J. Biomed. Eng. Res.
Vol. 24, No. 2, 69-75, 2003

가상내시경의 개발 및 가상 대장내시경으로 적용 시 성능평가

김정훈, · *이상훈, · **고성호, · ***김상준

테크하임 주식회사 연구개발팀, *단국대학교 의과대학 의공학연구소, **단국대학교 의과대학 의공학연구소,***단국대학교 의과대학 진단방사선과

(2002년 5월 6일 접수, 2002년 4월 11일 채택)

Development of Virtual Endoscopy and Evaluation of Performance as a 3D Virtual Colonoscopy

J.H. Kim *S.H. Lee, **S.H. Go, ***S.J. Kim

R&D Team of TechHeim Corporation, Seoul, Korea *Research Institute of Biomedical Engineering, College of Medicine, Dankook University **Research Institute of Biomedical Engineering, College of Medicine, Dankook University ***Department of Radiology , College of Medicine, Dankook University

(Received May 6, 2002. Accepted April 11, 2002)

Abstract : Virtual colonoscopy is one of the powerful tool for non-invasive colon examination and many in-vitro and in-vivo studies have shown its accuracy in polyp or adenoma detection. But most of virtual colonoscopy requires high quality workstation and software and its cost is high to setup whole system. We developed PC-based 3D model creation and navigation program which has diverse functions. It can be easily installed to PC and connected to network system. The performance, when used as a virtual colonoscopy, is evaluated by calculating sensitivity of detection for the simulated polyp which is artificially made inside the pig's colon and checked its clinical feasibility. Its total sensitivity is 76%. Grouping according to polyps diameter, the sensitivity for detection of polyps 10 mm or larger was 100%(40 of 40); 5.0-9.9 mm, 90.0(90 of 100); and smaller then 5 mm, 36.7%(22 of 60).

Key words : Virtual colonoscopy, 3D model, Virtual Navigation System.

서 론

최근 컴퓨터 기술과 의료영상 기술의 발전으로 인해 질병의 진단과 치료에 획기적인 발전을 가져왔다. 이 중 3차원 영상을 이용한 가상 내시경의 개발은 다양한 분야에서 진단과 치료에 응용되어 왔으며, 대표적인 것으로 기관지[1],[2],[3], 결장[4], 후두경[5], 비강[6], 신경외과 수술[7] 등의 영역이 있다. 최근에는 이들 가상장치들의 임상응용 및 그 효용성에 관한 평가가 활발히 진행되고 있으며, 진단의 중요한 도구로서 사용될 가능성이 한층 증대되었다.

가상내시경 기술 중 가장 활발하게 사용되고 있는 것이 가상 대장내시경이다. 이는 1990년 미국의 D. Vining 박사가 최초로 시작한 것으로 암이나 기타 질병의 증세를 비관혈적으로 측정하기 위해 개발되었다. 가상 대장내시경은 최근 선별검사(Screening Test)용으로 많이 사용되고 있으며, 실제 대장내시경을 적용할 경우 암종(carcinoma) 등에 의한 협착으로 검사가 어려운 경우도 완전하게 암이나 용종(polyp) 등을 찾아낼 수 있다. Fenlon 등의 연구에 의하면 실제 대장내시경이나 바륨(barium) 관장(enema)에 의해 종양(tumor) 근처의 협착 지점을 통과하지 못한 29명의 암 환자에게 가상 대장내시경을 적용한 결과 2개의 암과 24개의 용종을 발견하였다.[8] 또한 병변의 위치를 찾아내는데도 훨씬 효율적이어서 실제 대장내시경으로는 32개의 암세포의 위치를 찾아낸 것에 비해 가상 대

본 논문은 한국과학재단 "1998년~2001년 특정기초연구 지원사업(과제번호:98-0403-1501-3)"의 연구비지원에 의한 것임
통신저자 : 이상훈, (330-714)
Tel. 041) 550-3893
E-mail. dbiomed@dankook.ac.kr

표 1. 획득한 단면영상 정보
Table 1. Information of acquired image

파일형태	DICOM 3.0
획득장소	단국대학교 의료원 진단 방사선과
획득부위	뇌혈관, 결장, 기타 모형 등
촬영기기	CT, MR
슬라이스 간격	1.25 mm~3 mm
슬라이스 수	30장 ~ 90 장
단면 방향	Axial
영상의 크기	256×256, 512×512

장내시경에서는 38개의 암세포 위치를 찾아내었다[9]. 가상 대장내시경의 용종을 찾아내는 민감도(Sensitivity)는 초창기에 1 cm 이상의 경우 75 - 90 % 정도였으며, 5 - 9 mm 크기의 Polyp은 약 65 % 정도였다. 최근에는 이들 정확도가 한층 개선되어 1 cm 이상의 경우는 90 % 이상 발견할 수 있는 것으로 알려져 있다.

가상 기관지경의 경우도 임상에 많이 적용되고 있다. McAdams 등의 연구에 의하면 폐이식으로 인한 기관지접합(Bronchial Anastomosis)시 표면의 비균질성(Surface irregularity), 협착정도(severity of stenosis) 등을 실제 기관지경, 가상 기관지경 및 CT영상을 통해 비교해 보았는데, 실제 내시경보다는 못하지만 2차원 CT 영상보다는 훨씬 접합상태를 잘 관찰할 수 있음을 알 수 있었다[10].

그러나 이러한 3차원 영상을 우리의 환경에서 실제 적용하는데는 많은 문제점이 있다. 그 첫째가 복잡한 소프트웨어 사용에 대한 거부감과 운용에 필요한 장비 및 프로그램 가격에 대한 부담감이다. 의학영상 처리와 관련된 많은 소프트웨어들과 워크스테이션 등의 장비는 상당히 고가이며 이를 임상에 활용하는데는 많은 경비가 요구된다. 두 번째 문제로는 많은 소프트웨어가 외국에서 개발되어 우리의 실정에 적합한 프로그램을 구하기가 어렵고, 사용자의 요구를 충족시키기 위한 프로그램의 수정이 어렵다는 것이다. 본 논문은 가상내시경을 구현하기 위한 3차원 영상 생성을 PC를 통해 구현하고, 돼지의 결장을 이용하여 가상 대장내시경으로서의 그 성능을 평가함을 목적으로 한다. 이를 위해 VC++와 VTK(Visualization Tool Kit)을 기반으로 하여 3차원 영상 생성기를 제작하고, 여러 장기(organ)들에 대한 3차원 모델을 생성하여 보았으며, 다양한 탐색 기능을 갖는 탐색기(navigator)를 제작하고, 이를 생성된 3차원 영상과 연결하여, 탐색할 수 있도록 하였다. 결장, 기관지 및 혈관 등 여러 내장기관들의 3차원 영상을 생성하여 보았으며, 인터넷을 통한 자료의 공유가 가능하게 함으로, 원격진단 및 토의가 가능하도록 하였다.

제작된 프로그램의 성능을 평가하기 위해 10개의 돼지 결장에 다양한 크기의 용종을 만들고, 이를 CT로 촬영한 다음, 3차원 영상을 구현하고, 탐색기를 이용하여 용종의 갯수를 헤아리는 실험을 하여 보았다. 이를 통하여 제작된 프로그램의 민감도를 구하였으며, 임상적용 가능성을 평가하여 보았다.

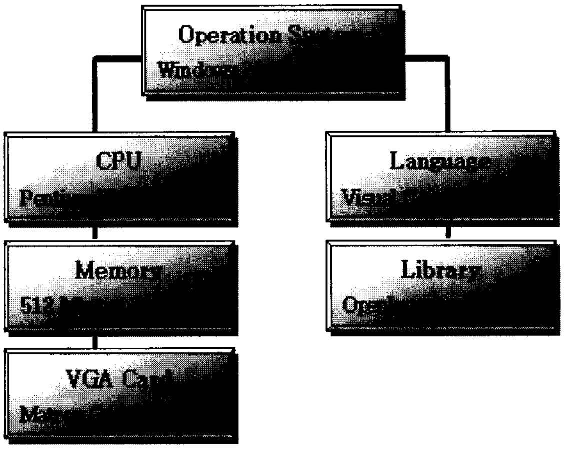


그림 1. 시스템의 개발환경
Fig. 1. System Environment

II. 재료 및 방법

1) 시스템의 개발환경

본 연구를 위한 가상내시경 3차원 모델 생성에 관한 개발 환경은 그림 1.과 같다. 본 시스템은 Window2000(Microsoft 社)을 기반으로 하였고 중앙처리장치(CPU)는 PentiumIII- 700MHz (Intel 社)를 사용하였으며 메모리는 512Mbyte의 SDRAM을 장착하였다. 개발언어는 Visual C++ 6.0을 사용하였으며 3차원 네비게이션 라이브러리인 OpenInventor(TGI 社)와 3차원 영상 생성 시 사용하는 라이브러리 인 VTK (Visualization ToolKit)을 사용하였다[그림 1].

2) 데이터 획득방법

본 연구에서의 데이터는 CT(Computed Tomography)와 MRI(Magnetic Resonance Imaging)의 다층 영상 데이터들을 MultiVox Gateway(테크하임 社)를 사용하여 개인용 컴퓨터로 영상을 전송하였다. 영상은 DICOM 3.0의 표준을 따르고 있으며 데이터의 손실이나 왜곡현상을 줄이기 위해 영상의 압축과정 없이 실 데이터를 저장하였으며, 본 연구에 사용된 영상정보를 정리하면 표 1과 같다.

3) Medical Image Viewer의 User Interface 설계

Medical Image Viewer는 디지털 의료영상을 저장장치로부터 가져오고 저장할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 영상의 밝기조절, 길이, 각도, 면적 등의 측정 기능, Histogram 및 확대, 축소 기능, 다양한 필터링 등의 영상처리 기능을 가지고 있다. 또한 3차원 생성을 위한 ROI 선택, Surface 및 Volume Rendering, MPR 등의 역할을 할 수 있도록 설계되었으며, 3차원 모델 속을 탐험 할 수 있는 다양한 네비게이션 기능과 연결되도록 하였다. 그림 2는 Medical Image Viewer의 기본 기능을 나타내는 모식도이다.

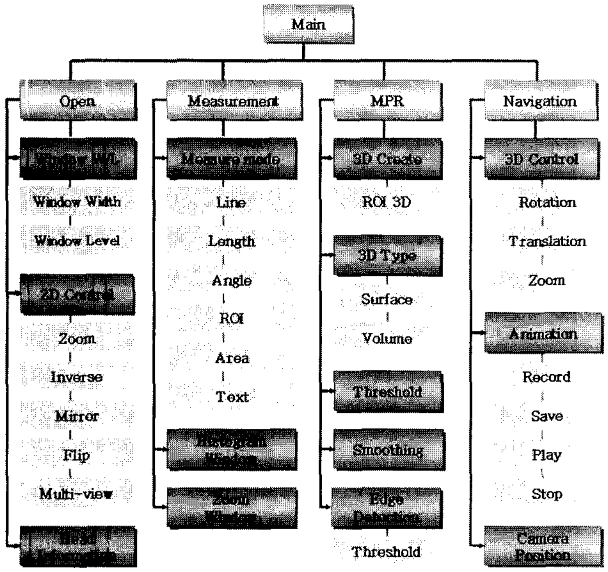


그림 2. Medical Image Viewer의 기능 설계도
Fig. 2. Function Design for Medical Image Viewer

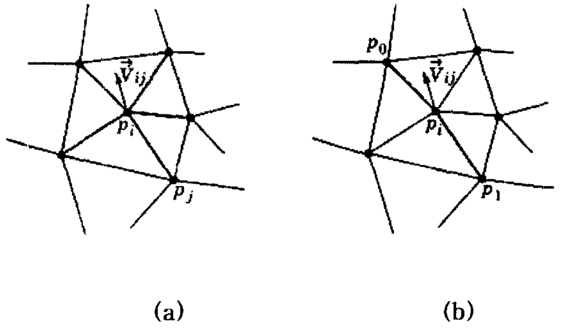


그림 4. 메쉬 평탄화 작업 (a)모션 포인트 (b) 외곽선 상에서의 평탄화 포인트
Fig. 4. Mesh Smoothing.(a)Motion of Point. (b)Smoothing a point on an edge.

4) 3차원 모델의 생성

획득된 의료영상은 DICOM 형태의 시리즈로 구성되어 있으며, 이를 3차원 영상으로 재구성하기 위해서는 그림 3의 과정을 수행하여야 한다. 우선 여러 장의 슬라이스(slice)를 하나의 파일로 구성하고, 이들 영상에 대한 VOI(Volume of Interest)를 구한다. 관심영역을 지정하는 이유는 관심영역 이외에는 데이터가 없는 것으로 간주하고, 이후의 작업을 수행하기 때문에 렌더링 속도의 향상과 함께 데이터의 사이즈를 줄일 수 있다. 관심 부위의 X,Y,Z 축에 대한 범위를 직육면체 또는 원주형의 형태로 지정함으로 문턱치(threshold)[13] 값으로는 분할이 되지 않는 부분이나 필터링을 통해서도 제거되지 않는 잡음을 사전에 방지할 수 있으며, 데이터 크기도 상당히 줄일 수 있다.

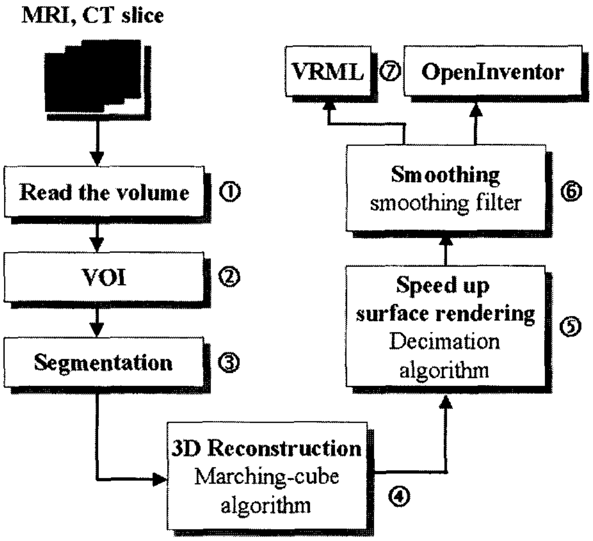


그림 3. 차원 모델 생성도
Fig. 3. Schematic Diagram for 3D Model Creation

(a) Before Smoothing (b) After Smoothing

그림 5. 라플라시안 평탄화 작업 후의 결과
Fig. 5. Laplacian Smoothing Result

분할된 영상을 가지고 마칭큐브(Marching Cube)[13],[16] 알고리즘을 사용하여 SSD(surface shade display)를 하였다. SSD 과정에서 'Rendering' 속도를 높이기 위하여 'triangle decimation' 알고리즘[13]을 사용하여 폴리곤의 수를 줄이는 작업을 하였으며, 구성된 3차원 영상의 표면 평탄화를 위해 'Laplacian Smoothing' 기법[13]을 사용하였다. 이러한 'Smoothing' 기법은 동일표면 평탄화 및 표면잡음도 함께 제거할 수 있다. 그림 4는 Laplacian Smoothing기법으로써 데이터 셋의 점좌표를 조절함으로써 메쉬의 표면을 평탄화 시키기 위하여 사용되며 그에 따른 알고리듬은 다음과 같다.

삼각형으로 이루어진 다각형의 가운데 포인트를 주변의 꼭지점 pj에서 pi까지의 벡터 평균을 모두 구한 다음(그림 4-Vij), 사용자의 가중치 λ값을 곱해서 원래의 벡터(Xi)와 더한다. λ값은 평탄화의 정도에 따라서 값을 주게되는데 그 특정값 이상의 벡터는 작은 크기의 새로운 벡터로 대체되어서 메쉬의 평탄화 작업이 이루어지게 된다. 그림 5는 원 모델과, 이와 같은 방법으로 평탄화 과정을 거친 3차원 모델을 비교한 영상으로 모델의 내・외 벽면이 평탄화 되어있음을 볼 수 있

그림 6. 직경7mm인 인공의 용종
Fig. 6. Artificial polyp of 7mm

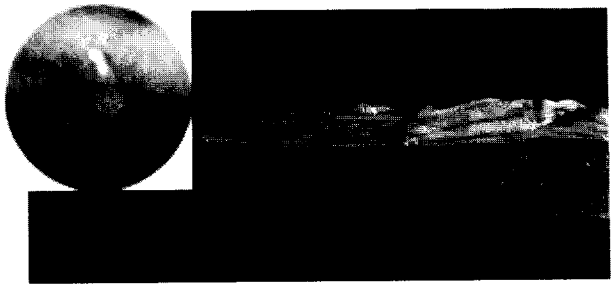


그림 7. 직경 2mm인 인공의 용종
Fig. 7. Artificial polyp of 2mm

표 2. 돼지의 결장에 생성시킨 용종에 대한 정보
Table 2. Information of artificial polyp which created on pig colon

구 분	개수 및 길이
절단된 결장의 길이	30 cm
한 개의 결장에 생성된 용종의 개수	10 개
용종의 크기	2~11 mm
결장의 개수	10 개
용종의 총 개수	100 개

다. 이상의 과정을 통하여 재구성된 오브젝트는 VRML[15], IV[14] 파일 등으로 변환되어 네비게이션 프로그램에 연결될 수 있도록 하였다.

5) 내시경전용 네비게이터

3D 네비게이터는 생성된 3차원 모델을 회전, 이동, 확대, 축소함으로써 모델의 내/외부를 관찰 하는 프로그램이다. 실제 내시경과 비슷한 역할을 수행 할 수 있도록 Fly기능[14],[15] 및 Light기능[14],[15]을 추가하여 장기 내부의 벽면을 자세한 관찰이 가능하도록 하였으며 특히, 현재 카메라의 위치를 알려주는 카메라포지션 기능[14]과 시술과정을 저장 할 수 있는 애니메이션 저장기능 등 내시경 시술에 적합한 내시경 전용 네비게이터로 설계하였다.

6) 가상내시경의 민감도 측정

구성된 3차원 가상내시경의 성능 및 임상적용 가능성을 평가하기 위해 돼지의 결장을 이용한 민감도를 측정하였다. 이를 위해 돼지의 결장 내부에 인공으로 용종을 만들고, CT를 이용한 단층촬영을 실시한 후 2D 영상에서의 용종개수와 3D 영상에서의 용종의 개수를 측정함으로 민감도를 추정하고, 두 방법 간의 민감도의 차이를 구해보았다.

인공용종을 만들기 위해 돼지의 결장을 30 cm 정도의 길이로 10개를 자른 후 결장의 내벽이 바깥쪽으로 나오도록 뒤집는다. 각 결장의 내벽에 식염수를 주사한 후 수술용 실로 결찰하는 방법으로 동일한 크기의 용종을 10개씩 생성한 후 결장을 뒤집고, 여기에 공기를 주입한 후 결장의 양단을 묶었다.

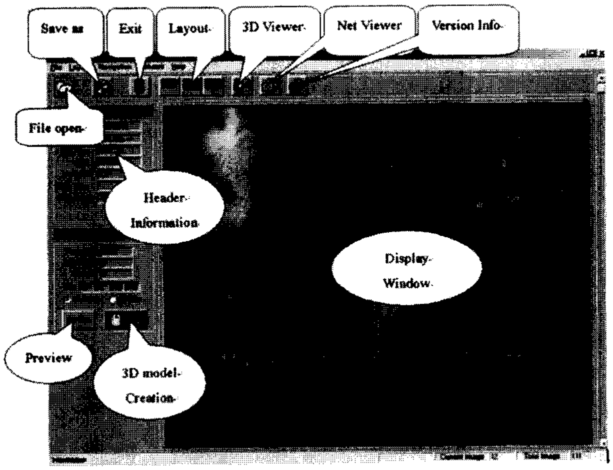


그림 8. Image Viewer의 Main Window
Fig. 8. Main Window of Image Viewer

용종의 크기는 2 mm - 11 mm까지 10단계로 구분하여 만들었으며, 크기는 1 mm 단위로 증가 시켰다. 표 2.는 제작한 용종에 관한 정보를 정리한 것이며, 그림 6과 그림 7은 크기를 다르게 만든 인공용종을 나타낸 것이다. 인공용종을 가지고 있는 결장에 대한 CT 영상을 얻기 위하여 플라스틱 용기에 물을 반쯤 채운 다음 준비된 결장을 넣고 물이 완전히 잠기도록 더 주입한 다음 용기의 뚜껑을 닫았다. CT의 촬영방향은 Axial이며, 슬라이스의 간격은 3 mm로 하였다.

실험 및 결과

Medical Image Viewer는 사용자와의 인터페이스의 기능을 가지며, 제작된 'Main' 화면은 그림 8과 같다. 기본 구성은 상단의 'Menu' 부분, 좌측의 환자정보 표시 부분, 우측의 영상 표시 부분으로 나뉘어져 있다. 좌측의 하단에는 3차원 영상을 제작하기 전에 대략 볼 수 있는 'Preview' 기능과 3차원 영상 파일을 만들고 저장할 수 있는 기능이 제공되고 있다. 그림 9는 Medical Image Viewer를 사용하여 제작된 다양한 장기에 대한 3차원 영상을 보여주고 있다. (a),(b)는 3 mm 간격으로 촬영한 MRI 영상을 사용하여 생성한 3차원 뇌혈관 모델이

(a) 3D brain angiography1 (MRI) (b) 3D brain angiography2 (MRI) (c) 3D bronchoscophy(CT) (d) 3D colonoscopy(CT)

그림 9. 제시한 프로그램을 통해 생성된 3차원 모델들
Fig. 9. Various 3D models which created using previously stated program

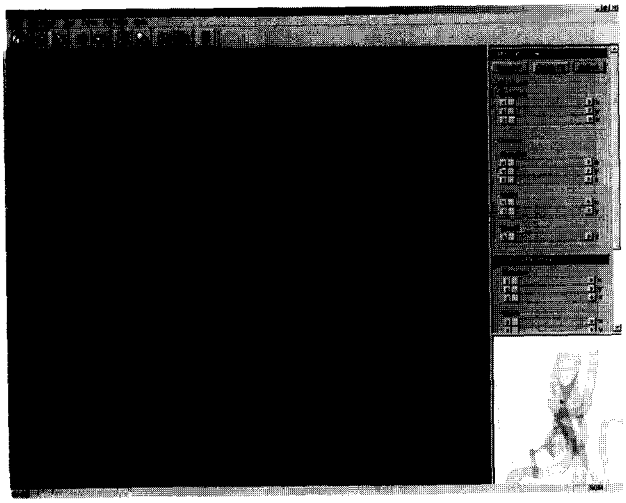


그림 10. 내시경 전용 네비게이션 인터페이스
Fig. 10. Navigation interface for virtual endoscope

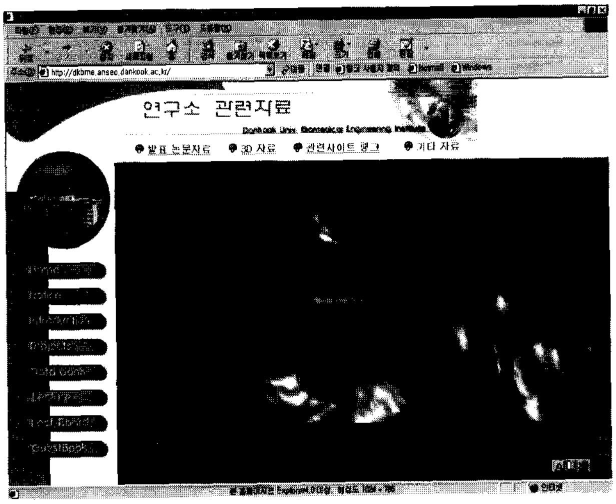
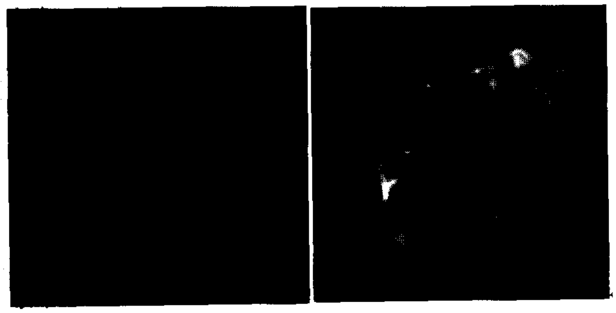


그림 11. 인터넷 상에서의 네비게이션 모습
Fig. 11. Flying inside virtual colon using internet browser



(a) (b)

그림 12. 3차원으로 재구성된 돼지의 결장 (a)결장의 외부 (b)결장의 내부
Fig. 12. Pig colon which reconstructed 3D Model (a)-nside (b)outside

며,(c)는 3 mm간격으로 촬영한 CT 영상을 사용하여 생성한 3차원 기관지 모델이다. 또한 (d)는 3 mm간격으로 촬영한 CT 영상을 사용하여 생성한 3차원 결장의 모델이다. 이를 통해 여러 장기에 대한 다양한 3차원 영상을 얻을 수 있음을 알았다. 그림 10은 생성된 3차원 모델을 회전, 이동, 확대, 축소 및 내부로 네비게이션 할 수 있도록 제작한 내시경 전용 네비게이션 툴 이다. 그림 11은 웹 브라우저를 통한 3차원 결장의 내부를 탐색하고 있는 가상내시경 화면을 나타낸 것으로 임상의사들이 인터넷을 통하여 제작된 3차원 영상을 다운로드 받아, 자유롭게 네비게이션 할 수 있다. 구체적인 구현방법은 생성된 3차원 영상을 VRML 파일형태로 변환시키고 공개된 프리웨어[15]를 사용하여 별도의 네비게이션 프로그램이 없이도 인터넷 상에서 네비게이션이 가능하도록 하였다. 즉, 사용자는 Medical Image Viewer에서 VRML파일 변환 버튼을 클릭하면 3D 모델이 생성될 때 VRML형태의 파일로 저장된다. 이러한 VRML 파일을 인터넷에 업로드하거나 메일로 전송하였을 때 별도의 프로그램 없이 익스플로러 상에서 플러그인으로 동작하도록 하였다. 그림 12는 2D 상에서 용종의 개수에 대한 판독이 끝난 후 3차원 모델로 재구성한 결장의 내외를 나타내

표 3. 2D 및 3D상의 용종검출개수
Table 3. The number of polyp which detected at 2D images and 3D models.

	용종크기(mm)	용종개수(개)	2D판독 A(개)	2D판독 B(개)	3D판독 A(개)	3D판독 B(개)
결장1	2	10	3	4	0	1
결장2	3	10	6	7	4	5
결장3	4	10	7	7	6	6
결장4	5	10	9	9	7	7
결장5	6	10	9	9	9	9
결장6	7	10	10	10	9	9
결장7	8	10	10	10	10	10
결장8	9	10	10	10	10	10
결장9	10	10	10	10	10	10
결장10	11	10	10	10	10	10
계		100	84	86	75	77

표 4. 3차원 용종검출에 대한 민감도
Table 4. Sensitivity of polyp detection on 3D models

Polyp Diameter(mm)	Sensitivity
Overall	76.0 % (152/200)
Smaller than 5	36.7 % (22/60)
5,0 ~ 9.9	90.0 % (90/100)
1.0 or larger	100 % (40/40)

는 영상이다. 표 3에서 제시한 판독결과를 보면 총 100개의 용종 중 2D 상에서 발견한 용종의 개수는 84개와 86개로 나타났고, 3D 모델상에서 발견된 용종의 총 개수는 75개와 77개로 나타났다. 표 3에서와 같이 전체적으로 3D의 용종 발견개수가 2D 상에서 보다 적게 나타났지만(2D 상에서의 89 %) 5 mm 이상에서는 2D상의 발견률에 비해 95 %, 8 mm 이상에서는 100 %가 발견되었다. 즉 용종의 크기가 클수록 3D를 통한 진단의 민감도는 높아지며, 특히 6 mm 이상에서는 98 % 이상의 민감도를 가지고 있다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 가상내시경은 PC 환경 하에서 간단하게 3차원 영상을 생성하고, 다양한 방법으로 탐색할 수 있는 기능을 가지고 있다. 또한 VRML 형태의 파일로 변환하여 인터넷상의 기본 브라우저를 이용하여 별도의 프로그램 없이 3차원 모델을 구동할 수 있게 하였다.

최근에는 3차원 의료영상을 이용한 가상내시경의 임상적용 결과가 매우 우수하여 선종(adenoma)이나 용종(polyp) 등을 찾아내는데 있어 표준 대장내시경의 역할을 대신할 것으로 예상된다. Judy Yee 등은 영상검사를 받은 후 표준 대장내시경을 시행 받은 300명의 환자들에게 가상 대장내시경을 적용하여 민감도를 평가하였다. 크기가 10 mm 이상의 용종, 5 - 9.9 mm 사이의 용종, 그리고 5 mm 미만의 용종을 찾아내는 민감도는 각각 90 %, 80.1 %, 그리고 59.1 % 이었다. 또한 각각의 크기별 선종을 찾아내는 민감도는 94 %, 82 %, 그리고 66.9 % 이었다. 또한 초창기 가상 대장내시경을 이용한 결과를 보면 1 cm 이상의 선종에서는 75 - 90 %의 민감도를 가지며 5 - 9 mm 이하의 선종에서는 65 % 미만의 민감도를 가지고 있는 것으로 보고되고 있다[11].

본 연구를 통해 개발된 가상내시경의 실험 결과를 보면 표 4와 같이 8 mm 이상의 용종은 100 % 발견할 수 있었으며, 5 - 9.9 mm 크기의 용종에 대한 민감도는 95 % 이상이 되고, 3 - 5 mm의 용종에 대한 민감도는 약 60 %가 된다. 따라서 초창기의 가상내시경이 갖는 성능은 넘어선 것으로 생각된다. J. Yee의 결과는 실제 환자를 대상으로 한 경우여서 본 연구의 결과와 절대적인 비교가 되기는 어렵지만, 가상 내시경용 CT 영상을 얻기 위한 노하우만 축적되면, 개발된 프로그램의 임상적용 가능성은 상당히 있음을 알 수 있었다.

따라서 가상 대장내시경이 임상적으로 중요한 용종들을 찾아내는데 있어서 실제 대장내시경의 역할을 대신할 수 있을 것으로 예상되며, 선별검사로서의 역할은 충분히 할 수 있음을 보여준다. 가상 대장내시경은 시술 시간도 더 짧고, 환자에게 덜 위험하며, 환자의 불편함을 최소화 할 뿐만 아니라 안정제 주사가 필요 없다는 장점이 있어 앞으로 활용성이 증대될 것으로 예상된다. 또한 기관지경, 가상후두경 및 신경외과적 수술 등에도 가상내시경 기술이 적용되어 좋은 임상결과를 얻고 있어 앞으로 3차원 영상과 탐색기를 이용한 가상내시경 기술은 표준화된 진료 및 치료수단으로 정착될 것으로 기대된다.

3차원 가상내시경 기술은 탐색기능뿐만 아니라 질환부위의 정량적 계측, 수술 전 시뮬레이션(preoperative planning) 및 내시경 모의훈련 등 다양한 분야에서 응용이 가능할 것으로 예상된다. 특히 국내 병원의 PACS 도입이 활성화되면서 디지털 의료영상을 이용한 교육자료, 정량적인 측정 및 데이터베이스 구축이 활발히 이루어지고 있다. 여기에 3차원 영상을 이용한 가상내시경 자료는 환자의 진단, 치료 및 환자에 대한 교육

등에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. Higgins WE, Ramaswamy K, Swift RD, McLennan G, Hoffman EA, *'Virtual Bronchoscopy for Three Dimensional Pulmonary Image Assessment: State of the Art and Furture Needs'*, Radiographics 1998 May-Jun;18(3) : pp761-778
2. Konnen E, Katz M, Rozenman J, Ben-Shlush A, Itzchak Y, Szeinberg A, *'Virtual Bronchoscopy in Children: Early Clinical Experience'*, AJR Am J Roentgenol 1998 Dec;171(6): pp1699-1702
3. Haponik EF, Aquino SL, Vining DJ, *'Virtual Bronchoscopy'*, Clin Chest Med 1999 Mar;20(1): pp201-217
4. Rex DK, *'CT and MR Colography(Virtual Colonoscopy)*: Status Report, J Clin Gastroenterol 1998, Oct;27(3): pp199-203
5. Fried MP, Moharir VM, Shinmoto H, Alyassin AM, Lorensen WE, Hsu L, Kikinis R, *'Virtual Laryngoscopy'*, Ann Otol Rhinol Laryngol 1999 Mar;108(3): pp221-226
6. Rogalla P, Nischwitz A, Gottschalk S, Huitema A,-Kaschke O, Hamm B, *'Virtual Endoscopy of the Nose and Paranasal Sinuses'*, Eur Radiol 1998;8(6): pp946-950
7. Auer LM, Auer DP, *'Virtual Endoscopy for Planning and Simulation of Minimally Invasive Neurosurgery'*, Neurosurgery 1998 Sep;43(3): pp529-537
8. Fenlon HM, McAneny DB, Nunes DP, Clarke PD, Ferrucci JT. *'Occlusive colon carcinoma: virtual colonoscopy in the preoperative evaluation of the proximal colon'*, Radiology 1999;210 : pp423-428.
9. Fenlon HM, Nunes DP, Clarke PD, Ferrucci JT, *'Colorectal neoplasm detection using virtual colonoscopy: a feasibility study'*, Gut 1998;43: pp806-811.
10. McAdams HP, Palmer SM, Erasmus JJ, Patz EF, Connolly JE, Goodman PC, Delong DM, Tapson VF, *'Bronchial Anastomotic Complications in Lung Transplant Recipients: Virtual Bronchoscopy for Noninvasive Assessment'*, Radiology 1998;209(3): pp689- 695
11. Judy Yee, Geetanjali AA, Raymond KH, Andreas MS, Susan DW, Kenneth RM, *'Colorectal Neoplasia : Performance Characteristics of CT Colonography for Detection in 300 Patients'*, Radiology 2001;219: pp 685-692
12. James D. Westwood, Helene M. Hoffman, Done Stredney, Suzanne J. Weghorst, *'Medicine Meets Virtual Reality:* Virtual Endoscophy Software Application on a PC' 1998: pp84-89
13. Will Schroeder, Ken Martin, Bill Lorensen, *'The Visualization Toolkit 2nd Edition'*,1998 Scalar Algorithms: pp155-167, Modelling Algorithms: pp371-407, Image Processing: pp 429-456
14. Josie Wernecke, *'The Inventor Mentor : Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor, Release2'* pp79-136
15. 고영덕 '3차원 멀티미디어 홈페이지로의 도전 - VRML 2.0' 1998: pp87-123, pp127-402
16. 김남국, 이동혁, 김종효, 민상구, 김영호, 'Segmentation된 CT/MR 볼륨데이터 3D Smoothing 모델 생성:KOSOMBE 20권 1호' 1998: pp220-221