

## 입자 시뮬레이터와 볼륨 렌더링 기반의 방사선조사계획 시스템<sup>1)</sup>

김아미<sup>0)</sup>, 김승완<sup>1)</sup>, 송주환<sup>2)</sup>, 권오봉<sup>3)</sup>, 김종일<sup>4)</sup>, 홍승우<sup>5)</sup>

† 전북대학교 전자정보공학부

‡ 전주대학교 교양학부, ‡‡ 전북대학교 과학학과, ‡‡‡ 성균관대학교 자연과학부

{midday, ksamsamson}@chonbuk.ac.kr, jwsong@jj.ac.kr, {obgwun, kimbo}@chonbuk.ac.kr, swhong@skku.ac.kr

### Radiation dose plan system based on particle simulation and volume rendering

Kim Ami<sup>0)</sup>, Kim Seungwan<sup>1)</sup>, Song Juwhan<sup>2)</sup>, Gwun Oubong<sup>3)</sup>, Kim Chongyeal<sup>4)</sup>, Hong Seungwoo<sup>5)</sup>

† Chonbuk National University Division of Electronics and Information Engineering

‡ Jeonju University School of Liberal Art

‡‡ Jeonbuk National University Dept. of Science Studies

‡‡‡ Sungkyunkwan University School of Natural Science

#### 요 약

악성 종양은 현대인을 괴롭히는 대표적인 질병의 하나로 이를 치료하는데 흔히 이용되는 것이 방사선치료이다. 방사선 치료에서는 종양세포만을 찾아 방사선을 조사하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 입자 시뮬레이터 Geant4와 볼륨렌더링을 이용하여 이러한 것을 가능하게 하는 방사선조사계획시스템을 제안하고 시스템의 논리적 구조와 구현 시 고려할 사항에 대하여 알아본다. 본 시스템은 Geant4에 있는 다양한 물리(physics)이론을 적용하여 방사선의 물성을 다양하고 정확하게 시뮬레이션 하고, 시뮬레이션으로 구한 방사선량 분포를 볼륨렌더링으로 생성한 영상과 함께 표시하여 사용자가 방사선 치료 계획을 용이하게 세울 수 있도록 한다.

선진국에서는 악성 종양 환자 절반이상이 방사선 치료를 받고 있다.

#### 1. 서론

악성 종양은 1983년 한국인의 사망 원인 1위에 오른 후 꾸준히 증가하여 2004년 전체 사망자 247,000여 명 중 악성 종양 환자가 65,000여 명으로 이로 인한 사망률은 26.3% 이었다. 사망자 4 명 중 1 명이 악성 종양으로 목숨을 잃고 신규 환자는 103,571 명(남 59,010, 여 44,561)으로 전년에 비해 7.7% 증가하였다[1]. 세계보건기구(WHO)가 발표한 2000년 세계현황을 보면 전체 사망자 56,000,000 명 중 악성종양으로 인한 사망이 6,720,000 명으로 이로 인한 사망률은 12%, 대략 사망자 8명 중 1명이 악성 종양으로 목숨을 잃었다. 이에 따라 악성종양에 관한 많은 치료법이 세계적으로 개발되고 있는데 대표적인 치료법 중의 하나가 방사선 치료법으로 1) 본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었습니다.

방사선 치료는 환부 근처의 장기를 보존 할 수 있다는 장점이 있으나 최대의 효과를 얻기 위해서는 종양 세포만을 찾아 방사선을 조사하는 소위 스마트 폭격을 할 수 있어야 한다. 종양 근처의 장기에 손상을 주지 않고 종양 세포만을 제거하기 위해서는 종양세포에는 치사량 이상의 방사선을 조사하고 될수록 주위 세포에는 방사선이 닿지 않아야 한다. 이를 위해서는 인체 내에서 종양의 정확한 위치, 형태, 크기를 파악하고 방사선이 주사되는 위치를 정확히 계산할 수 있어야 한다.

볼륨 렌더링은 생체내의 장기를 삼차원으로 가시화할 수 있는 것은 물론 받침대(gantry), 테이블 등을 가시화하여 보여줄 수 있어 장기 및 장비의 상대적인 위치를 파악할 수 있게 한다. 방사선 치료에서 성공의 관건은 악성조직

에는 이를 파괴할 수 있을 만큼 충분한 방사선을 조사하고 주위 조직에는 영향이 미치지 않도록 하는 것인데 이를 성취하기 위해 방사선이 직진한다는 전제아래 계산을 한다. 그러나 치료 방사선이라 해도 radiotherapy, brachytherapy, hadrontherapy 등[7] 여러 가지가 있고 이의 동작형태도 다양하여 직진한다는 가정만으로는 완벽하게 시뮬레이션을 할 수 없다. 방사선을 모의 실험하기 위하여 만들어진 것 중 지명도가 높은 것으로 Geant4[4]가 있다. Geant4는 몬테카를로 기법을 이용하여 입자가 물체를 통과하는 양상을 시뮬레이션할 수 있는데 이를 이용하면 방사선이 환자의 조직 및 기관, 주변 치료 장치에 미치는 영향을 정확하게 시뮬레이션 할 수 있다.

그리고 현재 병원에서는 의료영상획득장치로 데이터를 획득하고 처리하고 저장하기 위하여 DICOM(Digital Imaging and Communication in Medicine) 형식[8]을 사용한다. 이러한 데이터 형식을 사용하면 연구에 필요한 데이터를 용이하게 획득할 수 있고 이미 존재하는 진단 치료 시스템과 쉽게 통합할 수 있다.

위와 같은 이유에서 본 연구에서는 DICOM 형식의 데이터를 이용하여 영상획득장치로부터 얻은 3차원 단층영상을 볼륨렌더링 기법을 이용하여 분석하고 입자(particle) 시뮬레이터 Geant4로 병반에 미치는 방사선량을 시뮬레이션하여 이들의 합성 영상을 만들어 방사선치료 계획을 세우는 시스템을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 제안하는 시스템의 논리구조 및 기능에

대하여 고찰하고 3 절에서는 시스템의 타당성에 대해 알아보고 마지막으로 4 절에서 결론을 내린다.

## 2. 방사선 치료 계획 시스템의 논리 구조 및 기능

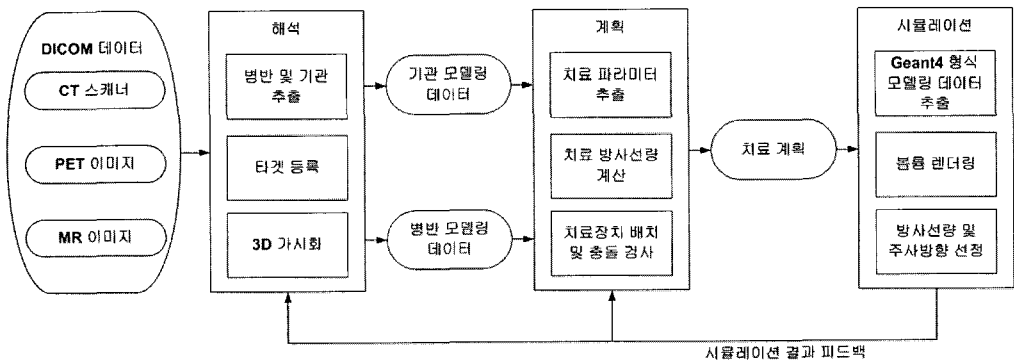
### 2.1 시스템의 논리 구조

제안하는 시스템의 논리 구조는 [그림 1]과 같다. 논리 구조는 의료영상해석, 방사선치료계획, Geant4를 이용한 시뮬레이션으로 구성되며 시뮬레이션 결과는 앞단으로 피드백 되어 의료영상 해석과 방사선치료계획을 점차적으로 수정하는데 사용한다. 피드백은 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 반복된다.

의료영상해석단계에서는 한 환자에 대하여 여러 영상획득장치(CT, PET, MR)로 얻은 영상 데이터를 영상처리와 컴퓨터 그래픽스 알고리즘을 이용하여 공통의 좌표축에 맞추어 일치 시킨 후 필요한 병반에 관한 정보를 추출한다. CT또는 MR 영상으로부터의 병반은 인터랙티브한 자동 또는 반자동 세그멘테이션을 알고리즘을 이용하여 얻은 후, 마칭큐브(marching cube) 알고리즘을 이용하여 다각형으로 모델링하여 가시화할 수 있도록 한다.

방사선 치료계획은 타겟으로 하는 병반에 맞추어 방사선이 주사되도록 하는 것으로 컨퍼멀(conformal) 치료 계획이라고 하며 다음과 같은 방법들이 있다[2].

- ① 병반을 제거하는데 필요한 만큼의 방사선 분포를 미



[그림 1] 시스템의 논리 구조

리 지정하고 이 분포에 가장 적합한 방사선 치료 계획을 대수적인 방법으로 구한다. 이 방법은 역 문제(reverse problem)라고 하는데 본 연구에서 제안하고 있는 시스템과 잘 매치하기 때문에 중점적으로 조사한다.

- ② 시뮬레이트 어닐링(simulated annealing)등의 방법을 이용하여 제한 조건을 만족시키는 모든 방사선 치료 계획을 찾는다. 이 방법의 제한 조건은 악성종양의 제거 확률은 높고 정상조직이 피폭되지 않도록, 예를 들면, 병반에는 7000cGy 이상의 방사선을 주사하되 주위 조직에는 5000cGy 미만의 방사선을 주사해야 한다는 식으로 주어진다.
- ③ 방사선이 특정 조직을 피하거나 정상조직을 통과하는 양이 최소가 되도록 하는 방사선 빔을 찾는다.

위의 방법들이 완전히 실용화되기 위해서는 악성종양을 제거할 수 있는 확률, 정상세포가 피폭될 확률, 방사선 치료에 대한 환자의 심리적 상태, 종래의 방사선 치료에 대한 관습 등 다양한 요소를 매개변수화 하여야 한다.

위에서 구한 방사선 치료 계획을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 한다. 시뮬레이션은 Geant4를 이용하는데 이를 위해서는 병반, 주위 조직 및 기관, 방사선 치료 장치에 대한 기하데이터가 필요하다. 인체 관련 기하 데이터는 DICOM 데이터를 이용하여 구하고 방사선 치료 장치에 대한 기하 데이터는 관련 매뉴얼을 이용한다. 인체 관련 데이터로부터 Geant4 기하 데이터를 구하는 방법은 2.2 절에서 설명한다.

## 2.2 DICOM 으로부터 Geant4 시뮬레이션에 필요한 기하 데이터 추출

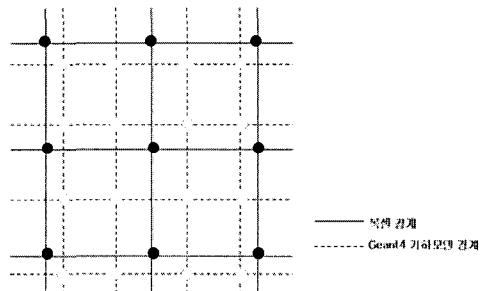
Geant4를 이용하여 방사선량 시뮬레이션을 하기 위해서는 3차원 인체영상에서 기하데이터를 추출하여 Geant4가 지원하는 기하모델로 변환을 하여야 한다.

Geant4가 지원하는 기하 모델은 다음과 같다[7].

- ① CSG solids  
box, tube, cone, polycone, polyhedra 등

- ② BREP solids  
객체를 구성하는 모든 면을 리스팅하는 것이 일반적인 방법이나 box, cone, tube등 사전에 정의된 것도 있음
- ③ Boolean solid  
solid를 불리언 함수 union( ), intersect( ), subtract( )등을 이용하여 결합시킴.

Geant4에서 시뮬레이션을 하기 위해 환자 기하 데이터는 Geant4가 지원하는 기하모델로 변환해야 하는데, DICOM 데이터는 복셀의 각 정점에서 Hounsfield 값으로 표시되므로, box로 변환한다고 가정한다. 그런데 Geant4의 기하데이터와 환자데이터가 반드시 일치하지 않기 때문에 [그림 2]와 같이 만나는 것이 일반적인 모양이다.



[그림 2] 복셀 정점의 Hounsfield 값과 Geant4 기하 모델의 Hounsfield 값

이 그림에서 실선으로 표시된 것이 DICOM 형식으로 표시된 환자의 복셀 데이터이고 점선으로 표시된 것이 Geant4의 기하데이터이다. 검은 점은 DICOM 형식의 Hounsfield 값이고 회색점은 Geant4 기하 데이터 Hounsfield 값이다. DICOM 복셀의 8개의 네이버 그리드(neighbor grid) 포인트의 Hounsfield 값을 Geant4 기하 데이터로의 Hounsfield 값으로 보간하는 데는 아래와 같은 방법이 있다. 그리고 x축에 대하여 보간 하고 이것을 이용하여 y축에 대하여 보간 하고 다시 z축에 대하여 보간 한다면 각각의 보간식은 다음과 같다.

- ① 최접 이웃(nearest neighbor): 구하려는 곳과 가장

가까운 복셀 정점에 있는 값을 취하여 해당점의 값으로 한다. 많은 앨리어싱 현상이 발생하는데 계산식은 다음과 같다.

$$f(d) = flood(d+0.5)$$

여기서 d는 해당점의 위치이다.

- ② 선형보간(linear interpolation): 두 점간에 직선을 그려 이 비율에 맞추어 보간한다. 2차원인 경우에는 쌍일차(bilinear)보간이되고 3차원인 경우는 삼일차(trilinear)보간이 된다. 방사형 잡음이 발생하며 계산식은 다음과 같다.

$$f(d) = f(x1) - f(x0) OVER x1 - x0 \times d + f(x0)$$

여기서 d는 x0에서부터 해당점이 위치하고 있는 곳까지 거리이다.

- ③ 입방나선보간(cubic convolution interpolation): 복셀 내부 및 외부에 있는 값을 함께 고려하여 선형보간의 방사형잡음을 제거할 수 있다. 3차식이기 때문에 많은 계산시간이 필요하며 계산식은 다음과 같다.

$$f(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & 0 \leq |x| \leq 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & 1 \leq |x| \leq 2 \\ 0 & 2 \leq |x| \end{cases}$$

여기서 a는 보간함수의 모양을 결정하는 계수이고 x는 중심점으로부터 거리이다.

본 시스템에서는 계산시간과 정확도를 고려하여 디폴드로 삼일차선형보간(trilinear)을 사용하나 용도에 맞게 사용자가 임의로 보간법을 설정할 수 있게 한다.

## 2.3 시스템의 여러 가지 기능

본 시스템은 Geant4를 이용하여 방사선 시뮬레이션을 하는 것 이외에 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

### 2.3.1 변형 DICOM 포맷에 대한 대응

Geant4 시뮬레이터는 DICOM 포맷을 지원하고 있으나

지적재산권 보호때문에 특별한 DICOM 데이터 스트림만을 처리할 수 있다. 그런데 실제로 사용되는 DICOM 형식은 여러 가지 변형이 있다. 이러한 여러 가지 변형에 대응하기 위해서는 바이트 순서(byte order), 목시적 또는 명시적 리틀엔디언(little endian), 빅엔디언(big endian), 프리엠블을 갖지 않은 DICOM 데이터 파일을 지원할 수 있어야 한다. 본 시스템에서는 존재하는 대부분 회사의 DICOM 파일을 처리할 수 있도록 한다.

### 2.3.2 시뮬레이션으로 얻은 방사선량 분포 저장

본 시스템은 시뮬레이션으로 관심영역(ROI) 근처에 조사되는 에너지를 추적하여 방사선선량을 계산하고 DICOM-RT 명세 파일에 저장한다. 그리고 전용 포맷을 가지고 있는 가시화도구에 연결하기 위하여 파일 변환 기능을 설치한다.

### 2.3.3 사용자 인터페이스 기능

본 시스템의 스크린은 3차원 영상을 표시하기 위한 볼륨 렌더링 페인(pane), 볼투명도(전달함수)와 칼라 값을 설정하기 위한 2개의 히스토그램 페인, 3단면상을 서로 수직으로 표시하는 3개의 2차원 영상 페인을 가지고 있다.

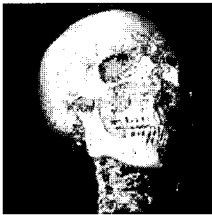
또한 GUI를 이용하여 2차원 영상의 대비, 3차원 영상의 해상도, 3차원 영상의 밝기, 3차원 예비 영상 등을 표시할 수 있게 한다. 사용자는 2개의 히스토그램을 이용하여 쉽게 볼투명도(전달함수)와 색깔을 바꿀 수 있으며 환자 단층영상의 볼륨 영상을 획득하고 방사선량을 계산할 수 있으며 이를 함께 표시할 수 있다.

## 3. 시스템 타당성 평가

### 3.1 볼륨 렌더링

본 연구에서 사용하는 볼륨렌더링은 레이캐스팅을 사용한다. 이 방법은 함수로 기술된 광선과 마주치는 복셀 값을 추적함으로써 픽셀의 빛의 세기를 계산한다. 이 방법은 구조화된 포인트 데이터 집합을 쉽게 렌더링할 수 있어 방사선량 분포, 인체기관 등을 함께 렌더링 할 수

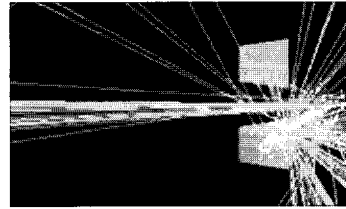
있고 최대값(maximum intensity) 투영, 다중임계값(multiple threshold) 투영, X선(radio graphic) 투영, 볼륨축적(volumetric compositing) 투영에 이용할 수 있다. 그러나 속도가 느린 단점이 있어 이를 개선하기 위하여 여러 가지 고속볼륨렌더링 방법이 제안되었는데, 본 연구에서는 이 중 하나를 이용한다. 이 방법은 객체의 바운딩 서피스를 깊이 버퍼에 저장하고 이를 시선 방향에 맞추어 투영 변환하여 실제 픽셀에 기여하는 복셀만을 찾아 가시화하는 방법이다[5][6]. [그림 3]은 NLM 디지털 맨의 CT 데이터를 이 방법을 이용하여 두 개를 만 가시화한 그림이다.



[그림 3] NLM 디지털 맨 CT 데이터 볼륨 렌더링

### 3.2 Geant4를 이용한 방사선 조사 시물레이션

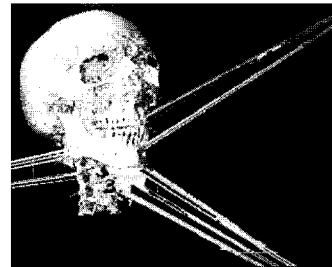
현재의 기술은 CT로 치료 전에 종양의 영상을 정확하게 얻을 수 있을 뿐 아니라 생체에서 병반의 방사선 감도, 흡수된 방사선량을 측정할 수 있다. 특히 Geant4는 가속기, 방사선 발생기, 환자 기관을 기하 모델링하는 기능이 있기 때문에 외부 장치에서 발생하는 방사선을 이용한 치료를 시물레이션 할 수 있다. Geant4는 관련 장치, 주위 조직, 병반을 정확히 기하 모델링 할 수 있고 방사선의 전파를 제어하는 물리 모델 기능이 방사선량을 정확하게 계산할 수 있게 한다. 특이할 만한 것은 환자 개인의 반응 데이터에 기반하여 효과가 있는 방사선량을 정확히 계산할 수 있다는 것이다. [그림 4]는 방사선 빔이 팬텀(phantom)에 주사하는 모양을 Geant4로 시물레이션 한 것이다.



[그림 4] Geant4를 이용한 방사선 빔 시물레이션

### 3.3 볼륨 렌더링 영상과 시물레이션 영상 합성

볼륨렌더링 영상과 Geant4 시물레이션으로 구한 방사선량 분포를 합성할 수 있다. Geant4의 OpenGL 드라이버를 가지고 그린 방사선 빔이 [그림 4]에 나타나있다. 그림에서와 같이 OpenGL 드라이버는 입자의 궤적은 그릴 수 있으나 조직에 조사되는 방사선량을 보여주지는 못한다. [그림 5]는 본 연구에서 목표로 하는 볼륨 렌더링 영상과 Geant4 시물레이션으로 구한 영상을 합성한 영상이다. 이러한 합성 영상을 이용하여 치료 방사선이 병반과 주위 조직에 미치는 영향을 시각적으로 확인할 수 있다.



[그림 5] 볼륨 렌더링 영상과 Geant4 시물레이션 영상 합성

## 4. 결론

본 논문에서는 볼륨렌더링과 Geant4 입자 시물레이터를 사용하여 방사선 치료 계획을 세우는 시스템에 대하여 고찰하였다. 본 시스템은 Geant4에 있는 다양한 물리(physics)이론의 적용이 가능하여 방사선을 다양하고 정확하게 시물레이트할 수 있고 이렇게 구한 방사선량 분포를 볼륨렌더링으로 생성한 영상과 함께 표시하여 사용

자가 방사선 치료 계획을 용이하게 세울 수 있는 특징이 있다. 본 논문에서는 이러한 시스템의 논리적인 구조를 제안하고 구현하는데 해결하여야 할 사항에 대하여 고찰하고 그 실행 가능성을 조사하였다. 문헌의 조사와 정성적인 가능성 평가 결과를 통해 이러한 시스템은 실용적인 면에서 의미가 있고 관련 라이브러리를 사용하면 비교적 용이하게 구현할 수 있다는 것을 알았다.

#### 참고문헌

- [1] <http://www.ncc.re.kr/>. 국립 암센터
- [2] A. State, J. Rosenman, MD, H. Fuchs, T. J. Cullip, and J. Symon, "VISTAnet: Radiation Treatment Planning through Rapid Dose Calculation and Interactive 3D Volume Visualization," *Proc. Visualization in Biomedical Computing*, Rochester, MN., pp. 484-492.
- [3] F. Fresne, B. Gibaud, C.Barillot, C. Toumoulin, D. Lemoine, J. P. Manens, and J. M. Scarabin, "A Computer Assisted Stereotactic Approach for Multibeam Radiation Therapy Planning," *IEEE Eng. Med. & Bio. Society Annual International Conference*.
- [4] J. Allison, et al., "Geant4: Developments and Application," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 53, no. 1, pp.270-278.
- [5] J. Song, S. Kim, Y. Kim and O. Gwun, "A Boundary Surface Based Ray Casting using 6-Depth Buffers," *CIS 2004*, pp. 516-522.
- [6] J. Song, O. Gwun, and H. Jeong, "Operation Level Acceleration for Volume Rendering," *SPIE Visualization and Data Analysis 2002*, pp. 154-164.
- [7] L. Archambault, et al., "Overview of Geant4 Application in Medical Physics," *Proc. IEEE NSS/MIC*. 2003. pp. 1743-1745.
- [8] <http://medical.nema.org> DICOM Homepage.