The Development of Image Processing System for Medical Robot Remote Application

Joo Young Kim*, Joong Hyuk Kim*, Jung Chae Kim*, Kee Deog Kim†, Sun K. Yoo*

*Department of Medical Engineering, Colleage of Medicine, Yonsei University,
†Department of Advanced General Dentistry, Colleage of Dentistry, Yonsei University, Seoul, Korea

In this paper, web-base image processing system has been implemented for remote-controlled medical robot applications. The developed software system was hierarchically composed of diverse image processing and remote operation modules, and the hierarchical composition was satisfied the expandability to higher level application and the accessibility over the web. It can also support diverse file formats including DICOM, VRML, and CAD(STL) to display, transmit, store and share the processed images depending on application environment. Message-based data exchange, object-oriented module and open-source based software configuration will enable the dynamic combination associated with diverse remote medical application requirements.

Key Words: Medical robot, Remote application, Image processing system, Module design, Layer design

서 론

첨단 의료 기술의 발전과 더불어 의료용 로봇 분야 역시 최근 눈부신 발전이 이루어지고 있다. 특히 원격(Teleoperation) 조작기술이나 정보 전송기술 등의 도입으로 인해 성능이 향상된 로봇기술이 의료분야에 적용되고 있다. 수술의 정확도를 높이고 환자의 회복 속도를 빠르게 할 수 있는 로봇을 활용한 수술 기법에 대한 관심이 높아지고 있으며, 원격 수술로봇에서 주로 사용되는 마스터-슬레이브(Master-Slave) 방식의 로봇제어 기술이 광범위하게 연구 개발되고 있다.[1-4] 특히 마스터-슬레이브 방식의 최소 침습 로봇 수술법은 통증 및 출혈이 적고 회복이 빨라 일상에 복귀가 빠른 장점을 가진다.[5]

원격 로봇 수술을 위해 필요한 의료용 로봇 시스템은 CT (Computed tomography), MRI (Magnetic resonance image), fMRI (functional Magentic resonance image)로 부터 획득된 영상을 통해서 환자에 대한 정보를 인지하는 과정, 획득된 영상 정보를 필요에 맞게 모델링하고 영상처리 하는 과정, 처리된 영상과 모델을 기반으로 적절한 수술 전략을 결정하는 수술 전 계획 과정, 수술 보조 로봇과 수술 로봇을 사용하여 실제로 수술 진행하는 과정, 수술 후 검사 과정까지의 전문의의 로봇 수술을 돕기 위한 모든 과정을 포함하는 통합 시스템을 의미한다.[6-8] 의료용 로봇 수술을 위한 컴퓨터 영상 유도 로봇 수술은 3차원 영상기반의 정확한 수술계획이 필요하며, 수술계획의 유효성 및 안정성이 보장되어야 한다. 정확한 수술 계획을 위해서는 3차원 의료 영상(CT, MRI, fMRI 등)의 가시화 기술, 병소 및 장기 분할 기술, 위험물 검지 기술이 필요하며, 직관적인 사용자 인터페이스 기술이 중요시 된다.[9]

로봇을 활용한 수술 기법의 계속되는 기술 발전으로 원격 조언(Tele-mentoring) 및 원격 참여 수술(Tele-presence surgery)은 미래의 로봇 수술로 지목되었고, 여러 연구들이 외과의가 원격지에서도 다른 외과의 수술을 감독할 수 있다는 것을 보여주었으며, 의료 격오지에 발달된 수술적 처치를 제공하였다.[10]

원격 로봇 수술 의료 환경에서 의사간의 원격 진료 및 의견 교류를 위한 네트워크 기능과 그러한 시스템의 상호연동성과 접근성 문제는 시스템 디자인에 있어서 중요한 문제가 된다. 상호연동성이란 시스템 또는 제품이, 특별한 노력 없이도 다른 시스템이나 제품과 함께 잘 동작하기 위한 능력을 말하며, 정보기술 제품의 품질에 있어 그 중요도

이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업, 지식경제부 바이오의료기기 전략기술 개발사업(10031993), 연세대학교 의과대학 교내연구비(6-2010-0050)의 지원에 의해 이루어진 연구 결과임.
이 논문은 2011년 12월 13일 접수하여 2012년 12월 11일 채택되었음.
책임저자 : 유선국 (120-749) 서울시 서대문구 신촌동
연세대학교 의과대학 의학공학교실
Tel: 02)2228-1921, Fax: 02)363-9923
E-Mail: sunkyoo@yuhs.ac

가 점차 커지고 있다. 접근성은 사용자의 신체적 특성이나, 지역, 성별, 나이, 지식수준 등과 같은 제한 사항을 고려하여 가능한 많은 사용자가 불편 없이 이용할 수 있도록 제품 및 서비스를 만들어 제공할 때 사용되는 용어이며, 접근성이 높다는 것은 이러한 제한 사항을 가진 사용자도 불편없이 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 특히 의료 서비스 분야에서, 의료 격오지로의 의료 행위 수행은 공간적, 기술적인 문제를 겪고 있기 때문에, 의료 효과 범위의 확대와 이어지는 상호연동성과 접근성 문제의 해결은 중요한 과제로 남아있다.

웹은 분산되어 있는 정보에 대해 표준화된 접근과 정보 표현 방법을 제공하기 때문에 상호연동성과 접근성 문제 해결에 용이하며, 그뿐만 아니라 웹과 의료 시스템의 접목은 대용량의 디지털 의료 영상을 처리 및 저장하기 위한 분산된 환경을 제공함으로써 더 큰 이점을 가진다.

마지막으로 로봇 수술을 지원하는 영상 처리 시스템의 필요조건 중 하나는 응용성이다. 다양한 분야에서 사용되는 로봇 수술을 위해 지원 영상처리 시스템은 하나의 분야에 대한 사용만으로 제한될 것이 아니라 수술 부위나 방법에 대해서 가능한 많은 방법을 제공해야 한다. 다양한 응용을 위한 영상처리 시스템의 구현 방법은 각종 모듈의 최적화된 조합과 확장이 가능한 개발이다.

본 논문은 기존 의료용 로봇 원격 응용 시스템의 효용성 증가를 위해 웹을 이용한 접근, 배포, 유지보수 등의 관리 비용 절감, 네트워크 운영 시 표준화된 프로토콜, 영상 데이터를 이용한 효율적인 네트워크 관리가 가능하도록 설계하였다. 이러한 설계를 바탕으로 모듈화된 영상처리 기능들의 다양한 조합을 이용하여 시스템의 사용이 수술 목적에 구애받지 않도록 개발하였다.

재료 및 방법

개발된 전체 시스템은 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 표준에 기반을 두어 구성되었으며, 객체 지향적 설계와 모듈화 디자인을 통해 가용성 및 확장성에 이점을 가지도록 설계하였다.

1. 시스템 구조

본 논문에서 개발된 의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템은 Fig. 1과 같은 구조를 가진다. 시스템을 사용하기 원하는 사용자가 인터넷을 통해 시스템이 호스팅 (hosting) 되어 있는 웹 페이지를 요청하여 사용자 인증을

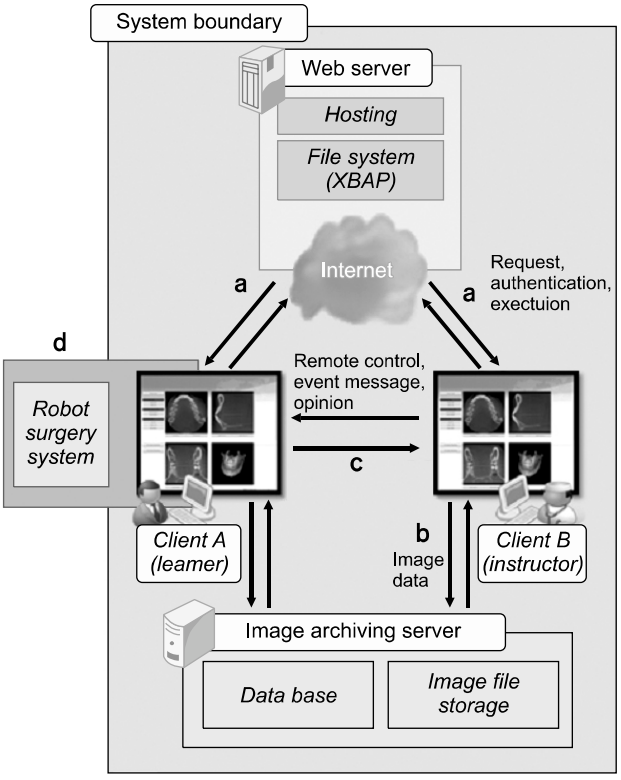

Fig. 1. Architecture of image processing system for medical robot remote application (a) request, user authentication, and program execution of web application. (b) Download of Image Data from Image archiving server. (c) Transfer of messages between users. (d) Interlocking between web application and robotic surgery system.

거치게 되고, 그 후에 자신의 컴퓨터에서 영상 처리 시스템 응용 프로그램을 사용하게 된다. 사용자는 영상 보관 서버(Image Archiving Server)로 접속하여, 원하는 의료 영상을 다운로드하게 된다. 일련의 의료 영상을 응용 프로그램을 통해 출력하고, 원하는 영상처리 과정을 수행한 뒤 영상 보관 서버에 다시 업로드를 수행할 수 있다. 로봇 수술에 대한 원격 의견 교류나 원격 제어가 필요한 경우 타 지역에서 응용 프로그램을 사용 중인 다른 사용자와 연결해 제어 전달, 응용 프로그램 이벤트 전달, 의견 교류를 위한 메시지 전달 기능 등을 수행할 수 있다. 이를 통해 로봇 수술 시스템을 사용하거나 그에 필요한 응용에 대한 도움을 응용 프로그램을 통해 부여받을 수 있게 된다.

2. 소프트웨어

개발된 소프트웨어는 Fig. 2와 같이 다양한 영상 처리 기능들이 계층별로 설계되었으며 웹 브라우저를 기본으로 하

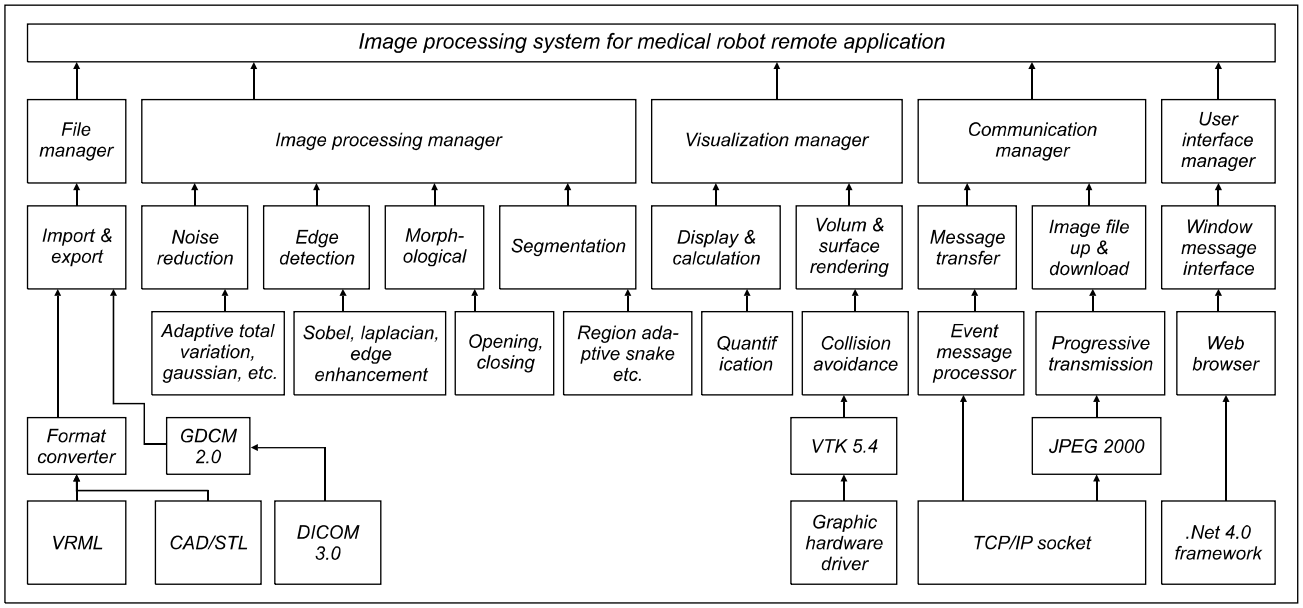

Fig. 2. Layered software configuration of image processing system for medical robot remote application.

는 다루기 쉬운 그래픽 인터페이스와 각 오픈 소스 라이브러리와 하드웨어의 체계적인 조합으로 구성되었다. 객체 지향적인 설계를 위해 C#을 이용한 .Net Framework 4.0에서 개발되었으며, WPF (Window Presentation Foundation) 브라우저 응용 프로그램으로 구성되었다.

파일 관리자(File Manager)는 DICOM 파일 입출력을 수행한다. 네트워크로 획득하는 영상 외에 사용자가 다루고자 하는 영상 데이터를 Import/Export 모듈로 입출력 수행하며, 해당 모듈은 오픈 소스 라이브러리인 GDCM (Grassroots DICOM library) 2.0으로 구성되어 DICOM 3.0의 표준을 따른다. 또한, 포맷 변환기(Format Converter)의 지원으로 DICOM 표준 영상과 더불어, VRML (Virtual Reality Modeling Language), CAD/STL (Computer-aided Design/Stereo Lithography) 등의 3차원 모델 영상 입출력 또한 가능하도록 설계되어 다양한 응용에 있어 더욱더 큰 강점을 가진다.

영상처리 관리자(Image Processing Manager)는 획득된 DICOM 영상의 처리를 수행하며 잡음 제거(Noise Reduction), 경계 검출(Edge Detection), 형태소 필터(Morphological Filter), 영상 분할(Image Segmentation)의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 또한 세부의 알고리즘 모듈들로 구성되어 있다. 잡음 제거 모듈은 적응형 총변이 기법 외에도 가우시안 필터(Gaussian filter)와 중간값 필터(Median filter) 알고리즘의 수행이 가능하다. 경계 검출 모듈은 Sobel, Laplacian, Edge enhancement 알고리즘으로 구성되어 있어 다양한 환경에서의 외곽을 검출하여 로봇 수술 계획에 도움이 되도록 구성되었다. 형태소 필터는 열림(Opening), 닫힘(Closing)의 알고리즘의 구현으로 구성되었으며, 영상 분할 모듈의 알고리즘으로는 Region adaptive snake 알고리즘 외에도 문턱치화(Threshold)와 SRG (Seed-point Region Growing)가 구현되어 각 필요한 모듈을 호출하여 사용할 수 있다.

가시화 관리자(Visualization Manager)는 각 영상의 출력과 3차원 모델링을 관리하며 표시 및 계산(Display/ Calculation) 모듈과 볼륨 및 표면 렌더링(Volume/Surface Rendering) 모듈로 구성되어 있다. 표시 및 계산 모듈은 2차원 영상의 출력 및 영상 분석에 필요한 수치 측정을 담당하고, 거리(distance), 각도(angle), 부피(volume) 등의 정량화를 수행하는 모듈로 구성되어 있다. 오픈 소스 라이브러리인 VTK (Visualization toolkit)를 이용하여 구현된 볼륨 및 표면 렌더링 모듈은 렌더링 외에도 로봇 팔과 생체 구조와의 충돌을 예방하기 위한 충돌 회피(Collision Avoidance)가 추가 구현되었다.

통신 관리자(Communication Manager)는 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 소켓(Socket)을 이용한 각 메시지 전송이나, 영상 전송 등의 역할을 수행할 수 있도록 설계되어 있으며, 마지막으로 사용자 인터페이스 관리자(User Interface Manager)는 .Net Framework 4.0에 기반을 두어 브라우저 응용 프로그램에서 풍부한 그래픽 구성요소와 인터페이스들을 사용할 수 있도록 디자인되었다.

결 과

1. 파일 관리자(File Manager) 모듈

파일 관리자 모듈의 기능은 Table 1에 기재된 것과 같이 DICOM 파일과 기타 영상 파일의 입출력을 담당하며, 입출력 기능은 크게 Import와 Export의 범주로 나뉜다. Import 기능은 Download와 Load로, Export 기능은 Import/Exportload와 Save로 각각 구성되어 있다. Net Framework 4.0에서 지원하는 파일 스트림(File Stream)과 TCP/IP 소켓을 이용하여 구현되었으며, 파일 포맷에 대한 지원확대를 위해 포맷 변환기를 구현하여 2차원 영상과 볼륨 및 표면 렌더링 기술로 모델링된 3차원 영상 간의 변환을 지원하여 기능을 확대하였다. 지원하는 현재 파일 포맷은 의료영상 표준인 DICOM 포맷과 인터넷에 3차원 공간을 표현하는 그래픽스 데이터 기술 언어인 VRML와 컴퓨터를 이용한 3차원 설계 포맷인 CAD(STL)이 있으며, 포맷 변환기의 추가구현으로 추가 포맷을 다룰 수 있다.

2. 영상 처리 관리자(Image processing manager) 모듈

영상처리 모듈은 많은 기능들의 조합으로 이루어져 있기에, 영상 모듈의 조합을 이용해 각 수술 분야에 맞는 다양한 응용이 가능하다. 크게 잡음 제거, 경계 검출, 형태소 필터, 영상 분할로 나뉘며, 각 영상 알고리즘의 실행에 연쇄적으로 처리가 가능해, 영상 데이터에 대한 분석 실험이 가능하다.

1) 잡음 제거(Noise Reduction): 병원에서 CT나 MRI로부터 측정된 의료영상들은 다양한 잡음들에 의해서 오염되어 획득되게 된다. 특히 CT영상 촬영에서 X선의 탄성산란으로 발생되는 간섭과 광학적 불안전성으로 인한 잡음, 영상의 압축 및 전송에서 발생하는 잡음은 영상의 주요 왜곡 요소이다. 이러한 잡음들은 중심 극한 정리(Central Limit Theorem)에 따라서 가우시안 확률 분포를 가지거나 임펄스 잡음 형태로 나타난다.[11,12] 특히 의료용 로봇 시스템의 수술계획단계에서 의료영상의 잡음제거에 대한 결과는 매우 세밀한 처리결과를 요구한다. 잡음으로 인해 오염된 영상정보는 의료 전문의에게 잘못된 수술계획을 세울게 할 수 있을 뿐만 아니라, 잘못된 수술계획은 로봇수술에서 심각한 문제로 발생할 수 있다. 반대로 영상의 잡음요소를 지나치게 줄인 경우에는 환자의 중요한 세부정보를 훼손시켜 잡음을 제거하지 않았을 경우보다 나쁜 결과를 가져올 수도 있다. 따라서 의료영상의 잡음을 줄이는 방법은 매우 신중하게 적용되어져야 한다.

(1) 적응형 총변이 기법을 이용한 가우시안 잡음 제거 방법: 본 시스템에서는 의료영상 중요한 정보를 훼손시키지 않기 위한 적응형 총변이 방법[13]을 도입했다. 일반적으로 영상의 불균일한 영역이나 경계와 같이 변화율이 큰 영역에서는 그 영역의 지역분산이 높게 나타난다. 따라서 기존의 총변이 방법의 제어 파라미터 람다(λ)를 영상의 지역분산에 따라 가변적으로 변화하도록 설정한다면, 좀 더 영상의 세부영역을 잘 보존할 수 있다.

$$\lambda_{m,n} = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{1}{1 + \left(\frac{m_{threshold}}{V(m,n) + \varepsilon} \right)^{E}} + \lambda_{\min} \quad (1)$$

식 (1)은 영상의 지역분산 특성에 따라 영역별로 변화하는 람다를 나타낸다.

식 (1)에서 $\lambda_{m,n}$는 영상의 영역에 따라 새롭게 설정된 제어파라미터이고, $m_{threshold}$는 잡음의 영향을 고려한 임계값을 나타내며, $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$는 영역별로 변화될 제어파라미터 람다의 최대, 최소 범위를 나타낸다. Fig. 3의 d는

Table 1. Design configuration of file manage module.

Category	Function	Target	Mean	Remark
Import	Download	DICOM[a], VRML[b], CAD(STL)[c]	TCP/IP[d]	-
	Load	DICOM	File stream	From local storage
		VRML, CAD(STL)	Format converter, File stream	
Export	Upload	DICOM	TCP/IP	
		VRML, CAD(STL)	TCP/IP, Format converter	
	Save	VRML	Format converter	.wrl exporter
		CAD(STL)	Format converter	.stl exporter

[a]Digital imaging and communications in medicine, [b]Virtual reality modeling language, [c]Computer-aided design/Stereo lithography, [d]Transmission control protocol/Internet protocol.

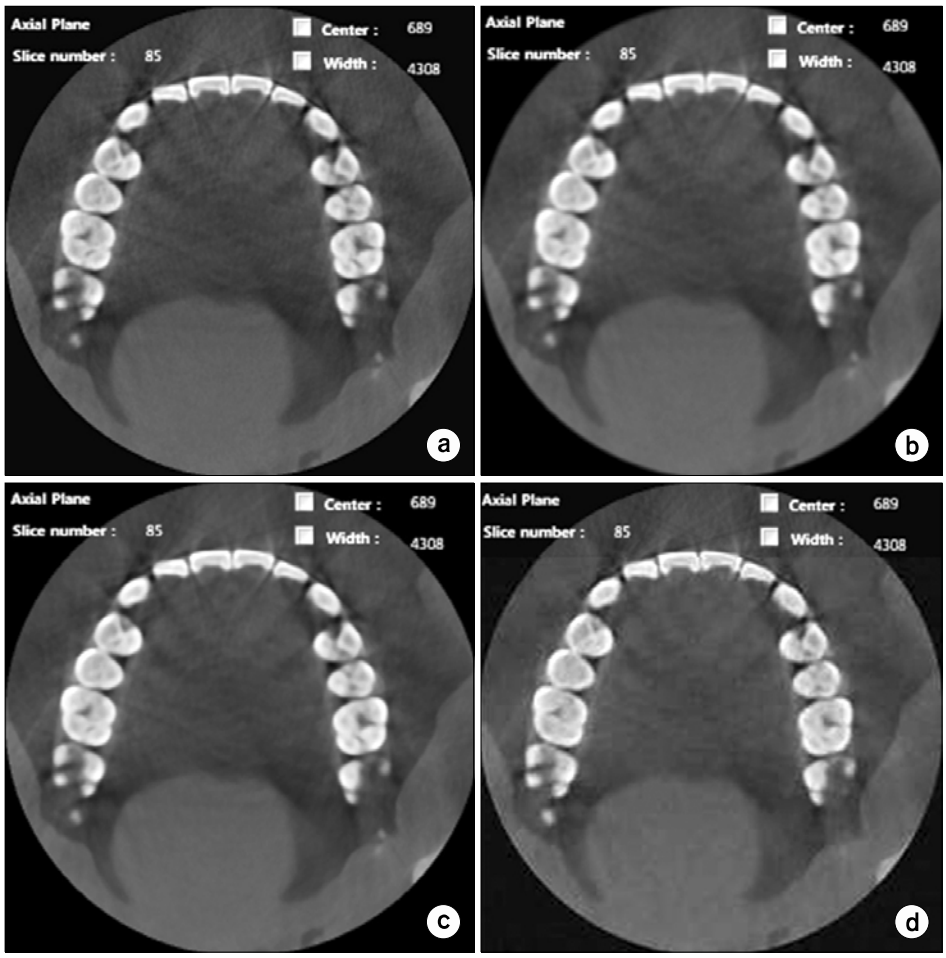

Fig. 3. Results of applying noise reduction filter to dental CBCT data. (a) Original image (b) Gaussian filter (c) Median filter (d) Adaptive total variation method.

적응형 총 변이 방법을 DICOM 원본영상에 적용한 결과를 나타낸다. 적응형 총변이 기법을 이용한 가우시안 잡음 제거 방법은 중요한 신경 등의 신체 정보를 보존함과 동시에 영상 품질 향상에 도움이 되어 수술 계획 등에 있어 효과적으로 활용된다.

(2) 기타 잡음 제거 기법: 적응형 총변이 기법과 더불어 영상획득 및 저장, 전송과정에서 발생하는 잡음을 최대한 제거하기 위하여 기존에 많이 알려진 가우시안 필터[14]와 중간값 필터를 구현하였다. 각 잡음 제거 모듈은 독립적, 종속적으로 선택 실행 가능하고, 잘못된 실행에 대한 전단계로의 회복이 용이하도록 구현되어 있기에 모듈의 조합 호출 통한 영상 향상을 기대할 수 있다. Fig. 3은 각 잡음 제거 기법의 결과를 원 영상(a)를 이용해 비교한 그림이다. Fig. 3의 (b)는 가우시안 필터를 이용하여 영상의 잡음을 제거한 영상으로 Fig. 3의 (c)에서 보이는 중간값 필터와 더불어 영상 내의 전체적인 잡음 제거를 효과적으로 수행한다. 3×3 마스크를 이용하여 구현되었으며, 가우시안 필터는 가우시안 함수를 이용하여 구해진 가중치를 이용해 영상 값을 획득하고, 중간값 필터는 마스크 내에서 얻어진 밝기 값 중 중간 위치에 해당하는 밝기 값을 현재 위치의 밝기 값으로 대체함으로써 구현된다.

2) 경계 검출(Edge Detection) 필터: 경계 검출 알고리즘으로는 Sobel 필터, Laplacian 필터, Edge enhancement가 구현되었다. 각기 다른 용도의 경계 검출 알고리즘을 사용함으로써 여러 상황에 맞는 충분한 기능을 제공하고자 하였다. Fig. 4는 각 경계 검출 알고리즘의 비교 영상이다.

Fig. 4의 (b)에서 Sobel 필터는 비선형 연산자로서 사용하는 마스크(mask) 영역에서 양 끝단에 속한 화소들 사이의 합의 차이를 구한 후, 이를 수평과 수직 방향에 대하여 평균 크기를 구함으로써 경계 부위를 강조하는 역할을 한다. Sobel 필터는 보통 3×3 크기의 마스크로 정의되며, 잡음에 강하고 굵게 나타나는 특성을 가지고 있다.

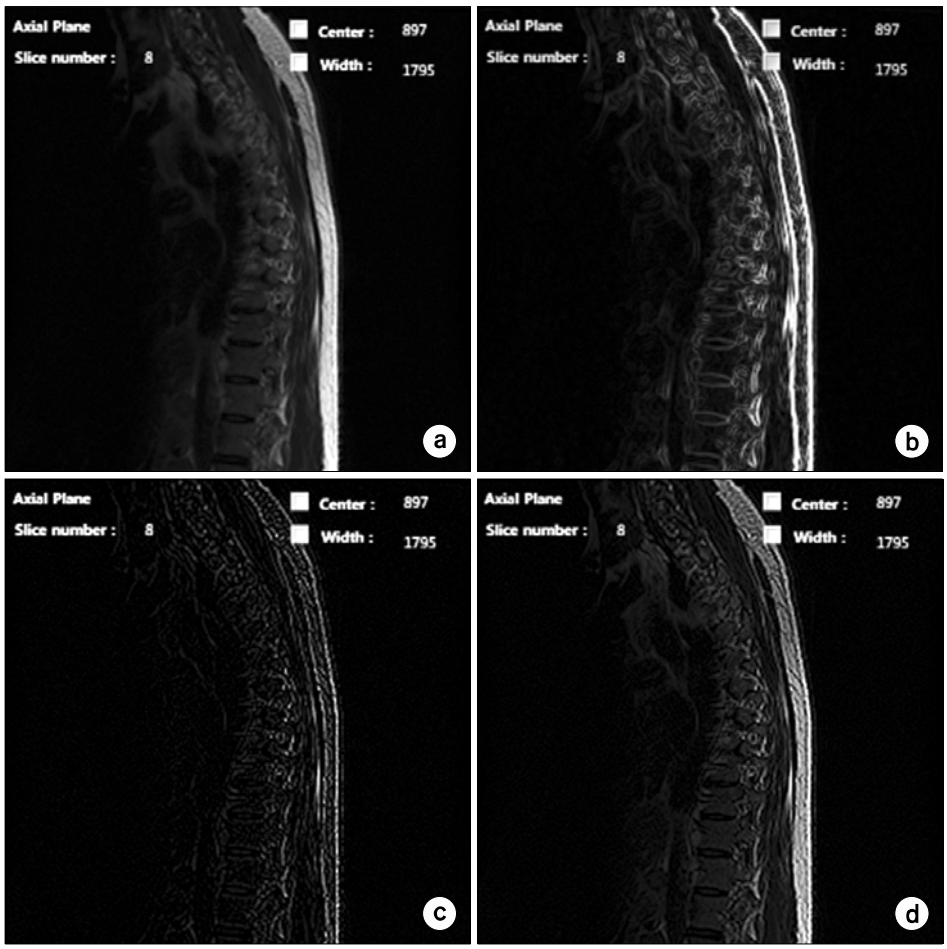

Fig. 4. Results of applying edge detection filter to spinal MR image (a) Original image (b) Sobel filter (c) Laplacian filter (d) Edge enhancement.

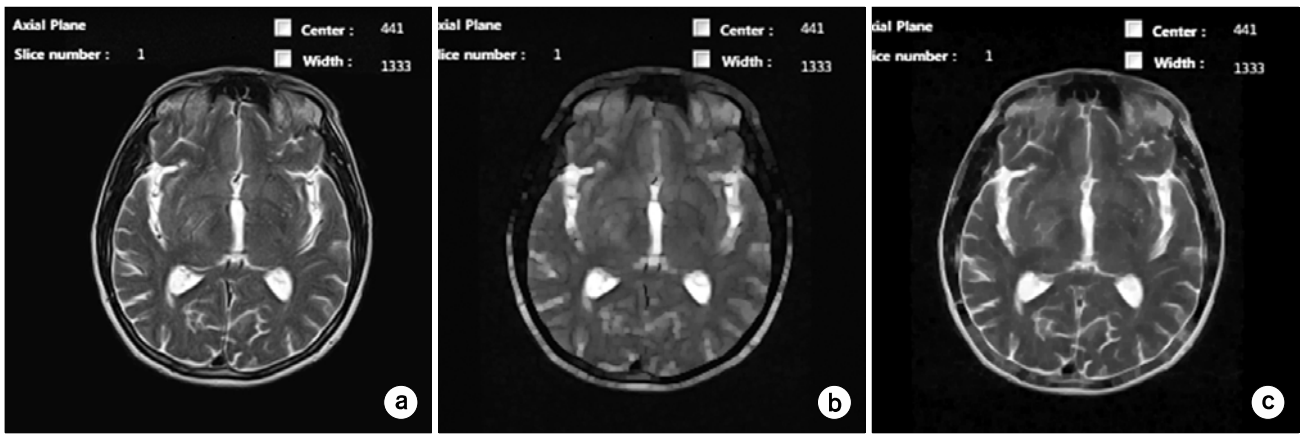

Fig. 5. Results of applying morphological filter to brain MR image (a) Original image (b) Opening operation (c) Closing operation.

Fig. 4의 (c)와 (d)에 해당하는 Laplacian 필터와 Edge enhancement는 모두 4방향 Laplacian 필터를 이용하여 구성되었고, edge enhancement는 Laplacian 필터로부터 얻어진 값을 원 영상에 더하는 방식으로 구현되었다. 이 모듈들은 로봇수술에 있어서 높은 밝기 값을 가지는 뼈나 생체 조직 검출에 용이하게 사용될 것이며 수술 계획에 있어서 경계

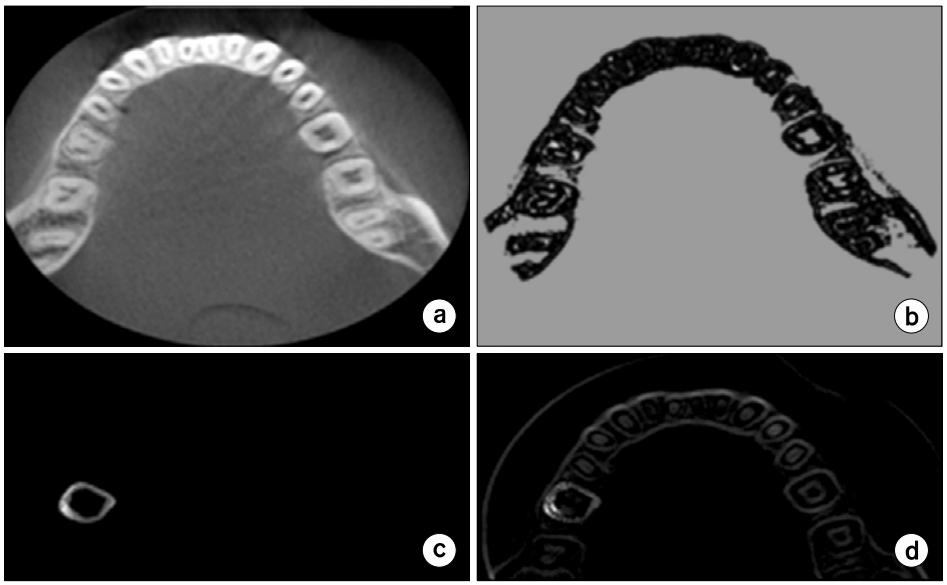

Fig. 6. Results of dental segmentation using region adaptive snake algorithm (a) Original image (b) Threshold image for energy function (c) Segmented contour in a tooth (d) A set of segmented contour.

검출을 보다 용이하게 하는 용도로 사용된다.

3) 형태소(Morphological) 필터: 형태소 필터는 열림 연산(Opening operator)과 닫힘 연산(Closing operation)으로 구현되었다. 열림 연산과 닫힘 연산은 침식과 팽창의 순서로 정의할 수 있으며, Fig. 5의 (b)와 같이 열림 연산은 영상의 외곽선 부분들을 부드럽게 하고, 좁은 지협들을 쪼개고, 얇은 돌출 부분을 제거할 수 있는 기능을 가지며, 특히 영상 내의 잡음을 제거하고 불필요한 작은 요소를 제거하는 기술이다. 또한 닫힘 연산은 Fig. 5의 (c)와 마찬가지로 외곽선을 부드럽게 하지만, 열림 연산에 비해 좁은 지협들과 길고 얇은 신호들을 합치고 작은 구멍들을 제거하여 외곽선의 간격을 채우는 기능을 수행한다. 형태소 필터의 사용은 경계 검출과 더불어 정확한 경계 데이터를 추출하는 역할을 수행한다.

4) 영상 분할(Image Segmentation): 의료용 로봇 수술을 위해서는 2차원 영상의 임상적인 판독뿐만 아니라, 3차원 공간적 정보 바탕의 수술계획이 선행되어져야 한다. 따라서 획득된 영상의 잡음 제거 과정이 끝나면 영상 내의 관심영역을 분할하고, 해부학적 3차원 데이터들의 그룹을 생성하는 과정이 실행되어야 한다.[15] 영상분할 방법에 대한 연구는 명암도에 기반을 둔 문턱치화를 기본으로 하여, 확률분포, 총변이, 유전자 알고리즘 등등에 기반을 둔 다양하게 연구가 진행되었다. 하지만 각각의 영상마다 획득과정이 다르고 사용되는 목적이 광범위하기 때문에 모든 영상에 적용할 수 있는 최적화된 자동화 분할방법을 찾는 것은 매우 힘들다. 개발된 시스템에서는 수술 전 계획 단계에서 쉽게 적용할 수 있는 문턱치화를 비롯하여 명암도 범위와 중심 선택 분할, Region Adaptive Snake 알고리즘을 시스템에 적용하였다.

(1) 명암도 범위와 중심 선택 분할: 명암도 범위와 중심 값을 정함으로써 선택된 영역만을 표시 하는 방법으로 식 (2)와 같다.

$$f(x,y)=\begin{cases} f(x,y) & \text{if } G_{center}-\frac{G_{width}}{2}\le f(x,y)\le G_{center}-\frac{G_{width}}{2} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

G_{center}를 중심으로 $\pm G_{width}/2$에 해당하는 픽셀 값은 보존하고 그 외의 값은 출력하지 않음으로서 선택된 영역만 화면에 출력한다. 명암도 범위와 중심 선택을 이용한 방법은 수술 전 계획 단계를 위해 개발된 어플리케이션의 마우스 메시지와 연동하여 효율적으로 사용될 수 있다. 위의 영상분할은 어플리케이션 상에서 마우스 클릭 후 이동하는 거리에 따라서 명암도 범위와 중심 값이 새롭게 설정하여 범위 안에 선택된 픽셀들을 실시간으로 출력된다.

(2) Region Adaptive Snake: Region Adaptive Snake 알고리즘[16]은 분할이 어려운 로봇 수술용 영상(예: CBCT 영상)을 위해 연구 진행 중이며 에너지 함수 E_{snake}는 식(3)와 같이 내부(internal) 에너지, 외부(external) 에너지, 영상(image)에너지의 합으로 정의한다.

$$E_{snake}=\int (E_{internal}+E_{external}+E_{\fallingdotseq})ds \quad (3)$$

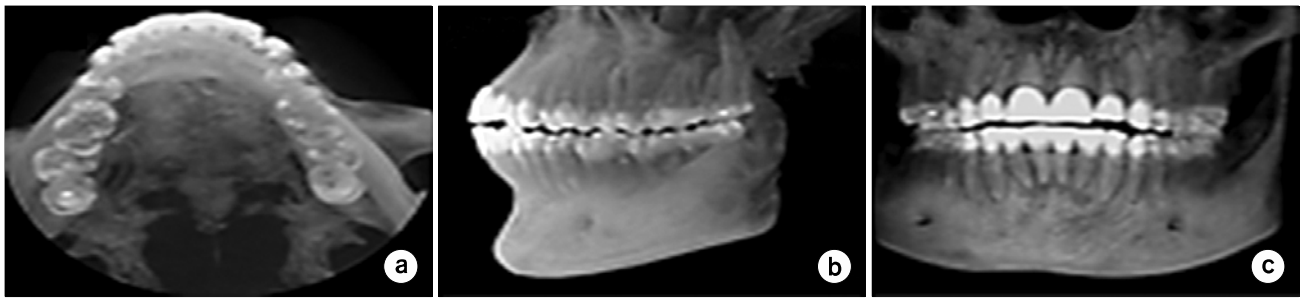

Fig. 7. Results for maximum intensity projection of dental CBCT data (a) axial view (b) sagittal view (c) coronal view.

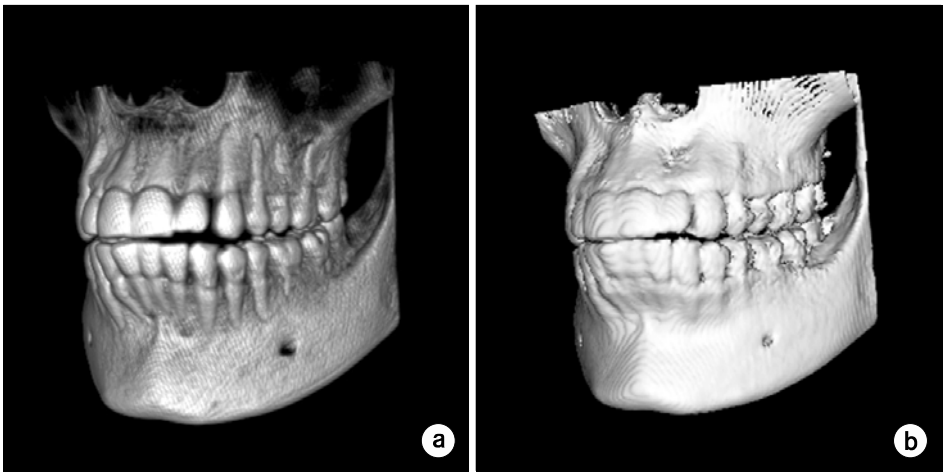

Fig. 8. The result of reconstructing CBCT data with 3D model (a) Volume rendering (b) Surface rendering.

Snake는 관심영역 주변에 초기화 되며, 초기화된 곡선은 에너지 함수 E_{snake}의 합이 최소가 되는 목표 값으로 추적해 가는 함수이다. 경계는 스네이크의 형태를 표현하는 스플라인 곡선에 해당되며 일반적으로는 스플라인 곡선 위의 점들 또는 스플라인 곡선의 제어 점들로 표현된다. Fig. 6은 치아 영상에서의 Region Adaptive Snake 결과를 보인다. (a) 주어진 입력 영상에서 초기 경계를 입력 받으면, 먼저 (b) 에너지 함수의 계산에 사용될 임계치 영상을 구성한다. (c)는 단일 치아 주변에 생성된 초기 경계가 반복적으로 새로운 경계로 대치되며 E_{snake}의 합이 최솟값을 갖는 곡선을 영상 분할을 위한 경계선과 대응된 결과 그림이다. (d)는 전체 치아 경계를 표시하기 위해 Region Adaptive Snake 알고리즘을 이용하여 얻어진 경계들의 영역에서 원 영상으로부터 대응되는 밝기 값으로 구성한 치아 경계를 보인다.

3. 가시화 관리자(Visualization Manager) 모듈

가시화 관리자는 3차원 모델링에 대한 기능을 제공하거나 주어진 영상의 정량화 모듈을 하위로 가지고 있으며, 로봇 수술에 있어서 내비게이션(navigation)에 해당하는 역할을 수행할 수 있도록 디자인되었다.

1) 표시 및 계산(Display/Calculation) 모듈: 영상의 표시 및 영상 내에서의 계산을 수행하는 모듈로서 설계되었다. 2차원 영상의 출력과 3차원 영상의 출력을 구현하고, 각 영상에서의 이벤트들을 정의함과 동시에, 이벤트를 기반으로 한 도구들을 구성하였다. 영상 출력과 동시에 MIP (Maximum Intensity Projection)과 마우스, 키보드 이벤트를 활용한 사용자 정의 영상 분할의 실행이 가능하다. 로봇 수술에 활용되는 혈관조영술 등에 자주 사용되는 MIP는, 각 화면에서 겹치는 영상 내에서 최대의 밀도 값을 가지는 픽셀을 선택하여 출력해 줌으로써, 2차원 데이터 내에서 더욱더 많은 정보를 표현할 수 있도록 해준다(Fig. 7). 또한, 표시 및 계산 모듈의 하위인 정량화(Quantification) 모듈은 각 해당 영상에 대해 거리, 각도, 부피 측정으로 2차원 영상 및 3차원 볼륨 영상의 정량화를 지원한다.

2) 볼륨 및 표면 렌더링(Volume/Surface Rendering) 모듈: 해당 모듈은 얻어진 DICOM 데이터를 3차원 가시화

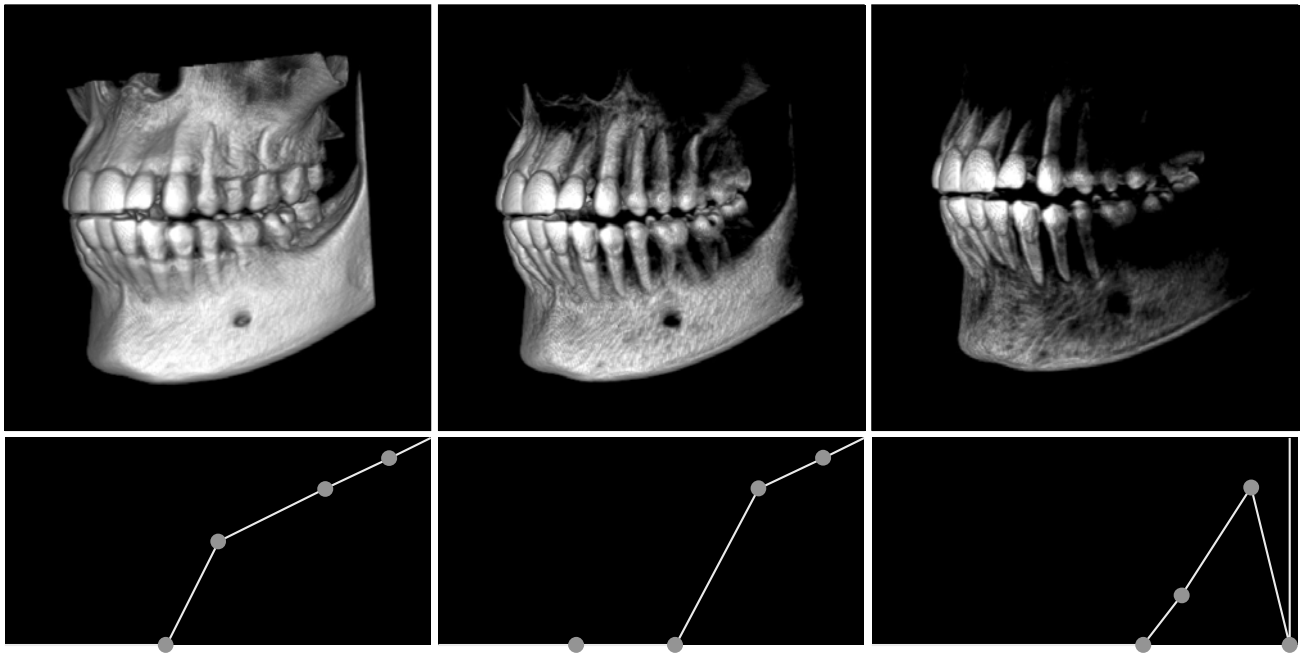

Fig. 9. Opacity transfer function of volume model, x-axis: intensity (min～max), y-axis: opacity (0～1).

하는 기능들로 구성되었으며, 모듈을 이루는 기능으로는 볼륨 렌더링과 표면 렌더링으로 구성되었다. 먼저 Fig. 8a의 볼륨 렌더링은 복셀(Voxel)을 기본 단위로 하는 3차원 데이터 값들을 사용하여 입체적인 영상을 만들어내는 렌더링 기법이다.[16-18] 본 시스템에 구현된 볼륨렌더링 기법은 가상의 광선으로부터 투영된 복셀에 칼라와 불 투명도를 할당하고 그 할당된 값을 합성하는 광선추적(ray-casting)기법에 기반을 두고 있다. 또한 Fig. 8b의 표면 렌더링 기법은 표면 데이터만을 추출하여 모델링한다는 것에 볼륨 렌더링 기법과 차이가 있다. 또한 표면 렌더링은 Adaptive Marching Cube 알고리즘을 이용하여 3차원 표면영상을 VRML, CAD (STL)로 변환하여 저장할 수 있는 기능을 제공하였다.[18,19] 이를 통해, 원격지의 의사나 시스템에 전송, 공유가 가능하였다.

(1) 불투명도 전이 함수(OTF: Opacity Transfer Function): 광선추적 방법에서 불투명도(opacity) 값의 할당은 3차원 영상의 경계를 나타낼 때 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 제안되었지만, 좀 더 응용하여 적용할 경우 명암도 임계치를 이용한 영상분할만으로는 확인할 수 없는 내부 영역의 3차원 정보를 확인할 수 있다. 또한 볼륨 렌더링된 데이터는 용량이 커 원격 응용에 있어서 중요시 되는 공유 문제에서 문제가 생긴다. 이를 해결하기 위해서 OTF을 구현하여, 몇 개의 실수 데이터를 이용해 현재 모델의 분할 정보만을 전송하는 기법을 구현하였다. OTF는 볼륨 데이터 내 복셀의 밝기와 불투명도를 매칭시켜 실시간으로 모델 영상을 제어할 수 있도록 해주며, 매칭된 두 실수 밀도와 불투명도의 전송만으로 모델의 정보를 표현할 수 있어, 원격 응용에 있어 효율적으로 사용되었다. Fig. 9에서 OTF의 변화로 3차원 모델 영상의 분할 결과를 확인할 수 있다.

(2) SRG (Seed-point Region Growing) 모듈: 일단 영상분할을 통해 특정 명암도 내의 데이터가 선택되면, 데이터들은 해부학적 위치와 목적에 따라 각각 개별적인 객체로 분류될 필요가 있다. SRG은 분할된 영상결과로부터 연결된 요소들을 찾는 방법으로 객체를 추출할 때 유용하게 이용될 수 있다. 본 시스템에서는 일반적인 SRG의 좌표를 확장하여 3차원 SRG를 통해 해부학적 객체 추출을 위한 모듈을 개발하였다. 영상 분할된 영역 집합을 f, 선택된 한 점을 p라고 가정하고 p로부터 6-연결성(Connectivity) 또는 26-연결성을 가지는 블록을 B라고 가정하면 SRG는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.[11,12,18]

$$X_k = (X_k \oplus B) \cap f \qquad k = 1,2,3.... \tag{4}$$

이 때, X_k는 추출된 요소를 나타내고, $X_0 = p$이며 연산자 $\oplus$는 팽창연산을 나타낸다.

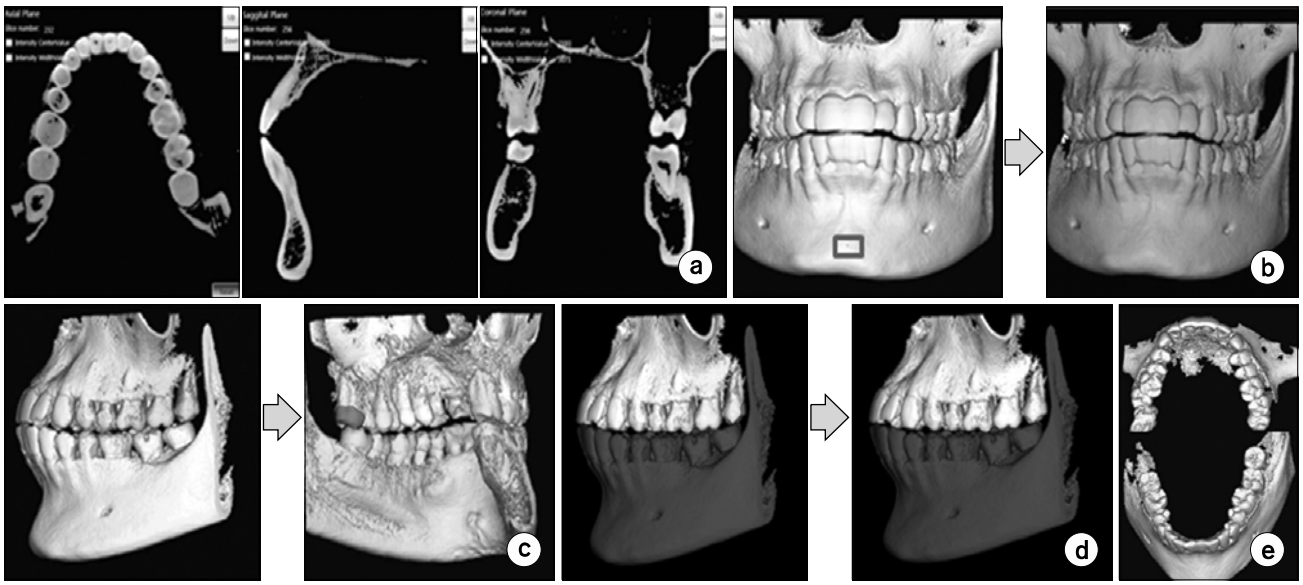

Fig. 10. The method extracting the maxilla and mandible (a) Image segmentation (b) 3D Seeded region growing (c) Object separation (d) Object combination (e) Extracting result of maxilla and mandible.

Fig. 10은 CBCT 치아영상의 상악골과 하악골을 분리하여 치아 진단에 사용하기 위한 모델을 생성과정 및 결과를 나타낸다. Fig. 10의 (a)는 영상분할 된 결과를 나타내고, (b)는 6-연결성을 가지는 블록을 이용하여 3차원 SRG를 적용한 결과이다. (c)는 상악골과 하악골을 분리하기 위해서 사용자가 선택한 두 개의 시작점(Seed Point)으로부터 팽창연산을 실시하여 서로 만나는 부분을 경계로 설정하고 영역을 분할한 결과이고, (d)는 분할된 결과영상을 다시 결합한 결과를 나타낸다. 최종적으로 (e)에서 볼 수 있는 듯, 상악골과 하악골은 각각의 치아영상이 각각의 객체로 추출할 수 있다. 로봇 수술 응용에 있어서 조직의 자동 분할은 영상 판돌, 수술 계획, 집도 등에 있어서 생체 조직 정보를 확인하고, 특히 3D 모델의 조직 정보는 충돌 회피 모듈 등과 함께 사용된다.

(3) 충돌 회피(Collision Avoidance) 모듈: 분할된 3차원 영상의 정보를 활용하여 로봇 수술 계획을 세우거나 원격 참여 수술을 진행할 때, 환자의 주요 생체 구조와의 충돌을 방지하는 모듈이 필요하다. 이는 오픈 소스 라이브러리인 VTK의 충돌 검출(Collision Detection)을 활용하여 구현되었다. 영상 처리 모듈들을 활용하여 분할된 생체 구조를 표시 및 계산 모듈에서 위치, 면적을 확인하고, 측정된 정보에 기반을 두어 경계 박스(bounding box)를 생성한다. 생성된 경계 박스는 침습 장비와의 충돌 검출 계산에 사용되고, 진행방향에 대한 충돌 예측이 구현된다. 이는 수술 집도 장비와의 피드백으로 연계 가능하도록 구현했다.

4. 통신 관리자(Communication Manager) 모듈

통신 관리자 모듈은 원격지의 의사 혹은 시스템과의 의견 교환, 데이터 공유를 위하여 구현하였으며, 최소한의 데이터를 전송함으로써 다양한 목적을 수행할 수 있다. 모듈로는 메시지 전송(Message Transfer)과 영상 업로드/다운로드(Image File Up/Download) 모듈이 구현되었다.

1) 메시지 전송(Message Transfer) 모듈: 메시지 전송 모듈은 하위 모듈인 이벤트 메시지 처리기(Event Message Processor)의 구현으로 각 사용자의 이벤트들을 메시지화하고 TCP/IP 소켓 통신을 활용하여, 각 시스템과 원격 제어가 가능하도록 구현하였으며, 그 외에도 의견 교류를 위한 메시지 전송을 구현했다. Fig. 11의 구조와 같이 각 원격지의 시스템은 서로의 이벤트를 병렬로 처리하여, 각 시스템을 동기화하며 원격제어를 수행한다. 주처리 장치(Main Processor)에서 사용자의 입력을 통해 발생된 이벤트 정보는 메시지화 되어 송신 버퍼(Send Buffer)로 전달되고, 송신 버퍼의 메시지는 송신 스레드(Send Thread)를 통해, 원격 연결중인 사용자로 전달된다. 또한, 연결된 사용자로부터 수신 스레드(Receive Thread)는 메시지를 전달받고, 주처리 장치로부터 생성된 이벤트 처리 스레드(Event Processing Thread)가 수신 버퍼(Receive Buffer)의 메시지를 주처리 장치와 동시에 병렬 처리하는 구조를 가진다. 웹 응용 프로그

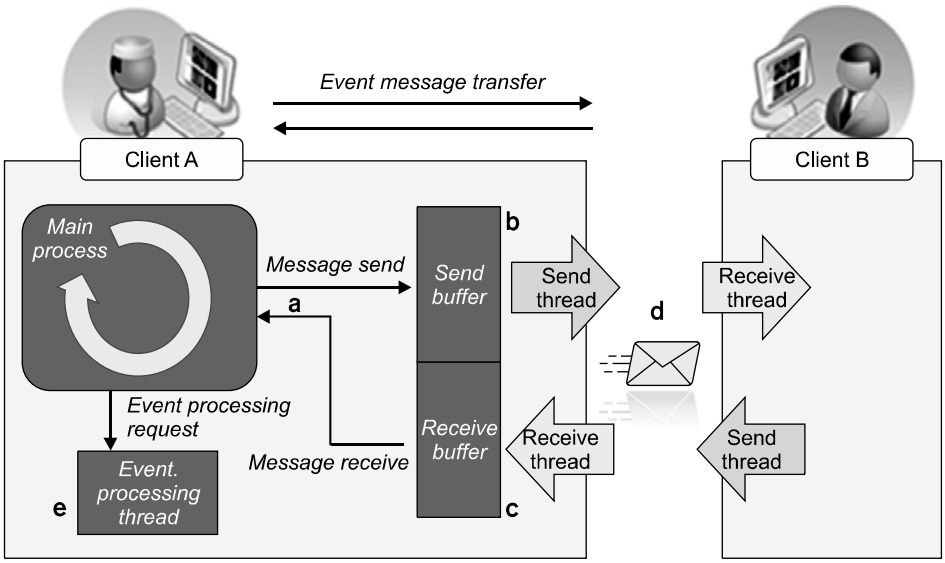

Fig. 11. Event message transfer architecture (a) Message transfer between main process and buffer (b) Message transfer from send buffer to other clients (c) Message receive from other clients (d) Message exchange between clients via TCP/IP (e) Event processing thread.

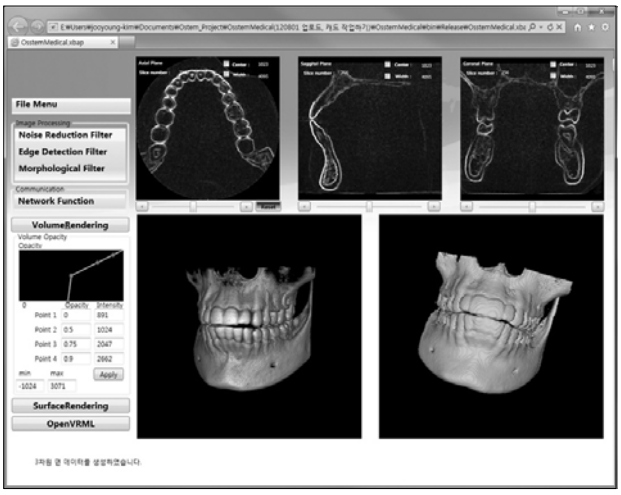

Fig. 12. User interface of Image Processing System for Medical Robot Remote Application.

램에서 실행되는 모든 이벤트는 각 고유의 이벤트 메시지 헤더를 가지며 이벤트 실행에 필요한 값들을 포함시켜 구성된 메시지를 이용해 송신/수신/실행을 수행한다.

2) 영상 업로드/다운로드(Image File Up/Download) 모듈: 해당 모듈은 TCP/IP 소켓 통신을 이용하여 대용량 DICOM와 VRML, CAD(STL) 데이터들의 획득 및 배출을 수행한다. 대용량 DICOM 영상 전송은 많은 시간이 필요하게 되므로 실시간 표시가 어렵다. 이를 해결하기 위해, JPEG (Joint Photographic Experts Group) 2000을 활용한 웨이블릿(wavelet) 변환을 기반으로 하여, SNR (Signal to Noise Ratio) Scalability와 Spatial Scalability를 적용해 하위 계층의 정지영상으로부터 시작하여 상위계층의 영상 정보를 점진적으로 전송함에 따라, 영상의 화질이 순차적으로 증가하도록 구현하였다. 또한 전송된 저화질 영상 정보부터 빠르게 출력해 줌으로써, 전체영상을 주고받는 기존의 시스템에 비해, 빠르게 영상정보를 표현할 수 있었다.[20)]

5. 사용자 인터페이스 관리자(User Interface Manager) 모듈

사용자 인터페이스 관리자 모듈은 .Net Framework 4.0 기반 WPF 브라우저 응용 프로그램으로 구현되었으며, 여러 풍부한 인터페이스들을 활용하여 사용자에게 높은 활용도를 제공하기 위해 디자인되었다. Fig. 12의 왼쪽 메뉴들을 활용하여 조합된 영상처리 모듈들의 독립/연속적으로 수행이 가능하며, 영상 출력 화면을 통해서 결과를 실시간으로 확인할 수 있었다. 웹 응용프로그램은 2차원의 영상정보를 횡단면, 시상면, 관상면을 통해 제공하며, 3차원 가시화를 위한 볼륨 렌더링 화면과 표면 렌더링 화면을 제공한다. 또한 각 모듈에 따라 필요한 하위 대화상자를 호출하여 사용자의 원활한 영상처리와 수술 계획을 가능케 한다. 웹 브라우저를 기반으로 한 의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템은 웹의 특성을 따르기 때문에, 원격지의 사용자 또한 지역 자원(Local resource)을 활용하여 같은 웹 응용 프로그램을 사용하게 되며, 네트워크 기능으로 원격 제어, 원격 의견 교류를 수행할 수 있다.

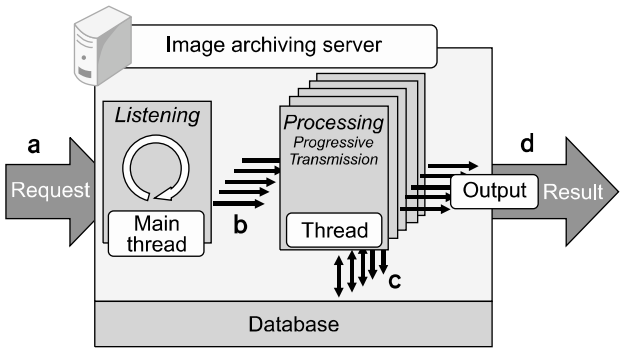

Fig. 13. Image archiving server architecture (a) request of connection from clients (b) action of transmission thread by each client (c) acquisition image data from database (d) transmission image data to clients.

6. 영상 보관 서버(Image Archiving Server)

의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템의 영상 보관 서버를 구현하여 대용량 CBCT 데이터와 VRML, CAD (STL)을 저장하고, 클라이언트의 요청을 받아 데이터베이스의 영상 데이터를 전송하는 역할을 수행한다. Fig. 13은 영상 보관 서버 내에 클라이언트를 처리하는 스레드의 병렬 생성/처리를 설명하는 그림이다. 클라이언트의 접속 요청이 요구되면 클라이언트의 단독 처리를 위한 스레드를 생성하고, 데이터베이스로부터 영상을 읽어, 요청된 전송을 수행한다. 클라이언트의 동시 접속으로 인한 교착상태(Deadlock)를 방지하기 위해 별도의 메모리로 각 클라이언트를 관리하도록 구현하였다. 영상 보관 서버에 저장된 영상은 클라이언트로 전송 시 앞서 4.2에서 설명한 점진적 전송(Progressive Transmission)을 수행한다.

고찰 및 결론

본 논문에서 개발된 의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템은 표준화된 접근방법과 다양한 영상 처리 방법을 레이어별 모듈의 조합으로 제공하였으며, 개발된 모듈들의 재구성으로 특정 분야에서 필요로 하는 요구사항을 만족 할 수 있었다.

개발된 각 모듈의 특징은 다음과 같다. GDCM, DICOM, VRML, CAD(STL)의 여러 라이브러리와 표준을 활용하여 파일의 입출력 및 표준화와 변환을 위한 모듈로 구성된 파일 관리자는 업로드와 다운로드의 기능으로 앞서 강조한 원격 조언, 원격 참여 수술에서의 원격지와 영상 공유를 위한 작업 공간으로 충분히 사용이 가능했고, 뿐만 아니라, Load/Save의 기능으로 서버의 개입 없이 단독 수술 계획 수립을 위한 영상 처리 시스템으로 활용이 가능하였다. 잡음 제거 및 경계 검출, 영상 분할 등을 수행하기 위한 영상 처리 관리자는 영상 모듈의 조합과 배치가 중요한 기존 영상처리 시스템의 특징을 따라, 각 모듈이 객체 지향적으로 설계되어 재조합이 가능하기 때문에, 제공되는 영상처리 모듈을 이용해 용도에 맞는 다양한 영상을 출력할 수 있었다. VTK를 활용하여 3차원 가시화와 정량화, 3차원 데이터 충돌검출 등으로 구성된 가시화 관리자는 로봇 수술에서 실시간 모니터 기능을 수행 가능 하였으며, 재사용을 고려한 설계로 사용자의 장비에 대한 피드백이 추가 구현이 가능해 높은 활용성을 가진다. 원격 제어 및 메시지/데이터 교환의 기능으로 구성된 통신 관리자는 원격 조언 및 원격 참여 수술에 있어서 필수적인 의견 교환 및 원격제어 기능을 수행하도록 디자인되었다. 또한 메시지 프로토콜의 추가 구현을 통해 기존의 펜 이벤트, 쪽지 이벤트 외에도 음성대화나 화상대화 등의 추가 모듈 구현으로 쉽게 접목이 가능해 원격지간의 동일한 작업 공간을 공유하는 플랫폼으로 구성되었다. 마지막으로 사용자에게 직관적인 인터페이스를 제공하는 사용자 인터페이스 관리자와 데이터 교환과 영상 저장을 위한 영상 보관 서버로 구성되었다.

상기된 모듈들의 최적화된 조합을 통해 다양한 분야에서 사용되는 의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템이 개발되었고, 다양한 영상 처리 알고리즘을 사용하여 의료용 로봇 시스템의 수술 계획 수립이 가능하게 구현되었다. 그 뿐만 아니라 원격 데이터 교환, 원격 제어를 이용한 원격 참여 수술, 수술 중 생체 구조 보존을 위한 충돌검출 및 예방, 점진적인 데이터 획득이 가능해 로봇 수술의 시뮬레이션으로서의 응용이 가능할 뿐만 아니라 추가구현을 통한 로봇 수술 플랫폼으로의 성장 가능성을 보였다.

개발된 시스템은 원격 로봇 응용에 있어서 상호 연동성과 접근성의 해결을 위해 웹 서비스 기술을 접목 시킬 방안을 계획하고 검증할 수 있었으며, 개발된 시스템을 통해 분산된 의료 정보에 대한 표준화된 접근 방법과 데이터 표현을 통하여 타 개발된 시스템들에 비해 높은 접근성을 지니고, 상호간의 운용이 가능한 서비스를 제공할 수 있었다. 웹을 이용한 원격 로봇 응용 시스템 개발은 시스템의 배포, 교육, 연동 등에 적은 비용이 사용되어, 의료 격오지로의 의료 행위에 있어서 많은 이점을 가졌다.

향후 과제로 본 논문에서 개발된 시스템이 가지는 필요 용도에 의한 추가적인 개발에 대해서 확장 용이하다는 장점을 토대로 앞으로 발전될 원격 로봇 수술 및 영상 시스

템 분야에 있어서 사용될 모듈들의 추가 구현을 통한 시스템의 확장 구현을 수행하여 로봇 수술 응용 분야를 확장하고자 한다.

참 고 문 헌

1. **Mitsubishi M, Arata J, Tanaka K, et al**: Development of a Remote Minimally-Invasive Surgical System with Operational Environment Transmission Capability, IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003, Taipei, pp. 2663-2670
2. **Ikuta K, Daifu S, Hasegawa T, Higashikawa H**: Hyper-finger for Remote Minimally Invasive Surgery in Deep Area, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2002, Japan, pp. 173-181
3. **Kobayashi Y, Chiyoda S, Watabe K, Okada M, Nakamura Y**: Small Occupanvy Robotic Mechanisms for Endoscopic Surgery, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2002, Japan, pp. 75-82
4. **Paul HA, Mittlestadt B, Bargar WL, et al**: A Surgical robot for Total Hip Replacement Surgery, IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1992, Nice, pp. 606-611
5. **승성민, 강병전, 박석호, 박종오, 김경환**: 뇌 수술을 위한 원격 수술로봇 시스템에 대한 연구. 대한기계학회 춘계학술대회 논문집. 2009, pp. 232-237
6. **Kwon DS, Kyung GU**: Status and prospects of medical robots. Journal of the KSME 42:38-44 (2002)
7. **Delingette H, Pennec X, Soler L, Marescaux J, Ayache N**: Computational Models for Image-Guided Robot-Assisted and Simulated Medical Interventions. Proceedings of the IEEE 94:1678-1688 (2006)
8. **Abolmaesumi P, Salcudean SE, Zhu WH, Sirouspour MR, DiMaio SP**: Image-guided control of a robot for medical ultrasound. IEEE transactions on robotics and automation 18:11-23 (2002)
9. **최진혁, 김영준, 이승빈 등**: 오픈소스를 활용한 로봇 수술용 3차원 수술계획 및 시뮬레이션 소프트웨어 플랫폼 개발. 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집. 2012, pp. 759-760
10. **나군호**: 로봇 수술의 현재와 미래. 대한의사협회지 67-73 (2008)
11. **Gonzalez RC, Woods RE** (하영호, 남재열, 이응주, 이철희 옮김): 디지털영상처리. 2nd ed, 그린, 서울(2002), pp. 232-238
12. **Dougherty G**: Digital Image Processing for MEDICAL APPLICATIONS, CAMBRIDGE, New York (2009), pp. 321-324
13. **김중혁, 김정채, 김기덕, 유선국**: 적응형 총변이 기법을 이용한 가우시안 잡음 제거 방법; CBCT 치과 영상에 적용. 전자공학회 논문지 49:29-39 (2012)
14. **Young IT, Vilet LJ**: Recursive implementation of the Gaussian filter. Signal Processing 44(2):139-151, (1995)
15. **Andrews HC, Hunt BR**: Digital Image Restoration, Prentice Hall, New York (1977), pp. 126-186
16. **Yoo SK, Wang G, Rubinstein JT, Vannier MW**: Semiautomatic Segmentation of the Cochlea Using Real-Time Volume Rendering and Regional Adaptive Snake Modeling. Journal of Digital Imaging 14:173-181 (2001)
17. **Schroeder W, Martin K, Lorensen B**: The Visualization Toolkit, 4th ed, Kitware, New York (2006), pp. 81-118, 161-481
18. **Inc. Kitware**: The VTK User's Guide, 11th ed. Kitware, New York (2010), pp. 119-161, 213-249
19. **Lorensen WE, Cline HE**: Marching Cubes; A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. Computer Graphics Proc SIGGRAPH 21:163-169 (1987)
20. **홍성혜, 김정채, 백진욱, 김기덕, 유선국**: 웹 기반 치과 서비스를 위한 CBCT 치아 영상 압축 및 전송. 대한의학영상정보학회지 15:33-38 (2009)

의료용 로봇 원격 응용을 위한 영상처리 시스템 개발

*연세대학교 의과대학 의학공학교실, †연세대학교 치과대학 통합진료과

김주영*・김중혁*・김정채*・김기덕†・유선국*

본 논문에서는 원격제어가 가능한 의료용 로봇 응용을 위한 웹기반-영상처리 시스템을 구현하였다. 개발된 소프트웨어 시스템은 다양한 영상처리 모듈과 원격 제어동작 모듈로 계층적으로 구성되어 있으며, 계층적 구성은 상위계층의 복잡한 응용을 위한 확장성과 웹에서의 접근성을 만족하였다. 또한, 응용환경의 변화에 따른 처리된 영상의 표시, 전송, 저장 및 공유를 위하여 다양한 DICOM, VRML, CAD (STL) 파일형식을 지원하였다. 메시지를 기반으로 한 데이터 교환과 객체-지향 모듈과 오픈소스 기반의 소프트웨어 구성은 다양한 원격 의료 응용에 따른 다양한 요구조건에 맞는 효율적인 동적 조합이 가능할 것이다.

중심단어: 의료용 로봇, 원격 응용, 영상처리 시스템, 모듈 디자인, 계층 디자인