

외곽선을 이용한 고속 3차원 인체모델 재구성

신병석¹, 노 성¹, 정희상¹, 정민석², 이용숙²

¹인하대학교 컴퓨터정보공학과, ²아주대학교 의과대학 해부학교실
(2004년 3월 22일 접수, 2004년 12월 17일 채택)

Fast Reconstruction of 3D Human Model from Contour Lines

Byeong-Seok Shin¹, Sung Roh¹, Hoe-Sang Jung¹, Min Suk Chung², Yong Sook Lee²

¹인하대학교 컴퓨터정보공학과

²아주대학교 의과대학 해부학교실

(Received March 22, 2004. Accepted December 17, 2004)

요약 : 의학 영상 분야에서 인체에 대한 3차원 모델을 생성하는 데는 평행한 2차원 영상위에 있는 외곽선들로부터 원래 물체의 형상을 복원하는 방법이 일반적으로 사용된다. CT나 MR영상을 획득한 후 해부구조물에 대해서 구역화를 하면 외곽선 집합을 얻을 수 있다. 기존의 표면 재구성 알고리즘은 외곽선을 단순 정합이 가능한 부분과 클레프트(cleft)를 나누어 처리하는데, 클레프트를 처리하는 시간이 오래 걸리기 때문에 모델이 복잡할 경우 수행속도가 저하되는 단점이 있다. 본 논문에서는 분기(branch)가 없는 단순영역을 형태에 관계없이 한번에 타일화하고, 분기가 있는 경우에는 한 외곽선의 정점들을 대응하는 외곽선들의 정점개수와 분포를 고려하여 분할함으로써 간단하고 신속하게 타일화하는 방법을 제안한다. 이 기법을 이용하여 해부구조물의 3차원 모델을 생성하는 표면 재구성 시스템을 구현하였다.

Abstract : In order to create three-dimensional model for human body, a method that reconstructs geometric models from contour lines on cross-section images is commonly used. We can get a set of contour lines by acquiring CT or MR images and segmenting anatomical structures. Previously proposed method divides entire contour line into simply matched regions and clefts. Since long processing time is required for reconstructing cleft regions, its performance might be degraded when manipulating complex data such as cross-sections for human body. In this paper, we propose a fast reconstruction method. It generates a triangle strip with single tiling operation for simple region that does not contain branch structures. If there exist branches in contour lines, it partitions the contour line into several sub-contours by considering the number of vertices and their spatial distribution. We implemented an automatic surface reconstruction system by using our method which reconstructs three-dimensional models for anatomical structures.

Key words : surface reconstruction, 3D human model, contour tiling

서 론

CT나 MRI와 같은 단층촬영영상은 인체 내부의 병리구조물을 배우고 진단하는 데 일반적으로 활용된다. 숙련된 의사들은 2차원 영상만으로 3차원 구조를 쉽게 유추할 수 있지만 그렇지 못한 경우는 3차원 영상의 도움이 필요하다. 3차원 인체영상이 있으면 병변의 크기, 위치, 방향을 쉽게 가늠할 수 있어 정확한 진단과 교육이 가능하다.

3차원 영상을 만드는 방법에는 볼륨 기반 방법과 표면 기반 방법이 있다. 볼륨 기반 방법은 2차원 단면 영상들을 쌓아서 얻은 볼륨 데이터에 직접 볼륨 렌더링 기법[1,2,3]을 적용하여 영상을 생성한다. 이 방법은 전처리 과정에서 인체의 3차원 모델을 만들지 않고도 영상을 생성할 수

있으나 렌더링 시간이 많이 걸리는 문제가 있다. 표면 기반 방법은 단면 영상에서 해부구조물의 외곽선을 수동 또는 자동화된 방법으로 추출한 후 외곽선들을 연결하여 본래의 3차원 형상을 복원하는 방법이다. 이 방법은 볼륨 기반의 방법에 비해 기억공간이 적게 소요되고 영상 생성 시간이 짧다는 장점이 있다. 또한 전문적인 해부학 지식을 가지고 있는 의사가 구역화를 하면 인체 내부의 복잡한 물리조직까지 표현하는 정밀 인체 모델을 생성할 수 있다. 생성된 인체 모델은 단순한 영상 생성뿐만 아니라 애니메이션, 시뮬레이션, 변형(deformation) 등에 활용할 수 있다.

표면 기반 방법에는 Marching Cubes[4]와 같이 3차원 볼륨 데이터에서 기하모델을 추출하는 방법과 단면 영상에서 외곽선을 추출한 후 이들을 타일화하여 메쉬모델을 만드는 방법이 있다[5,6,7,8]. 이 논문에서는 평행한 2차원 영상위의 외곽선으로부터 3차원 형상을 자동적으로 복원하는 3차원 모델 재구성 방법을 다룬다. 먼저 인접한 두 단면 영상에 있는 외곽선들의 대응하는 정점을 식별하고 그 정점들을 연결하는 간선을 삽입하여 영상 촬영 과정에서 손

실된 기하정보를 복원한다. 기존의 표면 재구성 알고리즘 중에서 많이 사용되는 Barequet의 알고리즘은 인접한 외곽선 쌍을 검사하여 단순 정합이 가능한 부분과 클레프트 부분으로 나눈다[5,6]. 단순 정합부분에는 간단한 타일화 (tiling) 방법을 적용하여 삼각형 메쉬를 생성하고, 클레프트 부분의 정점들에 대해서는 동적계획법을 적용하여 삼각형화한다[9]. 이 방법은 비교적 정확한 모델을 생성해내는 장점이 있지만 클레프트가 많이 발생하는 복잡한 모델을 생성할 때는 비효율적이다. 인체 해부구조물은 대부분 복잡한 형태를 가지고 있기 때문에 이 방법을 적용하면 처리 시간이 오래 걸릴 수 있다.

본 논문에서는 Barequet 방법을 변형하여 신속하게 3차원 모델을 생성할 수 있는 방법을 제안한다. 외곽선들 간의 대응관계를 결정하는 단계에서 분기의 유무를 쉽게 검출할 수 있다. 분기가 없는 경우는 정합 여부와 무관하게 클레프트를 식별하지 않고 한번에 타일화함으로써 계산시간을 단축시킨다. 분기가 있는 경우는 한 외곽선의 정점들을 대응하는 외곽선들의 정점 개수 비율과 정점의 분포에 따라 분할하여 별개의 외곽선쌍으로 분리한 후 타일화함으로써 복잡도를 감소시킨다.

제안하는 방법으로 각 해부구조물의 3차원 모델을 생성하는 표면 재구성 시스템을 구현하였다. 이것은 의학교육 및 의료영상 분야에 활용할 수 있는 가상 해부 소프트웨어로 활용할 수 있다. 입력 데이터로는 성인 남성 전신의 MRI를 촬영한 후, 다양한 해부구조물들을 구역화한 영상을 활용하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구를 소개하고, 3절에서는 제안하는 방법을 자세히 소개한다. 4절에서는 제안하는 방법을 적용하여 구현한 인체모델 재구성 시스템을 설명하고, 5절에서 실험결과를 보인 후 결론을 맺는다.

관련연구

표면 재구성과 관련된 문제는 대응 문제(correspondence), 타일화 문제, 분기 문제(branching)로 나눌 수 있다[10]. 대응 문제는 임의 개수의 외곽선들을 가지는 두 단면 영상이 있을 때, 한 단면 영상의 외곽선이 인접한 단면 영상의 어느 외곽선과 연결될지를 결정하는 것이다. 타일화 문제는 임의의 형태를 가진 두 외곽선 정점들을 어떻게 연결하여 삼각형 띠 (triangle strip)를 만들어낼 것인지에 관한 문제이다. 분기 문제는 서로 다른 개수의 외곽선이 대응될 경우 어떤 방법으로 타일화를 해야 하는지를 결정하는 것이다.

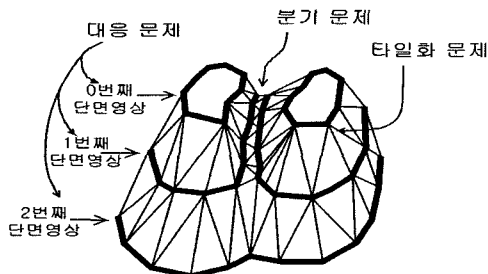


그림 1. 인접한 단면영상에서 발생하는 대응 문제, 타일화 문제, 분기 문제의 예

Fig. 1. An example of correspondence, tiling and branch problems occurred in adjacent slices

단면영상 사이의 거리가 충분히 가까우면 두 단면영상 만으로도 정확한 대응관계를 찾을 수 있지만, 단면영상 사이의 거리가 멀면 선형적 지식(prior knowledge)이나 전역적인 정보(global information)를 이용하여 대응관계를 찾아야 한다[11,12]. 대부분의 표면 재구성 알고리즘에서는 한 단면영상의 외곽선들에 대응되는 인접 단면영상의 외곽선들은 수직 방향으로 투영했을 때 서로 겹친다는 가정을 이용한다[12]. 그림 2는 (a)의 단면들로부터 나온 네 개의 서로 다른 집합 토폴로지(joint topology)들을 보여준다[14].

두 개의 인접한 단면영상의 외곽선들 사이를 타일화 하기 위해서 슬라이스 현(slice chord)을 사용한다(그림 3 참조). 슬라이스 현은 주어진 외곽선의 한 점을 인접한 단면영상 외곽선의 한 점과 연결한 것이다. 타일화된 각각의 삼각형은 두 개의 슬라이스 현과 한 개의 외곽선 부분으로 구성된다[14].

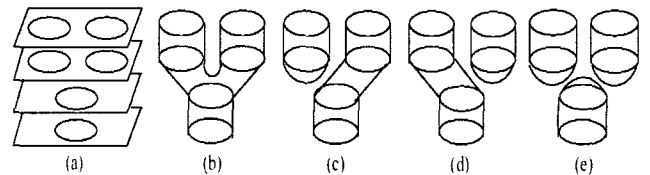


그림 2. 대응 문제의 예 [14] : (a) 인접한 단면들 (b)-(e) (a)와 동일한 단면을 생성하는 집합 토폴로지들

Fig. 2. Four possible joint topologies in several consecutive slices [14] (a) cross section contours (b)-(e) different topologies with the same cross section as in (a)

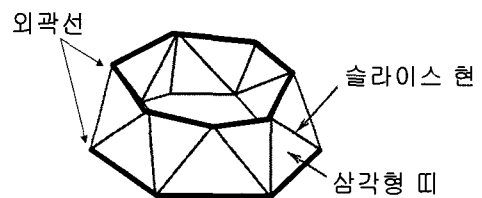


그림 3. 두개의 외곽선으로부터 삼각형 띠를 생성하는 예

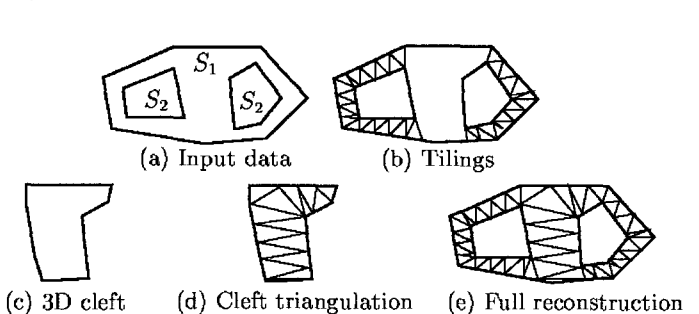


그림 4. Barequet과 Sharir의 표면 재구성 알고리즘

Fig. 4. Surface reconstruction method proposed by Barequet and Sharir

대표적인 표면 재구성 방법으로 Barequet과 Sharir가 제안한 알고리즘이 있다. 그림 4는 이 알고리즘의 개요를 보여준다. (a) 단계에서 두개의 연속된 슬라이스(S_1, S_2) 사이에서 외곽선들을 입력으로 받는다. (b) 단계에서 두 슬라이스의 각 점들 중에서 충분히 가까운 점을 찾아낸 후 부분 곡선 정합 방법(partial curve matching technique)을 이용하여 타일화 한다. (c) 단계에서는 두 슬라이스를 투영한 결과를 이용하여 (b) 단계에서 삼각형화 된 부분을 제거한다. (d) 단계에서는 남은 부분(클래프트)의 점들에 대해서는 3차원 다각형의 최소면적 삼각형화(minimum-area triangulation) 기법을 적용한다 [5,6]. (e) 단계에서 (b)와 (d) 단계에서 구해진 삼각형들을 합치면 표면 재구성이 완료된다. 이 방법의 처리비용은 $O((n+\xi)\log(n+\xi) + \xi h^3)$ 이다. 여기서 ξ 는 클래프트의 개수, n 은 외곽선을 이루는 정점의 개수, h 는 가장 큰 클래프트에 속하는 정점의 개수이다. 여기서 $O((n+\xi)\log(n+\xi))$ 는 외곽선이 중첩되어 있을 경우 계층구조를 찾는 데 드는 비용이고, $O(\xi h^3)$ 는 클래프트를 삼각형화 할 때 드는 비용이다. 따라서 클래프트의 개수가 많고 클래프트에 속하는 정점의 개수가 많은 경우는 처리 시간이 오래 걸리는 문제가 있다.

Bajaj 등은 재구성되는 표면에 세 가지 제약 조건을 정의하고 이 제약들로부터 정확한 대응 규칙과 타일화 규칙을 얻었다[14]. 제약 조건은 이 규칙을 적용하여 타일화된 부분이 실제 물체의 구조를 따르고, 자연스러운 형태를 가지도록 해야 한다는 것이다. 여기서는 다단계 타일화 알고리즘(multipass tiling algorithm)이 사용되기 때문에 복잡한 지역은 나머지 대부분의 영역이 타일화 된 후 마지막으로 처리된다.

한 단면영상에 M 개의 외곽선이 있고, 인접한 단면영상에 N 개의 외곽선이 있을 경우에 분기 문제가 발생한다 ($M \neq N, M, N > 0$). Meyers 등은 분기 문제를 해결하기 위해 분기되는 외곽선을 통합하여 복합 외곽선(composite contour)을 형성함으로써 간단한 일대일 대응 문제로 축소시켰다[12]. 여기서는 외곽선 사이의 협곡(canyon)에 대한 특별한 처리 방법을 제안했다. Bajaj[14]등과 Barequet과 Sharir[5,6]는 복잡한 토폴로지와 외곽선 형태를 가지는 분기 구조를 타일화하는 방법을 제안했다.

표면 재구성 알고리즘

본 논문에서는 Barequet과 Sharir의 알고리즘을 확장하여 클래프트 부분을 따로 처리하지 않는 고속 인체 모델 재구성 알고리즘을 제안한다. 인접한 두개의 단면영상을 S_n, S_{n+1} 이라하고, 각 단면영상에 포함된 외곽선들을 C_i^n, C_i^{n+1} 로 정의한다. 외곽선 C_i 는 정점집합 $\{v(i,j)\}$ 로 구성된다.

1. 대응관계 결정

한 외곽선의 모든 정점들이 나머지 외곽선의 외부에 존재하면 두 외곽선은 대응되지 않는다. 투영한 결과가 겹치는지 알아내기 위해서는 다음과 같은 방법을 사용한다. S_n 의 크기만큼 배열을 정의하고 모두 0으로 초기화 한다. 여기에 Boundary Fill 알고리즘을 이용해서 S_n 의 외곽선과

그 내부에 해당하는 배열요소 값을 1로 만든다. 그리고 나서 S_{n+1} 에 포함되는 외곽선 C_i^{n+1} 의 모든 정점 $v(i,j)$ 에 대해서 S_n 배열의 (i,j) 원소가 1인지 검사한다. 만약 1이 하나라도 있으면 두 외곽선은 겹치는 것이다. 이때 하나의 외곽선에 대응하는 인접 슬라이스의 외곽선 개수가 2개 이상인 경우는 분기가 있는 것으로 판단한다.

2. 타일화

대응되는 두 외곽선 C_i^n 과 C_i^{n+1} 가 정해지면 외곽선의 정점들을 있는 삼각형 띠를 만든다. 한 외곽선의 특정 정점에서 출발하여 대응되는 외곽선의 가장 가까운 정점을 차례로 연결하여 삼각형띠를 생성한다.

1) 최단간선 (shortest edge) 결정

최단간선은 대응하는 외곽선쌍의 정점들을 연결한 간선들 중 가장 짧은 간선을 가리킨다. C_i^n 의 정점들과 C_i^{n+1} 의 정점들은 공간적으로 아무런 연관관계를 가지고 있지 않으므로 먼저 최단간선들을 결정하고 난 후, 그 사이의 정점들을 연결해야 올바른 형태의 삼각형 띠를 만들 수 있다. 최단간선을 결정하는 방법은 다음과 같다. 외곽선 쌍 $\langle C_i^n, C_i^{n+1} \rangle$ 의 정점 리스트들을 각각 $(p_0, \dots, p_{l-1}), (q_0, \dots, q_{l-1})$ 라 하자. 이들은 서로 연결하는 간선 $e(p_i, q_j)$ 의 길이가 임계치 ϵ 이하이면 두 정점은 "정합(match)" 되었다고 하고 그 간선은 정합간선이라 부른다. C_i^n 의 인덱스는 고정된 상태에서 C_i^{n+1} 의 시작 정점 인덱스 j 를 0에서 $l-1$ 까지 증가시키면서 (p_0, \dots, p_{l-1}) 와 $(q_j, \dots, q_{(j+1) \bmod l})$ 사이에서 간선 $e(p_k, q_{(j+k) \bmod l})$ 중 정합되는 간선 수가 극대가 되도록 하는 j 를 찾는다. 여기서 j 는 두 리스트에서의 상대적인 이동치이며 "쉬프트(shift)"라고 한다. 정합간선 수를 극대가 되도록 하는 쉬프트값을 적용했을 때의 간선들 중 가장 짧은 간선을 최단간선으로 정한다. 인덱스 k 가 0에서 $l-1$ 로 증가할 때 그림 5(a),(c)의 경우는 두 외곽선의 시작점이 멀리 떨어져 있어서 각 간선 $e(p_k, q_k)$ 의 길이가 길어지고 정합되는 간선 수가 많지 않다. 여기서는 (b)에서 처럼 쉬프트가 2일 때 정합되는 간선 수가 극대값을 가지게 되고, $e(p_0, q_2)$ 가 최단간선이 된다. 극대값이 여러개가 될 수도 있다. 이 경우에는 각각의 극대값에 대해서 해당 쉬프트를 적용했을 때 나오는 최단 간선들을 모두 저장하여 다음 단계에서 활용한다.

2) 최근접 이웃 정점 연결

생성된 삼각형 띠가 시각적으로 양호한 형태를 가지도록 하려면 띠를 구성하는 각각의 삼각형이 정삼각형에 가깝도록 해야 한다. 한 외곽선의 정점간격이 동일하다고 가정하면 삼각형 띠에 새로운 정점을 삽입할 때 새로 생성된 간선의 길이가 최소화 되도록 하면 된다. 생성 중인 삼각형 띠의 최외곽 간선이 $e(p_i, q_j)$ 일 때 새로 삽입될 정점은 후보정점 p_{i+1} 과 q_{j+1} 중에 하나가 된다. 따라서 이 두 후보정점을 연결한 후에 각 간선의 길이를 비교하여 짧은 쪽의 정점을 삽입한다. $|e(p_i, q_{j+1})| > |e(q_j, p_{i+1})|$ 일 때는 p_{i+1} 이 다음 정점이 되고, $|e(p_i, q_{j+1})| \leq |e(q_j, p_{i+1})|$ 일 때는 q_{j+1} 이 다음 정점이 된다.

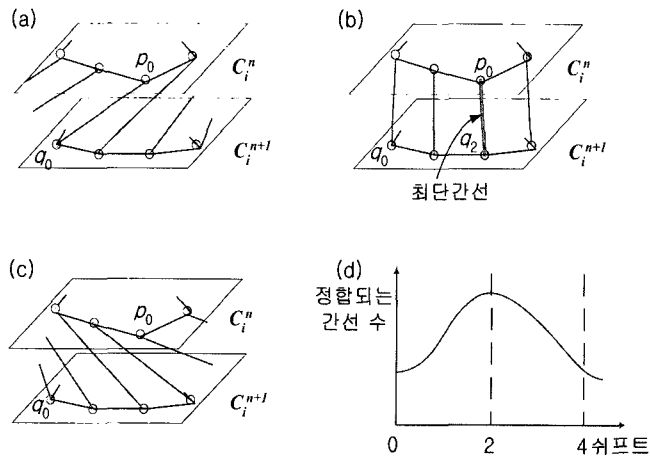


그림 5. 최단 간선을 결정하는 과정 (a) 쉬프트 = 0인 경우 (b) 쉬프트 = 2인 경우 (c) 쉬프트 = 4인 경우 (d) 쉬프트에 따른 정합되는 간선의 개수의 변화
 Fig. 5. Procedure to determine the shortest edge (a) shift = 0 (b) shift = 2 (c) shift = 4 (d) change of the number of matched edges according to shift value

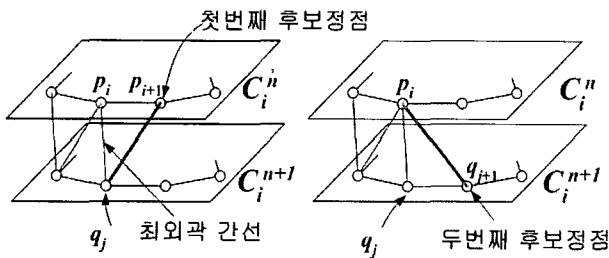


그림 6. 최근접 정점의 선택
 Fig. 6. Determining the nearest neighboring vertex

3. 분기가 있는 외곽선의 타일화

C_i^n 에 N ($N \geq 2$)개의 외곽선 $\{C_i^{n+1}, \dots, C_{i+N-1}^{n+1}\}$ 이 대응될 경우는 분기가 발생한 것이다. 분기가 있는 경우에는 C_i^n 을 N 개의 부분 외곽선으로 분할하고, $\{C_i^{n+1}, \dots, C_{i+N-1}^{n+1}\}$ 에 대응될 부분을 정한 후, 3.2절에서 설명한 방법으로 타일화한다. S_n 의 두 외곽선 C_0^n, C_1^n 이 S_{n+1} 의 한 외곽선 C_0^{n+1} 과 대응되는 경우, 외곽선을 타일화 하는 방법은 다음과 같다.

- ① C_0^n, C_1^n, C_0^{n+1} 에 속하는 정점들로부터 각각 무게중심 G_0^n, G_1^n, G_0^{n+1} 를 구한다. G_0^n, G_1^n 를 잇는 직선과 평행하고 G_0^{n+1} 을 지나는 직선 L_1 을 계산한 후 G_0^{n+1} 에 속하는 정점들 중 직선 L_1 과 가장 가까운 점 v_a, v_b 를 구한다 (그림 7(a)).
- ② 선분 $\overline{v_a v_b}$ 를 C_0^n, C_1^n 의 외접사각형 R_0^n, R_1^n 의 넓이의 비율 ($A_0:A_1$)로 분할하고 그 점을 M 이라 한다 (그림 7(b)).
- ③ M 을 지나면서, 선분 $\overline{v_a v_b}$ 와 수직인 직선 L_2 를 구한다. 다음으로 C_0^{n+1} 에 속하는 정점들 중 직선 L_2 에서 가장 가까운 점 v_c, v_d 를 구한다 (그림 7(c)).

- ④ 선분 $\overline{v_c v_d}$ 위에 외곽선의 정점 간격에 맞춰 공유 정점들을 추가한다. 추가된 정점들을 이용하여 외곽선 C_0^{n+1} 을 $\overline{C_0^{n+1}}$ 와 $\overline{C_0^{n+1}}$ 로 분할한다. (그림 7(d))
- ⑤ 마지막으로 C_0^n 의 정점들은 $\overline{C_0^{n+1}}$ 의 정점들과, C_1^n 의 정점들은 $\overline{C_0^{n+1}}$ 의 정점들과 연결하여 앞서 설명한 단일 외곽선쌍 처리 방법으로 타일화 한다 (그림 7(e)(f)).

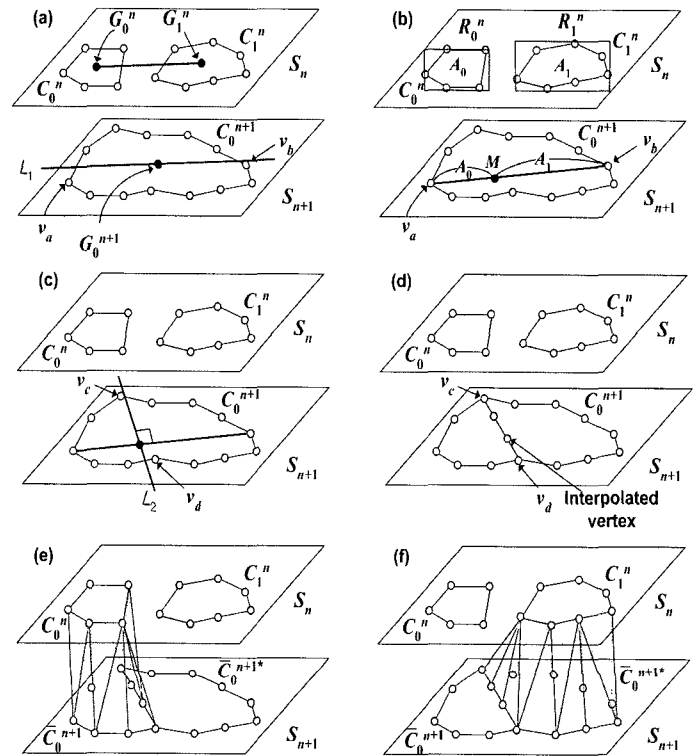


그림 7. 분기가 있는 외곽선의 타일화 과정
 Fig. 7. A procedure for tiling a pair of contour lines that contains a branch.

$N \geq 3$ 인 경우에는 모든 외곽선에 대한 대응관계가 정해 질 끝날 때까지 위에서 설명한 알고리즘을 재귀적으로 적용하여 외곽선을 분할하고 타일화 한다. $M:N$ ($M \neq N, M, N > 1$)으로 대응될 때는 기존의 방법만으로 대응관계를 결정할 수 없는 특수한 경우가 발생한다. 그림 8(a)에서는 인접 단면영상의 대응되는 외곽선이 또 다른 외곽선과 대응되어 간단하게 분할 할 수 없다. 이때는 먼저 S_n 과 S_{n+1} 의 모든 외곽선들을 중간 단면영상 S' 에 투영하여 새로운 단일 중간 외곽선 C' 을 정의한다. 그리고 나서 S_n 의 모든 외곽선과 C' 을 연결하고 S_{n+1} 의 모든 외곽선과 C' 을 연결한다. 이렇게 하면 $M:N$ 대응관계가 $M:1$ 과 $1:N$ 관계로 단순화 되고 앞에서 설명한 방법으로 타일화가 가능하다.

표면 재구성 시스템

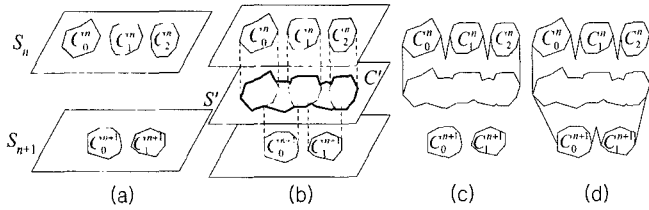


그림 8. M:N분기가 발생할 경우 중간 외곽선을 삽입하여 타일화하는 방법

Fig. 8. A tiling method for reconstructing M:N branch by inserting an intermediate contours between two slices

본 논문에서 제안하는 방법의 수행과정별 비용은 다음과 같다. 먼저, 슬라이스 상의 외곽선이 중첩되어 있을 경우에, 외곽선을 이루는 점점들의 대응관계를 결정하는 데 $O(n \log n)$ 의 비용이 소요된다. 그 다음으로 연결간선을 결정하기 위해 슈프트별 정합되는 간선 수를 계산 하는데 $O(n)$ 의 비용이 소요된다. 마지막으로 연결간선 사이를 타일화 하는데 $O(n)$ 의 비용이 소요된다. 분기가 있는 경우는 무게중심 계산에 $O(n)$, 외접 삼각형 계산과 외곽선 분할점 계산에 $O(1)$ 이 시간이 소요된다. 따라서 이방법의 복잡도는 $O(n \log n)$ 가 되고, 이는 기존 방법의 복잡도 $O((n + \xi) \log(n + \xi) + \xi^3)$ 보다 낮다.

이 방법은 무게중심을 이용하여 분할 위치를 결정하기 때문에 처리가 단순하고 속도가 빠른 반면에 외곽선이 볼록(convex)하지 않은 경우에는 타일링이 부정확하게 되는 문제가 생길 수도 있다. 그 이유는 외곽선의 무게중심이 외곽선의 바깥쪽에 위치할 수도 있기 때문이다. 그러나 무게중심은 대응하는 외곽선의 개수에 따라 점점을 분할하는데 사용되는 중간데이터이기 때문에 매우 심하게 만곡된 외곽선이 아니라면 오목한 외곽선의 경우에도 분기부분의 기하정보를 생성하는데는 큰 문제가 없다. 그림 9는 오목한 외곽선에서 분기가 발생한 경우에 기하정보를 재구성하는 모습을 보여준다.

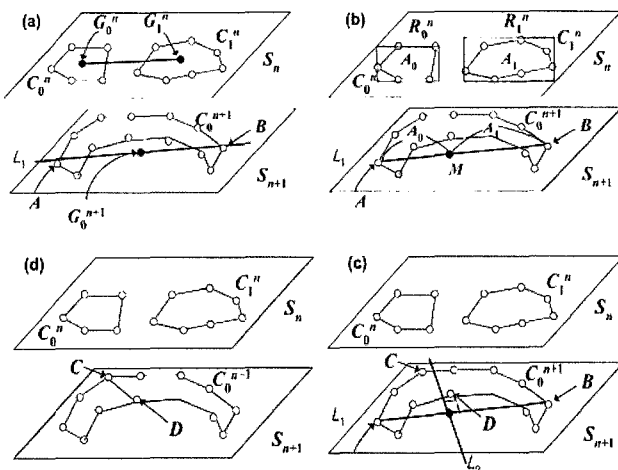


그림 9. 오목한 외곽선에서 분기가 발생한 경우의 표면 재구성
Fig. 9. Surface reconstruction of a branch structure comprising a concave contour

본 논문에서 제안하는 방법의 효율성을 검증하기 위해 표면 재구성 시스템을 구현하였다. 이것은 성인 남성 전신의 MRI를 촬영한 후 다양한 해부구조물의 구역화 영상을 입력하고, 본 논문에서 제안한 표면 재구성 방법으로 3차원 모델을 생성하고 이를 다양한 방식으로 가시화하여 가상해부 소프트웨어와 같이 의학교육 및 의학적 응용에 활용할 수 있는 교육자료를 만드는 데 사용된다.

이 시스템의 처리과정은 그림 10과 같다. 먼저 구역화 영상의 색상 정보를 이용하여 해부구조를 분류하고, 원하는 해부구조물의 외곽선만 찾아낸다. 선택된 해부구조물의 외곽선이 1픽셀 두께를 가지도록 세선화 과정을 거친다. 다음으로 연속된 두 단면영상에서 외곽선들의 대응관계를 결정하고 분기가 있는 경우는 외곽선을 분할한다. 마지막으로 연결된 외곽선들을 이루는 점점들을 타일화 한다. 모든 단면영상에 대하여 삼각형 띠를 만들어 연결하면 원하는 해부구조물의 삼각형 메쉬 모델이 완성된다.

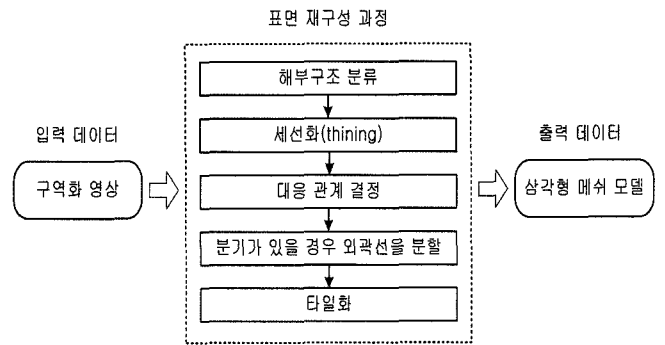


그림 10. 표면 재구성 시스템에서 인체 해부구조 모델 생성 과정
Fig. 10. Procedure of model reconstruction for anatomical structures in our system

표면 재구성 시스템의 입력 데이터로는 그림 11과 같이 인체 해부구조별로 색상 값을 다르게 만든 구역화 영상을 이용한다.

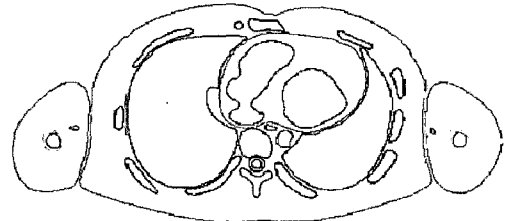


그림 11. 인체 복부 구역화 영상의 예
Fig. 11. An example of segmented image for stomach

실험 결과

실험을 위해 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용해서 구현한 표면 재구성 시스템을 이용하여 여러 가지 해부구조물의 3차원 모델을 만들었다. 인체 모델 재구성 프로그램은 펜티엄IV 2.4GHz CPU와 1GB Main Memory, GeForce 4 Ti 4600 그래픽카드를 장착한 PC에서 구현하였

다. 실험데이터로는 성인 남성의 전신을 512X274해상도로 MRI를 촬영한 후, 다양한 해부구조물들을 구역화한 영상을 사용하였다.

표면 재구성 시스템으로 만든 모델의 정확성을 알아보기 위해서 수작업으로 만든 3차원 모델과 비교하였다. 수작업으로 모델링 하는 방법으로는 3ds max™ 소프트웨어에서 테두리 구역화 영상을 모눈선(grid) 613개 위에 놓은 후 모든 정점들을 직접 지정해서 해부구조물의 3차원 모델을 만드는 방식을 이용하였다[15]. 본 논문에서 제안하는 방법의 유효성을 보이기위해 Barequet과 Sharir가 제안한 방법을 구현하여 동일한 샘플 데이터를 이용하여 기하정보를 재구성하고 소요되는 시간을 측정하였다.

그림 12는 몇가지 해부구조물에 대해서 외곽선 정점들을 수작업으로 3차원 영상을 모델링한 결과(왼쪽)와, 제안한 알고리즘을 적용한 표면 재구성 시스템으로 3차원 영상을 모델링한 결과(오른쪽)를 렌더링한 것이다. 셰이딩 방법에 약간의 차이가 있기는 하지만 기존의 수작업한 모델과 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 그림 13은 인체 기관 중 소화계통과 피부부를 모델링 한 후 렌더링한 모습이다.

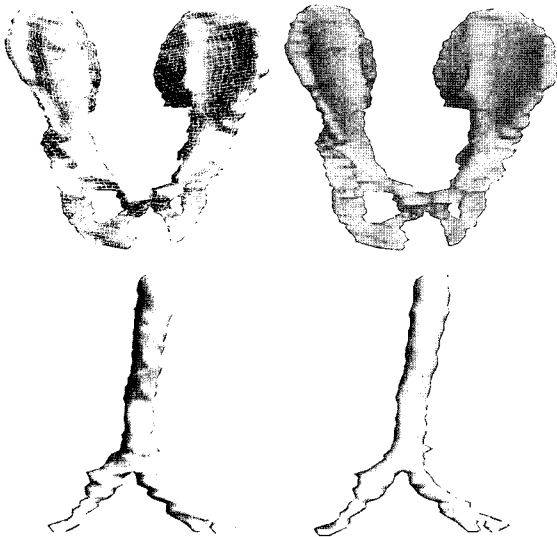


그림 12. 불기뼈(윗줄)와 기관지(아래줄)에 대해 수작업으로 모델링 한 결과(왼쪽)와 표면 재구성 시스템으로 모델링 한 결과(오른쪽)의 비교

Fig. 12. A comparison of the models manually constructed by a designer(left column) and those constructed by our method(right column) for hip bone(top row) and bronchus(bottom row)

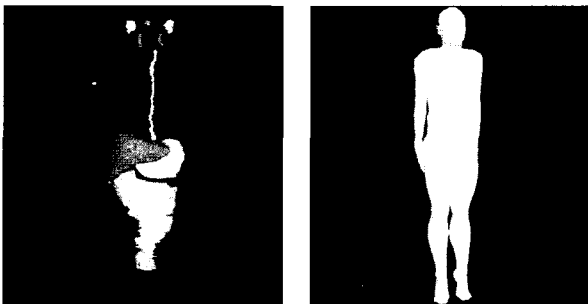


그림 13. 표면 재구성 시스템으로 만든 소화기관 모델과 피부 모델

Fig. 13. Models for digestive system and skin generated by our surface reconstruction system

표 1은 본 논문에서 구현한 표면 재구성 시스템을 이용하여 간, 위, 척수 등의 해부구조물들에 대해서 단면영상들로부터 3차원 모델을 생성하는 데 걸리는 시간을 측정한 결과이다. 수작업으로 모델을 생성하는 데 걸리는 시간과 노력은 매우 크다. 예를 들어, 3ds max™를 잘 다루는 디자이너가 간의 모델을 완성하는 데에는 일주일의 시간이 걸렸다. 본 시스템을 이용하여 간, 위, 척수 등의 모델을 생성하는 데는 입력 데이터의 크기와 관계없이 10초 이하의 시간이 소요된다. 따라서 사용자는 신속하게 모델링된 결과를 확인할 수 있으며 그 결과를 이용하여 좀더 정확한 구역화를 할 수 있다.

표 1. 해부구조 별 모델 생성 시간

Table 1. Reconstruction time for several anatomical structures

해부구조이름	단면영상 개수	삼각형 개수	수행시간(초)
가슴샘	13	526	0.594
간	50	11642	2.219
뇌줄기	15	856	0.735
방광	13	1298	0.656
방패연골	8	353	0.375
소뇌	24	2776	0.703
식도	92	1730	4.094
심장	37	6770	1.812
쓸개	12	454	0.563
위	37	1594	1.594
이자	12	1004	0.562
입안	6	178	0.312
입인두	17	590	0.813
입천장	3	230	0.188
작은창자	95	16946	4.859

그림 14는 인접한 4개의 외곽선을 이용하여 분기 부분을 재구성한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 논문의 방법을 사용하면 빨간색 원으로 표시된 것처럼 분기부분을 좀더 매끄럽게 표현할 수 있다. 표 2는 두가지 방법의 처리시간을 비교한 것이다. 실험에 의하면 본 논문에서 제안하는 방법이 기존 방법에 비해 3배정도 빠른 속도를 보이는 것을 알 수 있다.

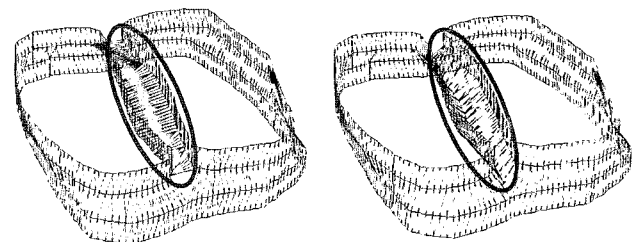


그림 14. 동일한 데이터를 이용하여 Barequet의 방법으로 생성한 모델 (왼쪽)과 본 논문에서 제안하는 방법으로 생성한 모델 (오른쪽)을 비교한 그림

Fig. 14. A comparison of reconstructed models generated by the Barequet's method (left) and our method (right) respectively

표 2. 두가지 방법을 적용한 경우 모델 생성 시간 비교
 Table 2. A comparison of reconstruction time while applying two method

적용한 방법	단면영상 개수	삼각형 개수	수행시간(초)
Barequet의 방법	4	1437	0.047
본 논문의 방법	4	1336	0.015

결론 및 향후연구

본 논문에서는 기존의 표면 재구성 알고리즘에 비해 복잡도가 낮은 알고리즘을 제안하고 이를 실험하였다. 단순 정합되는 부분과 클래프트 부분으로 나누던 기존 방법과 달리, 최단간선들만 결정하여 연결한 후, 그 사이의 정점들을 연결하는 간단한 타일화 알고리즘을 사용한다. 이 방법은 분기가 있는 경우에도 정점 개수와 그들의 공간 분포에 따라 분할하는 방법을 사용하므로 처리 속도가 빠르다.

본 논문에서 구현한 표면 재구성 시스템은 성인 남성의 전신의 MRI 촬영한후 다양한 해부구조물의 구역화 영상을 입력하여 본 논문에서 제안한 표면 재구성 방법으로 3차원 모델을 생성하였다. 표면 재구성 시스템을 통해 생성된 모델의 영상은 수작업으로 만든 모델의 영상과 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 수작업으로 만들 경우에는 오랜 시간과 노력이 걸리는데 반해서 본 논문에서 구현한 표면 재구성 시스템에서는 자동으로 몇 초 만에 3차원 모델이 생성된다. 또한 기존 방법보다도 빠른 시간에 기하모델을 생성할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. M. Levoy, "Display of Surfaces from Volume Data", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 8, no. 3, pp. 29-37, 1988
2. R. Yagel and A. Kaufman, "Template-based volume viewing", Computer Graphics Forum (Eurographics 92 Proceedings), pp. 153-167, Cambridge, UK, 1992
3. P. Lacroute and M. Levoy, "Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation", Computer Graphics (SIGGRAPH 94 Proceedings), pp. 451-458, Orlando, Florida, 1994

4. W. Lorensen, and H. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", Computer Graphics, vol. 21, pp. 163-169, 1987
5. G. Barequet and M. Sharir, "Piecewise-linear interpolation between polygonal slices", Computer Vision and Image Understanding, vol. 63, no. 2, pp. 251-272, 1996
6. G. Barequet, D. Shapiro and A. Tal, "Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices", The Visual Computer, vol. 16, no. 2, pp. 116-133, 2000
7. H. Fuchs, Z. Kedem and S. Uselton, "Optimal surface reconstruction from planar contours", Communications of the ACM, vol. 20, no. 10, pp. 693-702, 1977
8. N. Kehtarnavaz, L. Simar and R. Figueiredo, "A syntactic/semantic technique for surface reconstruction from cross-sectional contours", Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 42, pp. 399-409, 1988
9. G. Klincsek, "Minimal triangulations of polygonal domains", Annals of Discrete Mathematics, vol. 9, pp. 121-123, 1980
10. P. Lederbuch, "Reconstruction of Surfaces from Planar Contours", Computer Engineering and Informatics, pp. 218-223, 1999
11. B. Soroka, "Generalized cones from serial sections", Computer Graphics and Image Processing, vol. 15, no. 2, pp. 154-166, 1981
12. D. Meyers, S. Skinner, and K. Sloan, "Surfaces from Contours", ACM Trans. on Graphics, vol. 11, no. 3, pp. 228-258, 1992
13. A. Ekoule, F. Peyrin, and C. Odet, "A triangulation algorithm from arbitrary topology shaped multiple planar contours", ACM Trans. on Graphics, vol. 10, no. 2, pp. 182-199, 1991
14. C. Bajaj, E. Coyle, and K. Lin, "Arbitrary Topology Shape Reconstruction from Planar Cross Sections", Graphical Models and Image Processing, vol. 58, no. 6, pp. 524-543, Nov. 1996
15. 이용숙, 정민석, 황성배, 왕지남, 유승현, "자기공명 영상의 해부구조를 익히기 위한 3차원 영상과 소프트웨어", 대한체질인류학회지, 16권 3호, pp. 147-164, 2003