



UNIVERSIDAD DE LAS CIENCIAS INFORMÁTICAS
FACULTAD 5

Sistema de Registro para software de Navegación Quirúrgica

Trabajo de Diploma para optar por el título de
Ingeniero en Ciencias Informáticas

Autor: Fidel Martínez Pérez

Tutores: Ing. Ernesto de la Cruz Guevara Ramírez

Ing. Mileydi Moreno Mirabal

Co-Tutor: Ing. Adrian Fonseca Mursuli

La Habana, Junio de 2012

Intenta no volverte un hombre de éxito, sino volverte un hombre de valor.

Albert Einstein.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro ser autor de la presente tesis y reconozco a la Universidad de las Ciencias Informáticas los derechos patrimoniales de la misma, con carácter exclusivo.

Para que así conste firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del año _____.

Fidel Martínez Pérez

Firma del Autor

Ernesto de la Cruz Guevara Ramírez

Firma del Tutor

Mileydi Moreno Mirabal

Firma del Tutor

Adrian Fonseca Mursuli

Firma del Co-Tutor

DATOS DE CONTACTO

Tutor: Ing. Ernesto De La Cruz Guevara Ramírez.

Graduado como Ingeniero en Ciencias Informáticas en la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en el año 2008. Actualmente pertenece al Centro de Informática Industrial (CEDIN) de la Facultad 5 de la UCI.

Empresa: Universidad de Ciencias Informáticas UCI.

Dirección: carretera a San Antonio Km. 2 1/2 Torrens, Boyeros La Habana.

Correo electrónico: elquevara@uci.cu

Tutor: Ing. Mileydi Moreno Mirabal

Graduada como Ingeniera en Ciencias Informáticas en la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en el año 2008. Actualmente pertenece al Centro de Informática Industrial (CEDIN) de la Facultad 5 de la UCI.

Empresa: Universidad de Ciencias Informáticas UCI.

Dirección: carretera a San Antonio Km. 2 1/2 Torrens, Boyeros La Habana.

Correo electrónico: mmirabal@uci.cu

Co-tutor: Ing. Adrian Fonseca Mursuli

Graduado como Ingeniero en Ciencias Informáticas en la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en el año 2011. Actualmente pertenece al Centro de Informática Industrial (CEDIN) de la Facultad 5 de la UCI.

Empresa: Universidad de Ciencias Informáticas UCI.

Dirección: carretera a San Antonio Km. 2 1/2 Torrens, Boyeros La Habana.

Correo electrónico: amursuli@uci.cu

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su sacrificio, empeño y dedicación, por estar presente en cada paso de la vida.

A mi familia, que gracias a ella me he convertido en la persona que soy hoy.

A mis tutores, por su apoyo incondicional y su trabajo incansable.

A todos mis amigos tanto dentro y fuera de la universidad.

A Lafita y los jímaguas Lester y Leiser por compartir tantos momentos buenos y malos, a Simón por ser el compañero de batalla.

Al Muni, que siempre estuvo dispuesto a ayudarme en lo que fuera necesario.

A todos los que de una forma u otra dejaron su huella y me brindaron su apoyo en el desarrollo este trabajo.

DEDICATORIA

A mi madre, por ser la luz de mi universo.

A mi abuelo Macho, que siempre está presente en mi corazón.

A mi novia, por su amor y comprensión en todos estos años, sin ella nada tendría sentido, te amo Janet.

RESUMEN

La neuronavegación se ha convertido en un procedimiento de rutina que se ha implantado en muchos hospitales del mundo. La evolución de esta tecnología, ha provocado una reacción de demanda por parte del cirujano y del propio paciente. La presente investigación se realiza a partir de la necesidad de generalizar este tipo de procedimiento en todo el país, planteada por las instituciones Clínica Central Cira García y Centro Internacional de Restauración Neurológica a la Universidad de las Ciencias Informáticas. Este trabajo se enfoca en resolver la problemática de detectar en tiempo real la posición y orientación espacial de una herramienta similar a un instrumento quirúrgico, y relacionar estos datos con el estudio de imágenes médicas del paciente que es intervenido quirúrgicamente por medio de dicha herramienta. Se planteó como objetivo, la implementación de un componente de registro 3D alternativo a los existentes en el mercado internacional. Se elaboró un componente de registro que se integró a un prototipo de software a través de las bibliotecas ARToolKit e IGSTK, con el cual se logró retroalimentar visualmente, la posición y orientación espacial de la herramienta de seguimiento en el estudio de imágenes correspondiente a una escena real. Se desarrolló un caso de estudio utilizando un cráneo de pruebas con su correspondiente estudio de tomografía. Las pruebas realizadas al componente desarrollado arrojaron resultados de precisión aceptables, lo que permite comenzar a desarrollar las funcionalidades principales de un neuronavegador quirúrgico.

Palabras Clave: neuronavegación, registro 3D.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	13
Introducción.....	13
1.1. Conceptos y términos asociados al dominio de la investigación	13
1.1.1. Cirugía asistida por computadora.....	13
1.1.2. Navegación guiada por imágenes	14
1.1.3. Estereotaxia	14
1.2. Registro	14
1.3. Neuronavegación.....	15
1.3.1. Ventajas de la neuronavegación	16
1.2.3. Componentes de un sistema de neuronavegación guiada por imágenes	17
1.3. Visualización de imágenes médicas	17
1.4. Sistema de seguimiento tridimensional.....	18
1.4.1. Marco estereotáxico	18
1.4.2. Brazo mecánico	19
1.4.3. Luz infrarroja	20
1.4.4. Ultrasonidos	21
1.4.5. Magnetismo.....	21
1.4.6. Grabación de video	22
1.4.7. Calibración	23
1.5. Registro de correlación	23
1.5.1. Basado en puntos	24
1.5.2. Basado en superficies	25
1.5.3. Basado en volumen.....	25
1.6. Bibliotecas para el desarrollo de aplicaciones de cirugía guiada por imágenes	25
1.6.1. ITK	26
1.6.2. VTK.....	26
1.6.3. 3D Slicer	26
1.6.4. IGSTK	27

Conclusiones parciales.....	27
CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN PROPUESTA.....	28
Introducción.....	28
2.1. Soluciones técnicas	28
2.2. Descripción de la solución	31
2.2.1. Descripción del componente de seguimiento	33
2.2.2. Integración del componente de seguimiento con IGSTK	34
2.3. Modelo de dominio	37
2.3.1. Descripción de las clases conceptuales	38
2.4. Requisitos funcionales	39
2.5. Diagrama de casos de usos del sistema.....	39
2.5.1. Definición del actor del sistema.....	40
2.5.2. Expansión de los casos de uso del sistema	40
2.6. Diagrama de clases	43
2.7. Diagramas de secuencia	44
Conclusiones parciales.....	46
CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS	47
Introducción.....	47
3.1. Diagrama de despliegue	47
3.2. Diagrama de componentes	47
3.3. Estándar de codificación.....	48
3.4. Pruebas	51
3.4.1. Pruebas desarrolladas	51
Conclusiones parciales.....	55
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS.....	61
GLOSARIO	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Registro.	15
Figura 2 Marco estereotáxico.....	19
Figura 3 Brazo mecánico.	20
Figura 4 Componentes de un sistema de seguimiento mediante ultrasonidos. a) Distribución de los detectores de sonido en el quirófano. b) Emisor de sonido acoplado a una pinza quirúrgica.	21
Figura 5 Componentes de un sistema de seguimiento magnético. a) Dispositivo generador de campo magnético. b) Bobinas sensores.	22
Figura 6 Calibración de la herramienta.	23
Figura 7 Transformaciones involucradas en el proceso de registro.....	32
Figura 8 Formato de los marcadores.	34
Figura 9 Funcionamiento del Tracker de IGSTK.	35
Figura 10 Modelo de dominio.....	38
Figura 11 Diagrama de casos de usos.....	40
Figura 12 Diagrama de clases del diseño.	44
Figura 13 Diagrama de secuencia del caso de uso: conectar dispositivo de seguimiento.....	45
Figura 14 Diagrama de secuencia del caso de uso: realizar registro.....	45
Figura 15 Diagrama de despliegue.	47
Figura 16 Diagrama de componentes.	48
Figura 17 Escenario de prueba.	52
Figura 18 Interfaz de la aplicación.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Funciones implementadas en las clases ARTKTracker y ARTKTrackerTool.....	36
Tabla 2 Descripción del actor del sistema.....	40
Tabla 3 Expansión del caso de uso: conectar dispositivo de seguimiento.....	42
Tabla 4 Expansión del caso de uso: realizar registro.	43
Tabla 5 Resultados de la Prueba.	55

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, en intervenciones neurológicas complejas, era frecuente que el cirujano tuviera que abandonar el campo quirúrgico; observar todas las placas radiográficas, y hacerse una composición imaginaria del lugar donde se encontraba en el momento en que había detenido la intervención. Gracias al avance de la informática, la imagenología médica, y la cirugía asistida por ordenador, se ha evolucionado en el desarrollo de nuevas herramientas de apoyo a los cirujanos. Estas herramientas asisten al médico en el diagnóstico, planificación y ejecución de la intervención quirúrgica; con el objetivo de proporcionar mejores resultados clínicos, disminuir el tiempo en el quirófano y minimizar los riesgos al paciente. Una de las herramientas de última generación que se destaca en este campo es el neuronavegador, el cual brinda al cirujano y su equipo profesional, un margen de seguridad y confianza que facilita el tratamiento quirúrgico de lesiones cerebrales.

La neuronavegación se ha convertido en una rutina que ha dejado obsoletos otros procedimientos en muchos hospitales del mundo. La evolución de esta tecnología, sin duda, está provocando una reacción de demanda por parte del cirujano y del propio paciente. Ambos desean y exigen que se utilicen las técnicas más precisas para obtener mejores resultados, lo cual provoca que cada vez haya menos intervenciones quirúrgicas que no requieran la ayuda de esta avanzada tecnología.

La gran desventaja de estos equipos es el costo de adquisición en el mercado internacional, así como el costo de mantenimiento y actualización. Las posibilidades técnicas y el desarrollo alcanzado en nuestro país en las ciencias informáticas, sirven como base para la fabricación de equipos como estos; los cuales una vez desarrollados podrán distribuirse por los hospitales cubanos y de las colaboraciones médicas en el exterior. Además se avizora como una vía para posicionar la industria cubana del software en el mercado internacional, especialmente América Latina, África y Asia, con precios que pudieran acercarse mucho más a su costo real de producción y con elevada calidad tecnológica.

Utilizando como base los argumentos anteriores y debido a la necesidad de utilizar sistemas de este tipo, la Clínica Central “Cira García”, en colaboración con la Sociedad Cubana de Neurología y Neurocirugía y el Centro Internacional de Restauración Neurológica, ha propuesto (ver Anexo 1. **Propuesta de construcción en Cuba de un Neuronavegador.**) a la Universidad de las Ciencias Informáticas la

fabricación de este tipo de sistema de navegación guiada por imágenes. La decisión se sustenta además en la experiencia que han tenido los cirujanos miembros de las instituciones mencionadas en hospitales europeos, donde se utilizan estos sistemas como procedimiento de rutina para brindar servicios médicos de elevada calidad a los pacientes.

La función principal de un neuronavegador es mostrarle al médico una representación visual del instrumental quirúrgico sincronizado con el estudio de imágenes médicas aplicado al paciente. Cuando el cirujano posiciona el instrumento quirúrgico sobre el paciente, el neuronavegador debe mostrar una representación visual de dicho instrumento en la misma posición sobre las imágenes médicas. Por tanto, una de las problemáticas principales es tener localizado espacialmente el instrumental quirúrgico en todo momento. Aunque en el Centro de Informática Industrial (CEDIN) se han realizado trabajos de visualización de imágenes médicas y seguimiento de objetos en un espacio tridimensional, nunca se ha hecho este tipo de sincronización, que en este contexto suele llamarse registro 3D. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se plantea el siguiente **problema científico**: ¿Cómo retroalimentar visualmente en tiempo real al médico durante una neurocirugía guiada por imágenes?

La investigación tiene como **objeto de estudio**: el registro 3D mediante visión por computadoras, constituyendo el **campo de acción**: técnicas de registro para sistemas de neuronavegación.

Para darle solución a este problema se propone el siguiente **objetivo general**: proponer un sistema que sea capaz de registrar los sistemas de referencia de las imágenes médicas y la anatomía del paciente.

Para resolver el problema científico y darle cumplimiento al objetivo, se plantearon las siguientes **tareas de investigación**:

1. Analizar la bibliografía relativa a los sistemas de navegación guiada por imágenes para conocer su estructura y cuáles son sus componentes principales.
2. Caracterizar los métodos de registro que se utilizan en los sistemas de neuronavegación para seleccionar el más conveniente a la propuesta de solución.
3. Analizar las técnicas de seguimiento existentes para seleccionar la más conveniente a la propuesta de solución.

4. Analizar posibles bibliotecas para el desarrollo de software de navegación guiada por imágenes que se pueden utilizar para la implementación de la solución.
5. Proponer una solución con la consiguiente validación de los resultados obtenidos y reflejarlo en la documentación.

Entre los métodos científicos de investigación que apoyaron el desarrollo de este trabajo, se encuentran:

Métodos Teóricos

- **Histórico-lógico:** este método permitió conocer los antecedentes y las tendencias actuales referidas a las herramientas de navegación guiada por imágenes, además de conceptos, términos y vocabularios propios del campo que contribuyen en gran medida al entendimiento del trabajo.
- **Analítico-sintético:** mediante este método se pudo estudiar y analizar una serie de documentos y teorías relacionados con los sistemas de neuronavegación guiada por imágenes y extraer los elementos más importantes de estos, los componentes por los que están conformados, su funcionamiento y la interacción entre ellos.

Métodos Empíricos

- **Revisión de documentos:** este método permitió determinar el estado del arte del objeto de investigación.
- **Entrevistas:** al jefe del proyecto y otras personas especialistas en el tema de las herramientas de seguimiento y navegación, para obtener información sobre el tema de la investigación, así como para la validación de los resultados esperados.

El presente trabajo de diploma está estructurado de la siguiente forma: resumen, introducción, tres capítulos de contenido, conclusiones, recomendaciones, bibliografía, glosario de términos y anexos. A continuación se hace una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos:

Capítulo 1 “Fundamentación Teórica”: se hace un análisis de todo lo concerniente al objeto de estudio, se analizan los principales conceptos y términos asociados al problema en cuestión, así como otras soluciones existentes. Se refleja el estado del arte del tema de investigación. Se analizan los principales

componentes de un neuronavegador, los principales sistemas de seguimiento y métodos de registro que se utilizan en las aplicaciones de navegación guiada por imágenes, y las bibliotecas utilizadas para el desarrollo de este tipo de aplicaciones.

Capítulo 2 “Solución Propuesta”: se muestran las características de la propuesta de solución. Se hace una conceptualización a través del modelo de dominio, un levantamiento de requisitos, se obtienen los casos de uso del sistema y una descripción de estos, se presenta el diagrama de clases del diseño y los diagramas de secuencia, obteniendo así las entradas para la implementación de la solución.

Capítulo 3 “Implementación y Prueba”: se modela la implementación de la solución mediante los diagramas correspondientes y se define el estándar de codificación utilizado para el desarrollo de la misma. Además, se demuestra el cumplimiento del objetivo del trabajo a través del análisis del resultado de las pruebas realizadas a la solución.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Introducción

En este capítulo se abordarán los principales elementos teóricos que conforman los sistemas de navegación guiada por imágenes. Se exponen los componentes principales que están presentes en un sistema de neuronavegación. Se presentan los distintos métodos de seguimiento espacial que utilizan este tipo de aplicaciones y los principales métodos para realizar el registro de correlación. Además se identifican las bibliotecas existentes para el desarrollo de este tipo de aplicaciones de software.

1.1. Conceptos y términos asociados al dominio de la investigación

En el presente y posteriores epígrafes se abordarán temáticas comprendidas en el dominio de la investigación. Se mostrarán una serie de conceptos identificados durante la investigación realizada, así como la descripción de cada uno para facilitar la comprensión de los temas abordados.

1.1.1. Cirugía asistida por computadora

La tendencia en la cirugía es reducir al máximo el trauma terapéutico de los pacientes y maximizar la precisión, eficacia, fiabilidad y efectividad de la tarea quirúrgica introduciendo técnicas alternativas a las utilizadas en la cirugía tradicional. La cirugía asistida por computadora (CAS) surgió por una creciente necesidad de la sociedad, que demanda una mejora de los tratamientos quirúrgicos. La CAS constituye el conjunto de métodos que utilizan la tecnología informática como apoyo en la realización de la actividad quirúrgica. Esta pretende facilitar al cirujano herramientas informáticas que le asistan en el diagnóstico y la planificación preoperatoria, e incluso en la posterior ejecución de la intervención quirúrgica. El objetivo de la CAS es proporcionar mejores resultados clínicos, con menos procesos y mayor precisión, disminuir el tiempo de quirófano y minimizar los riesgos para el paciente.

1.1.2. Navegación guiada por imágenes

La navegación, por definición, es el proceso de determinar y mantener un camino o trayectoria hacia una ubicación objetivo (1). En medicina, se adopta este término para expresar la orientación espacial respecto a un volumen anatómico. La navegación guiada por imágenes en cirugía (2) consiste en determinar las coordenadas de los instrumentos de cirugía en la mesa de operaciones, y mostrar su posición en las imágenes de estudios previos para guiar al cirujano en zonas de difícil visibilidad o acceso, lo que favorece y simplifica la toma de decisiones.

1.1.3. Estereotaxia

En el campo de la navegación guiada por imágenes no se puede pasar por alto la estereotaxia o cirugía estereotáxica, pues esta constituye el procedimiento pionero en permitir la neuronavegación quirúrgica y es la base de los sistemas actuales de neuronavegación guiada por imágenes. El término fue introducido en la práctica médica por Horsley y Clarke alrededor de 1908 (3). Estereotaxia se origina del griego stereos: tridimensional y taxis: colocación. La cirugía estereotáxica consta de un marco estereotáxico (ver Epígrafe 1.4.1) que se fija al cráneo del paciente, el cual posee un sistema de coordenadas de referencia incrustado. Luego se toman las imágenes al paciente con el marco fijado al cráneo. Después se analizan las imágenes y se obtienen las coordenadas del objetivo quirúrgico. A través del marco estereotáxico es posible hacer llegar con gran seguridad y precisión cualquier material, energía u objeto a dicho objetivo.

El término más importante en esta investigación, y que debe ser perfectamente entendido para una total comprensión de este trabajo, es el registro. Por la importancia de este concepto, será tratado en un epígrafe aparte.

1.2. Registro

En la literatura estudiada existen varias definiciones de registro. Un grupo de investigadores define el registro como la técnica de calcular una transformación espacial que mapea un punto de un sistema de coordenadas a otro (4). Para otros, el registro consiste en la obtención de una función matemática o algoritmo que describa la relación entre cada punto de un sistema de coordenadas y su equivalente en otro

sistema de coordenadas (5). En palabras comunes, basado en las definiciones dadas, se puede decir que el registro es la acción de alinear espacialmente dos sistemas de coordenadas distintos. Para una mejor comprensión de este término, se muestra un ejemplo (Figura 1). Suponga que tiene una imagen A y una imagen B. El registro permite definir una alineación espacial entre la imagen A y la imagen B, es decir, establece una transformación espacial que especifica, para cada punto de la imagen A, el punto de la imagen B al cual se debe superponer.

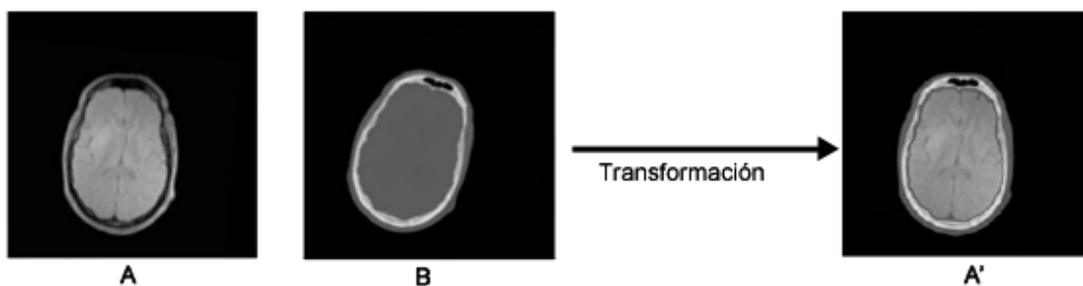


Figura 1 Registro.

En los sistemas de navegación guiada por imágenes el registro se utiliza con dos fines principales: para la fusión de las imágenes médicas y para el registro de correlación. La fusión de imágenes médicas consiste en mezclar las imágenes médicas de diferentes modalidades con el objetivo de mostrar un mayor cúmulo de información al médico. El registro de correlación se realiza para relacionar la imagen médica con el espacio físico real del paciente, este tipo de registro es un proceso indispensable para llevar a cabo la navegación quirúrgica. Otra clasificación que es importante conocer y que será tratada más adelante en la clasificación de los métodos de registro de correlación, es la dada por R L. Galloway (6); donde clasifica el registro como prospectivo si la decisión de realizar el registro se debe tomar antes de la adquisición de las imágenes médicas, o retrospectivo si la decisión se puede tomar después.

1.3. Neuronavegación

El término neuronavegación fue acuñado por Watanabe (7) y definido más tarde por R. L. Galloway (8) como “localizar la posición quirúrgica en el espacio físico y presentar la posición en el espacio de la imagen”. La neuronavegación consiste en un método médico de orientación espacial intracraneal

intraoperatorio, a través de la superposición de los instrumentos quirúrgicos sobre las imágenes médicas preoperatorias, esto permite al neurocirujano una guía interactiva por la imagen.

1.3.1. Ventajas de la neuronavegación

El uso de la neuronavegación en los procedimientos quirúrgicos proporciona extraordinarias ventajas tanto para el equipo médico que realiza la intervención como para el paciente. Según el doctor Leonardo Lustgarden (9) la aplicación de la neuronavegación depende de la ubicación de la lesión dentro del cráneo y cerebro, pero generalmente es muy útil para:

- La correcta y adecuada localización de tumores cerebrales en tiempo real y en forma continua dentro del cerebro, en particular en ubicaciones difíciles.
- Ayuda en la óptima y más completa resección de todos los tumores cerebrales u otras lesiones ocupantes de espacio.
- Es particularmente útil para aquellas lesiones que radiológicamente muestran una descripción muy parecida a la del cerebro y por ello son difíciles de distinguir.
- Permite la correcta ubicación de las lesiones pequeñas y ayuda a delimitar la resección en las lesiones grandes.
- Permite planificar las mejores trayectorias para abordar diferentes lesiones intracerebrales.
- Permite correlacionar y visualizar de forma continua y en tiempo real las estructuras vitales cercanas a la lesión (nervios ópticos, tallo cerebral, entre otros).

Entre las ventajas que la neuronavegación proporciona al paciente, se encuentran:

- Menor tiempo quirúrgico.
- Menor riesgo para las zonas de importancia funcional.
- Mayor radicalidad en las resecciones.
- Menor número de complicaciones postquirúrgicas (infecciones, fístulas, entre otras).
- Corta estancia hospitalaria.
- Menor defecto cosmético.

Todas estas características dependen de la eficacia de la implementación de los sistemas que permiten llevar a cabo esta tarea, es decir, los neuronavegadores. Por esta razón resulta crucial analizar las características de estos sistemas, los componentes o subsistemas que los conforman y su función.

1.2.3. Componentes de un sistema de neuronavegación guiada por imágenes

Los sistemas de navegación guiada por imágenes, específicamente los de neuronavegación, poseen tres componentes principales:

- Visualización de imágenes médicas: este es el componente utilizado para cargar y visualizar las imágenes médicas de distintas modalidades.
- Sistema de seguimiento tridimensional: es el encargado de obtener la posición, orientación, y seguir la trayectoria de las herramientas quirúrgicas en el quirófano.
- Registro de correlación: permite establecer una correspondencia entre cada punto de la imagen y su correspondiente anatómico físico o real.

Para una mejor comprensión, en los epígrafes siguientes serán explicados con más detalle cada uno de estos componentes.

1.3. Visualización de imágenes médicas

El paso inicial para llevar a cabo la navegación guiada por imágenes, es cargar las imágenes de estudios médicos, las cuales contienen la información anatómica, morfológica y funcional del paciente. Existe una gran cantidad de modalidades de imágenes médicas, las cuales se diferencian en cuanto a la naturaleza del principio físico en que se basan. Las modalidades de imágenes más utilizadas en los sistemas de navegación guiada por imágenes son la tomografía axial computarizada (TAC), la resonancia magnética (RM) y las tomografías por emisión de positrones (PET), aunque se está extendiendo el uso de otras modalidades que complementan las mencionadas anteriormente. El componente de visualización en un sistema de neuronavegación guiada por imágenes es el responsable de cargar y visualizar los archivos de imágenes médicas, además de los objetos visuales que representan las herramientas quirúrgicas.

1.4. Sistema de seguimiento tridimensional

Los sistemas de seguimiento, sistemas de rastreo o sistemas de *tracking* como también se les llama, progresan constantemente en número, fiabilidad y facilidad de uso (5). Todos ellos suponen soluciones muy ingeniosas al problema de la localización tridimensional en el campo quirúrgico, al tiempo que presentan sus propias ventajas y desventajas. Los sistemas de seguimiento tridimensional se pueden dividir en dos grupos, los ópticos y los no ópticos; la diferencia radica en que los dispositivos ópticos requieren una línea de visión directa entre los emisores y los receptores, por lo que se ven afectados por la presencia de obstáculos que impidan visualizar el objetivo a seguir.

A continuación se describen los principales métodos de seguimiento tridimensional que se utilizan en los sistemas de neuronavegación guiada por imágenes, estos son: marco estereotáxico, brazo mecánico, luz infrarroja, ultrasonidos, magnetismo y grabación de video.

1.4.1. Marco estereotáxico

Este es el primer método de seguimiento y el de mejor influencia y longevidad en la historia del desarrollo de la navegación quirúrgica. Este método consiste en una estructura rígida (marco estereotáxico) que es firmemente anclada al cráneo del paciente, lo que impide el movimiento relativo entre el marco y el paciente. El marco estereotáxico (Figura 2) lleva fijado unos marcadores de referencia fácilmente identificados en las imágenes médicas. Se montan unas escalas físicas que actúan como control de dirección y profundidad, que permiten colocar un instrumento quirúrgico en cualquier punto objetivo del cerebro (10).



Figura 2 Marco estereotáxico

La principal ventaja de los marcos estereotáxicos es la precisión. Este mecanismo proporciona al cirujano un alto nivel de seguridad en el procedimiento quirúrgico. En investigaciones realizadas (ver (11) y (12)) se ha alcanzado una precisión física de fracciones de milímetros. A pesar de su gran precisión y seguridad, el marco estereotáxico también presenta importantes desventajas, las cuales se mencionan a continuación:

- El marco y los sistemas de guía obstruyen la cirugía.
- Solo se puede calcular un número limitado de objetivos quirúrgicos.
- No es posible tener un control directo e interactivo del extremo profundo del instrumento cuando avanza en el campo quirúrgico.
- El paciente tiene que someterse a las técnicas de imagen, el transporte y la cirugía con el marco fijado al cráneo, lo que incrementa significativamente la invasividad del procedimiento, el tiempo quirúrgico y el riesgo de incidencias.

1.4.2. Brazo mecánico

Este sistema consiste en un brazo mecánico multiarticulado (Figura 3) con medidores de ángulo en cada articulación, de modo que el sistema conoce las coordenadas de un puntero colocado al extremo distal del brazo articulado (ver (7) y (13)).



Figura 3 Brazo mecánico.

Este mecanismo mejora la obstrucción del campo quirúrgico que existía en el marco estereotáxico, aunque no la elimina por completo. Investigaciones realizadas (ver (14), (15) y (16)) han demostrado que los sistemas de localización que utilizan brazo mecánico presentan una precisión limitada en comparación con el marco estereotáxico, además, se hace difícil manipular el brazo mecánico en estructuras profundas.

1.4.3. Luz infrarroja

Los sistemas de seguimiento que utilizan luz infrarroja se dividen en dos, los activos y los pasivos. Los sistemas activos consisten en la ubicación de dos o más cámaras receptoras de luz infrarroja en el quirófano. Las cámaras receptoras detectan la luz infrarroja emitida por diodos emisores de luz (LED) fijados a los instrumentos quirúrgicos, luego por triangulación es posible determinar la localización espacial del instrumento (16). Los sistemas pasivos funcionan de manera similar, la diferencia radica en que las cámaras infrarrojas ubicadas en el quirófano son las encargadas de emitir la luz, y a las herramientas se fijan marcadores pasivos que reflejan la luz que reciben, lo que permite conocer su posición mediante triangulación. Este tipo de sistemas de seguimiento alcanza una precisión inferior a 1 milímetro y es muy versátil, debido a que los LED y los marcadores pasivos se pueden fijar a cualquier instrumento quirúrgico. Sin embargo, presenta la desventaja de los sistemas de seguimiento óptico, que la línea de visión directa entre los sensores infrarrojos y los LED o los marcadores debe permanecer libre de obstáculos.

1.4.4. Ultrasonidos

El principio de funcionamiento de este tipo de sistemas de seguimiento es similar al sistema de luz infrarroja activo, pero utilizando sensores de ultrasonidos. Al instrumento quirúrgico se le fija un emisor de ultrasonidos (Figura 4 b)). En el quirófano se colocan sensores detectores de sonido (Figura 4 a)), que determinan la posición del instrumento mediante triangulación calculando las diferencias del tiempo que tarda el ultrasonido en llegar a ellos (17).

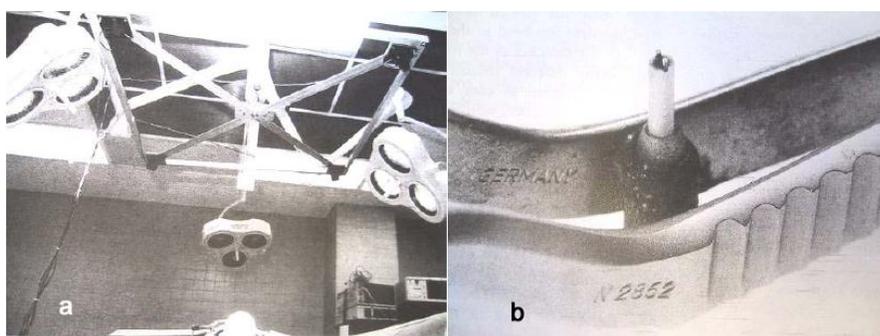


Figura 4 Componentes de un sistema de seguimiento mediante ultrasonidos. a) Distribución de los detectores de sonido en el quirófano. b) Emisor de sonido acoplado a una pinza quirúrgica.

Este tipo de sistema de seguimiento en condiciones ideales puede alcanzar una precisión comparable a los sistemas de luz infrarroja, y no requiere una línea de visión directa entre receptores y emisores. El inconveniente en la utilización de este método de seguimiento, es la susceptibilidad a las interferencias del ruido ambiental y a los cambios de temperatura (17).

1.4.5. Magnetismo

Un sistema de localización mediante magnetismo, consta de un dispositivo que genera un campo magnético (Figura 5 a) el cual se coloca en el campo quirúrgico, y pequeñas bobinas sensores (Figura 5 b) que se incrustan en los instrumentos. Estas bobinas son detectadas por el dispositivo generador (4). Luego, de forma similar a los sistemas de luz infrarroja y ultrasonidos, la posición del instrumento en el campo quirúrgico se determina mediante triangulación.

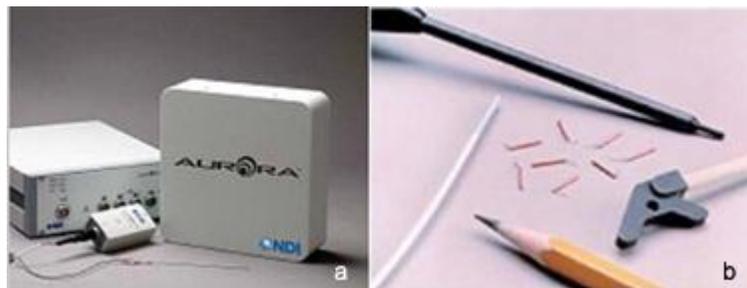


Figura 5 Componentes de un sistema de seguimiento magnético. a) Dispositivo generador de campo magnético. b) Bobinas sensores.

Este método no tiene la limitación de la línea de visión directa entre el receptor y los emisores. Esto permite que el instrumento que está siendo rastreado por el dispositivo de seguimiento se pueda mover con total libertad en el campo quirúrgico, y que se puedan rastrear los instrumentos dentro del cuerpo del paciente. La presencia de objetos electromagnéticos puede afectar la precisión y estabilidad de este método de seguimiento (4). Se debe tener un ambiente libre de metal, algo que es difícil en un salón de operaciones debido a la presencia de la propia mesa de operación, las herramientas quirúrgicas, y los dispositivos de imagen y de monitorización del paciente.

1.4.6. Grabación de video

Este método de seguimiento utiliza técnicas estereoscópicas para la localización de un objeto en un espacio tridimensional. Consiste en la ubicación de dos cámaras de video de alta calidad en ángulos distintos. Las cámaras captan imágenes al mismo tiempo que al fusionarlas, proporcionan una información estereoscópica que permite la localización del instrumento en el campo quirúrgico. Mediante este método se puede alcanzar una alta precisión, pero presenta la desventaja de todo sistema óptico, se ve afectado por la ocurrencia de obstáculos entre las cámaras y el objetivo a localizar.

En los epígrafes anteriores han sido abordados los principales métodos utilizados para realizar el seguimiento de objetos en un espacio tridimensional, específicamente, de las herramientas quirúrgicas en un quirófano. Mediante las técnicas vistas, es posible determinar con precisión la posición de objetos que son fijados a las herramientas, pero en los sistemas de navegación guiada por imágenes lo que se desea

conocer es la posición de la punta de la herramienta. La posición de la punta de la herramienta se determina mediante un proceso de calibración, el cual se explica en el siguiente epígrafe.

1.4.7. Calibración

Para la determinación de los puntos de referencia en el paciente y la visualización de la herramienta durante la navegación una vez realizado el registro, se necesita conocer la posición de la punta de la herramienta. La calibración de la herramienta, se realiza con el objetivo de determinar la transformación M_c (Figura 6) entre el centro del marcador o el conjunto de marcadores que están fijados a la herramienta, y la punta de esta. Esta calibración se realiza mediante un algoritmo denominado calibración de pivote.

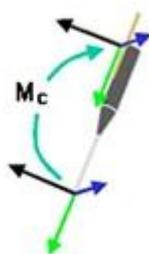


Figura 6 Calibración de la herramienta.

El procedimiento de calibración de pivote consiste en fijar la punta de la herramienta a un punto. La herramienta se hace girar de forma esférica sin mover la posición de la punta. Durante el proceso se almacenan los valores de posición de los marcadores de la herramienta. Mediante un algoritmo de calibración dinámica, se calcula la posición del centro de la esfera que representa la posición del punto de pivote, y el radio de la esfera, que representa la transformación entre el punto de pivote y los marcadores fijados a la herramienta. La precisión de la estimación de la relación entre la punta de la herramienta y los marcadores fijados a esta, depende de la exactitud de las mediciones de los marcadores que están fijados a la herramienta.

1.5. Registro de correlación

Los métodos para llevar a cabo el registro de correlación se pueden dividir en dos, los que utilizan marco y los que no utilizan marco. El método principal con marco es el marco estereotáxico, mientras que entre los

principales métodos sin marco se pueden encontrar los métodos basados en puntos, basados en superficies y los basados en volumen. La tendencia actual en los procedimientos de navegación guiada por imágenes es a utilizar métodos de registro sin marcos, debido a que estos métodos son menos invasivos para el paciente; y aunque no brindan la precisión casi exacta de los sistemas con marco, gracias al desarrollo de algoritmos avanzados y optimizaciones se mejora cada vez más la precisión de estos métodos de registro. A continuación se describen los métodos de registro sin marco mencionados.

1.5.1. Basado en puntos

En el método de registro basado en puntos, se localizan puntos de referencia en ambos espacios, en el espacio de la imagen y en el espacio del paciente. Las ubicaciones de estos puntos de referencia de los dos espacios se organizan en dos listas de coordenadas tridimensionales, y se realiza una transformación tridimensional entre los dos conjuntos mediante un algoritmo o método matemático (5).

Los puntos de referencia se clasifican en dos tipos, los fiduciales intrínsecos y los fiduciales extrínsecos. Los fiduciales intrínsecos se basan en la información de los píxeles en el espacio de la imagen y en puntos estratégicos de la anatomía en el espacio del paciente. Los fiduciales extrínsecos son objetos extraños diseñados de manera que sean bien visibles y fácilmente detectables, tanto en el espacio de la imagen como en el espacio del paciente. (18)

Los primeros sistemas de cirugía guiada por imagen que realizaron el registro de correlación basado en puntos (ver (7), (19), (20)), utilizaron puntos de referencia anatómicos: el nasion, los tragos, y bordes orbitarios, como fiduciales intrínsecos. El problema con este enfoque es la dificultad de definir con precisión el punto de referencia anatómico, e incluso al ser localizado tal punto en el espacio físico, el grosor del corte de la imagen puede introducir una incertidumbre espacial.

Los fiduciales extrínsecos, o marcadores fiduciales, como también se les conoce, se pueden descomponer en dos clases: marcadores pegados a la superficie de la piel o marcadores implantados en el hueso. Los marcadores implantados se atornillan a la tabla externa del cráneo. Los marcadores pegados a la superficie son mucho menos invasivos que los implantados, pero contienen una fuente potencial de error debido al desplazamiento, hinchazón y tracciones de la piel (6).

1.5.2. Basado en superficies

Aunque las dificultades en la identificación de puntos anatómicos permanecen en la localización de superficies o características, la naturaleza retrospectiva del uso de características intrínsecas atrae a los investigadores. Varios investigadores han intentado usar la información de la superficie de la piel, por contacto (21) y por medios ópticos (ver (22) y (23)). El problema que presenta esta técnica es que la superficie de la piel es una estructura dinámica que responde a regímenes preoperatorios como la resequedad, hinchazón, o regímenes intraoperatorios, como la tracción de la piel. Una solución a este problema ha sido la utilización de la superficie del cráneo como una característica del registro (24). Otros investigadores han utilizado características de la superficie del cerebro para el registro intraprocedimiento (ver (25) y (26)), pero este método presenta la desventaja de que la estructura del cerebro cambia una vez que el cráneo se abre.

1.5.3. Basado en volumen

Un grupo de investigadores realizaron una comparación y evaluación de las técnicas de registro retrospectivo (27), donde se demostró que el registro basado en volumen es la mejor metodología para el registro de imagen a imagen. En el registro de correlación del espacio físico a la imagen, el registro basado en volumen ha tenido poco desarrollo. Este tipo de registro se ha utilizado en aplicaciones especializadas, como la terapia para el cáncer de próstata, donde se hace coincidir el ultrasonido intraprocedimiento tridimensional con los datos tomográficos preoperatorios en los que se ha realizado la planificación previa (28).

1.6. Bibliotecas para el desarrollo de aplicaciones de cirugía guiada por imágenes

Cuando se va a desarrollar una aplicación de cirugía guiada por imágenes, se puede optar por desarrollar el software desde el inicio, implementando todas las herramientas que se necesitan para desarrollar la aplicación; o utilizar herramientas existentes que proporcionen funcionalidades y herramientas que sirvan como base para el desarrollo de la aplicación. Desarrollar un software desde el inicio conlleva la inversión de tiempo y recursos valiosos en la implementación de una infraestructura básica. Si se utiliza una herramienta que brinde la infraestructura básica, este tiempo y recursos pueden centrarse en la

implementación y optimización de las funcionalidades deseadas de la aplicación. La evolución del software de código abierto, ha impulsado el desarrollo de bibliotecas y *frameworks* para todo tipo de aplicaciones. El uso de software de código abierto para aplicaciones y procedimientos médicos está ganando mayor aceptación en los últimos años. A continuación se mencionan las principales bibliotecas existentes en la actualidad para el desarrollo de aplicaciones de navegación guiada por imágenes.

1.6.1. ITK

Insight ToolKit (ITK) brinda un conjunto de potentes herramientas de código abierto y multiplataforma para el análisis de imágenes médicas. Fue desarrollado con el apoyo de la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos (NLM). Esta biblioteca ofrece algoritmos avanzados de procesamiento, segmentación y registro de imágenes, cuenta con una extensa comunidad de usuarios. Además, se mantiene en constante actualización y mantenimiento con apoyo de la NLM. ITK está implementada en el lenguaje C++ y provee contenedores para Tcl, Python e intérpretes Java, no proporciona soporte para visualización, tampoco para interfaz gráfica de usuario. (29)

1.6.2. VTK

Visualization ToolKit (VTK) fue originalmente desarrollado por GE Global Research, y luego pasó a ser propiedad de la compañía Kitware. Esta biblioteca multiplataforma y de código abierto, ofrece una amplia gama de algoritmos de gráficos por computadora, procesamiento y visualización de imágenes multidimensionales. Proporciona además, técnicas de modelado como el modelado implícito, la reducción de polígonos, suavizado de mallas, curvas de nivel y triangulación de Delaunay. VTK soporta el procesamiento en paralelo y puede integrarse con *frameworks* para el desarrollo de interfaz gráfica de usuario, como por ejemplo, Qt. (30)

1.6.3. 3D Slicer

3D Slicer, es un paquete de software libre, multiplataforma y de código abierto, para el análisis y visualización de imágenes médicas. *3D Slicer* permite el manejo de imágenes en formato DICOM, la visualización interactiva de imágenes volumétricas y la segmentación automática de imágenes.

Proporciona además, algoritmos rígidos y no rígidos para la fusión y el registro de correlación de datos espaciales. Este paquete de software es distribuido bajo licencia BSD, lo que no impone restricciones de ningún tipo en el uso de este. Sin embargo, *3D Slicer* no ha sido aprobado para uso clínico en Estados Unidos y otros países del mundo, por lo que actualmente se utiliza solamente con fines investigativos y terapéuticos. (31)

1.6.4. IGSTK

Image Guided Surgery ToolKit (IGSTK) es un proyecto de software de código abierto desarrollado con el apoyo del Instituto Nacional de Imagenología Biomédica y Bioingeniería (NIBIB) de los Estados Unidos. Esta biblioteca está pretendida para el prototipado y desarrollo de robustas aplicaciones de navegación guiada por imágenes. IGSTK es una biblioteca C++ multiplataforma que proporciona los componentes básicos necesarios para desarrollar un sistema de navegación guiada por imágenes. IGSTK permite cargar y visualizar imágenes médicas en formato DICOM, soporta la mayoría de los sistemas de seguimiento existentes en el mercado, y provee una vía para extender el soporte a otro tipo de sistemas de seguimiento. Además, proporciona clases para realizar el registro basado en puntos. (32)

Conclusiones parciales

En el presente capítulo, se estudiaron los principales términos y conceptos asociados al objeto de estudio enmarcados en el campo de acción. Se analizaron los componentes principales de un sistema de navegación guiada por imágenes, específicamente de los neuronavegadores. Se describieron los principales métodos de registro y dispositivos de seguimiento utilizados en estos sistemas. Todo esto permitió sentar las bases para definir una solución al problema planteado, la cual se detalla en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN PROPUESTA

Introducción

En este capítulo se realiza una descripción general de la solución propuesta al problema de la investigación. Se describen los procesos fundamentales que intervienen en la construcción del prototipo y la integración de estos. Además, se especifican las condiciones y los pasos a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de la solución.

2.1. Soluciones técnicas

La presente investigación pretende obtener como resultado un prototipo de navegación quirúrgica guiada por imágenes, que realice el registro de correlación entre la imagen médica y el espacio físico del paciente. Este a su vez debe permitir la navegación quirúrgica mediante la superposición de una representación visual del instrumento quirúrgico sobre las imágenes médicas, de esta manera es posible brindar la retroalimentación visual en tiempo real al médico durante una neurocirugía guiada por imágenes. Para el desarrollo de la propuesta de solución se hizo una estricta selección de las herramientas y lenguajes a utilizar, basada en la investigación realizada. A continuación se menciona cada una de las herramientas seleccionadas y su correspondiente justificación.

Biblioteca de desarrollo: la selección de la biblioteca para el desarrollo de la solución propuesta se fundamentó en un estricto análisis de las herramientas existentes con este fin, las cuales se describieron en el epígrafe 1.6. Como biblioteca para el desarrollo del prototipo se seleccionó IGSTK, ya que esta proporciona los componentes básicos necesarios en una aplicación de navegación quirúrgica, provee una plataforma común para la creación de prototipos y desarrollo de robustas aplicaciones de cirugía guiada por imágenes. Esta biblioteca está aprobada por la Agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA). Este conjunto de herramientas utiliza la biblioteca ITK para el registro y la segmentación, y VTK para la visualización, ambas bibliotecas están en constante desarrollo y constituyen un estándar en el campo de las aplicaciones de navegación guiada por imágenes. IGSTK proporciona las siguientes funcionalidades:

- Capacidad de cargar imágenes médicas, entre las que se incluyen imágenes TAC y RM en formato

DICOM.

- Contiene clases para la comunicación con dispositivos de seguimiento comunes en el mercado (por ejemplo, Aurora de NDI), además brinda la posibilidad de extender el soporte a dispositivos de seguimiento de terceros.
- Capacidad de creación de interfaz gráfica y visualización, incluyendo vista de cuatro cuadrantes (axial, sagital, coronal y 3D) y vista multicorte axial.
- Corrección de la precisión de los instrumentos quirúrgicos mediante técnicas de calibración.
- Contiene clases para el registro 3D basado en puntos.
- Brinda un robusto servicio interno para el registro de mensajes del sistema, manejo de excepciones y solución de problemas.

Estas características sirvieron como base para desarrollar la solución porque permitieron abstraerse de funcionalidades que pudiera desviar el foco de la investigación, centrada en buscar una solución para realizar el registro.

Biblioteca para el componente de seguimiento: para desarrollar el componente de seguimiento de la propuesta de solución, se utilizó el conjunto de herramientas para realidad aumentada que brinda la biblioteca ARToolKit (33). ARToolKit es una biblioteca de software utilizada para la construcción de aplicaciones de realidad aumentada. Utiliza algoritmos de visión por computadoras para resolver el problema del seguimiento de marcadores previamente definidos en el espacio físico real. ARToolKit calcula la posición real de los marcadores físicos y su orientación relativa a la cámara en tiempo real para hacer seguimiento. Esta es la funcionalidad principal por la que ha sido seleccionada para el componente de seguimiento del prototipo. A continuación se exponen las principales funcionalidades y facilidades que ofrece ARToolKit:

- *Tracking* de orientación/posición de una sola cámara.
- Posee la habilidad de utilizar cualquier marcador o patrón. (Siempre que sea cuadrado).
- Código de calibración de cámara muy fácil.
- Es multiplataforma, soportada en distribuciones SGI IRIX, Linux, MacOS y Windows OS.
- Soporta bibliotecas de video multiplataforma.
- Soporta múltiples fuentes de entrada (USB, FireWire, Tarjeta de captura).
- Soporta múltiples formatos (RGB/YUV420P, YUV).

- Soporta *tracking* para múltiples cámaras.
- *Tracking* de marcadores en 6 grados de libertad, rápido y de bajo costo computacional.
- Estrategia de patrones de marcadores extensible. El número de marcadores es directamente proporcional a la eficiencia.
- Ofrece soporte 3D mediante VRML.
- Interfaz de programación de aplicaciones (API) simple y modular, escrita en lenguaje C.
- Soporta otros lenguajes (Java, Matlab).
- Ofrece un conjunto completo de utilidades y ejemplos.
- Tiene una comunidad de desarrollo muy activa.

Lenguaje de Programación: para el desarrollo de la solución propuesta se utilizó el lenguaje C++. C++ es un lenguaje de programación de propósito general, especialmente indicado para la programación de sistemas por su flexibilidad y potencia. Por sus características es uno de los lenguajes más utilizados por la comunidad de desarrollo de software, incluyendo la programación gráfica, para lo que es ideal por el alto grado de rapidez y optimización que provee. Además de los beneficios que proporciona la utilización de este lenguaje, el principal motivo por el cual fue seleccionado es porque la biblioteca IGSTK, que es la base de la solución propuesta, está desarrollada con este lenguaje.

Entorno de desarrollo: como entorno integrado de desarrollo (IDE) se utilizó Microsoft Visual Studio 2008. Microsoft Visual Studio es un IDE de probada eficacia para la construcción de aplicaciones de alto rendimiento. Proporciona plantillas avanzadas, acceso a plataformas de bajo nivel y un compilador compatible con los estándares ANSI C y ANSI C++, que optimiza las compilaciones. Ofrece además funcionalidades especiales que facilitan el desarrollo de sólidos componentes de software y aplicaciones finales. Soporta las bibliotecas gráficas OpenGL y DirectX que son las utilizadas por excelencia en la industria de los gráficos por computadoras y video-juegos. OpenGL es la biblioteca gráfica utilizada por IGSTK para la visualización. No obstante, este IDE se utilizó fundamentalmente por tener un editor de código fuente muy avanzado que facilita la rapidez de la construcción de la solución. También es válido aclarar que no se utilizó el *framework* de .NET para elaborar la solución, lo cual garantiza su portabilidad entre sistemas operativos.

Metodología de software: Una metodología de software es un conjunto de procedimientos, técnicas, herramientas y un soporte documental que ayuda a los desarrolladores a realizar un software. Como metodología de software se utilizó el proceso unificado de software (RUP). RUP constituye la metodología estándar más utilizada para el análisis, implementación y documentación de sistemas. El principal motivo de selección de RUP es que este constituye el principal proceso de desarrollo utilizado en el centro para la construcción de software. (34)

Lenguaje de Modelado: como lenguaje de modelado se optó por el lenguaje unificado de modelado (UML). Este lenguaje representa de forma gráfica un sistema y define las características de este antes de su construcción. UML es uno de los lenguajes de modelado más conocido y utilizado, se utiliza fundamentalmente para la construcción y documentación de un software durante el proceso de desarrollo. Este lenguaje de modelado es el utilizado por la metodología de software seleccionada. (35)

Herramienta CASE: como herramienta CASE se seleccionó Visual Paradigm. Visual Paradigm proporciona herramientas avanzadas que facilitan la modelación de los artefactos durante el análisis, diseño e implementación de un proceso de desarrollo de software. Esta herramienta CASE soporta modelado UML, posee licencia gratuita y comercial, es multiplataforma, multilenguaje, y brinda compatibilidad entre versiones. (36)

2.2. Descripción de la solución

El problema del registro se puede dividir en tres etapas: la selección de los marcadores en la imagen, la selección de los marcadores correspondientes en el espacio físico, y la transformación (T) del sistema de coordenadas de la imagen al sistema de coordenadas del paciente o viceversa. La Figura 7 muestra el proceso de llegar a la transformación compuesta final T. Este proceso implica una concatenación de transformaciones individuales expresada en la ecuación 1:

$$T = M_r * M_m * M_h * M_c \quad (1)$$

Dónde:

M_r : es la transformación que mapea el sistema de coordenadas del paciente a la imagen. La transformación del registro.

M_m : es la transformación entre el dispositivo de localización y las coordenadas del mundo (el espacio físico del paciente). Por lo general, se utiliza una herramienta fija que representa el marco de referencia del mundo, y proporciona un marco de referencia para las otras herramientas de seguimiento.

M_h : representa la transformación entre el sistema de coordenadas del dispositivo de seguimiento, y el marcador de la herramienta que está siendo seguida.

M_c : relaciona el marcador y la punta de la herramienta. Esta es una transformación que se determina antes de la intervención quirúrgica en el proceso de calibración.

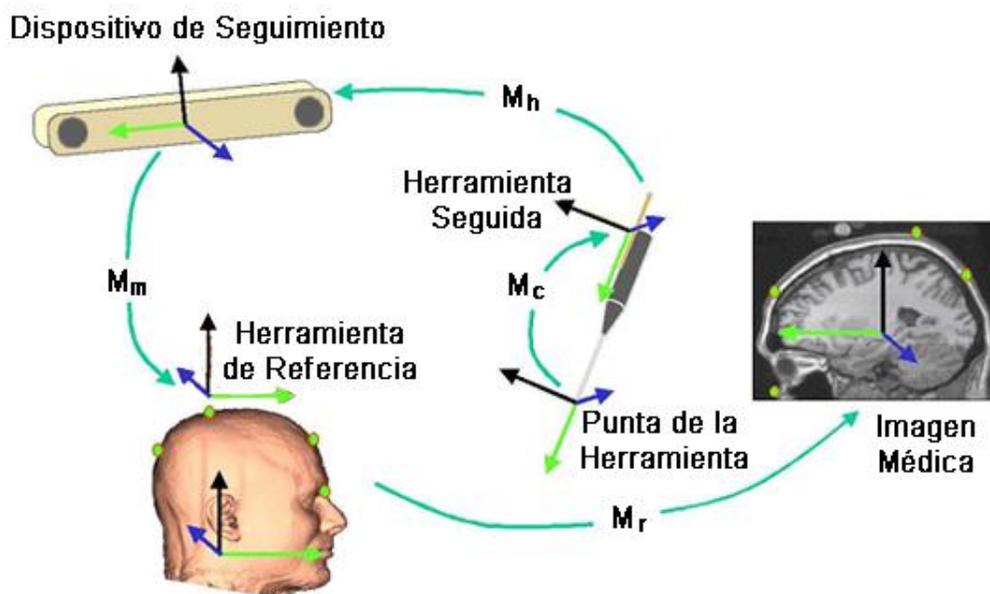


Figura 7 Transformaciones involucradas en el proceso de registro.

La selección de los puntos en la imagen dentro de la solución propuesta se hace a través de las funcionalidades que brinda IGSTK, para la carga y visualización de las imágenes médicas, y la selección de los puntos correspondientes en las imágenes. Para determinar la transformación M_r que alinea los sistemas de coordenadas de la imagen y el paciente, se utiliza un algoritmo de registro 3D basado en

puntos proporcionado por IGSTK. Teniendo los puntos en la imagen, y el algoritmo que calcula la transformación de registro, queda por resolver el problema de localizar espacialmente los puntos en el paciente para realizar el registro.

La selección de los puntos en el paciente se realiza mediante contacto físico con la herramienta que es rastreada por un dispositivo de seguimiento. IGSTK soporta la comunicación con varios dispositivos de seguimiento que se comercializan en el mundo. Estos equipos tienen un alto costo en el mercado, lo que impide el acceso a ellos por parte de la red cubana de salud pública. Esto constituyó una problemática adicional a la solución que se desea proponer. Por tal motivo se decidió desarrollar un componente de seguimiento compatible con IGSTK, que proporcionara los datos de posición y orientación de las herramientas en el espacio físico para la selección de los puntos en el paciente. En el siguiente epígrafe se describe el componente de seguimiento desarrollado.

2.2.1. Descripción del componente de seguimiento

El componente de seguimiento consta de una cámara con capacidad de captura de video en tiempo real, y una serie de marcadores con un formato definido. Los marcadores presentes en cada imagen del flujo de video proveniente de la cámara se detectan en tiempo real. La posición y orientación del marcador con respecto a la cámara se determina mediante técnicas de procesamiento y análisis de imágenes proporcionadas por la biblioteca ARTToolKit. La posición y orientación de los marcadores con respecto al mundo (espacio donde se encuentra el paciente), se obtiene utilizando un marcador como sistema de referencia global. El marcador de referencia se fija al paciente o en la mesa de operaciones, luego, la posición y orientación de las herramientas restantes se determina a partir de este marcador de referencia. De esta forma, si se le fija un marcador a una herramienta quirúrgica, es posible obtener la posición y orientación de dicha herramienta en el espacio de coordenadas del paciente.

El formato de los marcadores es el propuesto por ARTToolKit; consiste en un cuadrado externo negro con un cuadrado interno blanco, que a su vez contiene una figura que debe ser lo más asimétrica posible como se muestra en la Figura 8. La elección de este tipo de marcador evitó resultados indeseados, los cuales se producen por ambigüedades introducidas a la hora del reconocimiento del marcador por parte del algoritmo de reconocimiento. Además facilitó la utilización de una sola cámara para realizar el

seguimiento, en lugar de dos o más de haber utilizado una variante de seguimiento estéreo o por triangulación, como proponen muchas de las variantes explicadas en el capítulo 1.



Figura 8 Formato de los marcadores.

2.2.2. Integración del componente de seguimiento con IGSTK

Para la comunicación con los dispositivos de seguimiento, IGSTK provee dos componentes: Tracker y TrackerTool, que son los encargados de establecer, mantener y cerrar la comunicación con el dispositivo de seguimiento; iniciar y detener el seguimiento; recopilar la información del seguimiento; y verificar la validez del dispositivo de seguimiento en todo momento.

Los componentes de IGSTK funcionan como un sistema síncrono. Debido a que cada componente se ejecuta según su turno, no existe garantía de que el procesamiento y la representación que corresponde a una medición de posición, sean completados antes de que se haga la siguiente medición de posición. Por otra parte, cuando un componente envía un evento a otro componente, el segundo componente controla la ejecución del programa hasta que se pasa el control de nuevo al primero.

Para solucionar esta situación el componente Tracker utiliza un hilo independiente para la comunicación con el dispositivo de seguimiento, esto evita que el componente tenga que esperar a que se le pase el control de la aplicación para obtener los datos de posición y orientación de las herramientas. Este hilo independiente se utiliza para mantener la comunicación con el dispositivo de seguimiento y almacenar en una memoria intermedia (*Buffer*) los datos de medición de las herramientas. Cuando el hilo principal de la aplicación le solicita los datos de medición de las herramientas al componente Tracker, este le devuelve

las mediciones más recientes del *Buffer*. De esta manera se garantiza que no haya retardos en el proceso de obtención de los datos de medición, y que se mantenga una comunicación continua con el dispositivo de seguimiento. La Figura 9 ilustra el funcionamiento del componente Tracker de IGSTK.

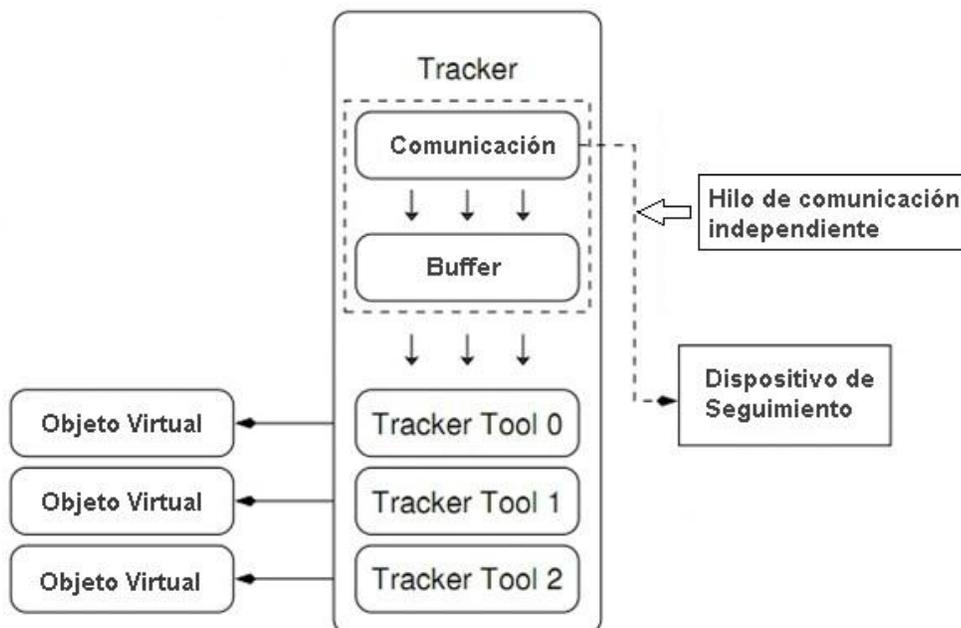


Figura 9 Funcionamiento del Tracker de IGSTK.

El componente TrackerTool representa cada una de las herramientas que van a ser rastreadas por el sistema de seguimiento, y almacena los datos de posición y orientación para cada una de ellas. El componente Tracker es el encargado de establecer la comunicación con el dispositivo de seguimiento, obtener las medidas de posición para cada herramienta y almacenarlas en el *buffer* interno.

El componente de seguimiento fue desarrollado utilizando las funcionalidades que brinda ARTToolkit y se integró con IGSTK, mediante la implementación de las clases ARTKTracker y ARTKTrackerTool, que heredan las funcionalidades básicas de las interfaces Tracker y TrackerTool proporcionadas por IGSTK. La Tabla 1 muestra las principales funcionalidades implementadas en las clases ARTKTracker y ARTKTrackerTool y una breve descripción de estas.

Función	Descripción
---------	-------------

Clase ARTKTracker	
Abrir comunicación	Inicializa las variables principales y prepara todas las condiciones para que se pueda iniciar el seguimiento.
Iniciar seguimiento	Inicializa la captura de video y comienza la detección de los marcadores
Resetear componente de seguimiento	Devuelve el componente de seguimiento al estado inicial.
Actualizar estado	Toma las mediciones del <i>buffer</i> y actualiza la posición y orientación de los TrackerTool correspondientes.
Actualizar estado H	Obtiene la posición y orientación de cada marcador detectado en la imagen y almacena esta información en el <i>buffer</i> para el TrackerTool correspondiente a dicho marcador.
Adicionar TrackerTool	Adiciona el TrackerTool dado en el contenedor de TrackerTools interno del componente.
Verificar TrackerTool	Comprueba que la información del TrackerTool dado sea correcta. Esta función debe ejecutarse antes de la función Adicionar TrackerTool.
Eliminar TrackerTool	Elimina el TrackerTool dado del contenedor de TrackerTools interno del componente.
Detener seguimiento	Detiene la detección de los marcadores y la captura de video.
Cerrar comunicación	Libera la memoria y los recursos utilizados por el componente.
Clase ARTKTrackerTool	
Verificar configuración	Verifica si el TrackerTool está configurado o no.

Tabla 1 Funciones implementadas en las clases ARTKTracker y ARTKTrackerTool.

Dándole solución al problema del dispositivo de seguimiento se resolvió la problemática de la selección de los puntos fiduciales en el paciente. De esta forma, se satisfacen los tres requerimientos para llevar a cabo el registro. El flujo de la solución desarrollada consta de cinco pasos: cargar imagen, modificar fiduciales en la imagen, inicializar el dispositivo de seguimiento, seleccionar fiduciales en el paciente y realizar el registro. El objetivo de este trabajo es demostrar el seguimiento de un instrumento quirúrgico dentro de un espacio físico y relacionarlo con el estudio médico del paciente. La selección de los puntos en el paciente

se obtiene de la integración del componente de seguimiento desarrollado con las funcionalidades de ARToolKit a IGSTK. Las funcionalidades de cargar imagen y modificar los fiduciales en la imagen, se consideran precondiciones que deben ser cumplidas antes de inicializar el dispositivo de seguimiento. Este es el motivo por lo que se tomó el ejemplo NeedleBiopsy de IGSTK como un punto de partida para el desarrollo de la solución. Por tanto, no se consideró necesario hacer el análisis completo de la aplicación, solo se hizo el análisis de la integración del componente de seguimiento desarrollado con ARToolKit en el ejemplo que brinda IGSTK mencionado anteriormente, el cual es un punto de partida para el desarrollo de una aplicación de navegación guiada por imágenes.

2.3. Modelo de dominio

A partir del entendimiento del problema, se obtuvo el siguiente modelo de dominio representado en la Figura 10, el cual permitió mostrar de manera visual los principales conceptos que se manejan en el dominio de la solución a desarrollar y sus relaciones.

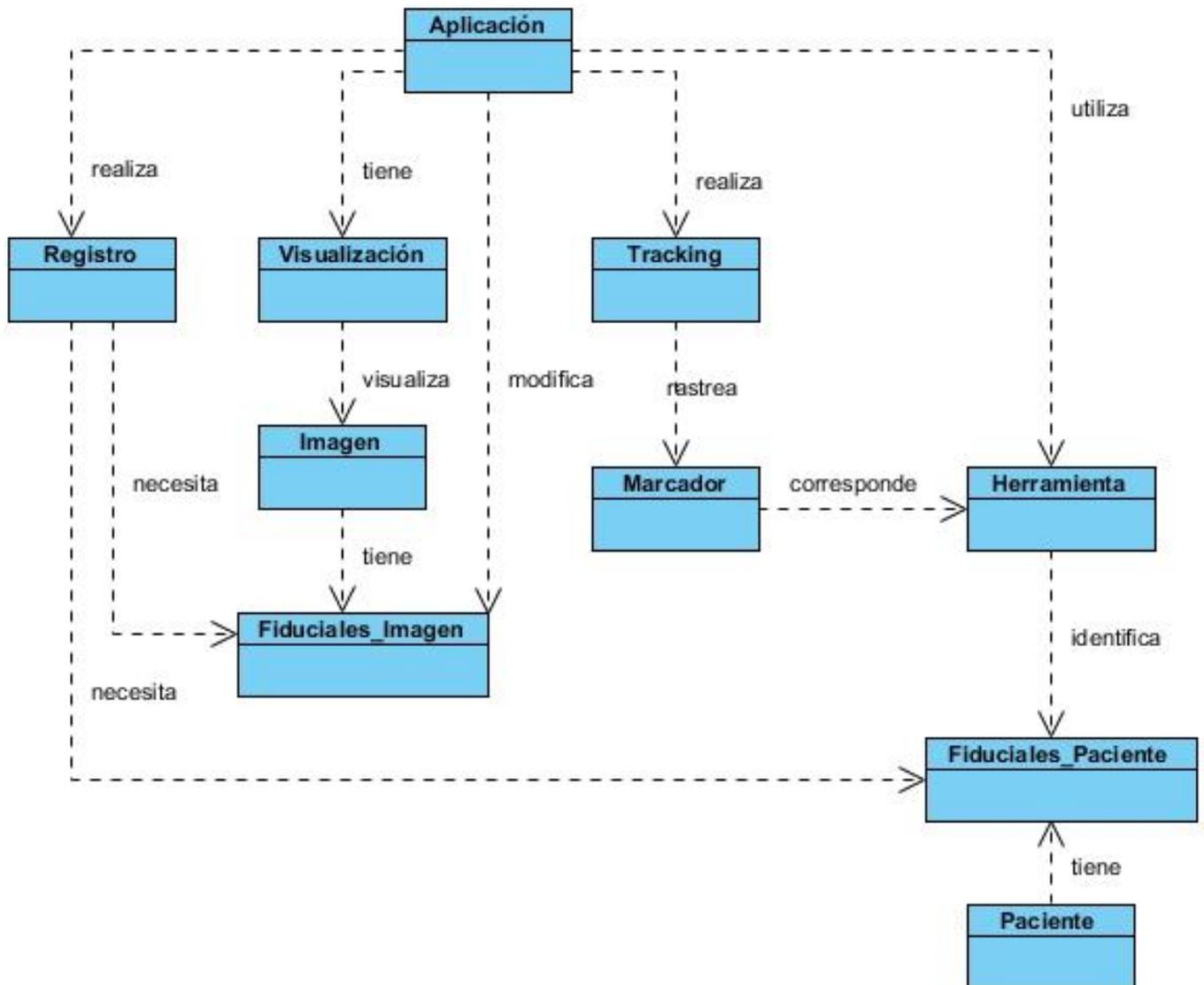


Figura 10 Modelo de dominio.

2.3.1. Descripción de las clases conceptuales

En aras de lograr un mayor entendimiento del modelo de dominio, a continuación se enuncia el significado de los conceptos identificados en este:

Registro: componente de registro.

Visualización: componente de carga y visualización de imágenes.

Tracking: componente de seguimiento. Realiza el seguimiento de las herramientas quirúrgicas.

Imagen: imagen médica de estudios previos realizados al paciente.

Fiduciales_Imagen: representa los puntos fiduciales en la imagen.

Marcador: marcador impreso en papel incrustado a una herramienta quirúrgica.

Herramienta: esta es la herramienta quirúrgica con un marcador incrustado.

Fiduciales_Paciente: representa los puntos fiduciales en el paciente.

Paciente: representa al paciente que será operado.

2.4. Requisitos funcionales

A continuación se identifican los requisitos funcionales de la solución donde interviene el componente de seguimiento:

RF1. Conectar dispositivo de seguimiento

RF1.1. Configurar dispositivo de seguimiento.

RF1.2. Inicializar dispositivo de seguimiento.

RF2. Realizar registro

RF2.1. Introducir fiduciales del paciente.

RF2.2. Calcular transformación de registro.

2.5. Diagrama de casos de usos del sistema

La Figura 11 muestra el diagrama de casos de usos, elaborado a partir de las funcionalidades que debe tener el prototipo funcional desarrollado. En este diagrama se puede apreciar el actor que interactúa con la aplicación, el cual se detalla en el próximo epígrafe.

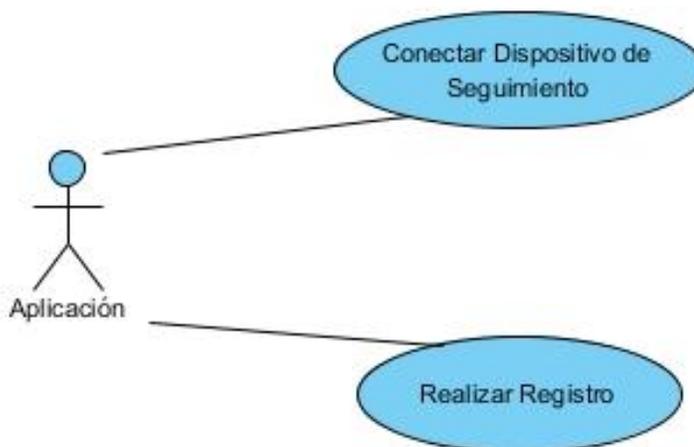


Figura 11 Diagrama de casos de usos.

2.5.1. Definición del actor del sistema

Para obtener los datos de posición y orientación de la herramienta quirúrgica en el espacio físico real la aplicación se comunica con el componente de seguimiento. Como lo que se quiere demostrar es la interacción de la aplicación con el componente de seguimiento para poder realizar el registro, como se puede ver en la Tabla 2 se definió la aplicación como actor del sistema.

Actor	Justificación
Aplicación	Es quien interactúa con el componente de seguimiento. Requiere las funcionalidades del componente para realizar el registro.

Tabla 2 Descripción del actor del sistema

2.5.2. Expansión de los casos de uso del sistema

Caso de Uso	Conectar dispositivo de seguimiento
Actores	Aplicación
Propósito	Establecer la comunicación con el dispositivo de seguimiento, inicializarlo y comenzar la obtención de datos de posición y orientación de las herramientas.

Resumen	El caso de uso comienza cuando el actor solicita conectar el dispositivo de seguimiento. Luego el componente de seguimiento inicializa la captura de video, comienza a detectar los marcadores y proporciona la información de posición y orientación de las herramientas cada vez que el actor lo solicite.
Referencia	RF1, RF1.1, RF1.2
Pre-condiciones	<p>El componente está correctamente integrado a la aplicación.</p> <p>La cámara está conectada a la PC.</p> <p>La aplicación conoce la dirección del archivo que contiene los datos de los marcadores.</p> <p>La aplicación conoce la dirección del archivo de calibración de las herramientas.</p>
Flujo Normal de Eventos	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. Solicita conectar el dispositivo de seguimiento.	<p>1.1- Lee archivo de datos de marcadores.</p> <p>1.2- Lee archivo de datos de calibración de las herramientas.</p> <p>1.3- Crea un objeto Tracker.</p> <p>1.4- Crea un TrackerTool para cada marcador.</p> <p>1.5- Asigna los TrackerTool creados al objeto Tracker.</p> <p>1.6- Establece el primer TrackerTool como herramienta de referencia.</p> <p>1.7- Establece la calibración a los TrackerTool restantes.</p> <p>1.8- Inicializa captura de video de la cámara.</p> <p>1.9- Inicializa detección de marcadores y envío de</p>

	los datos de posición y orientación de los TrackerTool.
Flujo Alternativo de los Eventos	
	<p>1.8- Si la cámara no está conectada, se lanza un mensaje comunicando que falta el dispositivo de captura y se devuelve el control a la aplicación.</p> <p>1.9- Si un marcador sale del campo de visión de la cámara, no se envía información de posición y orientación de este.</p>
Post-condiciones	Se conectó el dispositivo de seguimiento y se inició el seguimiento de los marcadores.
Prioridad	Crítico

Tabla 3 Expansión del caso de uso: conectar dispositivo de seguimiento

Caso de Uso	Realizar registro
Actores	Aplicación
Propósito	Realizar el registro
Resumen	La aplicación solicita las coordenadas de los puntos en el paciente y realiza el registro.
Referencia	RF2, RF2.1, RF2.2
Pre-condiciones	<p>Son conocidos los puntos en la imagen.</p> <p>Está conectado el dispositivo de seguimiento.</p>
Flujo Normal de Eventos	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1. Solicita coordenadas del punto n en el paciente, correspondiente al punto n en	1.1- Obtiene datos de posición y orientación de la herramienta que es seguida y está haciendo

la imagen. 2. Realiza el registro.	contacto con el punto n en el paciente. 1.2- Envía los datos de posición y orientación.
Flujo Alternativo de los Eventos	
	1.1- Si la herramienta no está en el campo de visión de la cámara se obtendrán datos incorrectos, se permitirá volver a seleccionar el punto.
Post-condiciones	Se realizó el registro.
Prioridad	Crítico.

Tabla 4 Expansión del caso de uso: realizar registro.

2.6. Diagrama de clases

Los diagramas de clases del diseño muestran las diferentes clases que componen un sistema y como se relacionan unas con otras. Además, muestra cómo queda compuesta la estructura de clases que se emplea en la implementación del sistema. La Figura 12 muestra como quedó el diagrama de clases del diseño el cual resultó ser el punto de partida para comenzar a elaborar la solución.

organizados en forma de una secuencia temporal. Los diagramas de secuencias correspondientes del prototipo navegación quirúrgica guiada por imágenes se pueden ver en Figura 13 y Figura 14.

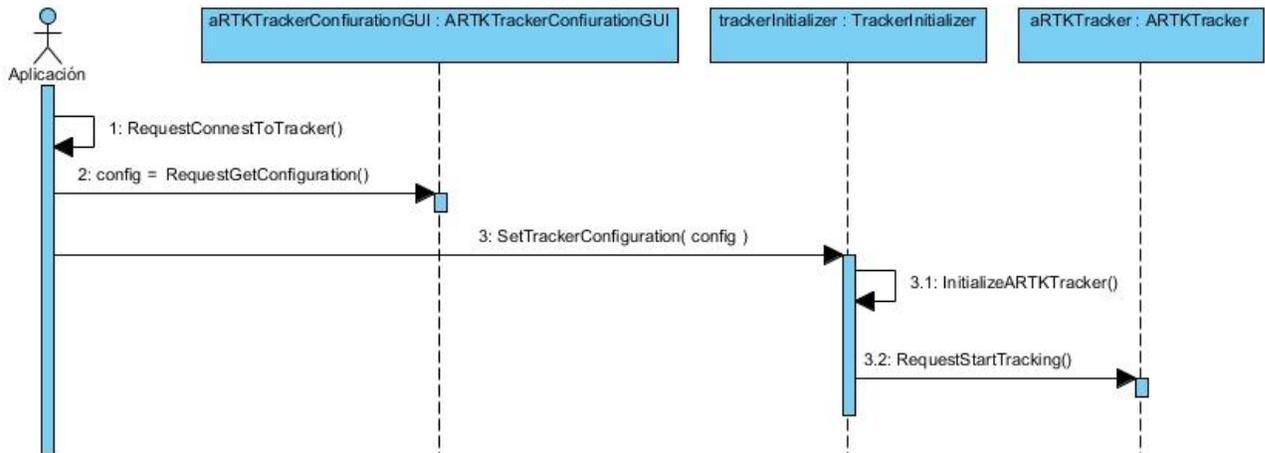


Figura 13 Diagrama de secuencia del caso de uso: conectar dispositivo de seguimiento.

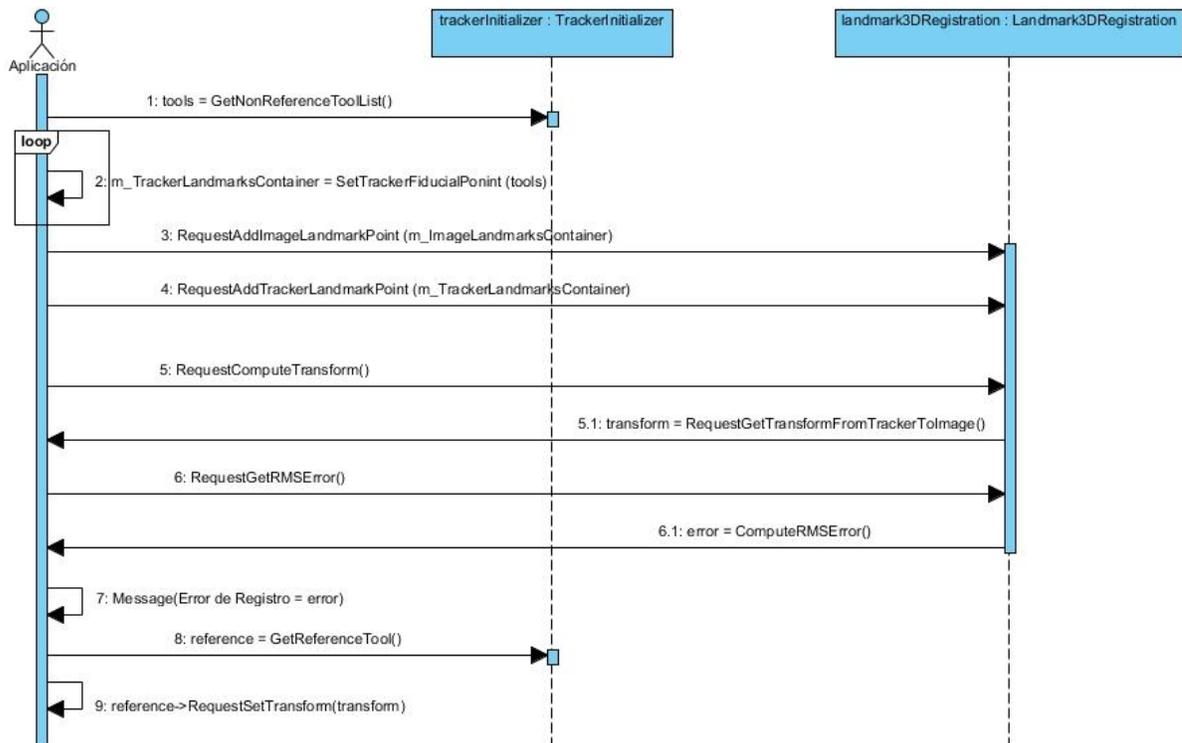


Figura 14 Diagrama de secuencia del caso de uso: realizar registro.

Conclusiones parciales

En este capítulo se definieron las herramientas, lenguajes y la metodología utilizada para el desarrollo de la solución. Se detalló la solución propuesta a través de la metodología de desarrollo de software utilizada y los diagramas que propone UML. Se describió lo que el sistema debe ser capaz de hacer, para ello se modelaron los principales conceptos y se establecieron las capacidades o funcionalidades que el sistema debe cumplir, es decir, los requisitos funcionales. Se agruparon los requisitos funcionales en casos de uso y estos últimos se describieron para un mejor entendimiento de los procesos que tienen lugar en la herramienta desarrollada. Se modeló el diagrama de clases del diseño y los diagramas de interacción, específicamente los diagramas de secuencia. Con la realización de este capítulo se obtuvieron las entradas para comenzar la implementación de la solución propuesta.

CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

Introducción

En el presente capítulo se abordan los temas de la implementación de la solución, se muestran los diagramas de despliegue y de componentes. Se especifica el estándar de codificación utilizado. Finalmente, se realizan las pruebas correspondientes y se hace un análisis de los resultados obtenidos.

3.1. Diagrama de despliegue

La Figura 15 muestra el diagrama de despliegue. Aunque este es un diagrama sencillo se decidió incluirlo para enfatizar en la necesidad del uso de una cámara conectada a la computadora para el funcionamiento de la solución desarrollada.

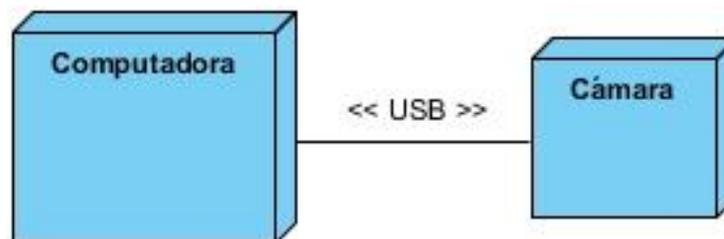


Figura 15 Diagrama de despliegue.

3.2. Diagrama de componentes

La Figura 16 muestra los componentes utilizados para la elaboración de la solución. Los componentes se agruparon en paquetes. Los paquetes IGSTK y ARToolKit engloban los componentes utilizados de dichas librerías. El paquete Componente de Seguimiento agrupa los elementos definidos para la construcción de dicho componente.

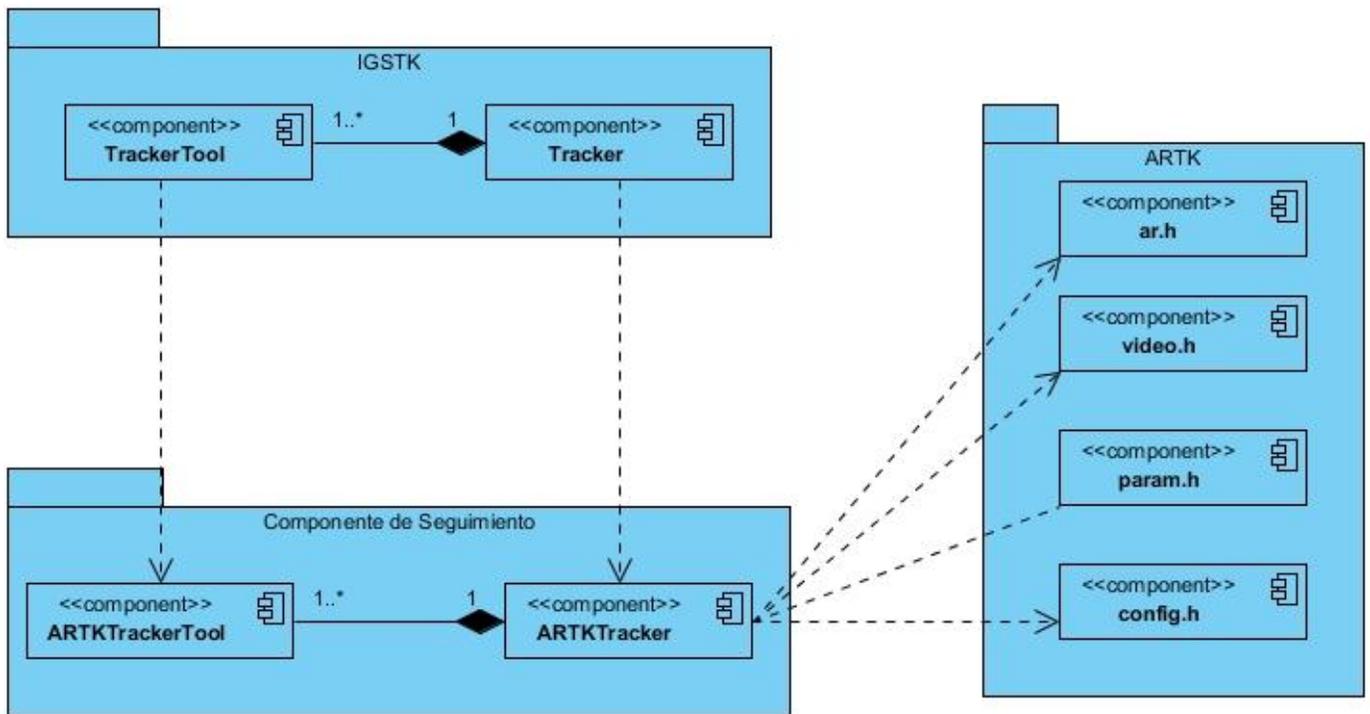


Figura 16 Diagrama de componentes.

3.3. Estándar de codificación

Los estándares de codificación son pautas de programación que no están enfocadas a la lógica del programa, sino a su estructura y apariencia física. Estos estándares crean un buen hábito en un equipo de desarrollo, permiten que todos los involucrados en un proyecto entiendan el código fácilmente y en menor tiempo. Para el desarrollo de la solución se utilizó el estándar de codificación de IGSTK, el cual se presenta a continuación:

Convención General

- No se deben utilizar guiones bajos. Se permiten para separar palabras en el nombre de las variables miembros de una clase.
- Cuando el nombre de una variable o función es una palabra compuesta, cada palabra debe comenzar con inicial mayúscula.

- No se permiten abreviaturas (solo se utilizan abreviaturas en el caso de variables comunes conocidas, por ejemplo RGB, y se escriben con mayúsculas).

Sangría

- No se deben utilizar tabulaciones.
- El nivel de sangría adecuado es de dos espacios.

Líneas y espacios

- Cada línea de código no debe tener más de 79 caracteres. Se debe romper el código en varias líneas como sea necesario.
- Utilizar espacios en blanco para separar bloques lógicos de código, que se entremezclan con comentarios.
- Usar espacios alrededor de los argumentos de las funciones y alrededor de los operadores.

Declaración de variables

- Las variables dentro de las clases, métodos y funciones deben declararse una por cada línea.
- Las variables locales comienzan en minúsculas.

```
int i;  
int j;  
std::string m_DirDatosMarcadores;
```

Declaración de funciones

- Las llaves se colocan en una línea independiente y deben estar en la misma columna.
- Las funciones globales y miembros de clases se nombran comenzando con mayúscula.

```
Bucle()  
{
```

```
(...)  
ARUint8 * image;  
ARMarkerInfo * marker_info;  
int marker_num;  
(...)  
}
```

Declaración de clases

- Las clases se definen según los siguientes lineamientos: métodos públicos primero, métodos protegidos después, y por último los miembros privados.
- Los miembros públicos están prohibidos.
- Todas las variables miembro se declaran como privadas.

```
class ARTKTracker : public Tracker  
{  
public:  
    (...)  
protected:  
    (...)  
private:  
    (...)  
}
```

- Los métodos se definen a través de varias líneas: la primera línea es para la declaración de plantilla (en caso de existir), la segunda línea es para el tipo de datos de retorno del método, la tercera línea para es el calificativo de la clase, y la última línea es para el nombre y los parámetros del método.

```
int  
ARTKTracker::  
InicializarVideo(const char *cparam_name, char *vconf, ARParam *newParam)
```

```
{  
  (...)  
}
```

3.4. Pruebas

La fase de pruebas en el desarrollo de software consiste en probar las aplicaciones construidas. Las pruebas permiten verificar, validar y revelar la calidad de un producto software. Todos los programas que se desarrollan tienen errores, en esta fase de pruebas es donde se encuentran y corrigen generalmente los errores de las fases anteriores.

Un sistema de navegación guiada por imágenes es un sistema de misión crítica, donde la vida del paciente corre peligro en caso de funcionamiento incorrecto del software. Un aspecto importante a tener en cuenta es la precisión del sistema, debido a que durante una intervención para llegar a una lesión se debe atravesar o rechazar estructuras con diferente valor funcional. En este trabajo, las pruebas se concentran en evaluar la precisión que alcanza el componente de registro desarrollado. En el siguiente epígrafe se describen las pruebas realizadas.

3.4.1. Pruebas desarrolladas

Para realizar las pruebas se utilizó un cráneo de estudio y el conjunto de imágenes de tomografía axial computarizada en formato DICOM correspondiente a dicho cráneo, ambos facilitados por la Clínica Central Cira García. Se utilizó un bolígrafo para simular una herramienta quirúrgica al cual se le fijo un marcador. En el cráneo se establecieron los puntos fiduciales basándose en las características anatómicas distintivas de este. Seguidamente se seleccionaron los fiduciales en la imagen en correspondencia con los establecidos en el cráneo. El escenario de prueba se puede ver en la Figura 17. Luego se procedió a realizar el registro. Para estimar el error del registro, se colocó la herramienta sobre cada punto en el espacio físico, y se determinó la variación media de la posición de la herramienta en la imagen con respecto al punto correspondiente.



Figura 17 Escenario de prueba.

La Figura 18 muestra la interfaz de la aplicación durante la ejecución de las pruebas realizadas al prototipo desarrollado.

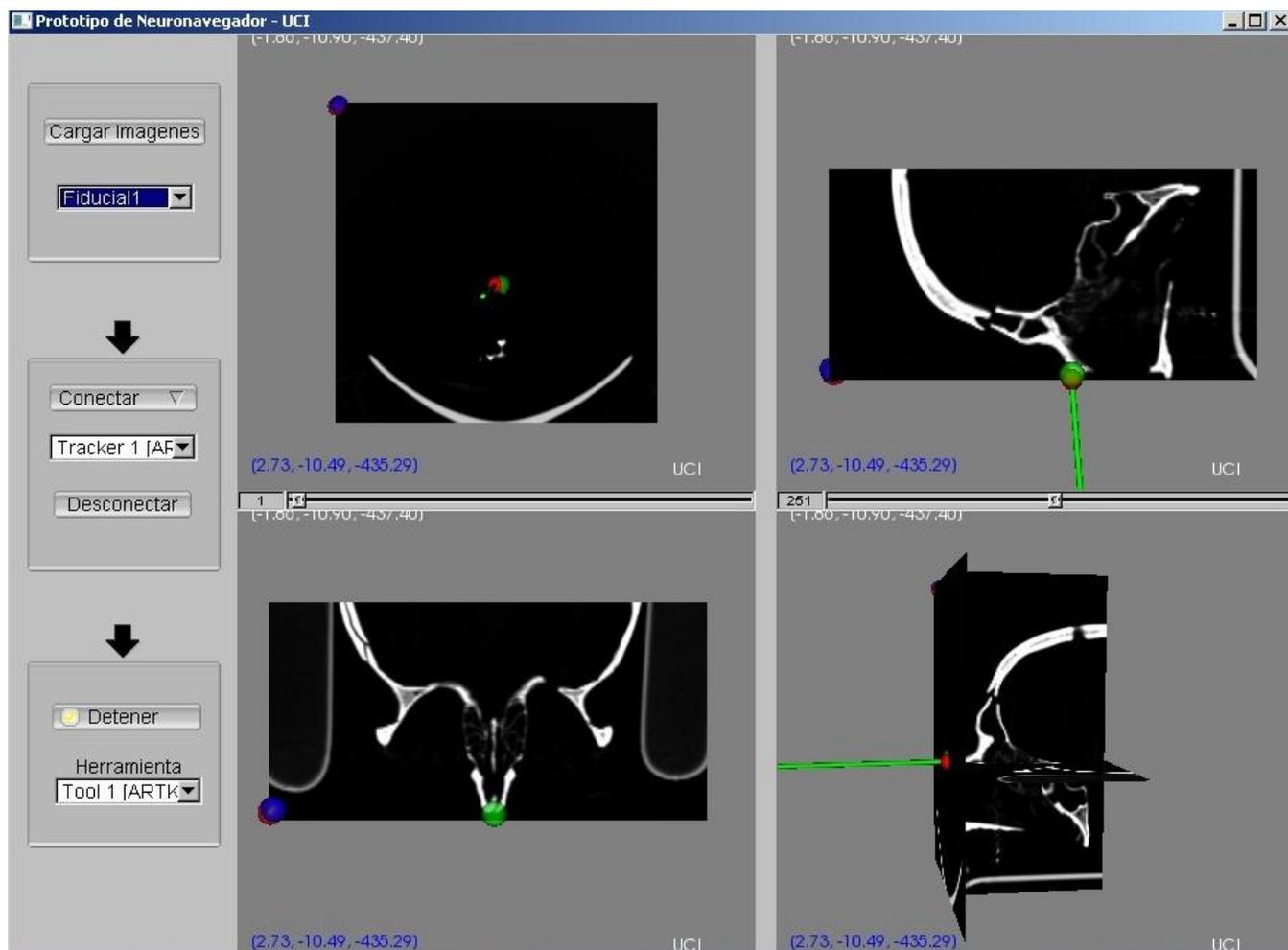


Figura 18 Interfaz de la aplicación.

Para estimar la variación media de la punta de la herramienta con respecto a cada punto, se calculó el error cuadrático medio según la expresión (2) entre las coordenadas conocidas del punto seleccionado y las coordenadas en la imagen correspondientes al punto tomado como muestra,. En la Tabla 5 se presenta una muestra de 20 puntos, y la distancia de cada punto de la muestra al punto conocido. Luego de analizar la muestra se presenta el resultado del error cuadrático medio que representa el error medio que se comete en el sistema al calcular la posición de la punta del instrumento de prueba.

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d(p_i p_m)^2}{n-1}} \quad (2)$$

Dónde:

p_i : representa el punto conocido de la imagen.

p_m : representa cada punto de la muestra.

n : es la cantidad de puntos tomados como muestra.

$d(p_i, p_m)$: es la distancia entre el punto tomado como muestra y las coordenadas del punto en la imagen.

La distancia se calcula mediante la fórmula de la distancia euclidiana expresada en la ecuación (3).

$$d(p_i, p_m) = \sqrt{(x_{pi} - x_{pm})^2 + (y_{pi} - y_{pm})^2 + (z_{pi} - z_{pm})^2} \quad (3)$$

Punto			Distancia
x	y	z	
-58.09	-201.44	-4.59	1.88841203
-60.15	-201.47	-3.47	3.6018051
-60.25	-198.59	-4.5	4.7289428
-60.1	-199.52	-3.87	4.0155946
-61.26	-200.78	-3.77	4.75325152
-60.71	-201.08	-2.33	4.33046187
-59.97	-198.87	-5.18	4.55180184
-61.04	-201.4	-2.05	4.71849552
-60.66	-200.87	-3.22	4.14856602
-60.84	-200.16	-4.09	4.49357319
-61.03	-199.16	-3.26	4.99679898
-60.67	-199.4	-4.33	4.6373376
-60.68	-202.29	-2.64	4.31988426
-61.3	-200	-4.11	4.97837323
-60.81	-199.7	-3.95	4.59409403
-59.67	-200.93	-3.12	3.17233353
-60.79	-201.67	-4.01	4.28179869

-58.99	-199.4	-5.24	3.58089374
-58.92	-200.25	-4.05	2.67422886
-59.45	-199.6	-3.94	3.42070168
Error RMS			4.17047

Tabla 5 Resultados de la Prueba.

Luego del análisis de los resultados de las pruebas realizadas, se demuestra que se pudo alcanzar una precisión con un error de ± 4.17 milímetros. Los sistemas de navegación guiada por imágenes profesionales alcanzan precisiones con errores de ± 1 mm, incluso algunos llegan a estar en el orden de las micras. Teniendo en cuenta que se trata de un prototipo, con el que se quiere demostrar que la fabricación de equipos de este tipo es posible, se considera una precisión aceptable. Según los resultados obtenidos del análisis de la muestra, se pone de manifiesto que el componente de registro se puede utilizar para comenzar el desarrollo de un software de navegación guiada por imágenes. No obstante, hay que tener en cuenta que aunque se puede avanzar en las funcionalidades de visualización y trabajo con imágenes del estudio médico, la precisión del registro va a estar afectada por lo que no es recomendable para ser utilizado en un ambiente real de una intervención quirúrgica. Aunque el prototipo desarrollado si se pudiera utilizar en este momento para adquirir habilidades en los procedimientos de un sistema de navegación guiada por imágenes.

Conclusiones parciales

En este capítulo se realizó la descripción de la implementación y el análisis del resultado de las pruebas realizadas al prototipo. Se obtuvieron los diagramas de componentes y de despliegue correspondientes al flujo de trabajo de implementación, lo cual facilitó la codificación de la solución. Se describió el estándar de codificación utilizado en la implementación de la solución propuesta. Del análisis del resultado obtenido de las pruebas se llegó a la conclusión de que se cumplió el objetivo de la investigación, aunque la precisión alcanzada con el prototipo no es suficiente para utilizarlo en un ambiente quirúrgico real.

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo:

- Se logró desarrollar un componente de seguimiento 3D que es capaz de seguir en tiempo real el movimiento de una herramienta en un espacio físico.
- Se integró el componente de seguimiento a una aplicación prototipo de navegación guiada por imágenes desarrollada utilizando la biblioteca IGSTK. La aplicación prototipo desarrollada permitió relacionar la posición y orientación de la herramienta a seguir con el estudio de imágenes de un cráneo de prueba, en un ambiente similar al que se establece en un procedimiento real de navegación guiada por imágenes.
- EL rango de error obtenido del análisis de los resultados de las pruebas se considera aceptable para comenzar el desarrollo de las funcionalidades de un neuronavegador quirúrgico utilizando la biblioteca IGSTK.

RECOMENDACIONES

Aunque se alcanzaron resultados aceptables para el desarrollo de las funcionalidades principales de un sistema de navegación guiada por imágenes con el desarrollo del componente de registro, este no se considera apto para el uso en un ambiente quirúrgico real. Se recomienda:

- Validar la aplicación resultante de esta investigación como un entrenador para los procedimientos regulares de una intervención quirúrgica guiada por imágenes.
- Utilizar un IDE de software libre en el desarrollo de próximas versiones del prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Mallot, Franz.** Robotics and Autonomous Systems. 2000, pp. 133-153.
2. **Alvaro Gómez, Gregory Randall.** *Navegación guiada por imagenes en Neurocirugía.*
3. *Estereotaxia: Historia, generalidades y actualidades.* **Tejera del Valle, José Ramón, Piñeiro Martí, Juan Francisco and Morales Sabina, Osmany** . ISSN:1727-879X, Cienfuegos : s.n., 2005, Revista Electrónica de las Ciencias Médicas en Cienfuegos, Vol. Medisur 2005; 3(1).
4. **Andinet Enquobahrie, Patrick Cheng, Kevin Gary, Luis Ibanez, David Gobbi, Frank Lindseth, Ziv Yaniv, Stephen Aylward, Julien Jomier, Kevin Cleary.** *Toolkit, The Image-Guided Surgery Toolkit IGSTK: An Open Source C++ Software.* 2007.
5. **Maurer CR, Fitzpatrick JM.** *A review of medical image registration.* 1993. pp. 17-44.
6. **Galloway Jr, Robert L.** *The process and development of Image-Guided Procedures.* 2001.
7. **Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagui Y, Takakura K.** *Three-dimesional digitizer (Neuronavigator): new equipment for CT-Guided stereotaxy surgery.* s.l. : Surg Neurol, 1987. pp. 543-547.
8. **Galloway RL, Maciunas RJ.** *Interactive image-guided neurosurgery.* s.l. : IEEE Transac Biomed Engin, 1992.
9. **Lustgarten, Dr Leonardo.** Dr Leonardo Lustgarten - Neurocirugia y Radiocirugia. [Online] Febrero 8, 2010. [Cited: 10 15, 2011.] <http://www.leonardolustgarten.com/2010/02/neuronavegacion-cerebral/>.
10. **PJ, Kelly.** *Tumor Stereotaxis.* Philadelphia : Pa. WB Saunders, 1991.
11. **Haberland N, Ebmeier K, Hlises R, Grunewald JP, Silberman J, Steenbeck J, Nowak H, Kalff R.** *Neuronavigation in surgery of intracranial and spinal tumors.* s.l. : J Cancer Res Clin Oncol, 2000. pp. 529-541.
12. **Kaminsky J, Brinker T, Samii A, Arango G, Vorkapic P, Samii M.** *Technical considerations regarding accuracy of the MKM navigation system - an experimental study of impac factors.* s.l. : Neurol Res, 1999. pp. 420-424.
13. **Kosuji Y, Watanabe E, Goto J, Watanabe T, Yoshimoto S, Takakura K, Ikebe J.** *An articulated neurosurgical navigation system using IRM and CT images.* s.l. : IEEE Trans Biomed Eng, 1988. pp. 147-152.

14. **Dorward NL, Alberti O, Velani B, Gerritsen FA, Harkness WFJ, Kitchen ND, Tomas DGT.** *Postimaging brain distortion: magnitude, correlates, and impact on neuronavigation.* s.l. : J. Neurosurg, 1998. pp. 656-662.
15. **Gumprecht HK, Widenka DC, Lumenta CB.** First experience with the Brain Lab neuronavigation system. [book auth.] Bauer B. L Hellwig D. *Minimally invasive techniques for neurosurgery.* s.l. : Springer, 1998.
16. **Gumprecht, HK, Widenka, DC and Lumenta, CB.** *Brainlab VectorVision neuronavigation system: technologie and clinical experiences in 131 cases.* s.l. : Neurosurgery, 1999. pp. 97-105.
17. **Bucholz RD, Smith KR.** A comparison of sonic digitizers versus light emitting diode-based localization. 1993, pp. 179-200.
18. **J. B. Antoine Maintz, Max A. Viergever.** *An Overview of Medical Image Registration Methods.*
19. **Sipos EP, Tebo SA, Zinreich SJ, Long DM, Brem H.** *In vivo accuracy testing and clinical experience with the ISG viewing wand.* pp. 194-202.
20. **Mactunas RJ, Galloway RL, Fitzpatrick JM, Mandava VR, Edwards CA, Allen GS.** A universal system for interactive image-directed neurosurgery. Pittsburgh : s.n., Junio 16-19, 1991.
21. **Henderson JM, Smith KR, Bucholz RD.** An accurate and ergonomic method of registration for image-guided neurosurgery. s.l. : Comput. Med. Imaging Graph., 1994. pp. 273-277.
22. **Colchester AC, Zhao J, Holton-Tainter KS, Henri CJ, Maitland N, et al.** Development and preliminary evaluation of VISLAN, a surgical planing and guidance system using intra-operative video imaging. s.l. : Med. Image Anal., 1996. pp. 79-90.
23. **Gleason PL, Kikinis R, Altobelli D, Wells W, Alexander E III, et al.** Video registration virtual reality for non-linkage etereotactic surgery. s.l. : Stereotac. Funct. Neurosurg., 1994. pp. 139-143.
24. **Bass WW, Maurer CR, Galloway RL.** *Surface-based registration of physical space with computed tomography images using A-mode ultrasound localization of the skull.* s.l. : Med. Imaging, 1998. pp. 228-238.
25. **Nakajima H, Atsumi R, Kikinis R, Moriarty TM, Metcalf DC, et al.** *Use of cortical surface vessel registration for image-guided neurosurgery.* s.l. : Neurosurgery, 1997. pp. 1201-1210.
26. **Bucholz R, Macneil W, Fewings P, Ravindra A, McDurmont L, Baumann C.** *Automated rejection of contaminated surface measurements for improved surface registration in image guided neurosurgery.* s.l. : Stud. Health Technol. Inf., 2000. pp. 39-45.

27. **West J, Fitzpatrick JM, Wang MY, Dawant BM, Maurer CR Jr, et al.** *Comparison and evaluation of retrospective intermodality image registration techniques.* s.l. : J. Comput. Assist. Tomogr., 1997. pp. 554-566.
28. **Ionescu G, Levalle S, Demongeot J.** *Automated registration of ultrasound with CT images: application to computer-assisted prostate radioteraphy and orthopedics.* s.l. : Lect. Notes Comput. Sci., 1999. pp. 767-777.
29. ITK - Segmentation & Registration Toolkit. [Online] [Cited: 11 15, 2011.] www.itk.org.
30. VTK - The Visualization Toolkit. [Online] 11 15, 2011. www.vtk.org.
31. 3D Slicer. [Online] 11 15, 2011. www.slicer.org.
32. IGSTK - Image-Guided Surgery Toolkit. [Online] 11 15, 2011. www.igstk.org.
33. ARToolKit Augmented Reality ToolKit. [Online] 2006. [Cited: 1 30, 2012.]
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>.
34. **Ivar Jacobson, Grady Boch, James Rumbaugh.** *El proceso unificado de desarrollo de software.* s.l. : Addison-Wesley, 2000.
35. **Craig, Larman.** *UML y Patrones.* La Habana : Feliz Varela, 2004.
36. **Colectivo de autores.** *Visual Paradigm for UML User's Guide.* 2007.
37. **S Lavalle, P Cinquin, J Troccaz.** *Computer Integrated Surgery and Therapy: State of the Art.* Amsterdam : IS Press, 1997.

ANEXOS

Anexo 1. Propuesta de construcción en Cuba de un Neuronavegador.

La Habana, 5 de diciembre, 2011

“Año 53 de la Revolución”

Propuesta de construcción en Cuba de un Neuronavegador para aplicación en cirugía intracraneal y espinal.

La Neuronavegación es un procedimiento que ha sido posible gracias al desarrollo de la computación y la imagenología aplicada a la medicina. Su objetivo es: ubicar o visualizar “en tiempo real”, cualquier instrumento quirúrgico durante una intervención, en imágenes obtenidas por Resonancia Magnética Nuclear (RMN) o Tomografía Axial Computadorizada (TAC) del paciente, donde sería imposible lograrlo con nuestros órganos de los sentidos (visión o tacto).

A modo de comparación: cuando se pilotea un avión a expensas de los órganos de los sentidos puede estimarse la altura a la que se está volando, ver las montañas que tiene delante para esquivarlas, observar la línea del horizonte para ver el ángulo que llevan sus alas, estimar la velocidad con que se mueve. De noche es prácticamente imposible hacerlo. Es necesario navegar con aparatos. Equipos que le dicen la altura, radares que le indican las montañas que tiene delante con la distancia y ángulo a la que se encuentran, otros que le indican la velocidad a la que se mueve, “líneas del horizonte” donde se puede conocer la angulación de las alas del avión con relación al piso. Y todo esto “en tiempo real”.

Un neuronavegador es un similar. Con este podemos “ver” en cortes axiales, coronales, sagitales, 3D o en alguno otro plano previamente definido de la RMN o TAC; la ubicación de los instrumentos neuroquirúrgicos mucho más allá de lo permisible por los órganos de los sentidos del neurocirujano. Por ejemplo: observar (todavía con la cabeza cerrada) el sitio real donde se encuentra una lesión colocando el instrumental con el neuronavegador para poder abordarla directamente desde un inicio sin equivocar la trayectoria. Es decir, el médico se ayuda en este caso de equipos que le permiten hacer lo que es imposible con la visión o tacto.

Los neuronavegadores comenzaron a construirse con equipos mecánicos alámbricos altamente complejos que permitían sentir los ángulos y posiciones de muchas de sus articulaciones y, a distancia, poder ubicar el instrumental con relación a la anatomía quirúrgica. Pero desde hace menos de 20 años se han desarrollado neuronavegadores inalámbricos guiados por rayos infrarrojos. Los sistemas inalámbricos revolucionaron la Neuronavegación por prescindir de los altamente complejos sistemas articulados con múltiples sensores. Los sistemas inalámbricos actuales consisten en:

- 1.-Computadora de gran velocidad y memoria virtual (fácil de obtener en el mercado con costo menor de 2000 USD).
- 2.-Cámaras que emiten y reciben rayos infrarrojos para localizar puntos de referencia fijados en la cabeza del paciente (fáciles de obtener las cámaras en el mercado probablemente con costos menores de 2000 USD).
- 3.-Tarjeta interfaz que convierte la señal infrarroja en digital (fácil de obtener en el mercado probablemente con costo inferior a 1500 USD).
- 4.-Software para hacer interactuar las imágenes obtenidas de los estudios de RMN o TAC previos a la cirugía, con información recibida a través de las cámaras infrarrojas desde los puntos de referencia en la cabeza del paciente (software altamente costoso e imposible de obtener en el mercado sin comprar el equipo).

Por otra parte, los neuronavegadores actuales tienen un costo en el mercado que oscila entre los 400 000 y los 600 000 USD. Son fabricados por firmas como Brain Lab, Medtronic, Bbraun; algunas de origen norteamericano. Es decir, estos desorbitantes precios de los equipos están dados por:

- 1.-El Software.
- 2.-Por la factibilidad de un mercado en el mundo neuroquirúrgico (elitista dentro de las especialidades médicas a nivel internacional) que permite su adquisición aunque tenga estos precios.

Conociendo las posibilidades técnicas y el desarrollo alcanzado en nuestro país en las Ciencias Informáticas la fabricación de equipos como estos pueden llevarse a cabo, expandirse por los hospitales cubanos y de las colaboraciones médicas en el exterior, así como lograr invadir el mercado internacional, especialmente América Latina, África y Asia, con precios que pudieran acercarse mucho más a su costo real de producción. Todo esto con elevada calidad tecnológica.

Esta propuesta la hicimos en el año 1998, fue aceptada y se comenzaron los primeros intentos en EICISOFT. Semanas más tarde fue desechada la idea por falta de prioridad en dicho centro.

En estos momentos volvemos a proponer sea analizada la posibilidad de emprender la fabricación de Neuronavegadores en nuestro país utilizando la posibilidades tecnológicas y organizativas de la Universidad de las Ciencias de la Informática.

Nota: podemos adjuntar video relacionados con la funcionalidad de los neuronavegadores.

Fraternalmente,

Dr. Enrique de Jongh Cobo

Presidente de la Sociedad Cubana de Neurología y Neurocirugía

Clínica Central "Cira García"

GLOSARIO

3D: tres dimensiones.

Fiducial: término que proviene del idioma inglés y no tiene traducción directa al español. Se refiere a un punto u objeto fijo que se utiliza como referencia para comparación o medición. En los sistemas de navegación guiada por imágenes se denomina *fiducial* a los puntos que son utilizados como referencia para realizar el registro.

Tracking: seguimiento o rastreo de un objeto.

Nasion: el punto en el puente de la nariz donde los huesos frontal y nasal del cráneo se encuentran.

Trago: pequeña aleta cartilaginosa delante de la abertura externa de la oreja

Borde orbitario: borde óseo que da entrada a las cavidades orbitarias. Las cavidades orbitarias son las dos cavidades situadas a ambos lados de la línea media de la cara destinadas a alojar los globos oculares y sus anexos.

Buffer: ubicación de memoria reservada para almacenamiento temporal de información que se transfiere de un lugar a otro.

Framework: estructura de soporte definida para el desarrollo de software en la cual un proyecto de software puede ser organizado y desarrollado. Típicamente, un *framework* puede incluir soporte de programas, bibliotecas y un lenguaje de programación entre otras herramientas para ayudar a desarrollar y unir los diferentes componentes de un proyecto.

Herramienta CASE: Las herramientas de ingeniería de sistemas asistida por computadora (Computer-Aided Systems Engineering - CASE) son aplicaciones informáticas dirigidas a las actividades, técnicas y metodologías de desarrollo de sistemas. Su objetivo es automatizar o apoyar una o más fases del ciclo de vida del desarrollo de sistemas.

Multiplataforma: Es un término utilizado frecuentemente en informática para indicar la capacidad o características de un software de funcionar o mantener una interoperabilidad de forma similar en diferentes sistemas operativos o plataformas.

Tiempo real: la computación en tiempo real hace referencia a los sistemas de software que están sujetos a restricciones de tiempo. Un sistema en tiempo real es un sistema que se ve limitado por problemas de tiempo debiendo necesariamente tener la característica de un tiempo de respuesta crítico. En el caso del prototipo desarrollado, el tiempo de respuesta crítico es 30 fotogramas por segundo.