j = 0, 1, 2, 3$의 초기 변위값으로 정해진다. 기존의 방법들 [13, 14, 16]에서는 기반 곡면 자체가 해석적 표현을 갖지 않았기 때문에 사영된 점을 찾는것이 어려웠으며, 대신 샘플링 기법을 사용하였다. 국소적 패치의 해석적 표현은 사영과정을 크게 단순화 시켰으며, 다음에 논의될 최적화 방법과 함께 보다 정밀한 근사 결과를 가능하게 한다.

스칼라변위함수 최적화. 일반적으로 네 개의 사영 매개변수 $(\hat{s}_j, \hat{t}_j), j = 0, 1, 2, 3$는 각 각의 차트에서 전이관계 (transition relation)를 만족하지 않는다. 매개변수의 초기 변위값은 각 각의 해당되는 패치로부터 점 $\mathbf{p}_i$까지의 정확한 변위를 나타내지만, 이러한 네 개의 변위값들이 블렌딩 될때, 결과 곡면은 점 $\mathbf{p}_i$를 정확히 보간하지 않게 된다. 이러한 근사오차는 사영매개변수 $(\hat{s}_j, \hat{t}_j), j = 0, 1, 2, 3$가 전이관계를 만족하지 않는데서 기인한다. 이 근사오차를 최소화 하기 위해서는 전이관계를 만족하는 최적의 사영 매개변수들 (s_j, t_j)과 해당되는 변위값들 $d_j, j = 0, 1, 2, 3$을 찾아야한다. 이러한 최적의 매개변수와 변위값들은 다음의 오차 함수를 최소화함으로써 구한다:

$$\Psi(s_0, t_0, d_0, d_1, d_2, d_3) = \|\mathbf{p}_i - \sum_{j=0}^{3} w_j(s_j, t_j) \cdot (S_j(s_j, t_j) + N_j(s_j, t_j) \cdot d_j)\|^2, \quad (5)$$

여기서 매개변수 (s_0, t_0)는 첫 번째 사영매개변수 $(\hat{s}_0, \hat{t}_0)$로 초기화 되고, $(s_j, t_j) = \theta_{i,j}(s_0, t_0)$는 해당되는 전이 매개변수들이다. 변위값 d_j는 $\hat{d}_j, j = 0, 1, 2, 3$로 초기화 되고, 이러한 초기값들로부터 식 (5)를 최소화하는 최적의 값들을 얻게 된다. 이러한 최적화는 6차원 공간의 비선형 최적화 문제이면, 일반적으로 Powell의 방법 [18]과 같은 함수 최적화 방법으로 해결된다. 비록 최적의 매개변수들은 국소적 패치에대한 정확한 사영 매개변수는 아니지만, 근사오차를 최소화하는 값들이 된다.

위에서 언급한 최적화 과정을 통해서 구해진 매개변수와 변위값들은 각 각의 차트에 다시 할당 되고, 이러한 값들을 보간하여 최종적으로 최적화된 스칼라 변위함수가 생성된다.

5. 실험결과

본 논문에서 제안된 변위곡면에 대한 알고리즘은 Pentium-IV(3.2GHz) PC(2GB 메모리) 환경에서 구현되었다. 그림 4과 5는 두 개의 모델들에 대한 근사 과정과 결과들을 나타낸다. 처리시간은 두 부분으로 나누어 진다: 정점의 사영단계에서는 모든 점 군의 점들이 적절한 국소적 패치들 (local patches)에 사영된다. 두 번째 단계에서는 각 각의 차트에 최적화된 거리함수들이 생성된다. 표 1는 각 단계에서의 처리시간 그리고 점 군 데이터와 제어메쉬의 정점의 수를 나타낸다.

제안된 변위곡면의 효율성을 입증하기 위해서 근사된 인체 모델에 대하여 Hyun [11] 등이 제안한 스윕기반 인체형상 변형기법을 적용하였다. 그림 6은 이 방법을 변위곡면의 제어메쉬에 적용한 형상변형의 결과들이다. 이 것은 제안된 표현기법이 인체 모델에 대한 부드럽고 자연스러운 형상변형의 결과를 생성한다는 것을 보여준다.

본 논문에서 제시된 기법은 또한 다 단계 B-spline 함수로 표현된 스칼라 변위함수를 사용하여 다중해상도 표현(multi-resolution representation)을 지원하게 된다. 그림 7는 각기 다른 단계의 변위함수로 표현된 Armadillo 모델의 형상들을 나타낸다. 각 각의 모델에 대하여 단위 크기로 정규화된 모델에 대한 근사 오차 (평균거리)가 표 1의 마지막 두 열에 나열되어 있다.

6. 결론

본 논문에서는 다양체 (manifold) 구조와 스칼라 변위함수 (scalar displacement function)에 기반한 새로운 변위곡면 (displaced surface)을 제안하였다. 제안된 표현기법은 제어메쉬의 각 정점에서 정의된 국소적 패치와 스칼라 변위함수로 구성되어 있다. 이러한 두 가지 형태의 표현들은 상세한 (detailed) 변위곡면을 표현하기 위해서 일관된 방법으로 블렌딩 (blending) 된다. 더욱이 제어메쉬의 국소적 패치들을 블렌딩하여 생성된 기반곡면 (base surface)은 제어메쉬의 정점에 대한 보간성질 (interpolation property)을 갖게된다.

점 군 (point cloud)의 형태로 주어진 상세한 기하학적 모델을 본 논문에서 제시한 다양체 기반의 변위곡면을 사용하여 근사하는 새로운 알고리즘이 제시되었다. 이 기법은 점 군의 사영과 스칼라 변위함수의 최적화에 기반한다는 점에서 기존의 기법들과 차별화 된다. 점 군의 사영기법은 대상 모델 (target model)의 다각형 (polygon)정보에 대한 필요성 없애주고, 최적화 기법은 보다 정밀한 근사결과를 보장하였다. 또한 다 단계 변위함수를 통한 다중 해상도 표현 (multi-resolution representation) 및 골격기반의 형상변형 (skeleton-driven deformation)과 같은 응용을 근사된 변위곡면에 적용함으로써 본 논문에서 제시된 방법의 효율성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(ITRC)의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

[1] R. Cook. Shade trees. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 223–231, 1984.

[2] J. Cotrina and N. Pla. Modeling surfaces from planar irregular meshes. *Computer Aided Geometric Design 17*, 1, 1–15, 2000.

[3] J. Cotrina, N. Pla and M. Vingo. A generic approach to free form surface generation. *Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, 35–44, 2002.

[4] M. Eck, T. DeRose, H. Duchamp, M. Lounsbery and W. Stuetzle. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 303–312, 1995.

[5] C. Grim. Simple manifolds for surface modeling and parameterization. *Proceedings of Shape Modeling International*, 237, 2002.

[6] C. Grim, J. Crisco and D. Laidlaw. Fitting manifold surfaces to 3D point clouds. *Journal of Biomechanical Engineering 124*, 1, 136–140, 2002.

[7] C. Grim and J. Hughes. Modeling surfaces of arbitrary topology using manifolds. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 359–368, 1995.

[8] X. Gu, Y. He and H. Qin. Manifold spline. *Proceedings of the ACM Symposium and Solid and Physical Modeling*, 27–38, 2005.

[9] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle. Surface reconstruction from unorganized points. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 71–78, 1992.

[10] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle. Mesh optimization. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 19–26, 1993.

[11] D.-E. Hyun, S.-H. Yoon, J.-W. Chang, J.-K. Seong, M.-S. Kim and B. Jüttler. Sweep-based human deformation. *The Visual Computer 21*, 8, 542–550, 2005.

[12] INUS TECHNOLOGY. *RapidForm Users Manual*, 2006.

[13] W.-K. Jeong and C.-H. Kim. Direct reconstruction of displaced subdivision surface from unorganized points. *Graphical Models 64*, 2, 78–93, 2002.

[14] S.-J. Kim and C.-H. Kim. Point cloud approximation by displaced butterfly subdivision surfaces. *Proceedings of Israel-Korea Bi-National Conference*, 5–10, 2005.

[15] V. Krishnamurthy and M. Levoy. Fitting smooth surface to dense polygon meshes. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 313–324, 1996.

[16] A. Lee, H. Moreton and H. Hoppe. Displaced subdivision surfaces. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 85–94, 2000.

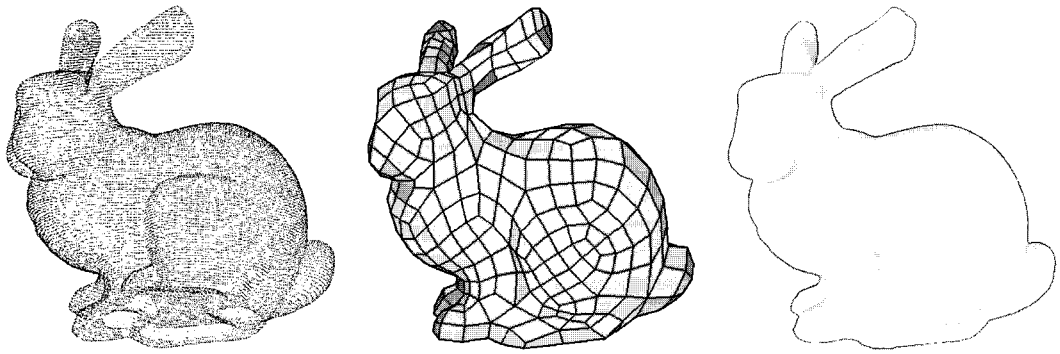
[17] S.-Y. Lee, G. Wolberg and S.-Y. Shin. Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 3*, 3, 228–244, 1997.

[18] W.-H. Press, S.-A. Teukolsky, W.-T. Vetterling and B.-P. Flannery. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1992.

[19] L. Ying and D. Zorin A simple manifold-based construction of surfaces of arbitrary smoothness. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 271–275, 2004.

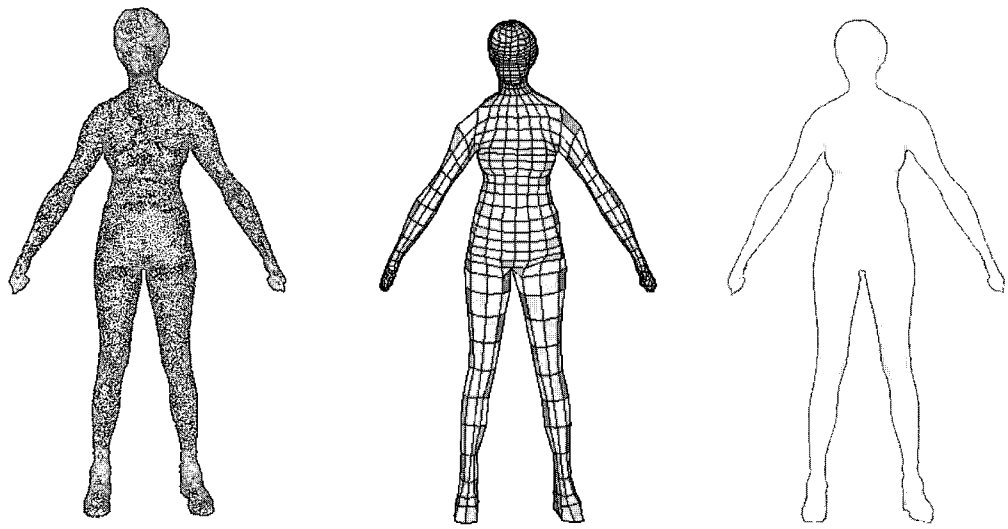
표 1: 근사 결과.

모델	Bunny	Human	Armadillo
점군의 데이터 수	34,834	43,817	159,103
조정메쉬의 정점수	540	1,134	720
사영과 최적화를 위한 시간 (sec)	221.07	318.72	813.72
거리함수를 위한 시간 (sec)	1.43	1.95	4.21
최적화되지 않은 근사오차	$1.78 * 10^{-3}$	$6.86 * 10^{-4}$	$7.84 * 10^{-3}$
최적화된 근사오차	$1.52 * 10^{-4}$	$1.23 * 10^{-4}$	$2.78 * 10^{-4}$



(a) (b) (c)

그림 4: 근사결과: (a) 점 군의 데이터, (b) 조정메쉬, (c) 근사된 변위곡면.



(a) (b) (c)

그림 5: 근사결과: (a) 점 군의 데이터, (b) 조정메쉬, (c) 근사된 변위곡면.

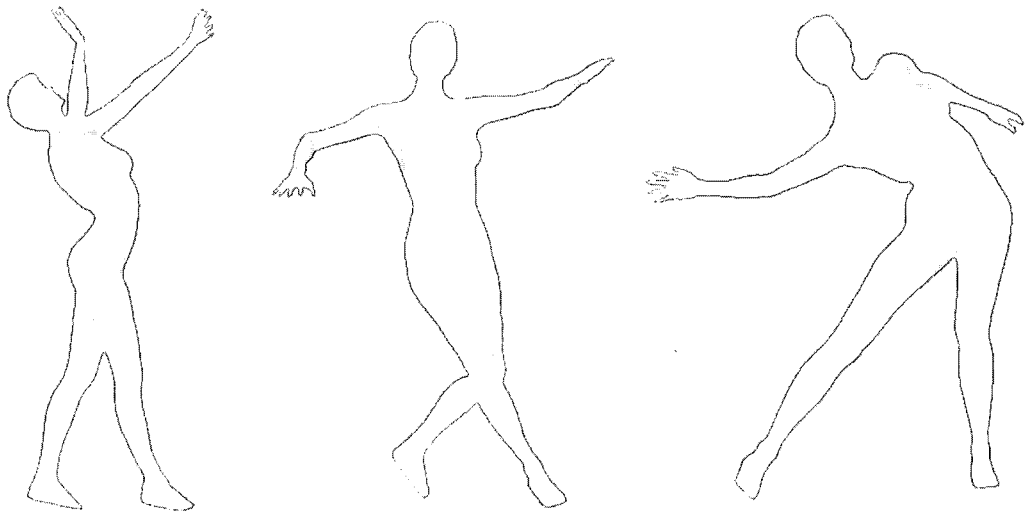


그림 6: 스윕기반 형상변형.

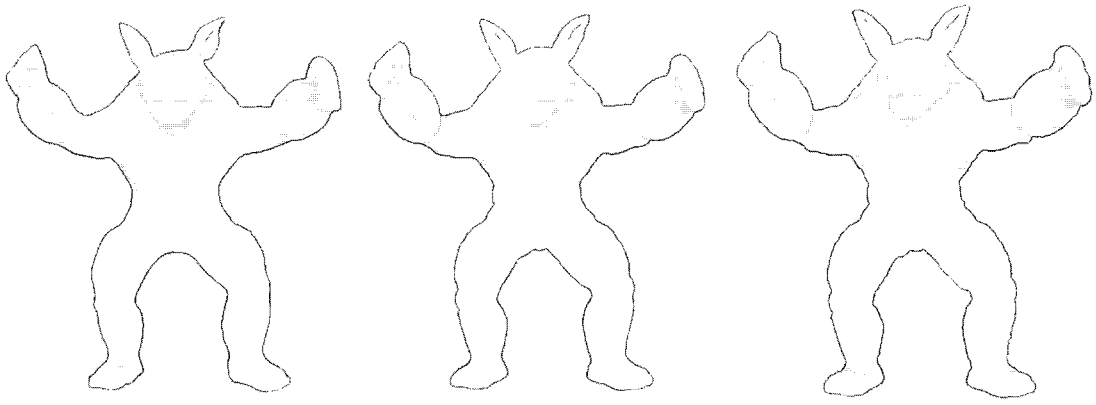


그림 7: 다중해상도 표현.