

거리영상으로부터 DSM 복원 알고리즘

정원기 김창현
고려대학교 컴퓨터학과
{wkjeong, chkim}@cgvr.korea.ac.kr

The reconstruction of a displaced subdivision mesh from unorganized points

Won-Ki Jeong Chang-Hun Kim
Dept. of Computer Science & Engineering, Korea University

요 약

본 논문은 연결정보가 없는 거리영상으로부터 DSM(Displaced Subdivision Mesh)을 복원하는 기술을 제안한다. DSM은 메쉬의 표면정보를 메쉬 분할법으로 생성한 부드러운 표면과의 차이값으로 표현할 수 있으므로 메쉬를 표현하는 데이터 크기를 획기적으로 줄일 수 있으며, 거리영상에 근접한 3차원 모델 복원기술에 효율적으로 적용될 수 있다. 제안 알고리즘은 기존 방법에서 사용하던 전역적 에너지 최소화 과정을 기하해석적인 방법으로 대체하여 빠르게 메쉬를 복원할 수 있으며, 복원된 메쉬는 Remeshing을 거치지 않고 바로 다단계 표현으로 변환이 가능하다. 또한 입력 데이터를 고려한 라플라시안을 이용하여 거리영상에 최대한 근접하면서 지역적인 곡률이 최소화 된 DSM을 생성한다. 이렇게 복원된 DSM은 메쉬 편집, 압축, 렌더링, 애니메이션 등 여러 응용분야에서 사용될 수 있다.

1. 서론

연결정보가 없는 공간상의 점 데이터 집합이 주어졌을 때 이로부터 3차원 모델을 복원하는 기술은 많은 응용분야를 가진다. 광학 레이저를 이용한 거리영상 스캐닝은 일정한 간격으로 물체 표면에 레이저를 쏘아서 깊이 정보를 획득하며 이는 3차원 공간좌표로 변환되어 거리영상을 구성하게 된다. 또한 여러 장의 단면 이미지로 구성되는 의학 볼륨 데이터에서 얻어지는 의과선들에서도 점 데이터들을 획득할 수 있다. 이러한 점 데이터로부터 3차원 모델을 복원해 내는 기술은 복원 대상 물체 M 으로부터 획득한 유한개의 샘플링 데이터 집합 $X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$ 을 이용하여 M 에 가장 근접한 3차원 모델 M' 을 만드는 작업이다.

DSM[5]은 복잡한 메쉬를 메쉬 분할법으로 생성된 부드러운 도메인 표면과 세부 정보로 표현한 메쉬이다. DSM은 파라메트릭 도메인이 간단한 기본 메쉬로 정의되며, 도메인 표면의 연속성이 자동적으로 보장되고, 저장해야 하는 데이터의 크기를 약 1/3정도로 크게 줄일 수 있으며, 메쉬 편집, 압축, 렌더링, 애니메이션 등의 응용분야에 적용되어 효율적으로 사용될 수 있는 많은 장점을 가진다.

본 논문에서는 연결정보가 없는 거리영상에서 DSM을 직접 복원하는 방법에 대해 소개한다. 본 논문에서 소개하는 알고리즘은 기존 방법[1,2,4,7]에서 사용하는 전역적 에너지 최소화 과정을 기하해석적인 방법으로 대체하여 3차원 메쉬를 직관적이고 빠르게 복원할 수 있으며, 복원된 결과는 분할 연결성의 특성을 갖는 3차원 메쉬이므로 Remeshing과정 없이 자동적으로 다단계 메쉬 표현, 메쉬 응용 알고리즘 등에 적용할 수 있다.

2. 관련 연구

2.1 메쉬 복원 기술

연결정보가 없는 공간상의 점 데이터를 3차원 모델로 복원하는 기술은 컴퓨터 비전 및 그래픽스 분야에서 많이 연구되고 있다[1]. Explicit surface를 이용하여 점 데이터에 근접한 표면을 생성하는 기법은 주어진 점을 지나가는 스플라인 곡면과 같은 파라메트릭 곡면을 생성하는 방법이다. Hoppe[2]는 점 데이터를 집평면 및 Marching cube 알고리즘을 이용하여 대략적인 3차원 메쉬를 복원하고 이를 간략화 한 후 Loop 메쉬분할법을 이용하여 분할하여 견고한 메쉬를 생성한다. 이 방법은 위상적 제약이 적은 장점을 가지나 계산량이 많다. Suzuki[8]는 Loop 메쉬분할법은 극한위치를 간단한 수식계산만으로 구해 낼 수 있다는 점을 이용하여 메쉬분할시에 극한위치가 점 데이터와 가장 근접할 수 있도록 매 분할 단계마다 기본 메쉬의 모양을 수정하였다. Hoppe방법보다 계산량이 적은 장점이 있지만 생성되는 메쉬가 세부적인 표현이 부족하다는 단점이 있다. Ramamoorthi[7]는 단순한 기본 메쉬를 주어진 점 데이터에 맞도록 변형하는 기술을 제안하였다. 생성되는 메쉬는 견고하고 우수하나 위상적 제약이 있으며 세부적인 표현은 불가능하다.

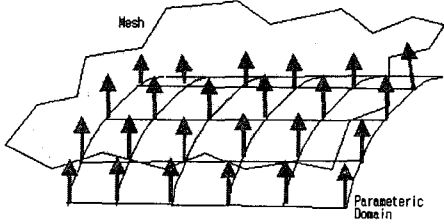
2.2 Subdivision 메쉬와 Displacement Map

메쉬분할법(Subdivision)은 간단한 메쉬의 각 모서리 및 면을 일정한 규칙에 따라 분할하여 새로운 점과 면을 생성하여 부드러운 메쉬를 만드는 기술이다. 메쉬의 종류 및 분할방법

에 따라 여러가지가 있으며[9] 본 논문에서는 삼각형 메쉬를 다루므로 Loop 메쉬분할법[6]을 이용한다.

Displacement Map은 대상 메쉬와 도메인 표면과의 차이값으로 정의되는 메쉬 표현법이다. Krishnamurthy와 Levoy[4]는 B-스플라인 곡면을 파라메트릭 도메인으로 이용하여 메쉬의 세부정보를 표현하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서 사용할 DSM은 Aaron Lee[5]가 제시한 방법으로, Loop 메쉬분할법으로 파라메트릭 도메인을 생성한 후 표면 수직 벡터 방향으로의 차이값을 구하여 세부 정보를 표현한다.



[그림 1] 파라메트릭 도메인으로부터 메쉬까지의 차이값

3. 거리영상으로부터 DSM 복원 알고리즘

제안하는 알고리즘은 다음과 같이 네 단계로 구성된다. 첫째, 입력된 거리영상에 잘 맞는 적절한 기본 메쉬를 생성한다. 둘째, 생성된 기본메쉬를 Loop 메쉬분할법으로 원하는 상세함을 갖는 단계까지 분할을 하여 파라메트릭 도메인을 생성한다. 셋째, 파라메트릭 도메인의 각 점에서 Loop 메쉬분할법으로 구한 극한위치에서의 법선벡터 방향을 구한 후, 거리영상과 차이값이 최소가 되도록 법선벡터 방향으로의 차이값을 구하여 3차원 모델을 초기 복원한다. 마지막으로, 초기 복원된 3차원 메쉬를 거리영상과의 거리를 고려한 라플라시안을 이용한 smoothing으로 최적화 한다.

3.1 기본 메쉬 생성

본 논문에서는 기본메쉬가 평면이나 구의 위상을 갖는 모델을 사용하였다. 기본메쉬가 평면인 거리영상의 경우(지형모델 등) 거리영상의 최대, 최소의 x,y,z값을 구한 후, 최대값과 최소값이 대각선이 되는 사각 평면을 기본 메쉬로 생성한다.



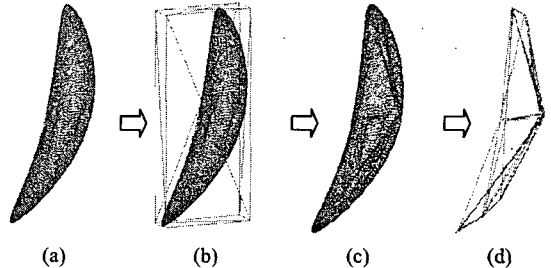
[그림 2] 지형모델 거리영상(a)과 기본메쉬(b)를 생성한 모습

기본메쉬가 구의 위상을 갖는 경우 거리영상을 포함하는 최소 직육면체를 생성한 후 각 면과 모서리를 2~3회 분할한 후 점 데이터와 거리가 최소가 되도록 변형시켜 기본메쉬를 만들 수 있다(그림 3).

3.2 파라메트릭 도메인 생성

기본메쉬가 생성되면 Loop 메쉬분할법을 이용하여 부드러운 파라메트릭 도메인 P를 생성한다. 분할을 많이 할수록 결과가 좋은 메쉬를 복원해 낼 수 있으나 그만큼 계산량이 많아지므로

로 샘플링 할 파라메트릭 도메인의 점의 개수가 입력 받은 거리영상 데이터 개수와 비슷한 정도까지 기본메쉬를 분할한다.



[그림 3] 바나나 모델(a)의 기본메쉬(d) 생성 과정. (b):입력된 바나나모델에 최소 직육면체를 씌운 모습. (d):기본메쉬가 생성된 모습

Even vertex $v' \in V'$ 와 그 1-ring 이웃점 V_k 가 주어지면 Loop 분할법에 의해 새로운 레벨의 점 v^{i+1} 은 다음과 같이 구해진다(수식 1). Odd vertex v^{i+1} 은 분할 될 edge에 인접한 두 면을 구성하는 점의 단순 가중합으로 구해진다[6].

$$v^{i+1} = (a(k) + k)^{-1} (a(k)v' + \sum_{n=1}^k v_n),$$

$$a(k) = \frac{k(1-\alpha(k))}{\alpha(k)} \quad (1)$$

$$\alpha(k) = \frac{5}{8} - \frac{(3+2\cos(2\pi/k))^2}{64}$$

3.3 최적의 차이값 d 계산 및 초기 복원

원래 DSM알고리즘은 메쉬로부터 도메인 표면까지의 차이값을 찾아내는 방법이였으나, 본 논문에서 제시하는 방법은 연결정보가 없는 임의의 거리영상으로부터 도메인 표면까지의 차이값을 찾아야 하는 어려움이 있다. 이를 위해서 거리영상으로부터 파라메트릭 도메인까지의 최소 거리를 이용하여 에너지 함수를 정의하고 이를 최소화 한다.

입력 거리영상 데이터 X와 파라메트릭 도메인 P로 복원되는 메쉬 M' 과의 거리의 제곱으로 정의되는 에너지 함수 E는 다음과 같다.

$$X = \{x_0, x_2, \dots, x_{n-1}\} \quad (2)$$

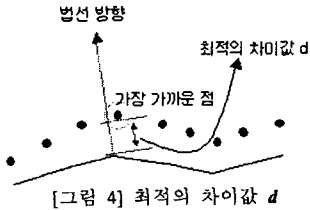
$$M' = P + \sum_{i=0}^{k-1} d_i$$

$$E(d_0, d_1, \dots, d_{k-1}) = \sum_{i=0}^{n-1} \|x_i - M'\|^2$$

여기서 에너지 함수 E의 입력 변수의 개수는 파라메트릭 도메인의 해상도에 따라 결정되며, E가 최소가 되는 각각의 d를 다변수 함수의 최소화 알고리즘에 의해 구할 수 있다. 그러나, 실제로 위와 같이 정의된 에너지 함수를 최소화 시키는 작업은 계산량이 많기 때문에 우리는 다음과 같은 기하해석적인 방법을 이용하여 빠르게 초기 메쉬를 복원한다.

본 알고리즘으로 복원되는 DSM은 도메인 표면 위의 모든 점이 표면 법선 방향으로만 이동 가능하므로, 파라메트릭 도메인 상의 모든 점에서 법선 방향으로의 직선을 구한 후, 각

직선에 대해 거리영상 중에서 최단거리에 있는 점을 구하여 그 점에 최대한 근접할 수 있는 차이값을 대수적으로 구한다.



[그림 4] 최적의 차이값 d

3.4 최적화

앞 절에서 복원된 메쉬는 입력 거리영상에 비교적 근사한 메쉬이나 표면이 고르지 않을 수도 있다. 여기서는 DSM 복원 알고리즘에 적합한 지역적 라플라시안 함수를 정의하고 이를 이용하여 Smoothing을 통해 최적화 된 결과 메쉬를 생성한다. 일반적인 메쉬의 Smoothing은 다음과 같은 반복적인 Gaussian filtering 기법에 의해 수행된다.

$$M^{n+1} = M^n + \lambda L(M^n) \quad (3)$$

메쉬의 한 꼭지점에 대한 이산적인 라플라시안 함수는 이웃 꼭지점의 가중합으로 정의된다[3]. 그러나, 기존의 라플라시안을 그대로 사용할 경우 축소현상이 생기므로 거리영상에 근사하지 않은 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 여기서는 기존 umbrella 연산에 거리영상과의 거리를 고려한 항을 추가하여 다음과 같이 새로이 정의하였다.

$$L(x_i) = (x_{nearest} - x_i) + \frac{1}{m} \sum_{j \in N_i(x_i)} (x_j - x_i) \quad (4)$$

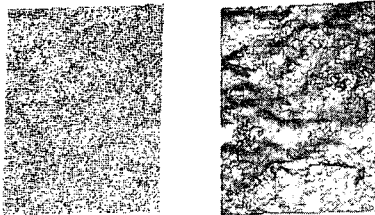
$x_{nearest}$: 입력점 중 x_i 와 최단거리의 점,

$N_i(x_i)$: x_i 의 1-이웃점

이렇게 정의된 라플라시안은 1-이웃점의 평균평면 방향으로의 곡률을 최소화 하려는 힘과 입력 거리영상으로부터 멀어지는 것을 억제하는 힘의 합으로 정의 되었으므로, 거리영상에서 그리 멀어지지 않으면서 표면이 최대한 부드러운 결과를 얻을 수 있다.

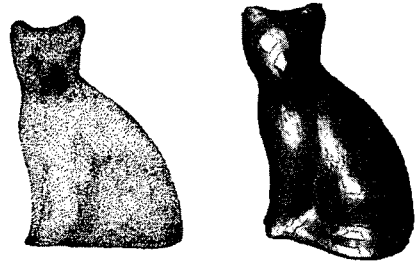
4. 실험 결과

실험 환경은 Pentium II 350CPU 128M의 PC이며, OpenGL, OpenInventor 라이브러리와 Visual C++을 사용하여 구현하였다. 복원 결과는 표 1 및 그림 5, 6과 같다.



(a) 입력 거리영상 (b) 복원된 DSM

[그림 5] Terrain 거리영상의 복원 결과



(a) 입력 거리영상 (b) 복원된 DSM

[그림 6] Cat 모델의 복원 결과

[표 1] 실험데이터 및 수행 시간 (Oct, Cat, Terrain 모델)

모델	데이터			수행 시간(초)			
	거리영상 #V	도메인 #V	도메인 #F	도메인 생성	초기 복원	최적화 (20회)	전체
Oct	9218	4098	8192	28	25	2	55
Cat	23362	4098	8192	53	81	2	136
Terrain	25897	16641	32768	4	1196	5	1205

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 연결정보가 없는 임의의 거리영상을 DSM을 이용하여 3차원 메쉬로 복원하는 방법을 제안하였다. 이렇게 복원된 메쉬는 전역적 최소화 과정을 거치지 않으므로 비교적 빠른 시간 내에 실제 거리영상에 근접한 결과를 얻을 수 있으며, 저장공간을 효율적으로 줄일 수 있다. 또한 이렇게 복원된 메쉬는 분할 연결성이 있으므로 다단계 표현 변환이 쉬우며, 메쉬 편집, 압축, 렌더링, 애니메이션 등의 DSM 응용 분야에 적용되어 효율적으로 사용될 수 있다.

향후 연구로는 임의의 위상을 가진 모델을 복원해 낼 수 있는 기본메쉬를 자동으로 생성하는 기술에 대한 연구가 필요하다.

6. 참고 문헌

- [1] Bolle, R.M., and Vemuri, B.C. *On three-dimensional surface reconstruction methods*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 13 Issue: 1, Jan. 1991, pp.1-13
- [2] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Halstead, M., Jin, H., McDonald, J., Schweitzer, J., and Stuetzle, W. *Piecewise smooth surface reconstruction*. Proceedings of SIGGRAPH 94, Computer Graphics, Annual Conference Series, pp. 295-302.
- [3] Kobbelt, L. *Discrete fairing*. In proceedings of the seventh IMA conference on the mathematics of surfaces '97, pp.101-131.
- [4] Krishnamurthy, V., and Levoy, M. *Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes*. Proceedings of SIGGRAPH 96, Computer Graphics, Annual Conference Series, pp.313-324.
- [5] Lee, A., Moreton, H., and Hoppe, H. *Displaced subdivision surfaces*. Proceedings of SIGGRAPH 2000, pp.85-94.
- [6] Loop, C. *Smooth subdivision surfaces based on triangles*. Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [7] Ramamoorthi, R., and Arvo, J. *Creating generative models from range images*. Proceedings of SIGGRAPH 99, Computer Graphics, Annual Conference Series, pp.195-204.
- [8] Suzuki, H., Takeuchi, S. and Kanai, T. *Subdivision surface fitting to a range of points*. Proceedings of Pacific Graphics 99, pp.158-167.
- [9] Zorin, D., and Schroder, P. *Subdivision for Modeling and Animation*. Course notes of SIGGRAPH 99.