استفاده از اطلاعات موجود در تصاویر حجمی مغز در هنگام عمل جراحی مغز و اعصاب

علی‌رضا آخوندی اصل[۱] **مهدی خالقیان**[۱] **حمید سلطانیان‌زاده**[۱] **مجید نیلی احمدآبادی**[۱]

۱–دانشگاه تهران، دانشکدهٔ فنی، گروه برق و کامپیوتر

چکیده

در این مقاله نحوه استفاده از تصاویر پزشکی در جراحی‌های مغز و اعصاب بررسی شده و سیستم رباتیکی پیاده‌سازی شده معرفی می‌گردد. این سیستم شامل یک بازوی مکانیکی پنج درجهٔ آزادی بدون موتور جهت تعیین مختصات شش بعدی پروب جراحی، یک کارت واسط مبتنی بر FPGA برای سنجش زوایای ربات، نرم‌افزار نمایش سه بعدی و پردازش تصاویر پزشکی (مانند MRI) مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی TCL/TK و کلاس‌های پردازش تصویر VTK است. این نرم‌افزار شامل قسمت‌های مختلف لازم برای انجام یک جراحی مغز و اعصاب بوده و قابلیت افزودن الگوریتم‌ها و امکانات مورد نیاز جدید را داراست.

واژگان کلیدی: جراحی مغز و اعصاب، بازوی رباتیکی، نمایش سه‌بعدی، پردازش تصویر، هدایت جراحی

۱- مقدمه

با توجه به اینکه جراحی مغز و اعصاب و نمونه برداری از بافتهای توموری نیاز به دقت و ظرافت خاصی دارد، امروزه سیستم‌های کامپیوتری برای کمک کردن به جراح در هدایت جراحی و نمونه برداری تومورهای مغز و اعصاب و همچنین برنامه‌ریزی جراحی قبل از عمل و همینطور تجزیه و تحلیل سه بعدی اطلاعات تصویری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱] [۲] [۳] [۴]. با اینگونه سیستم‌ها جراح قادر خواهد بود بهترین مسیر را برای جراحی و نمونه برداری پیدا کرده و آسیب‌رسانی به مغز را به حداقل ممکن برساند.

به‌طور کلی استفاده از تصاویر پزشکی به پزشک در تشخیص بیماری و وضعیت آن و همچنین انتخاب روش درمان کمک بسیار زیادی می‌کند. در برخی موارد بدون استفاده از این تصاویر تشخیص بسیار سخت و در برخی موارد غیر ممکن است. در جراحی مغز و اعصاب به علت شرایط خاص و حساسی که خود مغز دارد، استفاده درست و صحیح از تصاویر پزشکی می‌تواند کمک بسیار زیادی برای جراح باشد. مغز یک بافت نرم ولی به هم پیوسته است که کنترل کار تمام اعضای بدن بر عهدهٔ آن بوده و قسمت‌های مختلف مغز کنترل اعضای مختلف بدن را برعهده دارند.

نکتهٔ مهم در اینجاست که سلول‌های سیستم عصبی بسیار کند ترمیم می‌شوند، بطوریکه در صورت آسیب رسیدن به یک ناحیه از مغز آن وظیفه دیگر به درستی انجام نمی‌شود و در برخی موارد به‌کلی مختل می‌شود. با توجه به، به هم پیوسته بودن مغز در صورتی که نیاز به دسترسی به قسمت‌های داخلی آن باشد نیاز به عبور از مسیری در داخل مغز است که کمترین خطر را داشته باشد. جراح بدون استفاده از تصاویر فقط می‌تواند سطح مغز را مشاهده کند و نمی‌تواند قسمت‌های داخلی آن را مشاهده کند.

بطور کلی با استفاده از تصاویر مناسب می‌توان قسمت‌هایی را که با چشم غیر مسلح قابل تمایز نیستند، تشخیص داد. استفاده از تصاویر در قبل از عمل نیز به جراح در پیدا کردن بهترین مسیر عمل کمک می‌کند. جراح با در دست داشتن اطلاعات مربوط به قسمت‌های مختلف مغز می‌تواند بهترین مسیر را که کمترین آسیب را به مغز می‌رساند انتخاب کند. در نتیجه نیاز به برداشتن حجم زیادی از جمجمه برای جراحی نیست و این خود باعث کوتاه شدن مدت جراحی و همچنین دورهٔ درمان می‌شود.

استفاده از تصاویر در هنگام عمل نیز می‌تواند به جراح در بررسی وضعیت بیمار و شرایط جراحی کمک کند. برای مثال جراح می‌تواند بررسی کند که آیا تمام تومور مورد نظر به‌صورت کامل برداشته شده است. همچنین در صورت وقوع خونریزی می‌تواند از محل آن و مدت این خونریزی و شرایط آن نیز آگاه شود.

به‌طور کلی در یک سیستم جراحی با کمک تصاویر، تصاویری که قبل از عمل از بیمار گرفته شده، جمع بندی شده و با توجه به موقعیت و شرایطی که تصویر گرفته شده اطلاعات مناسبی در اختیار جراح قرار می‌گیرد. این اطلاعات می‌تواند از روش‌های مختلف تصویر برداری بدست آمده باشند. در مرحله بعد قسمت‌های مختلف که در جراحی مهم هستند، مشخص شده و مدل دوبعدی و سه‌بعدی مناسبی برای این قسمت‌ها بدست می‌آید. سپس جراح با استفاده از این داده‌ها بهترین مسیر را برای جراحی مشخص می‌کند. سپس با استفاده از روش‌های مختلف موقعیت پروب جراحی برای نرم‌افزار مشخص می‌شود و با استفاده از این موقعیت اطلاعات و تصاویر مناسبی در اختیار جراح قرار می‌گیرد.

با انجام مراحل بالا جراح به بهترین شکلی از وضعیت بیمار و بیماری در قبل از عمل و همچنین در هنگام عمل آگاه می‌شود. در صورت عدم استفاده از این اطلاعات، جراح خود باید با توجه به این تصاویر محل را تشخیص داده و بر اساس دریافت خود عمل را انجام دهد.

در این مقاله ابتدا به بررسی اجزای تشکیل دهنده سیستم پیاده‌سازی شده پرداخته و روش مورد استفاده برای ارتباط وسیله جراحی با نرم‌افزار نمایش بیان شده و سپس در مورد نرم‌افزار پردازشی و نمایشی توسعه یافته توضیح داده خواهد شد.

۲- نمودار بلوکی سیستم جراحی مغز

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ابتدا سیگنال انکودرهای ربات توسط کارت UPI[1] تبدیل به زوایای مطلق شده به نرم‌افزار کارت واسط ارسال می‌شود. نرم‌افزار محاسبه کنندهٔ موقعیت نوک ربات از طریق پروتکل TCP/IP اطلاعات سنسوری را از نرم‌افزار کارت واسط دریافت کرده، موقعیت شش بعدی پروب جراحی را در دستگاه مختصات تصویر محاسبه می‌کند و سپس این موقعیت را به نرم‌افزار پردازش تصویر ارسال می‌کند.

نرم‌افزار پردازش تصویر با توجه به مکان و جهت پروب جراحی، سه تصویر عمود برهم دو بعدی (Sagittal, Coronal, Axial) را به دست آورده و پس از بازسازی سه بعدی تصویر مغز و پروب جراحی از زاویهٔ دید مورد نظر تصاویر را نمایش می‌دهد. در ابتدای عمل جراحی برای یکسان سازی دستگاه‌های مختصات ربات و تصاویر پزشکی احتیاج به انطباق دو فضا می‌باشد.

۳- بازوی رباتیکی

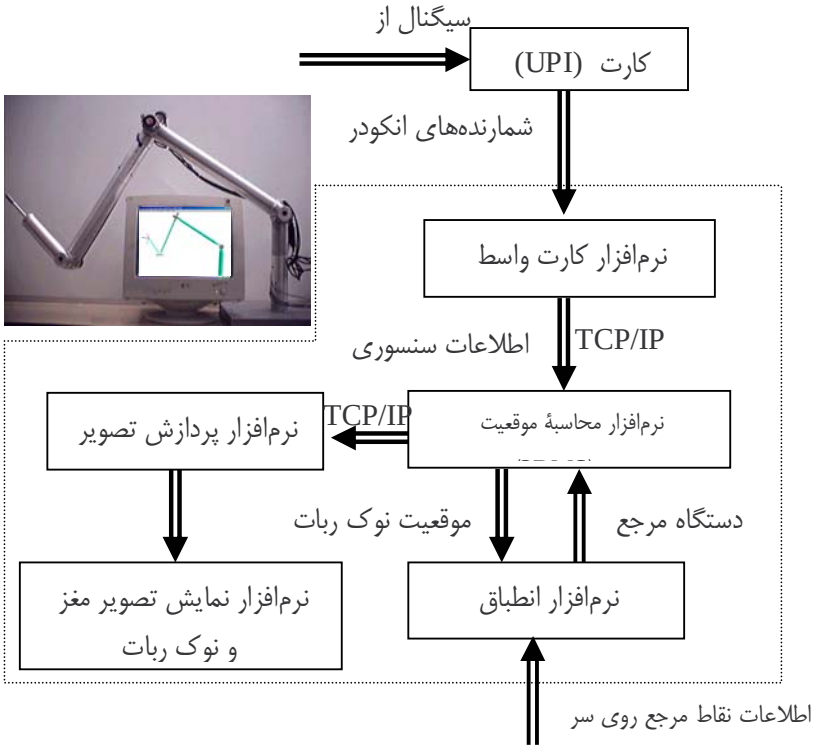
روش‌های مختلفی برای ایجاد ارتباط پروب جراحی وجود دارد که می‌توان به بازوهای رهیاب و رهیاب‌های بدون بازوی نوری و صوتی و مغناطیسی اشاره کرد. به علت دقت و پایداری خوب بازوهای مکانیکی و همچنین آسان بودن عمل انطباق تصاویر فیزیکی و پزشکی و مناسب بودن قیمت آنها، برای ارتباط پروب جراحی با سیستم کامپیوتری از ربات استفاده شده است [۵].

برای آن که بتوانیم تشخیص دهیم یک ربات برای جراحی مغز مفید می‌باشد یا نه، عمل جراحی مغز شبیه‌سازی شده است. در نرم‌افزار 3DMS یک انسان که روی تخت عمل جراحی قرارگرفته است در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی نوک ربات به سمت مغز بیمار حرکت می‌کند و پس از آن به صورت حلزونی سطح مغز را پویش می‌کند، در هر جایی که بخواهیم می‌توانیم پویش حلزونی ربات را متوقف کرده، جهات مختلف وارد شدن پروب جراحی به داخل مغز را نشانه‌گیری کنیم.

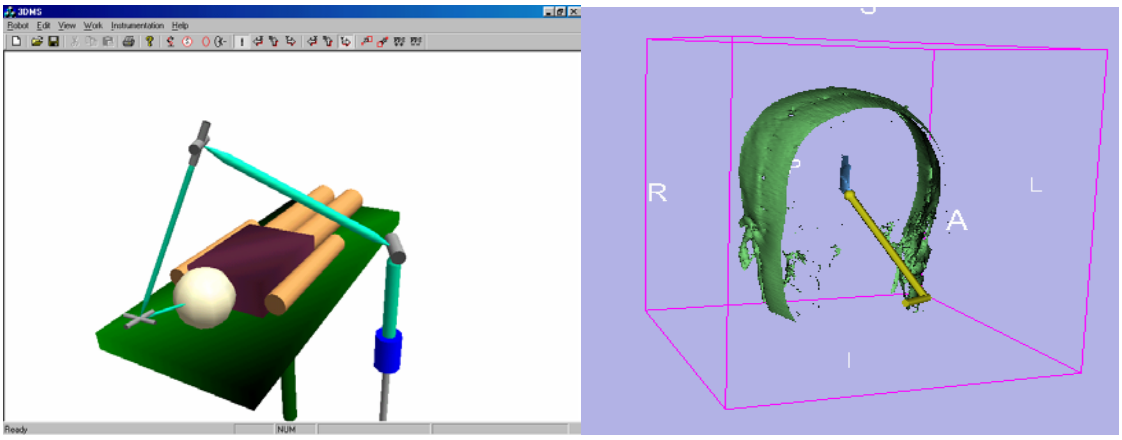
پس از این مرحله ربات در جهت مستقیم وارد مغز شده، پس از رسیدن به تومور فرضی مستقیماً به عقب برمی‌گردد. بازوی جراحی باید بتواند سه عمل فوق را به راحتی انجام دهد. پس از شبیه‌سازی رباتهای مختلف و آزمایش حرکات فوق بر روی نقاط مختلف سر، رباتی با پارامترهای جدول ۱ برای جراحی مغز مفید تشخیص داده شد. پارامترهای جدول ۱ مقادیر شناسایی شدهٔ ربات ساخته شده است [۶]. با داشتن سنسور خارجی ایده‌آل و انکودر ۸۰۰۰ پالس بر دور و رباتی که هیچ‌گونه لقی نداشته باشد و نسبت به دما پارامترهای آن تغییر نکند، طبق نتایج شبیه‌سازی به دقت ۱/۵ میلی‌متر می‌توان دست‌یافت.

---

[1] *Universal Peripheral Interface*



شکل ۱- تصویر ربات ساخته‌شده و نمودار بلوکی کل سیستم.



شکل ۲- شمای نرم‌افزار 3DMS و تصویر بازسازی شدهٔ متناظر با آن در نرم‌افزار 3DUT Slicer.

جدول۱- پارامترهای Denavit-Hartenberg-Hayati ربات جراحی ساخته شده.

رابط	D(cm)	a(cm)	α(deg)	θ(Off)	β
۱	۳۲/۲۶۷	۰/۱۹۸	۸۹/۸۵۹	۹۰/۱۲۵	
۲		۵۰/۵۳۲	۰/۴۷۷	۲۸/۳۷	۰/۰۰۴
۳	-۰/۱۸۲	-۰/۴۱۲	۸۹/۸۱۲	۱۵۵/۷۷۲	
۴	۴۹/۰۰۴	۰/۰۴۳	۹۰/۹۴۵	۱۹۱/۹۰۸	
۵	۳/۷۳۱	۲۹/۷۳۰	۰	-۹/۷۶۱	

٤- نمایش و پردازش تصاویر

با بررسی‌های به عمل آمده بر روی نرم‌افزارهای مختلف موجود در زمینه انجام پردازش تصویر و بررسی توانایی آنها برای انجام عملیات خاص برای جراحی مغز و اعصاب و امکان گسترش و افزودن توانایی‌ها و توابع مورد نیاز و همچنین زبان برنامه نویسی مورد استفاده، نرم‌افزار 3D Slicer به عنوان نرم‌افزار پایه‌ای مورد استفاده قرار گرفت و بر اساس آن نرم‌افزار 3DUT Slicer توسعه یافت [۷]. زبان برنامه نویسی مورد استفاده در این نرم‌افزار TCL/TK بوده و برای انجام عملیات پردازشی از VTK[1] استفاده شده است. این نرم افزار این قابلیت را به کاربر می‌دهد تا امکانات مورد نیاز خود را به سیستم اضافه کند.

در واقع با استفاده از توابع جامع و کاملی که برای انجام عملیات ریاضی و پردازشی در VTK در نظر گرفته شده و همچنین توانایی بالای TCL/TK برای انجام عملیات گرافیکی یک روش مشخص و مناسب برای انجام عملیات مورد نظر در اختیار برنامه‌نویس قرار می‌گیرد که با استفاده از این روش و الگوریتم می‌توان عملیات مورد نظر را بر روی نرم‌افزار پیاده کرد و توانایی مورد نظر را به نرم‌افزار افزود. توابع استفاده شده در قسمت پردازش تصویر دارای دقت بالایی بوده و علاوه بر این سعی شده است که سرعت مناسبی نیز داشته باشند. این توابع یک مجموعه استاندارد بوده و به صورت دایمی بر تعداد آنها افزوده شده و همچنین توابع موجود نیز بهتر می‌شوند.

یک قابلیت مهم این توابع امکان دخل و تصرف در آنها و همچنین افزودن توانایی‌ها و یا تغییر ساختار در آنها است. این توابع بر اساس اصول برنامه نویسی شی‌گرا نوشته شده و در نتیجه در صورت استفاده از فرمت‌ها جدیدتر به راحتی می‌توان عملیات مورد نظر را بر روی آنها بارگذاری کرد و همچنین از خاصیت مهم ارث‌بری استفاده کرد. بنابر این به طور کلی سیستم پردازشی مورد استفاده دارای توانایی‌های اولیه مناسبی بوده که برای انجام عملیات پردازشی بسیار کارا ست و علاوه بر این، این امکان را به نرم‌افزار نویس می‌دهد تا امکانات مورد نیاز خود را به سیستم اضافه کند.

از طرف دیگر قسمت گرافیکی نیز به نحوی در نظر گرفته شده است تا امکانات اولیه مورد نیاز به صورت مشخص وجود داشته و بتوان از توابع مربوط به آنها برای انجام کارهای مورد نظر استفاده کرد. در واقع با استفاده از یکی از خواص بسیار مهم و کاربردی TCL/TK که همان امکان استفاده از چند فایل جداگانه برای انجام عملیات مختلف است، این امکان در اختیار برنامه نویس قرار گرفته است تا با استفاده از این قابلیت بتواند توابع خاصی را که فکر می‌کند به آنها نیاز وافری دارد، به صورت مشخص و کلی تهیه کرده و از آنها به صورت دایمی استفاده کند.

برای مثال یکی از مهمترین کارهایی که در یک نرم‌افزار پردازش تصویر و جراحی مغز و اعصاب مطرح است، امکان انتخاب رنگ دلخواه است. این توانایی لازم است در قسمت‌های مختلف وجود داشته و مورد استفاده قرار بگیرد. با استفاده از این نرم‌افزار این امکان برای نرم‌افزار نویس بوجود می‌آید که با استفاده از این قابلیت بتواند برای سیستم خود توابع انتخاب رنگ را که کاربرد زیادی دارند به صورت مجزا تهیه کرده و از آن در موارد مورد نیاز استفاده کند.

۵- نرم افزار 3DUT Slicer

در این قسمت به بررسی قسمت های مختلف نرم افزار 3DUT Slicer می پردازیم. در شکل ۳ یک نمای کلی از صفحه اصلی این نرم افزار ارایه شده است.

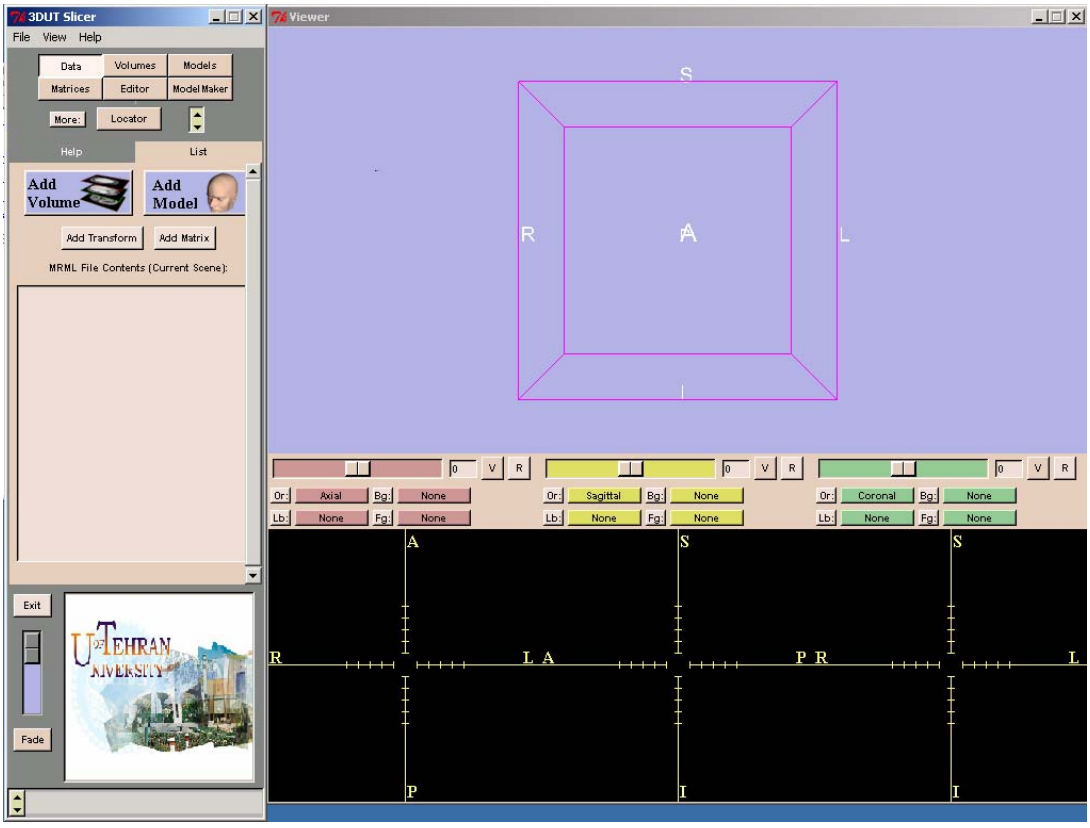
همانطور که در شکل مشاهده می شود، در این نرم افزار امکان مشاهده سه تصویر دو بعدی و همچنین محیط سه بعدی برای نمایش حجمی جسم در نظرگرفته شده است. اولین اقدام Load کردن اطلاعات مربوط به تصاویری است که بر روی آنها می خواهد عملیات خاصی انجام بگیرد.

بعد از Load کردن اطلاعات نیاز به انجام عملیات‌های خاص روی دیتای ورودی وجود دارد. برای این منظور می‌توان از گزینهٔ Edit استفاده کرد. با استفاده از Thresholding و استفاده از دوسطح آستانه امکان انجام این عمل بر روی یک یا همهٔ برش‌های موجود می باشد. با استفاده از این روش می‌توان قسمت‌های مختلفی از مغز را به راحتی جدا کرد. به عنوان مثال می‌توان استخوان و مغز را از هم جدا کرد.

---

[1] *Visualization Toolkit*

یک کار بسیار مهم و اساسی که می‌توان با استفاده از این گزینه انجام داد، اعمال سطح آستانه برای همهٔ برش‌ها است. با این کار می‌توان به سرعت یک حجم خاص را جداسازی کرد. البته برای داشتن دقت بسیار زیاد نه تنها استفاده از این روش مناسب نیست، بلکه استفاده از خود Thresholding نیز می‌تواند منجر به کاهش دقت شود. بنابر این استفاده از این روش به کاربرد آن بستگی داشته و باید به آن توجه کرد. با استفاده از Erode و عملیات ریاضی ساده می‌توان تغییرات لازم را بر روی داده‌ها پردازش شده تا این مرحله اعمال کرد.



شکل ۳- شمای کلی صفحه اول نرم‌افزار 3DUT Slicer.

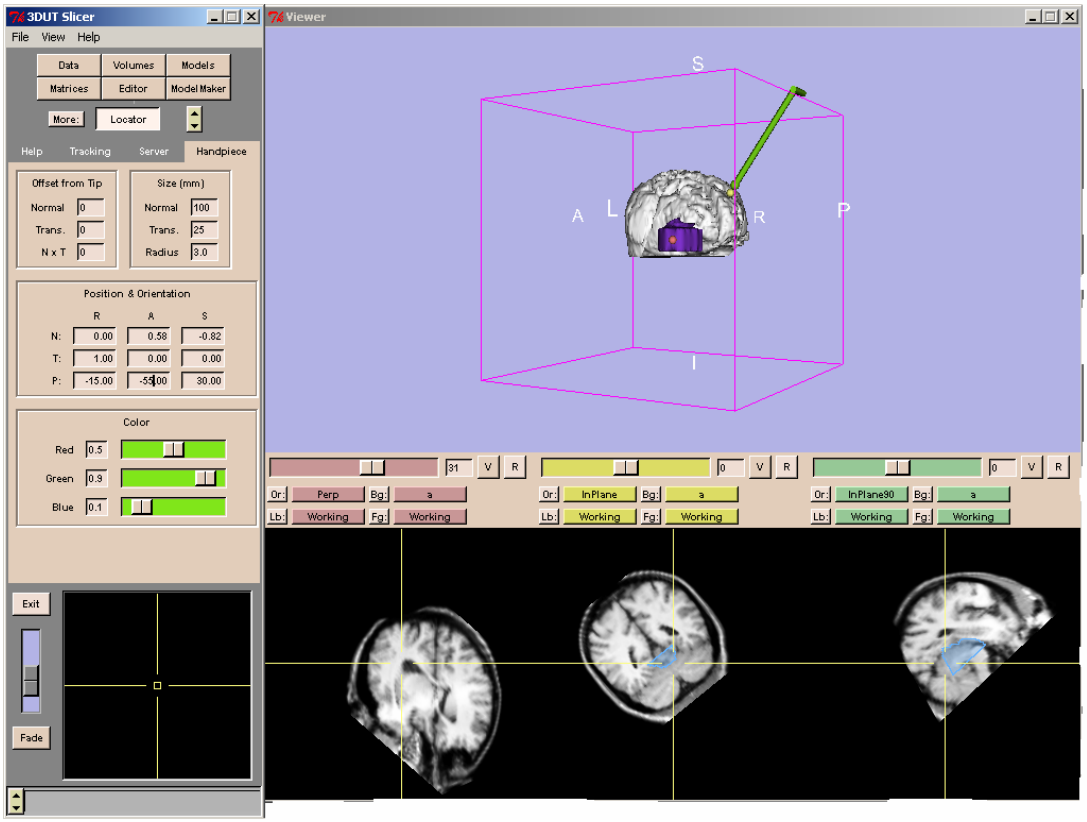
در برخی موارد برای جداسازی قسمت‌های خاص باید از روش‌های کاملاً غیر خودکار استفاده کرد. در این موارد با استفاده از Draw می‌توان سطوح مورد نظر را به صورت دستی مشخص کرد و برای آن از رنگ مورد نیاز استفاده کرد و در پایان با استفاده از دستورهای مشخص تمام سطح داخل محیط انتخاب شده را با رنگ خاص مشخص کرد. بعد از انجام کارهای جداسازی که در قسمت قبل در مورد برخی از آنها توضیح داده شد، نیاز به بدست آوردن یک مدل سه بعدی از قسمت‌های جدا شده است. برای این کار از Model Maker استفاده می‌شود. برای این کار با انتخاب دسته داده مورد نظر و سپس انتخاب سطوح مشخص شده در آن با رنگ و با استفاده از دستور Create می‌توان یک مدل حجمی بدست آورد.

در مورد همهٔ سطح‌هایی که مشخص شده می‌توان این کار را انجام داد و در نتیجه مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف را به شکل سه بعدی مشاهده کرد. در ادامه برای هر یک از قسمت‌های مختلف که مدل برای آنها بدست آمده می‌توان از دستور Smooth برای نرم کردن سطح حاصله استفاده کرد. همچنین می‌توان از ماتریس‌های خاصی که برای تبدیل فضاها به‌کار می‌رود برای تبدیل مدل بدست آمده و انتقال آن در فضای سه‌بعدی استفاده کرد.

بعد از انجام این کار برای انجام عمل انطباق می‌توان از Matrices استفاده کرد. در این مرحله هم می‌توان از روش‌های غیر خودکار یا روش‌های خودکار مبتنی بر Mutual Information استفاده کرد. در هریک از این موارد باید یک ماتریس ۴×۴ مشخص شود که نمایش

دهندهٔ تبدیل لازم برای انجام عمل انطباق است. در مرحلهٔ بعد باید از مجموعه اطلاعات بدست آمده برای عمل جراحی استفاده کرد. برای این کار باید بتوان وسیلهٔ جراحی را به شکل مناسبی مدل کرد و در هر لحظه از موقعیت دقیق آن مطلع شد. برای انجام این کار از Locator استفاده می‌شود. برای انجام این کار می‌توان اندازه و ابعاد و حتی رنگ مناسب را برای وسیلهٔ جراحی مورد نظر مشخص کرد.

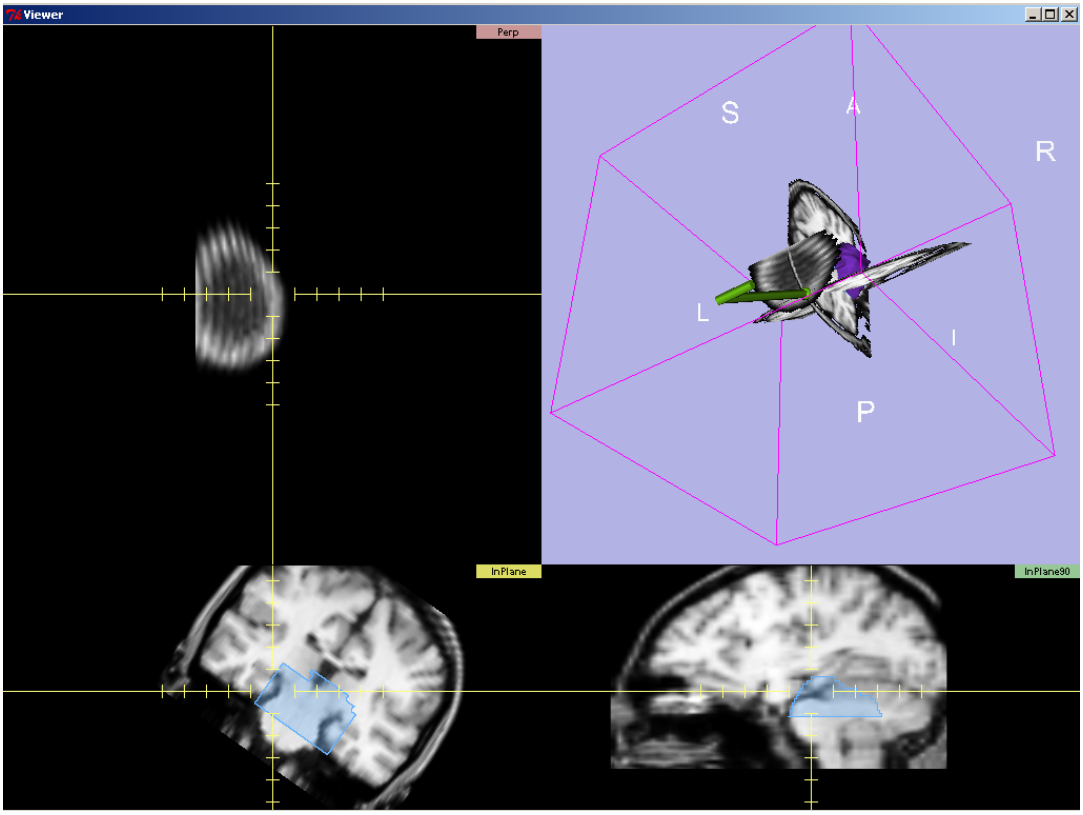
همانطور که گفته شد مهمترین مساله در جراحی مغز و اعصاب پیدا کردن مسیر بهینهٔ جراحی است. برای مشاهدهٔ مسیر انتخاب شده می‌توان از Guidance استفاده کرد. در این مرحله می‌توان با استفاده از دو هدف مشخص که یکی نقطهٔ ورود و دیگری نقطهٔ هدف را نشان می‌دهد برای مشخص کردن مسیر استفاده کرد. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شده است، برای ارتباط برقرار کردن با وسیلهٔ جراحی نیاز به دانستن محل و زاویهٔ وسیله جراحی می‌باشد. این نیاز باعث شده است تا روش‌های مختلفی را برای انجام این کار مورد استفاده قرار گیرند . ازجملهٔ این موارد می‌توان به ارتباط با فایل و ارتباط با Socket اشاره کرد. در این مرحله امکان ارتباط بر قرار کردن با فایل و Socket فراهم شده است.



شکل ۴– نتیجه اعمال پردازش‌های مختلف بر دسته داده و نمایش ۳ بعدی مغز و تومور و همینطور وسیله جراحی.

در این مرحله برای ارتباط با Socket نیاز به مشخص شدن آدرس و پورت مورد نظر و همچنین فاصله بین هر دو خواندن از Socket است. بعد از برقراری ارتباط داده‌ها مربوط به زاویه و موقعیت پروب جراحی مشخص می‌شود.

در شکل ۴ نتایج این عملیات بر روی یک دسته داده تصویر MRI نشان داده شده است. در این شکل مغز و همینطور تومور موجود درآن مدل شده و موقعیت وسیله جراحی و محل ورود و هدف مشخص شده است. در شکل ۵ نیز مسیر در نظر گرفته شده برای عمل جراحی مشخص شده است که با استفاده از آن در واقع جراح مسیر طی شده در داخل مغز و برش‌های مربوط به آن را به راحتی می‌بینند. باید توجه کرد که برای جراحان تصویر عمود بر وسیله جراحی مهم‌ترین برش بوده و بقیه برش‌ها در درجه دوم اهمیت قرار دارند و نمایش سه‌بعدی نیز در کنار این تصاویر می‌تواند به درک بهتر موقعیت جراح کمک کند که در شکل زیر این وضعیت به خوبی مشخص شده و قابل درک است.



شکل ۵– نمایش مسیر جراحی و برش‌های مربوط به آن.

۶- نتیجه گیری

با توجه به نیاز کشور به دست‌یابی به تکنولوژی روز برای جراحی مغز و اعصاب، نخستین سیستم رباتیکی جراحی مغز و اعصاب طراحی و پیاده‌سازی شد. پس از طراحی سینماتیکی بازو، طراحی و ساخت مکانیکی ربات توسط شرکت فرافن انجام گرفت. نرم‌افزار نمایش و پردازش تصویر این سیستم بر پایهٔ نرم‌افزار3D Slicer توسعه یافته است. این نرم‌افزار امکانات لازم برای کمک جراحی مغز و اعصاب را داشته و این قابلیت را دارد که در صورت لزوم اکانات مورد نیاز به آن افزوده شود. آزمایش‌های اولیهٔ این سیستم در بیمارستان شهدا توسط دکتر شهرزادی، جراح مغز و اعصاب و استاد دانشگاه شهید بهشتی صورت گرفت که تقریباً رضایت بخش بوده است. تصحیحات مربوط به بازو از قبیل اصطکاک، وزن و تعادل در حال انجام است.

۷-مراجع

[1] David T. Gering, “A System for Surgical Planning and Guidance Using Image Fusion and Interventional MRI,” *Ms Thesis, Massachuset institute of Technology, boston, USA*, December 1993.

[2] Philipe St-Jean, Abbas F. Sadikot, Louis Collins, Diego Clonda, Reza Kasrai, Alan C. Evans, and Terry M. Peters, “Automated atlas integration and interactive three dimensional visualization tools for planning and guidance in functional neuro-surgery,“ *IEEE Transaction on Medical Imaging*, Vol. 17, No. 5, pp. 672- 680, October 1998.

[3] Wieslaw L. Nowinski, Guo Liang Yang, and Tseng Tsai Yeo, “Computer-aided stereotactic functional neurosurgery enhanced by the use of the multiple brain atlas database, “ *IEEE Transaction on Medical Imaging*, Vol. 19, No. 1, pp. 62-69, January 2000.

[4] H.Schiffbauer, "Neuronavigation in Brain Tumor Surgery", *Oulu University Library*, 1999.

[5] D.A.Simon, "Intra-operative position sensing and tracking devices", 13th Conference of the Irish Manufacturing Committee, pp 713..722, 1996.

[6] M.Khaleghian, M.Nili," Powered Condition Number: A unified index for optimal pose selection in manipulator kinematic calibration", *Submitted to Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation*, 2003.
[7] *http://www.slicer.org*, Last Visited 2002.