

مقاله آموزشی:

آشنایی با نحوه انجام هوشمندانه اعمال جراحی با تهاجم کمتر

مهندس علی دروگر مقدم*، دکتر جواد حدادنیا**، دکتر محمد شوریده یزدی***

چکیده:

در سال‌های اخیر روش جدیدی در جراحی بنام جراحی کمتر تهاجمی مورد استقبال قرار گرفته است که علاوه بر ایجاد تحول عظیم در رشته جراحی سبب اصلاح بخش مهمی از نقصان و چهره تهاجمی در این رشته شده است. جراحی‌های کمتر تهاجمی معمولاً توسط آندوسکوپ‌ها و از طریق سوراخ‌های کوچکی بر روی پوست و یا مجاری بدن مانند مجاری هوایی، گوارشی و غیره انجام می‌شوند و از آسیب‌ها و عوارض کمتری برای بیمار برخوردار هستند. مهمترین ضعف این روش‌ها نسبت به جراحی‌های باز از بین رفتن دید جراح برای اطلاع یافتن از موقعیت آندوسکوپ و یا سایر ابزار جراحی در داخل بدن است که علاوه بر نیاز به تجربه و مهارت بسیار بالای جراح سبب افزایش احتمال آسیب زدن به بافت‌های حساس می‌شود. برای حل این مشکل در سال‌های اخیر سیستم‌های راهبری جراحی ابداع شده‌اند که نمونه‌ای از این سیستم‌ها هم در سال ۱۳۹۰ در داخل ایران ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است. وظیفه اصلی سیستم راهبری جراحی تخمین موقعیت ابزار جراحی در داخل بدن و نمایش موقعیت آن به همراه چگونگی حرکت آن بر روی تصاویری است که قبل از جراحی از همان بیمار دریافت شده‌اند. آزمایشات نشان داده است که سیستم‌های راهبری جراحی کیفیت جراحی‌های آندوسکوپی را افزایش می‌دهند و عوارض ناشی از آن را در بیماران به حداقل می‌رساند و از این رو این سیستم‌ها یکی از مهمترین نیازهای کلیه اتاق‌های عمل در آینده خواهند بود. بنابراین با توجه به پیشرفت سریع این فناوری و لزوم آشنایی جامعه پزشکی و بویژه جراحان با این سیستم در این مقاله بخش‌های مختلف سیستم راهبری جراحی هوشمند، چگونگی عملکرد آن و برخی مزایای استفاده از این سیستم در جراحی‌های آندوسکوپی مورد بحث و بررسی دقیق قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: جراحی با حداقل تهاجم، سیستم ردگیری نوری

زمینه و هدف

بکارگیری درمان‌های تجربی و اثبات نشده در آن‌ها امری معمول بود^۱ اما امروزه احتمال خطا در جراحی‌ها با ساخت دستگاه‌هایی که روز به روز در حال پیشرفت هستند بسیار

طی سالیان گذشته پیشرفت در جراحی به واسطه مشاهده، آزمایش، نوآوری، پشتکار و خوش شانسی حاصل شده است. جراحی‌های اولیه، پشتوانه علمی اندکی داشتند و

نویسنده پاسخگو: مهندس علی دروگر مقدم

تلفن: ۰۵۷۱-۲۲۲۸۵۹۳

E-mail: Aliderogar65@gmail.com

* کارشناس ارشد مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، عضو مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین پزشکی

** دانشیار گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، عضو مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین پزشکی

*** جراح گوش گلو و بینی، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار

تاریخ وصول: ۱۳۹۲/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲

است. تا به امروز تلاش‌های زیادی برای رسیدن به حداقل تهاجم در عمل‌های جراحی صورت گرفته است. به عنوان مثال در اولین تلاش سعی در کاهش جراحی با استفاده از ابزارهای جراحی کوچکتر و ایجاد برش‌های کوچکتر شد. این روش به تکنیک حداقل برش (Minimal Incision Technique) موسوم است. امروزه در جراحی به روش حداقل برش گاهی کاهش اندازه به قدری است که محل مورد جراحی بطور مستقیم از داخل شکاف ایجاد شده دیده نمی‌شود.^۵

برای رسیدن به حداقل تهاجم در عمل‌های جراحی گاهی راه‌های دیگری نیز وجود دارند. بعنوان مثال در برخی موارد ناحیه مورد نظر برای جراحی در داخل و یا مجاورت یک ارگان تو خالی مانند، لوله هوایی، لوله گوارش و یا مجرای ادراری قرار گرفته است. در این حالت برای داشتن کمترین جراحی، بجای برش دادن پوست و رسیدن به منطقه مورد نظر، عمل جراحی باید از داخل حفره انجام شود. امروزه برای انجام چنین جراحی‌هایی تعداد زیادی روش آندوسکوپی معرفی شده است، بعنوان مثال برداشتن پروستات از طریق مسیر پیشاب و یا برداشتن سرطان نای از طریق مسیر دهان نمونه‌ای از این جراحی‌ها هستند. مزایای جراحی‌های آندوسکوپی همچنین سبب شده است که ایده پرهیز از ایجاد شکاف‌های پوستی و در نتیجه سوراخ کردن دیواره مجاری و حفرات داخلی بدن در سال‌های اخیر برای عمل‌های جراحی که در آن‌ها محل مورد نظر دور از دیواره مجاری است نیز گسترش یابد. جراحی آپاندیس از طریق یک شکاف کوچک در معده و یا مهبل نمونه‌ای بارز از این جراحی‌ها است.^۶

جراحی‌هایی که بدون ایجاد شکاف‌های پوستی انجام می‌پذیرند اگر چه مزایای قابل توجهی نسبت به جراحی‌های باز از راه پوست دارند، اما پیچیده‌تر هستند و نیاز به آموزش مناسب جراحان و همچنین تجهیزات مخصوصی مانند آندوسکوپ‌ها و سایر ابزار جراحی مخصوص برای این نوع جراحی‌ها دارند. یکی دیگر از مشکلات اصلی در انجام چنین جراحی‌هایی از بین رفتن دید جراح برای اطلاع یافتن از موقعیت آندوسکوپ و یا سایر ابزار جراحی در داخل بدن است. در چند دهه گذشته اگر چه با ظهور آندوسکوپ‌های ویدئویی با رزولوشن بالا در زمینه جراحی این مشکل تا حدودی بر طرف شده است،^۷ اما با این وجود تشخیص موقعیت دقیق آندوسکوپ در داخل بدن از روی این تصاویر نیز کار بسیار مشکلی است و نیاز به تجربه و مهارت بسیار بالایی جراح دارد.

کاهش یافته است. علاوه بر این، جراحی‌های بشدت تهاجمی که در گذشته انجام می‌پذیرفتند به سرعت در حال جایگزین شدن با جراحی‌های با حداقل تهاجم (Minimum Invasive Surgery) و یا حتی بدون تهاجم هستند.

پیشرفت فناوری و ساخت دستگاه‌های مختلف تصویربرداری پزشکی در چند دهه اخیر، تصاویر پزشکی را به بخش بسیار مهمی از فرآیند تشخیص بیماری‌ها در مراکز پزشکی مبدل ساخته است. بطوریکه که امروزه تصاویر پزشکی کاربردهای تشخیصی و درمانی بسیار مهمی یافته‌اند و نقش کلیدی در بالا بردن دقت و سرعت معالجات پزشکی دارند.^۲ از سوی دیگر با پیشرفت سیستم‌های رایانه‌ای امکان پردازش این تصاویر با سرعت و دقت بسیار بالا نیز فراهم شده است و امروزه به کمک چنین سیستم‌هایی تصاویر پزشکی می‌توانند پس از پردازش تغییر کرده، اصلاح و یا حتی ادغام شوند و جزئیاتی که تا کنون قابل مشاهده نبودند را برای پزشکان فراهم آورند و به تشخیص زودهنگام و درمان مناسب بسیاری از بیماری‌ها کمک شایانی کنند. مزایای استفاده از تصاویر پزشکی در تشخیص و درمان بیماری‌ها در سال‌های اخیر افق تازه‌ای را نیز بسوی جراحی‌های هدایت شده بوسیله تصویر (Image Guided Surgery) و جراحی‌های با حداقل تهاجم گشوده است.^۳

روش‌های سنتی جراحی (جراحی‌های باز) شدیداً تهاجمی هستند و اکثر آن‌ها نیاز به شکافتن پوست و بافت زیر آن برای رسیدن به محل مورد نظر را دارند که این امر احتمال آسیب‌زدن به بافت‌های حساسی مانند رشته‌های عصبی، رگ‌های خونی و غیره را افزایش می‌دهد و در برخی موارد صدمات جبران ناپذیری را برای بیمار بدنبال می‌آورد.^۴ برای اجتناب از این صدمات امروزه جراحی‌های با حداقل تهاجم بیش از پیش مورد استقبال قرار گرفته‌اند. طبق تعریف یک جراحی با حداقل تهاجم نوعی جراحی است که نسبت به جراحی باز برای یک هدف یکسان از تهاجم و آسیب‌های کمتری برای بیمار برخوردار است.

مزایای یک جراحی با حداقل تهاجم که بخوبی طراحی شده باشد شامل:

- کاهش زمان بستری بودن بیمار
- کاهش هزینه‌های درمانی
- ناخوشی کمتر بیمار
- و بهبود سریعتر بیمار

فناوری جدید برای حرکت همگام با کشورهای پیشرفته در زمینه جراحی است. بدین منظور در ادامه بخش‌های مختلف یک سیستم راهبری جراحی، برخی از پرکاربردترین جراحی‌های قابل انجام توسط این سیستم و نیز روند انجام یک جراحی توسط چنین سیستمی به دقت تشریح می‌شود.

سیستم‌های راهبری جراحی

سیستم‌های مسیریابی و راهبری جراحی نوعی سیستم پیشرفته‌اند که بطور گسترده‌ای در جراحی‌های امروزی مورد استفاده قرار می‌گیرند و عملکرد آن‌ها شباهت زیادی به فناوری مورد استفاده در Global Positioning System (GPS) دارد. به عبارت دیگر همانطور که فناوری GPS موقعیت کاربر را نشان می‌دهد و او را از درستی مسیرش مطلع می‌کند، سامانه راهبری جراحی نیز موقعیت ابزار جراحی و مسیری که این ابزار باید در امتداد آن حرکت کند را با جزئیات کامل و به صورت سه‌بعدی بر روی تصاویری که قبلاً از همان بیمار گرفته شده‌اند به وی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در این سیستم‌ها اطلاعات و تصاویر مورد نیاز به صورت همزمان با روند جراحی، برای راهنمایی لحظه به لحظه و تحلیل و کنترل وضعیت بیمار در اختیار جراح قرار می‌گیرد. تصویر ۱ نمونه‌ای از یک سیستم راهبری جراحی را در یک اتاق عمل پیشرفته نشان می‌دهد:



تصویر ۱- تصویری از یک سیستم راهبری جراحی

تاریخچه راهبری در جراحی

تاریخچه استفاده از جراحی‌های هدایت شده به کمک تصویر تقریباً به ۱۰۰ سال پیش برمی‌گردد، زمانی که

تلاش‌ها برای حل این مشکل و آگاهی یافتن جراح از موقعیت ابزار در داخل بدن در سال‌های اخیر با ساخت سیستم‌های راهبری جراحی به نتیجه رسیده است.^۸ طبق تعریف سیستم راهبری جراحی ابزاری برای نشان دادن موقعیت ابزارهای جراحی بر روی تصاویر قبل از جراحی است که به درک مناسب جراح از موقعیت ابزار در داخل بدن کمک می‌کند. به عبارت دیگر جراحی‌هایی که توسط سیستم راهبری جراحی انجام می‌پذیرند، نوعی جراحی آندوسکوپیک هدایت شده‌اند که در آن جراح می‌تواند موقعیت ابزار خود را در داخل بدن به طور پیوسته و لحظه به لحظه بر روی تصاویری که قبلاً از همان بیمار و از ناحیه مورد جراحی گرفته شده است بر روی مانیتورهای مخصوصی در اتاق عمل ببیند. بسیاری از سیستم‌های راهبری جراحی از تصاویر ویدئویی آندوسکوپی در حین جراحی و تصاویر قبل از جراحی مانند تصاویر CT، MRI و... به عنوان راهنما استفاده می‌کنند. در این سیستم‌ها معمولاً آندوسکوپ بعنوان ابزار جراحی (تشخیصی و یا نمونه‌برداری) وارد بدن می‌شود و در مسیر خود از محیط داخلی بدن تصویربرداری می‌کند؛ سپس بطور همزمان موقعیت آندوسکوپ توسط این سیستم در داخل بدن تخمین زده شده و بر روی تصاویر قبل از جراحی نشان داده می‌شود. بنابراین به کمک چنین سیستمی جراح می‌تواند برای رسیدن به منطقه مورد نظر آندوسکوپ را با دقت بسیار بالاتری هدایت کند و نمونه‌برداری و یا جراحی خود را با موفقیت به انجام رساند.

هدف

با توجه به اینکه سیستم‌های راهبری جراحی افزایش کیفیت جراحی و کاهش عوارض ناشی از آن را در بیماران به دنبال دارند، این سیستم‌ها یکی از مهمترین نیازهای کلیه اتاق‌های عمل در آینده خواهند بود. سامانه راهبری جراحی به تازگی در کشور ما نیز ساخته شده است. این دستگاه که در سال ۱۳۹۰ در مرکز رشد لوازم و تجهیزات پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران طراحی و تولید شده است، هم اکنون در برخی از بیمارستان‌های کشور راه‌اندازی و مورد استفاده قرار گرفته است.^۹ ساخت سیستم راهبری جراحی در کشور و تجهیز شدن اتاق‌های عمل با این دستگاه از سوی دیگر نیازمند آشنایی جامعه جراحان با این فناوری و چگونگی عملکرد آن دارد. بنابراین هدف اصلی این تحقیق معرفی سیستم راهبری جراحی و آشنا کردن جامعه جراحان با این

انتخاب کند تا کمترین آسیب به بافت‌های حیاتی وارد شود. از سوی دیگر تصاویر بکار گرفته شده در حین این نوع جراحی نیز می‌توانند تغییر کنند، ادغام شوند و اعمال ریاضی بر روی آنها انجام شود تا بتوانند جزئیات بیشتری که قبلاً در اتاق عمل قابل دیدن نبودند را برای جراح فراهم کنند. برخی از مهمترین مزایای سیستم راهبری جراحی عبارتند از:

- کمک به انجام جراحی‌های کمتر تهاجمی با دقت بسیار بالاتر و در نتیجه ایجاد درد و عوارض کمتر برای بیماران و کاهش زمان بستری بودن آنها
- امکان مشاهده دقیق روند جراحی و موقعیت ابزار برای تمامی تیم جراحی بر روی مانیتورهای مخصوص در اتاق عمل
- امکان ذخیره‌سازی روند جراحی
- امکان شبیه‌سازی روند جراحی قبل از انجام عمل و تعیین مناسبترین محل برای ورود ابزار به بدن و نیز بهترین مسیر برای هدایت ابزار
- امکان استفاده از این سیستم برای اهداف آموزشی

کاربردهای سیستم راهبری جراحی

امروزه فناوری راهبری جراحی، کاربردهای پزشکی گسترده‌ای را از یک بیوپسی ساده تا جراحی‌های پیچیده تحت پوشش قرار داده است. سیستم‌های راهبری جراحی دقت و کیفیت عمل‌های جراحی را بهبود می‌بخشند و انجام موفقیت‌آمیز عمل‌های پیچیده و خطرناکی را که پیش از این با مرگ و میر بسیاری همراه بوده‌اند را امکان‌پذیر می‌نمایند. هم‌اکنون جراحی‌های مغز و اعصاب، گوش و حلق و بینی، ارتوپدی، ستون فقرات و نمونه‌برداری مهمترین حوزه‌های کاربردی سیستم راهبری جراحی هستند. در حوزه جراحی مغز و اعصاب، فناوری راهبری جراحی از کاربردهای متعددی در جراحی‌های حساس و ظریفی مانند تحریکات عمیق در مغز و یا خارج کردن تومور برخوردار است. استفاده از این فناوری به جراح این امکان را می‌دهد تا به راحتی از برداشته شدن کامل تومور اطمینان حاصل کند و از آسیب‌زدن به بافت‌های سالم پرهیز نماید. در حوزه جراحی گوش و حلق و بینی نیز بکارگیری فناوری راهبری، سبب می‌شود که عمل جراحی با تهاجم به مراتب کمتری انجام پذیرفته و اجرای عمل‌های دشوار و حساس با سطح ایمنی و کیفی به مراتب بالاتر از استانداردهای پیشین امکان‌پذیر گردد.

برخی زمینه‌های پرکاربرد سیستم راهبری عبارتند از:

تصویربرداری X-Ray متداول‌ترین روش تصویربرداری به شمار می‌آید. به عبارت دیگر، تصاویر X-Ray اساس و پایه جراحی به کمک تصاویر به شمار می‌رفتند، زیرا در آن زمان جراحان به کمک تصاویر دوبعدی X-Ray و با تکیه بر دانش و تجربیاتشان، به تشخیص ضایعه و انجام عمل جراحی مبادرت می‌ورزیدند و در واقع این تصاویر به گونه‌ای، راهنمای مناسبی برای تشخیص و درمان بودند.^{۱۰} اما به مرور زمان و با پیشرفت علم تصویربرداری، از تکنیک‌های جدیدتری برای نمایش دنیای واقعی آناتومیک درون بدن استفاده شد که بدون شک، امکان بهتری را برای تشخیص و جراحی فراهم می‌آورد. همچنین درک واقعی از محیط آناتومیک بدن انسان به کمک این تصاویر، انجام اعمال جراحی را از روش‌های کاملاً تهاجمی به نیمه تهاجمی و گاه غیرتهاجمی سوق داد. بطوریکه امروزه با بکارگیری این روش‌ها، آسیب‌های ناخواسته در حین جراحی به حداقل رسیده است.

سیستم‌های راهبری جراحی برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰ در زمینه جراحی‌های اعصاب (Neurosurgery) مورد استفاده قرار گرفتند و در اولین کاربرد آن‌ها جلوگیری از آسیب‌های جدی به مغز و سیستم عصبی کاملاً مشهود بود.^{۱۱} اما پس از مدتی کاربردهای این سیستم علاوه بر جراحی‌های اعصاب^{۱۲-۱۵} با پیشرفت چشمگیری در سایر جراحی‌ها مانند جراحی‌های Craniofacial،^{۱۶-۱۸} گوش، حلق و بینی^{۱۹-۲۰} ستون فقرات^{۲۱-۲۳} و ارتوپدی^{۲۴-۲۷} نیز همراه شد. سیستم‌های راهبری جراحی در طی سالیان گذشته به پیشرفت خود ادامه دادند و موفقیت‌های به دست آمده در جراحی‌های انجام شده به وسیله آن‌ها سبب شد که امروزه این سیستم‌ها یکی از اجزای اصلی اتاق‌های عمل پیشرفته به حساب آیند.

مزایای استفاده از سیستم راهبری جراحی

اکثر فرآیندهای جراحی به کمک تصاویر پزشکی راهنما، جراحی‌های کمتر تهاجمی هستند و در نتیجه در این جراحی‌ها، مدت زمان بستری شدن بیمار کاهش یافته و بیمار از درد کمتری پس از عمل جراحی رنج می‌برد و می‌تواند سریعتر به زندگی عادی خود برگردد. سیستم‌های راهبری جراحی بدون آن که در تصمیمات پزشکی متخصص مداخله کنند با وسیع کردن دید پزشک به محل مورد جراحی، باعث افزایش دقت و کاهش خطا در جراحی می‌شوند. این سیستم‌ها همچنین به پزشک این امکان را می‌دهند تا فرآیند جراحی را از قبل شبیه‌سازی کند و مسیر مناسب برای عبور ابزار جراحی را به گونه‌ای

هستند. نتایج عملی نشان می‌دهند که روش ESBS هنگامی که توسط سیستم راهبری جراحی هدایت شود، نسبت به روش‌های سنتی جراحی در این منطقه از دقت و کیفیت بالاتری برخوردار است.

تصویر ۲ نمونه‌ای از یک مثال کلینیکی که در آن تومور Clival Chordoma توسط روش ESBS و به کمک سیستم راهبری جراحی برداشته شده است را نشان می‌دهد.^{۲۸} همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود قرار گرفتن تومور در مرکز و دقیقاً در پشت شریان کاروتید سبب شده است که دسترسی به آن از طریق روش جراحی باز بسیار مشکل باشد. اما مقایسه تصاویر CT، MRI و آندوسکوپی که قبل و بعد از برداشته شدن تومور گرفته شده‌اند، نشان می‌دهد که تومور پس از جراحی به روش ESBS کاملاً برداشته شده است و شریان کاروتید بعد از عمل کاملاً خالی از تومور شده است.

(ب) کاربرد سیستم راهبری جراحی در جراحی‌های ستون فقرات:

ساختار پیچیده ستون فقرات، که استخوان‌ها و شاخه‌های اعصاب را به هم وصل می‌کند، نیاز به دقت جراحی بسیار بالایی دارد. جراحان ستون فقرات معمولاً مجبور هستند در ابعاد میلیمتری محاسبات را انجام دهند تا از آسیب رساندن به رشته‌های عصبی پرهیز نمایند و به نتایج بهینه‌ای دست یابند. سیستم راهبری جراحی در رابطه با جراحی‌های ستون فقرات می‌تواند در موارد زیر مورد استفاده گیرد:

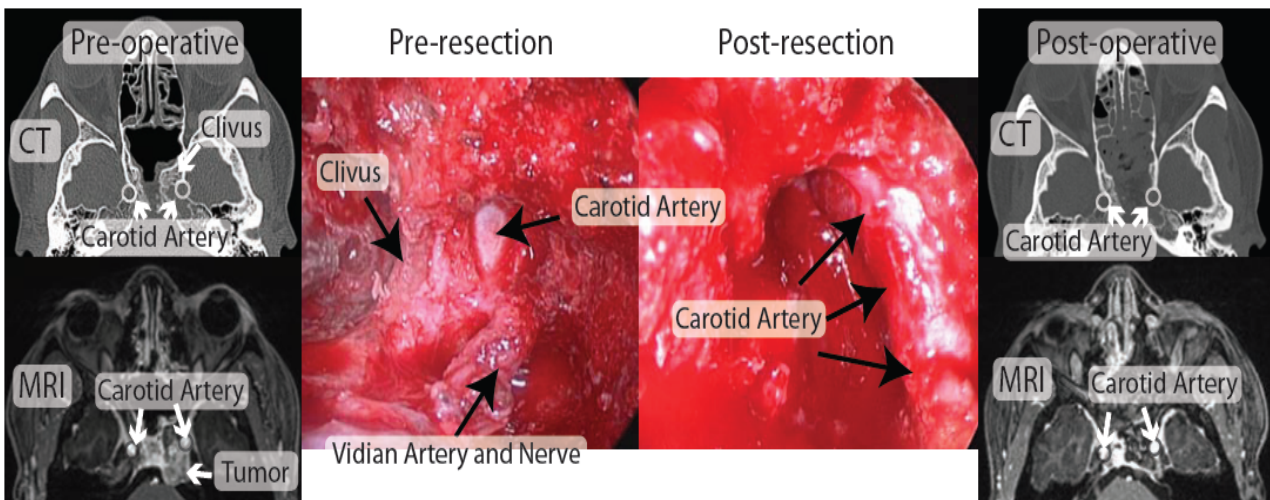
- درمان ضایعات نخاعی
- کم کردن فشار روی ریشه اعصاب نخاعی

- جراحی‌های مغز
- جراحی‌های ستون فقرات
- جراحی‌های ارتوپدی
- جراحی‌های گوش، حلق و بینی

(الف) کاربرد سیستم راهبری جراحی در جراحی‌های مغز:

مغز پیچیده‌ترین و حساس‌ترین ساختار در بدن را دارد و انجام جراحی در این ناحیه نیازمند دقت و مهارت بسیار بالای جراح است. در جراحی‌های مغز جراح در فاصله چند میلیمتری از ساختارهای حیاتی مانند رشته‌های عصبی و رگ‌های خونی در پایه جمجمه کار می‌کند، به همین دلیل در گذشته جراحی پایه جمجمه فقط در مواقع اضطراری انجام می‌شد، زیرا امکان آسیب رسیدن به اعصاب جمجمه‌ای در حین عمل بسیار زیاد بود.^{۲۸} امروزه سیستم راهبری جراحی کمک شایانی به جراحان مغز می‌کند و دقت جراحی‌های آندوسکوپی در این ناحیه را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. این سیستم در جراحی نواحی مغزی می‌تواند در موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد:

- نمونه‌برداری از تومورهای مغزی
 - برش‌زدن تومورهای مغزی
 - مشاهده ساختار حساس و بحرانی در مغز
- صدمات غده هیپوفیز اگرچه در حالت کلی خوش خیم هستند، شایع‌ترین صدمه مربوط به پایه جمجمه در جراحی‌های باز است. امروزه جراحی‌های باز که برای درمان تومورهای پایه جمجمه و یا سینوس‌های نزدیک به حفرات بینی بکار می‌رفتند به سرعت در حال جایگزین شدن با روش جراحی آندوسکوپی [Endoscopic Skull Base Surgery (ESBS)] پایه جمجمه

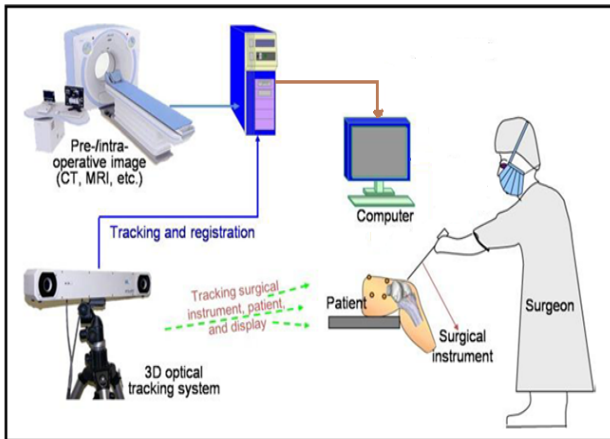


تصویر ۲- در سمت چپ نمای Axial از تصاویر CT و MRI به همراه تصویر آندوسکوپی قبل از انجام جراحی و در سمت راست همین تصاویر پس از برداشته شدن تومور به روش ESBS

- رایانه اصلی
- نمایشگر خروجی

نمایشگر خروجی

در ادامه هر یک از این بخش‌ها به همراه نقش آن‌ها در یک سیستم راهبری جراحی مورد بررسی قرار می‌گیرند.
الف) دستگاه تصویربرداری اولیه



تصویر ۳- بخش‌های اصلی سیستم راهبری جراحی

برای بکارگیری سیستم راهبری در حین یک جراحی اولین مرحله تصویربرداری از ناحیه مورد نظر قبل از شروع جراحی است. تصویر اولیه بسته به جنس و بافت ناحیه مورد نظر و خواسته جراح می‌تواند با استفاده از دستگاه‌هایی مانند CT، MRI، التراسوند و یا سایر دستگاه‌های تصویربرداری پزشکی گرفته شود. این تصویر سپس عملیات مورد نیاز برای بهبود تصویر و علامت‌گذاری نواحی مورد نظر مانند ناحیه جراحی و سایر نواحی حساس را طی کرده و در رایانه اصلی ذخیره می‌شود تا در مراحل بعدی به عنوان مرجعی برای نشان دادن موقعیت ابزار جراحی بر روی آن مورد استفاده قرار گیرد. رایجترین روش برای نمایش موقعیت ابزار جراحی بر روی تصاویر قبل از جراحی نمایش همزمان موقعیت ابزار بر روی مقاطعی از تصویر دوبعدی است. سپس جراح با مشاهده موقعیت ابزار بر روی این مقاطع دوبعدی در حین جراحی یک تجسم سه‌بعدی از این ناحیه در ذهن خود ایجاد کرده و موقعیت ابزار را در این فضای سه‌بعدی محاسبه می‌کند. تصویر ۴ نمونه‌ای از سه مقطع Coronal، Sagittal و Axial از تصویر CT و چگونگی نمایش موقعیت ابزار توسط سیستم راهبری جراحی بر روی آن‌ها را در حین جراحی نشان می‌دهد:

ج) کاربردهای ارتوپدیک سیستم راهبری جراحی
بکارگیری سیستم راهبری جراحی در کاربردهای ارتوپدیک سنتی، مزایای زیادی را در بردارد و در اکثر موارد سبب کاهش شدت تهاجمی بودن جراحی و در نتیجه کاهش زمان بستری بودن و کاهش عوارض و هزینه‌های ناشی از جراحی می‌شود. سیستم راهبری جراحی در اکثر جراحی‌های ارتوپدیک می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد، اما جراحی‌های ارتوپدیک زیر بیشتر از این سیستم استفاده می‌کنند:

- جراحی‌های ترمیمی
- ترمیم استخوان‌های آسیب دیده

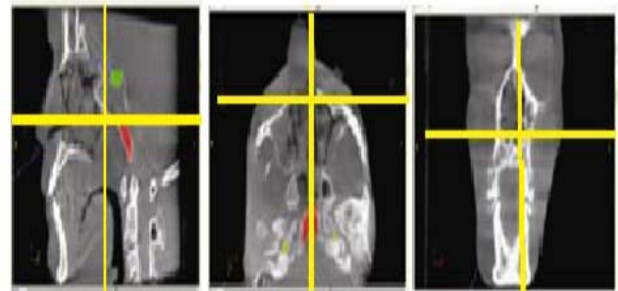
د) کاربردهای گوش، حلق و بینی سیستم راهبری جراحی
سیستم راهبری جراحی برای اولین بار در دهه ۱۹۹۰ توسط یک گروه از جراحان آلمانی در زمینه جراحی‌های ENT مورد استفاده قرار گرفت.^{۲۹} آناتومی بسیار پیچیده ناحیه گوش، حلق و بینی و برخی تفاوت‌های موجود در آناتومی این ناحیه در افراد مختلف از یک سو و وجود مسیرهای باریک و حفره‌های بسیار زیاد در آن از سوی دیگر تشخیص موقعیت دقیق آندوسکوپ در ناحیه گوش، حلق و بینی را برای جراحان بسیار مشکل می‌سازد. بنابراین سیستم راهبری جراحی با تعیین موقعیت دقیق آندوسکوپ در داخل این حفرات و نشان دادن این موقعیت بر روی تصاویر قبل از جراحی مربوط به بیمار می‌تواند کمک شایانی به جراحی در این ناحیه داشته باشد. سیستم راهبری جراحی در جراحی‌های ENT عمدتاً در موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد:

- جراحی سینوسی
- برداشتن کیست و پولیپ
- کم کردن فشار بر روی چشم

اجزای یک سیستم راهبری جراحی

اگر چه سیستم‌های راهبری جراحی انواع مختلفی دارند و معمولاً از تکنیک‌های متفاوتی برای ردیابی و نمایش موقعیت ابزار جراحی استفاده می‌کنند، اما عملکرد تقریباً مشابهی دارند و از بخش‌های یکسانی تشکیل شده‌اند. تصویر ۳ اجزای اصلی یک سیستم راهبری جراحی را بطور شماتیک نشان می‌دهد.
این بخش‌ها عبارتند از:

- دستگاه تصویربرداری اولیه
- سیستم ردگیری
- ابزار جراحی (آندوسکوپ) ردیابی شونده



تصویر ۴- نمایش موقعیت ابزار جراحی بر روی مقاطع Axial و Sagittal و Coronal از تصویر CT

ب) سیستم ردگیری

سیستم‌های ردگیری یکی از بخش‌های اصلی در هر سیستم راهبری جراحی هستند که وظیفه تعیین موقعیت لحظه به لحظه ابزار جراحی را در حین جراحی بر عهده دارند. به عبارت دیگر برای اینکه سیستم‌های راهبری جراحی بتوانند موقعیت نوک آندوسکوپ را در داخل بدن و همچنین موقعیت معادل آن را بر روی تصویر قبل از جراحی تعیین کنند، این سیستم‌ها نیاز به یک سیستم ردگیری دارند. سیستم‌های ردگیری انواع مختلفی دارند اما سیستم‌های ردگیری نوری و الکترومغناطیسی به دلیل داشتن دقت بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر کاربردهای بیشتری در سیستم‌های راهبری جراحی یافته‌اند.

سیستم راهبری ساخت کشور هم‌اکنون از سیستم ردگیری Polaris-Spectra که نوعی سیستم ردگیری نوری است استفاده می‌کند. این سیستم ردگیری از دو بخش اصلی تشکیل شده است: ۱) بخش ردگیری کننده شامل دو دوربین مادون قرمز و ۲) سنسورهای ردیابی شونده که به ابزار جراحی و همچنین بخش‌های خاصی از بدن بیمار متصل می‌شوند و موقعیت آن‌ها بطور پیوسته توسط دوربین‌های ردگیری تعیین می‌شود. در تصویر ۵ سمت چپ دوربین‌های ردگیری کننده و سنسورهای ردیابی شونده و در سمت راست پیکربندی کامل سیستم ردگیری Polaris-Spectra نشان داده شده است.

تصویر ۵- سمت چپ: دوربین‌های ردگیری کننده و سنسورهای ردیابی شونده، سمت راست: پیکربندی کامل یک سیستم ردگیری Polaris-Spectra

ج) ابزار جراحی (آندوسکوپ) ردیابی شونده

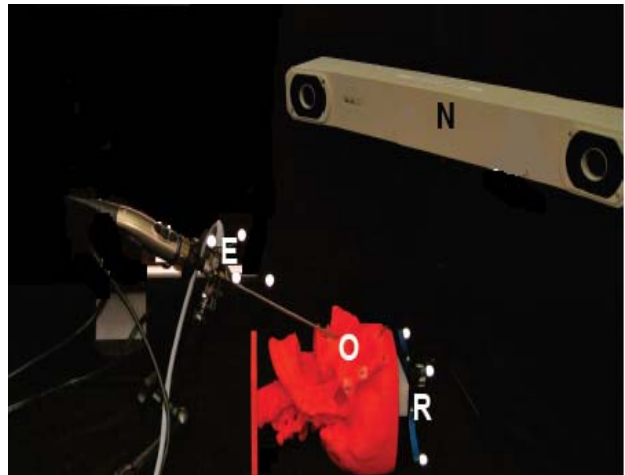
برای اینکه موقعیت یک ابزار جراحی در داخل بدن و به دنبال آن بر روی تصاویر قبل از جراحی قابل محاسبه باشد، این ابزار باید توسط سیستم ردگیری قابل ردگیری باشد. بدین منظور تعدادی از سنسورهای سیستم ردگیری (حداقل سه سنسور) بر روی دسته ابزار و تعدادی دیگر نیز بر روی بخش‌های خاصی از بدن بیمار (به عنوان سنسورهای مرجع) قرار می‌گیرند و بطور مداوم موقعیت آن‌ها در فضای سه‌بعدی توسط دوربین‌های ردگیری تعیین می‌شود. بدین ترتیب سنسورهای متصل شده به آندوسکوپ و سنسورهای مرجع دو دستگاه مختصات تعریف خواهند کرد که در تعیین موقعیت نوک آندوسکوپ بر روی تصویر CT به کار گرفته می‌شوند. دوربین‌های ردگیری پس از تعیین موقعیت این سنسورها در فضا، این اطلاعات را به رایانه اصلی می‌فرستند تا در آنجا موقعیت نوک ابزار نسبت به تصویر قبل از جراحی محاسبه و بر روی آن نمایش داده شود. تصویر ۶ چگونگی اتصال سنسورهای سیستم ردگیری را بر روی دسته آندوسکوپ و بدن بیمار و تصویر ۷ دستگاه‌های مختصاتی موجود در این پیکربندی را نشان می‌دهد.

دوربین‌های ردگیری به طور پیوسته در مورد موقعیت سنسورهای متصل شده به آندوسکوپ و بدن بیمار به آن ارسال می‌کنند. برای تعیین موقعیت نوک آندوسکوپ (Camera) بر روی تصویر CT رایانه اصلی نیاز به دو پارامتر مهم دارد که هر دوی آنها توسط اطلاعات به دست آمده از سیستم ردگیری نوری در حین جراحی قابل محاسبه می‌باشند:

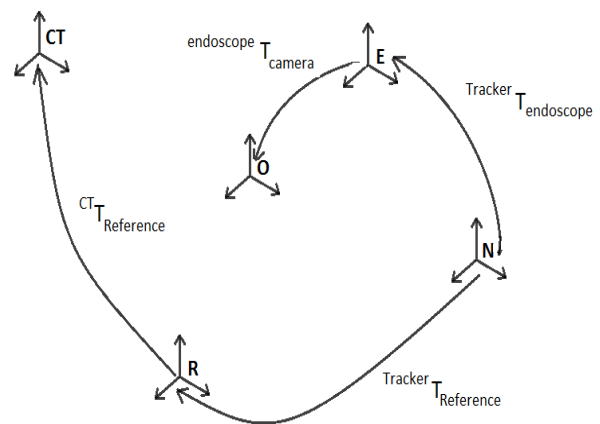
۱. موقعیت نوک آندوسکوپ در دستگاه مختصات سیستم ردگیری

سنسورهای سیستم ردگیری نوری به دلیل نیاز این سیستم به خط دید مستقیم بین سنسورها و دوربین‌های ردگیری کننده نمی‌توانند به نوک آندوسکوپ متصل شده و وارد بدن شوند و در نتیجه تعیین موقعیت نوک آندوسکوپ در دستگاه مختصاتی سیستم ردگیری به طور مستقیم امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای حل این مشکل تعدادی سنسور (معمولاً چهار سنسور) به دسته آندوسکوپ متصل می‌شوند و یک دستگاه مختصاتی قراردادی (E) برای آندوسکوپ تعریف می‌کنند، به طوری که موقعیت نوک آندوسکوپ نسبت به مرکز این دستگاه مختصاتی قراردادی مشخص است.

تصویر ۸ مثالی از پیکربندی سنسورها بر روی دسته آندوسکوپ و دستگاه مختصاتی قراردادی تعریف شده توسط این سنسورها به همراه موقعیت نوک آندوسکوپ در این دستگاه مختصات را نشان می‌دهد. سپس در حین انجام جراحی سیستم ردگیری موقعیت سنسورهای متصل به آندوسکوپ را به طور پیوسته در دستگاه مختصات سیستم ردگیری (N) تعیین می‌کند و با استفاده از آنها موقعیت مرکز سیستم مختصاتی آندوسکوپ را محاسبه و موقعیت نوک آندوسکوپ در دستگاه مختصات سیستم ردگیری را محاسبه می‌کند. موقعیت نوک آندوسکوپ در مختصات سیستم ردگیری پس از این به صورت یک ماتریس 3×1 مانند $P_N = [a, b, c]^T$ خواهد بود.



تصویر ۶- چگونگی اتصال سنسورها بر روی دسته آندوسکوپ و بدن بیمار



تصویر ۷- دستگاه‌های مختصاتی موجود در فرآیند ردگیری

(د) رایانه اصلی

رایانه اصلی محلی برای ذخیره‌سازی تصاویر قبل از جراحی، جداسازی و پردازش داده‌های به دست آمده از سیستم ردگیری، برقراری ارتباطات و سایر کارهای محاسباتی است. وظیفه اصلی این رایانه تعیین موقعیت نوک ابزار بر روی تصاویر قبل از جراحی با استفاده از اطلاعاتی است که

حال که توابع تبدیل ${}^{CT}T_{reference}$ ، ${}^{tracker}T_{reference}$ ، ${}^{endoscope}T_{camera}$ و ${}^{tracker}T_{endoscope}$ محاسبه شدند، تابع تبدیل ${}^{CT}T_{camera}$ با استفاده از رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$(1) \quad {}^{CT}T_{camera} = ({}^{CT}T_{reference}) ({}^{tracker}T_{reference})^{-1} \times ({}^{tracker}T_{endoscope}) ({}^{endoscope}T_{camera})$$

پس از محاسبه تابع تبدیل ${}^{CT}T_{camera}$ و با داشتن موقعیت نوک آندوسکوپ در مختصات سیستم ردگیری (P_N) موقعیت آندوسکوپ بر روی تصویر CT از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

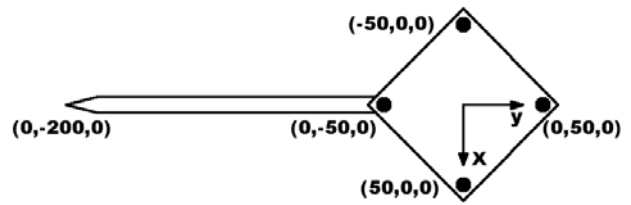
$$(2) \quad P_{CT} = {}^{CT}T_{camera} \times \begin{bmatrix} P_N \\ 1 \end{bmatrix}$$

(ه) نمایشگر خروجی

پس از محاسبه موقعیت ابزار بر روی تصاویر قبل از جراحی این موقعیت بر روی نمایشگر خروجی در اتاق عمل نمایش داده می‌شود. نمایشگر خروجی علاوه بر نمایش موقعیت ابزار بر روی برش‌های دلخواه از تصویر قبل از جراحی می‌تواند تصاویر ویدئویی آندوسکوپی و یا سایر اطلاعات مربوط به بیمار را نیز به طور همزمان نشان دهد. نمایش موقعیت ابزار بر روی یک مانیتور در اتاق عمل سبب می‌شود که علاوه بر جراح تمامی تیم جراحی بتوانند موقعیت ابزار را دنبال کرده و در خصوص چگونگی هدایت ابزار تصمیمات مناسبتری را اتخاذ نمایند (تصویر ۹).



تصویر ۹- مشاهده روند جراحی و موقعیت ابزار توسط تمامی تیم جراحی بر روی نمایشگر خروجی



تصویر ۸- پیکربندی سنسورها بر روی دسته آندوسکوپ و دستگاه مختصات قراردادی تعریف شده توسط آن‌ها

۲. تابع تبدیلی که موقعیت نوک آندوسکوپ را از مختصات سیستم ردگیری به مختصات تصویر CT منتقل نماید پس از آنکه در مرحله قبل موقعیت نوک آندوسکوپ به صورت $[a, b, c]^T$ در مختصات سیستم ردگیری تعیین شد، این مختصات باید به فضای مختصاتی تصویر CT انتقال یابد تا موقعیت نوک آندوسکوپ بر روی تصویر CT نشان داده شود. برای این تبدیل مختصات، نیاز به یک تابع تبدیل مانند ${}^{CT}T_{camera}$ است که با ضرب شدن در $[a, b, c]^T$ موقعیت دوربین آندوسکوپ را بر روی تصویر CT تعیین کند. اما این تابع تبدیل بطور مستقیم قابل محاسبه نمی‌باشد و بنابراین بطور پیوسته توسط اطلاعات بدست آمده از سیستم ردگیری در حین جراحی تعیین می‌شود. بدین منظور در حین جراحی سیستم ردگیری نوری به طور پیوسته موقعیت سنسورهای متصل به آندوسکوپ و همچنین سنسورهای مرجع را در فضای مختصاتی سیستم ردگیری تعیین کرده و آن‌ها را به رایانه اصلی می‌فرستند. در مرحله بعد این اطلاعات در رایانه اصلی پردازش شده و مراکز مربوط به سیستم‌های مختصاتی آندوسکوپ (E) و سنسورهای مرجع (R) که بصورت قراردادی از پیش تعریف شده‌اند و همچنین زوایای اولیه بین محورهای این سیستم‌های مختصاتی و سیستم مختصاتی دستگاه ردگیری محاسبه شده و سپس توابع تبدیل ${}^{tracker}T_{reference}$ و ${}^{tracker}T_{endoscope}$ با استفاده از این مراکز و زوایا محاسبه می‌شوند. از سوی دیگر با دانستن موقعیت نوک آندوسکوپ نسبت به سیستم مختصاتی آندوسکوپ ${}^{endoscope}T_{camera}$ و همچنین با توجه به اینکه سنسورهای مرجع نیز بر روی نواحی آناتومیکی خاصی از بدن بیمار (مانند گوشه-های چشم و ...) متصل شده‌اند، این نقاط بصورت دستی بر روی تصویر CT تعیین می‌شوند و تابع تبدیل ${}^{CT}T_{reference}$ نیز محاسبه می‌شود.

ملاحظات فنی

با توجه به اینکه در جراحی‌های انجام شده توسط سیستم راهبری جراحی این سیستم‌ها نقش کلیدی در تعیین دقت و کیفیت جراحی بر عهده دارند، در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فنی مربوط به سیستم‌های راهبری که از سیستم ردگیری نوری Polaris-Spectra استفاده می‌کنند، ذکر شده‌اند.

جدول ۱- ملاحظات فنی سیستم راهبری جراحی که از سیستم ردگیری نوری Polaris-Spectra استفاده می‌کند

دقت مکان یابی نوک آندوسکوپ	۱ تا ۳ میلی‌متر
حداکثر سرعت بروزسانی موقعیت	۶۰ هرترز
فاصله مناسب سنسورها تا دوربین‌های ردگیری	۱ تا ۲/۵ متر
دمای کاری مناسب	۱۰°C - ۴۰°C
مدت زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی سیستم	حداکثر ۱۰ دقیقه

چگونگی انجام یک جراحی توسط سیستم راهبری

حال که با بخش‌های مختلف یک سیستم راهبری جراحی آشنا شدیم، به چگونگی انجام یک جراحی توسط این سیستم می‌پردازیم. قبل از شروع جراحی یک تصویر اولیه از ناحیه مورد نظر در بدن بیمار توسط یکی از روش‌های تصویربرداری مانند CT، MRI و... گرفته می‌شود. این تصویر سپس مراحل مورد نیاز برای بهبود کیفیت تصویر مانند حذف نویز، تغییر شدت روشنایی و ... را طی کرده و پس از علامت‌گذاری شدن ناحیه جراحی و نواحی حساس روی آن در رایانه اصلی ذخیره می‌شود. همچنین جراح بکمک این تصویر می‌تواند محل وارد شدن ابزار جراحی به بدن و مسیر رسیدن به ناحیه مورد نظر را تعیین و یا حتی علامت‌گذاری کند. در مرحله بعد و پس از انتقال بیمار به اتاق عمل، سنسورهای مربوط به سیستم ردگیری بر روی دسته ابزار جراحی و همچنین نقاط خاصی از بدن بیمار متصل می‌شوند و نقاطی از بدن بیمار که سنسورهای سیستم ردگیری به آن متصل شده‌اند بر روی تصویر قبل از جراحی تعیین و در رایانه اصلی ذخیره می‌شود تا امکان تعیین موقعیت نوک ابزار نسبت به این تصویر فراهم آید.

پس از ایجاد چنین پیکربندی سیستم راهبری جراحی برای تعیین موقعیت ابزار و کمک به چگونگی هدایت آن آماده

خواهد بود و جراحی می‌تواند آغاز شود. با شروع جراحی ابزار جراحی از ناحیه مورد نظر وارد بدن بیمار می‌شود و در این حین موقعیت سنسورهای متصل شده به پایه آندوسکوپ و بدن بیمار به طور لحظه به لحظه توسط دوربین‌های ردگیری تعیین و به رایانه اصلی منتقل می‌شود. رایانه اصلی سپس با پردازش این اطلاعات موقعیت نوک آندوسکوپ را نسبت به تصویر قبل از جراحی محاسبه و آن را بر روی نمایشگر خروجی نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

امروزه جامعه پزشکی با تمرکز بیشتری در حوزه جراحی‌های حداقل تهاجمی فعالیت می‌کند. پیشرفت‌هایی به وجود آمده در فناوری‌های تصویربرداری و ابزارهای جراحی باعث شده است تا در بعضی از جراحی‌ها به منظور داشتن حداقل تهاجم و حداکثر دقت این فناوری‌ها مورد استفاده قرار گیرند. مزایای عمده سیستم‌های MIS شامل پیچیدگی‌های کمتر و دقت بالاتر در جراحی، دوره بستری کوتاه‌تر، دوره بهبودی سریع‌تر و هزینه‌های کمتر می‌باشد که سبب ایجاد یک روند رو به رشد برای استفاده از این سیستم‌ها شده است. سیستم‌های راهبری جراحی یکی از آخرین پیشرفت‌ها در زمینه جراحی‌های کم‌کمک تصویر هستند که امکان ردگیری ابزار جراحی و شناخت ساختارهای آناتومیکی خاص را برای جراحان فراهم می‌آورند. به طور کلی این سیستم‌ها، مکان ابزار جراحی را دنبال کرده و موقعیت آن را روی تصاویر مربوط به بیمار که از روی داده‌های تصویری از پیش اخذ شده بیمار استخراج شده‌اند، مشخص می‌کنند. سیستم‌های جراحی به کمک تصویر در جراحی‌های مغز و اعصاب، سینوس، ستون فقرات و نخاع و به طور کلی در جاهایی که نیاز به دقت و صحت بالایی دارد به عنوان مناسب‌ترین گزینه بوده و به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سامانه راهبری جراحی در سال ۱۳۹۰ در مرکز رشد لوازم و تجهیزات پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران طراحی و تولید شده است و هم اکنون در برخی از بیمارستان‌های کشور راه‌اندازی و مورد استفاده قرار گرفته است. ساخت سیستم راهبری جراحی در کشور و تجهیز شدن اتاق‌های عمل با این دستگاه در آینده‌ای نزدیک از سوی دیگر نیازمند آشنایی جامعه جراحان با این فناوری و چگونگی عملکرد آن دارد.

Abstract:

Familiarity with Intelligent Surgical Navigation System and its Applications in Minimally Invasive Surgery

Moghadam A. MSc^{}, Haddadnia J. Ph.D^{**}, Yazdi M.S. MD^{***}*

(Received: 22 April 2013 Accepted: 23 Nov 2013)

In recent years a new method, called minimal invasive surgery (MIS), has been welcomed. In addition to creating enormous development in the field of surgery, it has corrected defects and aggressive face of this field. MIS usually uses endoscopes and is done through small holes on the skin or through the body cavities, such as airways, digestive and etc. and has less injury and side effects for patients. The main problem of MIS in comparison to open surgeries is the lost of surgeon's vision in finding the endoscope's position or other surgical instruments inside the body that needs more experience and increase probability of injury to critical tissues. To solve this problem, in recent years surgical navigation systems have been developed, and a kind of these systems was invented and used in Iran in 2011. The main task of a surgical navigation system is to estimate the position of the surgical instrument and how to move it inside the body, and showing this data on the pre-operative images, which were taken from the patients. Experiments show that surgical navigation systems improve endoscopic surgery's quality and reduce its complications in patients. Therefore these systems will be one of the important requirements of all operating rooms in future. So, due to the rapid advancement of this technology and medical community's need and especially surgeon's need to be familiar with surgical navigation system, we have carefully discussed. In this article various parts of these systems, their performance and some of their advantages in an endoscopic surgery has been carefully discussed and reviewed.

Key Words: Minimally Invasive Surgery, Optical Tracking System

^{*} *Master Degree in Medical Engineering, Sabzevar University of Medical Sciences, Center for Research of Advanced Medical Technology, Sabzevar, Iran*

^{**} *Associate Professor of Biomedical Engineering, Sabzevar University of Medical Sciences, Center for Research of Advanced Medical Technology, Sabzevar, Iran*

^{***} *ENT Surgeon, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran*

References:

1. Mirmalek, A., and translators group "research in surgery: selected perspective of evolution in surgery science" Journal of Iran Surgery, Volume 15, Number 3, 1386.
2. Cleary K, Peters TM. 2010. "Image-guided interventions: technology review and clinical applications". *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 12: 119-42.
3. Yaniv, Z., Cleary, K. "Image-Guided Procedures: A Review" Imaging Science and Information Systems Center, Department of Radiology, Georgetown University Medical Center, Washington, DC, USA. April 2006.
4. Mirotta, D., Ishii, M., Hager, G.D. "Vision-Based Navigation in Image-Guided Interventions". *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2011. 13: 297-319.
5. William D., Sandra C., Girma, T., Charles W., John R., "Minimal incision aortic surgery". Elsevier, *Journal of Vascular Surgery*, Volume 34, Issue 1, July 2001, Pages 47-53.
6. Aziz, O., Athanasiou, T., Tekkis, P.P., Purkayastha S. Haddow, J. Malinowski, V., Paraskeva, P., Darzi A. "Laparoscopic versus open appendectomy in children: a meta-analysis". *Ann Surg.* 2006 Jan; 243(1): 17-27.
7. Gross, S., Kollenbrandt, M., "Technical evolution of medical endoscopy". Proceedings of the 13th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2009.
8. Taylor R. H., Funda J., Eldgridge B. "Telerobotic assistant for laparoscopic surgery". *IEEE Eng Med Biol* 1995; 14: 279-288.
9. <http://parsiss.com>
10. E. Grimson, M. Leventon, G. Ettinger, A. Chabrierie, F. Ozlen, S. Nakajima, H. Atsumi, R. Kikinis, P. Black "Clinical Experience with a High Precision Image-guided Neurosurgery System". *Interactive Image-Guided Neurosurgery, Neur. Surg.*, 2006.
11. Kingdom TT, Orlandi RR, "Image-guided surgery of sinuses: current technology and applications". *Otolaryngol Clin North Am.* 2004 Apr; 37(2): 381-400.
12. Smith, K.R., Frank, K.J., Bucholz, R.D., "The neurostation: a highly accurate minimally invasive solution to frameless stereotactic neurosurgery". *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1994; 18: 247-256.
13. Heilbrun, M.P., Koehler, S., McDonald, P., Sieminov, V., Peters, W., Wiker, C., 1993. "Implementation of a machine vision method for stereotactic localization and guidance". Maciunas, R. (Ed.), *Interactive Image-Guided Neurosurgery*, pp. 169-177. AANS.
14. Barnett, G.H., Kormos, D.W., Piraino, D., Steiner, C.P., Weisenberger, J., Hajjar, F., Wood, C., McNally, J., 1993. "Frameless stereotaxy using a sonic digitizing wand: development and adaptation to the picker vistar medical imaging system". Robert Maciunas, J. (Ed.), *Interactive Image-guided Neurosurgery. American Association of Neurological Surgeons (Chapter 10)*.
15. Dey, D., Gobbi, D., Slomka, P., Surry, K., Peters, T., 2002. "Mixed reality merging of endoscopic images and 3D surfaces". *IEEE Transactions on Medical Imaging* 21 (1), 23-30.
16. Cutting, C.B., Grayson, B., Kim, H.C., 1990. "Precision multi-segment bone positioning using computer aided methods in craniofacial surgery applications". 12th IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference. IEEE Press, New York.
17. VanderKolk, C., Zinreich, S., Carson, B., Bryan, N., Manson, P., 1992. "An interactive 3d-ct surgical localizer for craniofacial surgery". Montoya, A. (Ed.), *Craniofacial Surgery*.
18. Burghart, C., Krempien, R., Redlich, T., Pernozzoli, A., Grabowsky, H., Munchenberg, J., Hassfeld, S., Albers, J., Vahl, C., Rembold, U., Worn, H., 1999. "Robot assisted craniofacial surgery: first clinical evaluation". *Computer Assisted Radiology and Surgery*, 828-833.
19. Bartz, D., Gurvit, O., Freudenstein, D., Schiffbauer, H., Hoffman, J., 2001. "Integration of navigation, optical and virtual endoscopy in neurosurgery and oral and maxillofacial surgery". 3rd Caesarium - Computer Aided Medicine.
20. Adams, L., Knepper, A., Krybus, W., Meyer-Ebrecht, D., Pfeiffer, G., Rueger, R., Witte, M., 1991. "Navigation support for surgery by means of optical position detection and real-time 3D display". *Proceedings Computer Aided Radiology*. Springer, Berlin.
21. Lavallee, S., Sautot, P., Troccaz, J., Cinquin, P., Merloz, P., 1994. "Computer assisted spine surgery: a technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3-D optical localizer". *Medical Robotics and Computer-assisted Surgery* 2, 315-332.
22. Merloz, P., Tonetti, J., Eid, A., Faure, C., Pittet, L., Coulomb, M., Sautot, P., Raoult, O., 1997. "Computer-assisted versus manual spine surgery: clinical report". Grimson, E., Mosges, R. (Eds.), *Proceedings of First Joint Conference of CVRMed and MRCAS*, vol. 1205. Springer, Berlin, pp. 541-544.
23. Cleary, K., 1999. "Workshop report: technical requirements for image guided spine procedures".
24. DiGioia, A.M., Simon, D.A., Jaramaz, B., Morgan, F., Blackwell, M., O'Toole, R.V., Colgan, B., Kischell, E., 1996. "Preoperative planning and intra-operative navigational guidance for acetabular implant placement in total hip replacement surgery". *Computer Assisted Orthopedic Surgery*.

25. Picard, F., Digioia, A., Sell, D., Jaramaz, B., Moody, J., Nikou, C., LaBarca, R., Levison, T., 2001. "Computer-assisted navigation for knee arthroplasty: intra-operative measurements of alignment and soft tissue balancing". First Annual Meeting of CAOS International, Davos, p. 114.
26. Kunz, M., Langlotz, F., Strauss, J., Ruther, W., Nolte, L.-P., 2001. "Development and verification of a non-CT based total knee arthroplasty system for the lcs prosthesis". First Annual Meeting of CAOS International, Davos, p. 131.
27. Van HellenMondt, G., deKleuver, M., Pavlov, P., 2001. "Computer assisted pelvic osteotomies; clinical experience in 25 cases". First Annual Meeting of CAOS International, p. 123.
28. D. J. Mirotta, H. Wang , R.H. Taylor, M. Ishii, G.L. Gallia, G. D. Hager, "A System for Video-based Navigation for Endoscopic Endonasal Skull Base Surgery" IEEE, Medtronic Computer-Aided Surgery, 2011.
29. Fried MP, Kleeffeld J, Gopal H, Reardon E, Ho BT, Kuhn FA, "Image-guided endoscopic surgery: results of accuracy and performance in multicenter clinical study using electromagnetic tracking system". Laryngoscope. 1997 may; 107(5): 594-601.