

뇌정위 수술계획을 위한 다원 3차원 영상가시화 시스템의 개발

최재정, 김 혁 , 신영길
서울대학교 전산학과

Development of 3D Mutil-volume Visualization System for Stereotactic Surgery

Jae-jeong Choi, Jin Ge , Yeong Gil Shin
Department of Comupter Science, Seoul National University

요 약

뇌정위 수술(Stereotactic Surgery)은 컴퓨터 단층영상과 자기공명 영상 같은 3차원 영상을 이용하여 뇌 병변의 위치를 입체적으로 정확히 파악하여 정상 뇌에 대한 손상을 최소화하며 병변을 수술하는 기법이다. 본 논문에서는 수술 받을 환자의 컴퓨터 단층영상과 자기공명 영상 등 다양한 종류의 3차원 볼륨 데이터를 전 처리한 다음 동일한 3차원 공간 내에서 정렬시켜 선택적 또는 동시에 3차원 영상을 가시화 하는 기법을 제안한다. 또한 3차원 영상에서 뇌정위 수술의 삽입점과 목표점을 지정할 수 있는 기능을 지원하며 수술 경로에 따른 가상 수술의 시뮬레이션을 통하여 수술 경로의 안전성을 검증할 수 있게 하였다.

1. 개 요

최근 뇌질환의 치료에 있어서 최첨단 분야가 바로 뇌정위 수술 분야이다. 뇌정위 수술은 신경외과, 방사선과 등의 전문 의학지식과 컴퓨터 그래픽기술 등의 집약이 필요한 분야이다. 본 논문에서는 컴퓨터 그래픽을 이용하여 뇌정위 수술계획을 위한 다원 3차원 영상 가시화와 시뮬레이션을 효율적으로 구현 할 수 있는 방법을 제안한다.

현재 뇌정위 수술에 사용되는 컴퓨터 단층영상(CT, Computed Tomography)은 영상에 나타난 실제 병변의 3차원적 위치를 정확히 파악할 수 있으나, 뇌의 자세한 해부학적 구조물들을 나타내지 못하는 큰 단점이 있다. 또한 뇌정위 수술의 관건은 수술시 삽입점의 선택과 수술 경로에서 중요한 조직들의 위치이다. 이런 정보를 보여주기 위하여 3차원 영상 가시화와 수술 경로에 따른 시뮬레이션이 필요하다.

뇌정위 수술시스템의 대표적인 예로는 MIT 인공지능연구실의 영상 기반의 수술 프로젝트(Project on Image Guided Surgery)와 캐나다 McGill 대학의 대화식 다원모델링 뇌정위 수술(Multimodality Interactive Stereotactic Image-Guided Neurosurgery)등이 있다[1].

MIT시스템과 McGill시스템의 3차원 모델은 컴퓨터 단층영상과 자기공명 영상(MRI, Magnetic Resonance Imaging) 데이터들을 세그먼트하여 얻어내며 가시화 영상은 다각형 정보들로 구성된 3차원 모델을 표면 렌더링 하여 얻는다.

이런 다각형 렌더링을 사용한 시스템들은 표면 영상을 효율적으로 보여 줄 수 있지만 피부와 뼈, 혈관 등 여러 부분을 동시에 투명하게 보여주는데는 미흡한 점이 있다. 또한 의사들은 컴퓨터 단층영상과, 자기공명 영상 등의 다양한 3차원 영상들을 한 공간 내에서 볼 수 있기를 희망하지만 표면 렌더링은 이런 요구를 만족시키는데는 어려움이 있다. 본 논문에서는 뇌정위 수술계획을 효과적으로 지

원하기 위하여 직접 볼륨 렌더링 알고리즘을 사용한다.

구현된 시스템은 뇌정위 수술시 요구되는 다양한 각도에서의 3차원 영상과 단면 영상을 편리한 인터페이스를 통해 제공한다. 구현된 다원 3차원 영상가시화시스템은 다음과 같은 영상을 제공한다.

1. 임의의 각도에서의 단일 볼륨의 가시화 영상
2. 임의의 각도에서의 컴퓨터 단층영상, 자기공명 영상, 자기공명 혈관영상(MR Angiography) 등의 다원 3차원 가시화 영상.
3. 임의의 3차원 공간에서의 삽입점과 목표점이 주어졌을 때 그 두 점을 포함하는 여러 평면에서의 절단면 영상
4. 임의의 3차원 공간에서의 삽입점과 목표점이 주어졌을 때 그 두 점을 지나는 경로에서의 단면 영상

구현된 시스템은 위와 같은 영상 제공기능이외에도 단면영상이 아닌 3차원 가시화 영상으로부터 수술경로를 효과적으로 지정할 수 있는 기능을 제공한다. 또한 수술 경로에 따라 렌더링한 영상과 애니메이션 기법을 결합하여 가상수술 시뮬레이션을 구현 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다원 3차원 영상들을 중첩가시화하는 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 효과적인 수술계획을 위한 부가기능을 설명한다. 4장에서는 실험 및 결과를 보여주며 5장에서는 결론 및 향후과제를 제시한다.

2. 다원 3차원 영상구현

2.1 단일 볼륨의 가시화영상

뇌정위 수술에 3차원 볼륨 가시화 기법을 사용하기 위해서는 각 데이터의 특성에 따라 필요한 부분만을 추출하여 보여줄 수 있어야 한다. 볼륨데이터는 3차원 공간좌표와 그 좌표에서의 밀도값의 집합으로 볼 수 있다. 볼륨데이터의 추출을 위하여서는 밀도값만 갖고는 부족하다. 물체의 표면특성을 나타내는 것은 밀도값과 기울기(gradient) 즉 밀도값의 변화량이다.

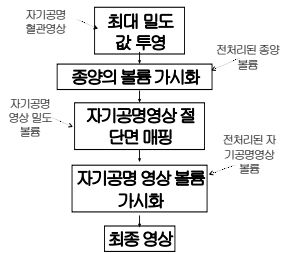


그림 1. 다원 3차원 영상 중첩 가시화 순서도

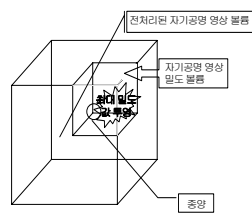


그림 2 다원 3차원 영상 공간 표시도.

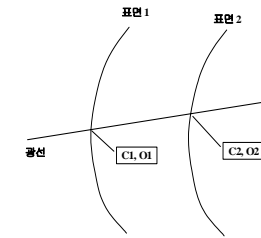


그림 3. 표면에서의 불투명도 누적

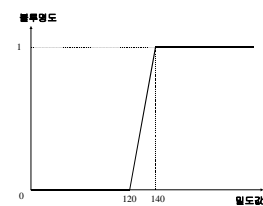


그림 4. 불투명도 변화 방정식

볼륨데이터의 각 복셀에 대해 밀도와 기울기의 크기가 기준치보다 큰 복셀은 불투명한(nontransparent) 그리고 기준치보다 작은 복셀은 투명(transparent)한 복셀로 추출된다.

추출된 볼륨에서 객체 순서 볼륨 렌더링 알고리즘을 사용하여 고화질의 영상을 빠른 시간 내에 만들어내기는 쉽지 않다. 렌더링 속도를 높이기 위하여 본 시스템에서는 쉬어-왁(shear-warp)알고리즘을 사용하였다[2]. 쉬어-왁 알고리즘은 볼륨 데이터를 쉬어 객체 공간으로 투영시켜 중간 영상을 생성하고 다시 왁 연산을 수행하여 최종 영상을 만드는 단계로 구성되어 있다[3].

2.2 다원 볼륨의 가시화 영상

본 시스템의 목적은 혈관, 중앙 주위의 여러 가지 조직들을 도시하여 수술에 도움을 주기 위한 것이다. 따라서 수술에 있어서 중요한 조직들에 우선 순위를 주어 가시화 함으로써 새로운 다원 3차원 영상을 만들어낼 수 있다. 이를 위하여 각각의 볼륨에서 가시화 될 부분을 정의하고 그에 따라 각 영상들을 가시화 함으로써 새로운 영상을 얻을 수 있다.

다원 볼륨 3차원 영상구현에 필요한 3차원 영상으로는 다음과 같은 것들이 필요하다.

1. 자기공명 영상 혹은 컴퓨터 단층 밀도영상
2. 볼륨가시화를 위한 전 처리된 자기공명 영상과 컴퓨터 단층영상
3. 전 처리된 중앙 등의 자기공명 영상과 컴퓨터 단층영상
4. 자기공명 혈관영상

각 3차원 영상들을 하나의 공간에 투영하여 최종 영상을 만들어내는 과정을 그림 1에서 볼 수 있다. 최종적인 영상은 그림 2와 같이 화면에 도시된다.

볼륨의 가시화 영상은 위의 단일 볼륨의 3차원 영상 구현 방법에 의해 얻어진다. 다원 볼륨의 가시화 영상에서 한 화소에 하나의 부분만이 대응하지 않고 최대 밀도값 투영방식(MIP, Maximum Intensity Projection)의 결과, 가시화결과, 단면 영상 등 많은 부분이 누적되어 저장되어야 하기 때문에 각 각에 알맞은 불투명도(opacity)를 누적하며 화소에 반영되어야 한다. 일반적으로 그림 3과 같은 경우에 불투명도는 아래의 식과 같이 누적된다

$$\text{final color} = C1 \cdot O1 + C2 \cdot (1 - O1) \cdot O2$$

위의 식에서 알 수 있듯이 불투명도가 높은 물질을 투과하는 경우에는 그 다음에 기여하는 물질의 기여도가 작아지게 되며 불투명도가 낮은 물질인 경우에는 다음 물질의 기여도가 상대적으로 높아진다. 이렇게 해서 불투명도를 누적해나가게 되며 여러 가지의 물질이 누적되더라도 자연스러운 모양의 영상을 만들어 낼 수 있다[4].

단일 볼륨의 가시화 영상에서 다원 볼륨의 가시화 영상을 만들기 위해서는 다음과 같이 4단계의 작업이 필요하다.

첫 번째 단계는 자기공명 혈관영상을 최대 밀도값 투영방식으로 가시화 하는 것이다 자기공명 혈관영상중 가시화 되는 부분에서 최종 영상의 한 화소에 대응되는 복셀들 중에서 최대 밀도값 투영방식을 이용하여 투영시킨다. 이때 나오는 값을 가지고 불투명도를 정하여 나중에 투영되는 볼륨의 기여 정도를 정하게 된다. 예를 들어 최대 밀도값 투영의 결과 값이 아주 커서 불투명도가 1이 되었다면 앞으로 그 화소에는 어떤 정보도 투영되지 않는다. 반대로 불투명도의 값이 0인 경우에는 아무 것도 가려지지 않

은 것처럼 뒤의 화소들이 보여지게 된다. 이때 실제로 필요한 핏줄 정보 외에 나머지 부분들도 뿌연게 나타난다. 이를 없애기 위해 이진 한계치(binary thresholding)를 이용하여 일정한 값보다 작을 경우에 모두 0으로 처리하면 필요한 정보임에도 없어지는 현상이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 불투명도 변화 방정식(transfer function)을 정의하였다. 예를 들어 밀도값이 120보다 작은 값들은 모두 무시하고 120-140의 값들에 대해서는 일정하게 증가하다가 140보다 큰 값에 대해서는 불투명도를 1로 만드는 불투명도 변화 방정식은 그림 4와 같이 만들어진다. 최대 밀도값 투영을 사용하여 얻어진 혈관영상은 그림 5와 같다.

두 번째 단계는 중앙의 가시화인데 이 단계에서는 중앙을 잘려진 부분에서만 가시화 한다. 중앙과 같은 전 처리된 볼륨들은 쉬어-왁 알고리즘을 통하여 빠른 시간 내에 가시화 영상을 만들어 낸다. 각 복셀을 가시화하기 전에 그 복셀이 잘려진 부분인가를 판단하여 화소에 반영할 것인가를 결정한다. 이때의 밝기 정보는 최대 밀도값 투영방식에서와 같이 밀도정보를 이용하는 것이 아니라 그 복셀에서의 법선 벡터를 가지고 계산하여 사용한다.

세 번째는 자기공명 영상과 컴퓨터 단층 영상을 절단면의 투영하는 단계이다. 자기공명 영상이나 컴퓨터 단층영상 밀도 볼륨에서 영상을 가져와서 축방향(axial), 두부방향(coronal), 시상방향(sagittal) 등 세 방향으로부터 절단면 투영시킨다[5]. 밀도영상의 투영 역시 쉬어-왁 알고리즘을 이용하여 구현하였다. 축방향의 경우 복셀의 위치는 z값이 같고 x, y좌표들이 변한다. 따라서 z 값을 고정시키고 x, y 값을 변화시켜 가며 투영되는 영상에서의 위치를 결정할 수 있다. 그림 6은 절단면과 3차원 영상을 매핑시킨 이미지이다.

네 번째 단계는 자기공명 영상과 컴퓨터 단층영상의 가시화이다. 이 단계에서는 자기공명 영상과 컴퓨터 단층영상의 잘려진 부분을 제외한 나머지 부분의 뼈나 피부 등을 전 처리된 볼륨을 이용하여 가시화 시킨다. 각 단계마다 그 전 단계까지의 합성 결과에 따른 불투명도 정보에 의하여 새로운 영상이 만들어지게 된다.

2.3 3차원 단면 영상

임의의 세 점이 주어지면 그 점들이 하나의 직선에 존재하지 않는 한 하나의 평면이 구성된다. 하나의 평면이 결정되면 3차원 단면 영상으로부터 그 값을 가져와 영상을 만든다. 그러나, 평면을 구성하기 위한 세 점을 직접 입력하는 방법은 효과적이지 못하다. 임의의 두 점을 있는 직선을 포함하는 평면에서의 단면 영상들이 의사들에

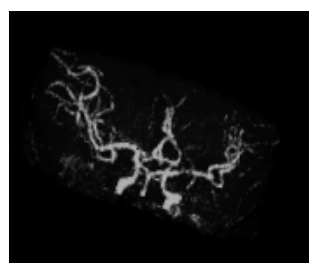


그림 5. 최대 밀도값 투영에 의한 자기공명 혈관영상

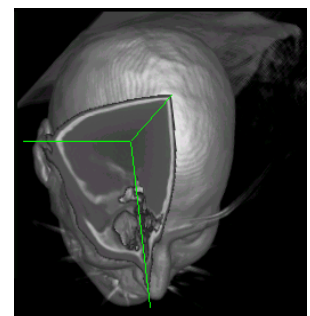


그림 6. 컴퓨터 단층 절단면의 투영 영상

게 더 효과적인 결과를 보여줄 수 있다. 이를 위하여 두 점을 잇는 직선을 x축으로 만들고 그 직선에 수직인 임의의 벡터를 선택하여 y축으로 삼은 뒤 그 두 벡터의 외적(cross product)으로 z축을 만들어서 단면 영상을 얻을 수 있다. 그 영상으로부터 직선을 포함하는 새로운 단면을 만들기 위해서 y축을 x축을 중심으로 하여 일정한 각도만큼 회전시키고 x축과 새롭게 얻어진 y축과의 외적으로 평면의 법선 벡터를 만들어서 절단면을 새롭게 구성할 수 있다.

뇌정위 수술에 필요한 또 하나의 단면 영상은 수술 경로의 단면을 보여주는 것이다. 이때 수술 경로 상의 두 점이 주어지면 그 두 점을 잇는 직선이 보여지게 될 절단면들의 법선 벡터가 된다. 따라서 상수항만 바꿈으로써 새로운 절단면들이 얻어지게 되고 절단면 영상을 얻을 수 있게 된다

3. 뇌정위 수술에 필요한 부가기능

3.1 3차원 영상에서 삼입점과 목표점 지정

기존의 시스템은 수술의 삼입점과 목표점을 선택하는데 있어서 컴퓨터 단층영상, 자기공명 영상 등 2차원 단면영상에서만 가능하였다. 본 시스템은 구현된 3차원 영상에서 직접 삼입점과 목표점 지정이 가능하게 하였으며 2차원 영상에서의 선택도 지원한다.

3차원 영상에서의 삼입점과 목표점의 지정을 위하여 광선 추적법을 사용하였다. 먼저 이미지 평면에서의 한 점의 좌표를 3차원 공간의 좌표로 변환한다. 이 점을 지나면서 시가광선과 평행 되는 광선을 추적한다. 광선에 따라 일정한 간격을 두고 3차원 볼륨데이터에서 밀도값과 기울기 값을 얻어 온다. 이 값들이 불투명한 복셀로 판단되는 기준치보다 크면 광선 추적을 멈춘다. 광선이 멈추어진 위치가 바로 3차원 영상에서 한 점의 공간 3차원 좌표이다[6].

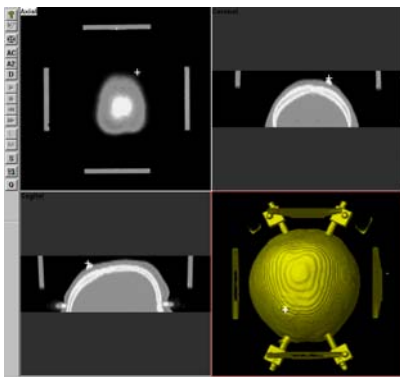


그림 7. 3차원 영상에서의 삼입점 지정

3.2 애니메이션을 이용한 시뮬레이션

뇌정위 수술계획의 마지막 단계는 가상 수술을 진행하는 것이다. 뇌정위 수술의 삼입점과 목표점이 정해지면 수술 경로에 따라 그에 대응한 다원 3차원 영상을 렌더링하여 비파에 저장한다. 만들어진 여러 영상들을 사용자의 요구에 따라 다양하게 보여줌으로써 의사들이 수술 중에 부딪치게 될 상황을 미리 예견할 수 있다.

4. 실험 및 결과

본 시스템은 233MHz의 PentiumII CPU와 128MB 메모리를 장착한 PC에서 개발되었다. 시스템의 입력 데이터는 256X256X225 의 UNC의 bighead 볼륨데이터와 256X256X78 의 자기공명영상 볼륨데이터이다. 위의 볼륨데이터를 사용하여 256X256 크기의 24비트 이미지를 만드는데 걸리는 시간은 단일 볼륨의 경우 1.1초가 걸리고 다원 3차원 영상은 1.5초가 소요되며 단면 영상은 실시간으로 보여줄 수 있다

그림 8, 9, 10, 11은 다원 3차원 영상 중첩 가시화 순서에 따라 가시화될 자기공명 혈관영상, 자기공명 볼륨의 밀도 영상, 전 처리된 자기공명 볼륨의 피부 영상과 중첩 가시화된 다원 3차원 영상들을 보여준 것이다.

5. 결론 및 향후과제

기존의 시스템과 비교할 때 본 논문에서 구현한 시스템은 다원 3차원 영상 구현에서 직접 볼륨 렌더링을 사용하여 사용자의 각도에서 필요하고 다양한 기능을 구현하는데 초점을 두었다. 3차원 영상과 단면 영상의 매핑, 수술 경로에서의 다양한 단면영상의 재구성, 3차원 영상에서의 삼입점과 목표점 선택과 애니메이션을 이용한 가상수술 등은 뇌정위 수술의 성공의 중요한 변수로 된다.

보다 효율적인 뇌정위 수술을 위해서는 수술 경로 상에 존재하는 여러 가지 위험 요소들을 미리 예견할 수 있도록 하는 충돌 검사 기능이 필요하다. 또한 컴퓨터 단층영상 밀도 볼륨에서 가상 내시경의 효과를 원근 투시 화법(perspective rendering)에 의해 구현하는 것도 효과적인 수술계획을 위해 필요할 것으로 생각한다..

6. 참고 문헌

- [1] W.E.L. Grimson, G.J. Ettinger, T. Kapur, M.E. Leventon, W.M. Wells III, R. Kikinis: Utilizing Segmented MRI Data in Image-Guided Surgery In IJPRAI, 1996.
- [2] Lacroute, P., Levoy, M., Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation Proceedings of SIGGRAPH 94, *Computer Graphics* 451-458, July 1994
- [3] Wolberg, G., *Digital Image Warping* IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1990
- [4] Levoy, M., Volume Rendering by Adaptive Refinement *The Visual Computer* 2-7, February 1990
- [5] Gelder, A.V., Kim, K.S., Direct Volume Rendering with Shading via Three-Dimensional Textures, *1996 Volume Rendering Symposium*, 23-30, 1996
- [6] Levoy, M., Efficient Ray Tracing of Volume Data *ACM Transactions on Graphics*, 9(3), 245-261, July 1990

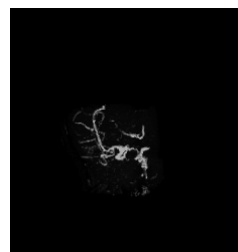


그림 8 가시화 될 자기공명 혈관영상

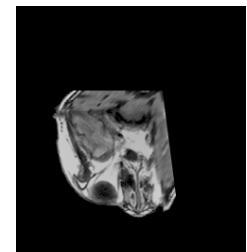


그림 9. 자기공명 볼륨의 밀도 영상

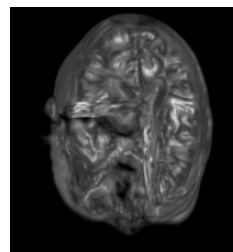


그림 10. 전 처리된 자기공명 볼륨의 피부

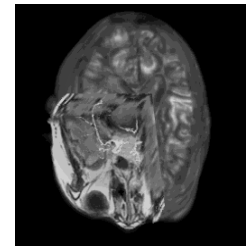


그림 11. 중첩 가시화된 다원 3차원