



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO
FACULTAD DE INFORMÁTICA**

“Estudio comparativo de diferentes tecnologías de navegación con localizadores ópticos para sistemas de entrenamiento quirúrgicos.”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

ING. JORGE ISRAEL PÉREZ ARREGUÍN

DIRIGIDO POR:

Dr. SAÚL TOVAR ARRIAGA



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO
FACULTAD DE INFORMÁTICA**

“Estudio comparativo de diferentes tecnologías de navegación con localizadores ópticos para sistemas de entrenamiento quirúrgicos.”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
Grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA

ING. JORGE ISRAEL PÉREZ ARREGUÍN

DIRIGIDO POR:

Dr. SAÚL TOVAR ARRIAGA

Querétaro, Qro., México. Abril del 2015



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática
Maestría en Ciencias de la Computación

**ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE
NAVEGACIÓN CON LOCALIZADORES ÓPTICOS PARA SISTEMAS DE
ENTRENAMIENTO QUIRÚRGICOS**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias de la Computación

Presenta:

Ing. Jorge Israel Pérez Arreguín

Dirigido por:

Dr. Saúl Tovar Arriaga.

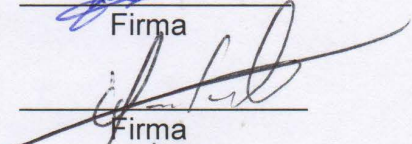
Dr. Saúl Tovar Arriaga
Presidente


Firma

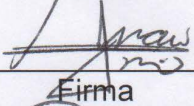
Dr. José Emilio Vargas Soto
Secretario


Firma

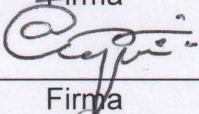
Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado
Vocal



Firma

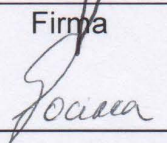
Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín
Suplente


Firma

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández
Suplente


Firma


M. C. Ruth Angélica Rico Hernández
Directora de la Facultad de Informática


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro México
Abril del 2015.

RESUMEN

El presente trabajo documenta el estudio de diferentes tecnologías de rastreo de objetos, aplicados a sistemas de navegación. Cada una de las tecnologías propuestas como dispositivo de rastreo, es analizada con el objetivo de documentar su desempeño y poner a prueba su mayor precisión posible. De esta forma se determina la factibilidad de su implementación en un sistema de navegación más completo, y dependiendo de su desempeño, analizar la posibilidad de su aplicación en áreas cruciales como las cirugías médicas.

El estudio se realiza analizando tecnologías comerciales y sistemas de rastreo ópticos. Entre estas tecnologías se encuentran, las cámaras de profundidad, los localizadores ópticos y los diversos materiales y métodos que se pueden aplicar al rastreo de herramientas mediante la obtención de sus coordenadas en tres dimensiones. Se explican los criterios considerados para la construcción de materiales necesarios tales como herramientas y marcadores, además se introduce un tipo marcador cuyo desempeño no ha sido documentado actualmente.

La experimentación documentada en el capítulo tres, arroja resultados positivos para los marcadores construidos. Esto indica que su precisión es similar a la de los localizadores utilizados en quirófanos actualmente. Esto no lleva a la inmediata implementación en un sistema de navegación quirúrgico, sino que abre un abanico de posibilidades a la continuidad de la experimentación de esta tecnología en diversas condiciones, para su eventual uso en este tipo de aplicaciones.

Además se documentan los resultados obtenidos a partir del análisis de un sensor de profundidad, cuya precisión, a pesar del procesamiento de imágenes empleado, resulta no ser óptima para aplicaciones que demandan precisión submilimétrica.

Palabras clave: Navegación óptica, Fiduciales planos, Localizadores Ópticos, Sensor de proximidad.

SUMMARY

This thesis documents the study of different object tracking technologies applied to navigation systems. Each of the proposed technologies as a tracking device, is analyzed with the object of document their performance and to test their maximum accuracy. This methodology is used to determine the feasibility of their implementation into a major navigation system, and, depending of their performance, the possibility of their implementation in crucial areas, as medical, is analyzed.

The experimentation done in chapter three, shows positive results for the constructed markers. This indicates that their accuracy is similar to those trackers actually used for operative room applications. This doesn't lead to the immediate implementation into a surgical navigation system, but opens a wide range of possibilities to continue with its experimentation under various conditions to be used in this kind of applications.

Furthermore, the obtained results from the deep sensor analysis are documented, this sensor, although the image processing done, results not to be optimal for applications that require sub-millimeter accuracy.

Keywords: Optical Navigation, Planar Fiducials, Optical Trackers, Depth Sensor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en estas líneas al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de la presente tesis a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad en el cual se encuentra la Maestría en Ciencias de la Computación.

Gracias a mi director de Tesis. Dr. Saúl Tovar Arriaga, por sus aportaciones, pero sobre todo, por su paciencia y dedicación hacia mi desarrollo profesional. Su pasión por la calidad del trabajo es algo muy valioso que aprendí gracias a usted.

Extiendo el más grande de mis agradecimientos a mi Tía María Arreguín Rivera, y a mi Abuelita, Dolores Rivera, ya que ellos fueron los cimientos de este logro. Por su amor, paciencia, tolerancia, respeto a mis ideas y apoyo económico. ¡Muchas gracias Tía!

Aprovecho estas líneas para compartir las últimas palabras de mi Tío Guadalupe Arreguín, quien me pidió le gritara al cielo al terminar mi carrera. Este será el segundo grito en memoria suya.

Gracias a mi Abuelo Guadalupe Arreguín. Por haber forjado una gran familia y por haber dejado en mí, un gran ejemplo de orgullo, corazón, y valor.

Muchas gracias a la mujer que me ha regalado su corazón, pues cada día que pasó de este tiempo de estudio, siempre estuvo presente de alguna forma. En la comida que me mandaba, en las oraciones que por mí elevaba, en esos días de enfermedad en los que me cuidó, y en los días que pacientemente esperó por mi retorno al salir de la facultad. ¡Gracias Miriam Huerta Vega!

Gracias a Cloe y a Elizabeth, porque me siguen compartiendo parte de sus vidas. Por su comprensión y apoyo hacia su mamá y hacia mí. Por su esfuerzo y dedicación al estudio, el cual en estas líneas me permito resaltar.

Gracias a Dios, pues lejos de abandonarme, aunque me alejara por momentos de Él, jamás se olvidó de mí, e incluso hoy me manifiesta su amor.

Gracias al apoyo de mis padres, por quienes adquirí la imperiosa necesidad de superación.

Querétaro Qro. Enero del 2015.

TABLA DE CONTENIDOS

i.	Resumen	i
ii.	Summary	ii
iii.	Agradecimientos	iii
iv.	Tabla de contenidos	iv
v.	Índice de Tablas	v
vi.	Índice de Figuras	vi
1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Sistemas de Navegación	1
1.2	Definición del proyecto de investigación	3
1.3	Justificación	3
1.4	Objetivo General	4
1.5	Objetivos Específicos	4
1.6	Organización de la Tesis	5
2.	ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1	Historia de los Localizadores Ópticos	6
2.2	Tipos de Localizadores	8
2.2.1	Localizadores Ópticos	8
2.2.2	Localizadores Mecánicos	11
2.2.3	Localizadores Ultrasónicos	12
2.2.4	Localizadores Electromagnéticos	14
2.3	Aplicaciones de los Sistemas de Navegación	15
2.3.1	Aplicaciones Industriales	15
2.3.2	Aplicaciones Médicas	17
2.4	Tipos de Cámaras	23
2.4.1	Cámaras RGB Convencionales	23

2.4.2	Estéreo-Cámaras	24
2.4.2.1	Primera Generación	26
2.4.2.2	Segunda Generación	27
2.4.2.3	Tercera Generación	27
2.5	Cámaras de Profundidad	28
3.	DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN BASADO EN UN LOCALIZADOR ÓPTICO DE SEGUNDA GENERACIÓN.	31
3.1	Sensor de Profundidad	32
3.2	Marcadores	38
3.3	Estrategia de Desarrollo	41
3.4	Conceptualización de la Herramienta	42
3.5	Diseño de Marcadores	44
3.5.1	Detección de Marcadores	45
3.5.2	Matrices Homogéneas	49
3.6	Construcción de la Herramienta	51
3.7	Técnicas de Calibración	52
3.7.1	Medición Directa	52
3.7.2	Unidad de Calibración	52
3.7.3	Pivoteo	53
3.8	Estimación del Error de Calibración	57
3.9	Programa de Navegación	57
4.	Resultados Generales	61
4.1	Resultados para Navegación con Fiduciales Planos	61
4.2	Resultados con Fiduciales Esféricos	66

5.	Conclusiones	69
5.1	Sensor de Profundidad	69
5.2	Marcadores Planos	69
5.3	Marcadores de Fiduciales Esféricos	69
5.4	Trabajo a Futuro	70
6.	Bibliografía	71
I.	Publicaciones	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Sistemas ópticos comerciales	9
2.2 Principales sistemas de navegación quirúrgicos disponibles actualmente	21
2.3 Desempeño de sistemas por cantidad de cámaras	24
3.1 Precisión del Kinect en aplicaciones recientes	35
3.2 Medidas de las distancias entre fiduciales	47
4.1 Errores de calibración de marcadores construidos	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Funcionamiento de un GPS	2
2.1 Sistemas de navegación con localizador óptico	10
2.2 Localizador laser	11
2.3 Dispositivo localizador mecánico	12
2.4 Interface de navegador ultrasónico	14
2.5 Sistema de navegación NDI Aurora	15
2.6 Aplicaciones de los sistemas de navegación que utilizan localizadores ópticos	16
2.7 Sistemas de navegación con localizador Claron	17
2.8 Sistema de navegación quirúrgico	18
2.9 Sistema de navegación Airo	20
2.10 Sistema de navegación Praxim ART	20
2.11 Estéreo-cámara	25
2.12 Primera generación de localizadores ópticos	26
2.13 Segunda generación de localizadores ópticos	27
2.14 Tercera generación de localizadores ópticos	28
2.15 Hardware del Kinect	29
3.1 Triangulación del sensor de profundidad	33
3.2 Imagen RGB y de Profundidad	34
3.3 Marcadores utilizados para el Kinect	36
3.4 Diferentes tipos de marcadores	38

3.5	Marcadores pasivos	40
3.6	Metodología para la implementación de nuevos marcadores	41
3.7	Tipos de puntas de herramientas quirúrgicas	43
3.8	Diseño de herramienta apuntadora	43
3.9	Diseño de marcadores	44
3.10	Determinación del punto de referencia de un fiducial plano	45
3.11	Grafos de geometrías de un marcador construido	46
3.12	Obtención del marco de referencia a partir de los fiduciales de un marcador	47
3.13	Transformación de un sistema de Coordenadas a otro eje en el espacio	50
3.14	Herramienta apuntadora construida	51
3.15	Procedimiento de calibración	55
3.16	Diagrama de flujo de calibración y navegación	58
4.1	Ensamble de herramienta y marcadores construidos	61
4.2	Detección del centroide de un fiducial esférico	62
4.3	Configuración para calibración	64
4.4	Reconstrucción de un objeto mediante navegación	65
4.5	Reconstrucción de un sólido utilizando un segundo marco de referencia	67
4.6	Comparación de reconstrucción con valor real del sólido	67
4.7	Regresión lineal aplicada a los datos obtenidos	68

I. INTRODUCCIÓN

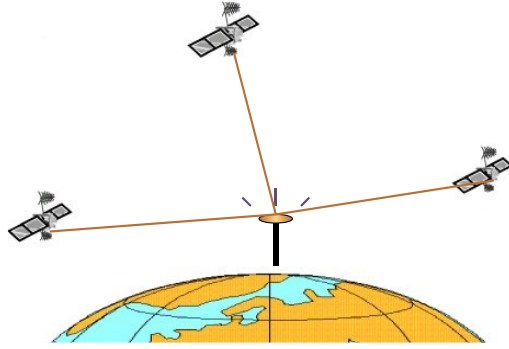
En los últimos años la tecnología relacionada al procesamiento de imágenes ha venido en aumento debido a la gran cantidad de aplicaciones que demandan claridad, velocidad y practicidad pero sobre todo precisión en sus datos. El reconocimiento de objetos es una de las principales áreas de aplicación de procesamiento de imágenes y visión por computadora. Durante muchas décadas ha sido, y sigue siendo, un área de extensa investigación (Treiber, 2010). Esto último con la finalidad de crear nuevos programas que permitan brindar información detallada sobre los objetos que se capturan.

Reconocimiento de rostros, reconocimiento de personas, detección de objetos, vigilancia en centros comerciales o estaciones de metro y cirugías asistidas por cámaras y computadoras (D’Orazio, 2012), ya que prácticamente todas las especialidades médicas tienden hacia procedimientos cada vez menos invasivos (Kurt, 2001). Estas son algunas de las más solicitadas aplicaciones para los sistemas de navegación en la actualidad, y el trabajo propuesto se basa en el principio de precisión de posicionamiento de herramientas durante la navegación, de manera similar a como se aplican con navegadores comerciales.

1.1 Sistemas de Navegación.

La navegación puede ser concebida como la determinación de la posición de uno o varios objetivos respecto a una referencia. Hoy en día existen diferentes tipos de sistemas de navegación, desde el compás magnético hasta la navegación por satélite (Corbasi, 1998). Para cada uno de los sistemas desarrollados hasta la actualidad fue necesario el rastreo o localización de objetivos diversos. En la actualidad el más conocido es el sistema de posicionamiento global (GPS) el cual mediante satélites, es capaz de rastrear objetivos dentro de un área determinada del globo terráqueo, proporcionando coordenadas para lograr la ubicación de sus objetivos. La Figura 1. ilustra en forma general la localización de un objetivo mediante GPS.

Figura 1.1. Funcionamiento de un GPS.



En este caso, el dispositivo localizador es un satélite, el cual es capaz de ubicar un objeto de referencia. A pesar de que puede visualizar grandes extensiones territoriales, la probabilidad de rastreo aumenta al tratarse de un objetivo específico que porte un dispositivo reconocible al satélite. Cabe señalar que el GPS no es una pantalla que muestra la posición de un objetivo, sino que ésta representa solo una parte del sistema de navegación completo.

El ejemplo anterior sirve para dar una idea general de lo que un sistema de navegación realiza y de los diferentes elementos que utiliza para cumplir su objetivo. Sin embargo, no es la única forma en la que los sistemas de navegación existen. Además del ya mencionado, también existen sistemas de navegación que auxilian a unidades de telefonía móvil, medios de transporte marítimos (Rice, 2000) y aéreos (Buchholz, 2005).

Además de ser útiles para localizar medios de transporte, los sistemas de navegación no se limitan a esta tarea. En la actualidad la navegación es necesaria también en el área médica. Esto debido a que la información obtenida por imágenes médicas llega a ser insuficiente en procedimientos más complejos como las cirugías, máxime si se trata de una cirugía que implique riesgos al daño de estructuras que representen daños críticos a órganos vitales como el cerebro.

Los sistemas de navegación cubren esta necesidad apoyados por imágenes médicas, y así como un GPS cuenta con un rastreador y objetivos, en el quirófano este concepto se traslada a elementos que cumplen con la misma función.

El elemento rastreador comúnmente utilizado es un localizador electromagnético, ultrasónico u óptico.

1.2 Definición del Proyecto de Investigación.

Realizar un estudio comparativo entre diversos sistemas de visión por computadora para su utilización en aplicaciones de navegación.

Mediante la implementación de métodos matemáticos y algoritmos en procesamiento de imágenes, es posible determinar la posición de herramientas en relación a objetos utilizando cámaras de menor costo a las cámaras estereoscópicas, pero con precisión similar.

Primeramente se analiza una cámara de profundidad de bajo costo para evaluar su utilización como un método de navegación factible.

Así mismo, se estudia la posibilidad de utilizar marcadores con fiduciales planos los cuáles son más baratos a los utilizados comúnmente (esféricos).

Por último, se analiza la factibilidad y exactitud de un sistema de navegación el cual posee una cámara web simple como sistema de visión.

1.3 Justificación.

Debido a las innovaciones tecnológicas en los sistemas de visión, se vuelve importante el estudio de tecnologías comerciales alternativas que puedan ser utilizadas en diversas aplicaciones basadas en sistemas de navegación. Además, las capacidades de los localizadores ópticos conducen hacia la investigación de su funcionamiento, y al análisis de la posibilidad de la implementación de sistemas de navegación de menor costo que deriven en resultados similarmente precisos a los obtenidos en aplicaciones de importancia considerable.

Los sistemas de navegación ayudan a mejorar los resultados de aplicaciones que demandan una alta precisión, auxiliando inclusive a personas durante la realización de tareas en las que se requiere destreza motriz (Hernández, 2003). A

este tipo de personas podría serle útil un sistema de navegación de menor costo. Para ello se debe de profundizar en las posibilidades de estéreo-cámaras o dispositivos similares pero que se ajusten a presupuestos considerablemente bajos a comparación de los sistemas disponibles actualmente en el mercado.

Entre las diversas tecnologías de visión por computadora, se pueden realizar pruebas para determinar cuál es la más adecuada para realizar determinadas tareas. Tal es el caso de las cámaras comerciales de diferentes tipos las cuáles se han vuelto más adquiribles (en relación al costo) en la última década.

1.4 Objetivo General.

Realizar un estudio comparativo de diferentes tipos de tecnologías para localizadores ópticos para la navegación de objetos e instrumentos (cámaras, estéreo-cámaras y cámaras de profundidad para medir diferentes características como: precisión, latencia y costo de implementación, así como estudiar la factibilidad de introducir un nuevo concepto de navegación utilizando una cámara de profundidad de bajo costo. Así como documentar los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas y de las aplicaciones en las que se implementan.

1.5 Objetivos específicos.

- Realizar un estudio analítico y documental de diferentes tipos de localizadores ópticos utilizados comúnmente para sistemas de navegación de instrumentos quirúrgicos.
- Implementar técnicas de calibración y registro de imágenes en sistemas de navegación ópticos para los sistemas antes mencionados.
- Investigar la factibilidad de emplear dichas técnicas en un sistema de visión RGB-D.
- Aplicar las técnicas desarrolladas en un sistema de navegación.

1.6 Organización de la Tesis.

El primer capítulo de este escrito hace referencia a grandes rasgos al tipo de tecnologías con el que se estará tratando a lo largo de la lectura. Es en esta sección donde es específica la importancia de los sistemas de navegación, por cuyo estudio tiene cabida esta investigación.

En este capítulo se explica también el objetivo que se pretende alcanzar al realizar una investigación sobre una tecnología que abarca diversos campos de aplicación. Es por ello que se explica el alcance del presente proyecto.

Para el capítulo dos se tiene un buen compendio de información sobre las diferentes tecnologías que se relacionan con la utilizada para este proyecto, se habla sobre diversos tipos de navegadores y de tecnología asociada a ellos. Mediante la comprensión de su funcionamiento, es posible darse una mejor idea de cómo trabajará el sistema desarrollado para esta tesis.

Sobre la marcha se puede leer parte de la historia que ha derivado en el desarrollo de las tecnologías aplicadas a localizadores ópticos, es necesario el conocimiento a grandes rasgos sobre el funcionamiento de estos dispositivos, por ello se incluyen especificaciones de los productos disponibles actualmente.

La metodología del desarrollo del proyecto es explicada en el capítulo 3. Es aquí donde se pueden observar los criterios de desarrollo tomados en cuenta para la selección de las tecnologías. Las herramientas y los materiales se describen a detalle en este apartado. Se describen también las técnicas matemáticas utilizadas para la obtención de los resultados deseados.

En el capítulo cuarto se pueden leer los resultados obtenidos a partir de los materiales y métodos empleados. Es en estas líneas donde se comienza a concluir que tecnología puede ser útil para determinados propósitos.

Para el capítulo cinco, se emite la conclusión sustentada en los resultados del capítulo cuatro. Además se sugiere una idea de cómo puede ser continuado este proyecto de investigación.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de navegación se utilizan para determinar la posición de un objeto en un espacio determinado, para ello utilizan varios componentes, siendo el más destacado el localizador empleado, cuya tecnología determina los tipos de componentes a utilizar. El alcance de esta tesis se enfoca en el estudio de localizadores ópticos para la determinación de posición y rotación de herramientas para sistemas de navegación.

2.1 Historia de los localizadores ópticos.

Hasta la fecha, han sido desarrollados muchos tipos de localizadores de posición de objetos. 47 años han transcurrido a partir de la primera aplicación desarrollada, conformada además, por un localizador con display (Vahala, 2001). Los localizadores ópticos desde entonces, se clasificaban solamente en 4 tipos, los magnéticos, los ultrasónicos, los ópticos y los mecánicos, representando cada uno diferentes ventajas y desventajas.

Entre las características principales deseables en un localizador se encuentran la precisión, resolución, tiempo de refresco, latencia y volumen de trabajo. Estas características se explican a continuación:

Precisión: Esta es en un sistema de navegación esencialmente relevante, y consiste en la medición del error referente a la posición y orientación obtenido por el dispositivo.

Resolución: Es el cambio de posición y orientación más pequeño que el localizador sea capaz de detectar.

Tiempo de refresco: Es el tiempo que toma el localizador en actualizar y exportar a una computadora los datos adquiridos en un instante de tiempo anterior. Esta característica ayuda a detectar un cambio de posición en un objetivo respecto al tiempo.

Latencia: Se le conoce también como el retraso existente entre un cambio en la posición y orientación respecto a los movimientos reales efectuados. Este tiempo también considera la exportación de las medidas a una computadora o sistema.

Volumen de trabajo: Se refiere al volumen sin el cual el localizador es capaz de medir posición y orientación a su precisión y resolución específica.

Por su parte, los localizadores ópticos son capaces de detectar la orientación y posición espacial de sus objetivos. Estos han sido diseñados utilizando una amplia gama de tecnologías. Mientras que algunos de ellos han sido clasificados como localizadores *faro* (Wang, 1990), existen otros tipos de localizadores que no pertenecen a esta categoría. Entre los más destacados se encuentran los de telemetría laser.

Los localizadores tipo *faro* utilizan un conjunto de marcadores ópticos. Estos marcadores pueden ser activos o pasivos, además se utiliza un conjunto de sensores como cámaras o fotodiodos de efecto lateral. Estos diodos además de ser uniformemente iluminados generan una concurrencia que varía como una función de posición del centroide del área iluminada. Este efecto es el utilizado en la localización de los fiduciales utilizados para los experimentos documentados en capítulos posteriores. Esta tecnología ha sido utilizada también en el área de animación por computadora (Sturman, 1994).

Entre las principales ventajas que representan los localizadores ópticos se encuentra su tiempo mínimo de refresco, el cual está limitado principalmente por la velocidad del procesador que se utiliza en la computadora a la que se conecta. Por lo tanto su tiempo de refresco puede mejorarse aún más en base al desarrollo de nuevas y más rápidas tecnologías de procesamiento.

Otra ventaja de este tipo de localizadores es que, aunque su volumen de trabajo varía de un sistema a otro, puede llegar a aumentarse. Sin embargo, una forma de vulnerar a estos localizadores es obstruyendo su rango de visibilidad con

un objeto interpuesto entre si y su objetivo de rastreo. Este problema puede mitigarse utilizando sensores y marcadores adicionales.

Otra desventaja que bien vale la pena mencionar es su vulnerabilidad ante la luz del medio ambiente y las emisiones de luz infrarroja. De tal manera que el uso de estos dispositivos debe desenvolverse dentro de un ambiente controlado.

Finalmente, este tipo de localizadores son vulnerables al movimiento eventual de sus marcadores a posiciones deslindadas de herramientas de rastreo o fuera del rango de visión del localizador óptico (Bhatnagar, 1993).

La llegada de los sistemas de rastreo ópticos a la industria ha introducido muchas variantes en sistemas y fábricas, sin embargo, las aplicaciones clínicas es donde más se ha aplicado, además puede mencionarse que en varios años, su tecnología no ha sufrido grandes cambios. Los sistemas ópticos pueden ser clasificados en sistemas de rastreo videométricos y sistemas base infrarrojos, los cuales a su vez pueden clasificarse en activos, pasivos y de rastreo laser.

Se puede ver que los localizadores ópticos son una pieza fundamental para los sistemas de navegación, ya que son estos los que determinan la posición de los objetivos, y pueden ser utilizados para sistemas de navegación de aplicación específicos o generales.

2.2 Tipos de Localizadores.

2.2.1 Localizadores Ópticos.

Son dispositivos de navegación que pueden tener una o más cámaras. Los localizadores ópticos emplean estas cámaras para reconocer la pose de objetivos específicos a través de algoritmos de visión por ordenador mediante la captura de imágenes de vídeo de la escena en tiempo real detectando un conjunto de marcadores activos o pasivos asociadas al objeto de interés (Northern Digital, 2010). Tomando en cuenta que en el área de estudio del análisis del movimiento humano, la técnica más utilizada en los diferentes campos de aplicación, ya sea

clínico, biomecánico o deportivo ha sido el rastreo óptico (Herda, 2001). Se muestra en la Tabla 2.1 una lista de las características más relevantes de algunos sistemas ópticos comerciales.

Tabla 2.1. Sistemas ópticos comerciales.

Sistemas Ópticos	Polaris Spectra	Polaris Vicra	Optotrack Certus	Micron Tracker S60	Micron Tracker H360	Micron Tracker H40	Micron Tracker H60
Fabricante	NDI	NDI	NDI	Claron Technology	Claron Technology	Claron Technology	Claron Technology
Precisión	Volumétrica. Piramidal: 0.25mm	Volumétrica 0.25mm RMS	3D 0.1mm	0.25 mm RMS	0.20 mm RMS	0.20 mm RMS	0.35 mm RMS
Frecuencia	60 Hz. Max. De Refresco	20 Hz. Max. De Refresco	4600 Hz. Para marcadores	48 Hz.	16 Hz.	20 H	20 Hz.
Volumen de medición	Piramidal y Pirámide extendida	Volumen Vicra	Completamente enfocado	115x200 x160 cm	240x200x160 cm	120x120x90 cm	200x130x100 cm
Tipos de herramientas	Pasivas, activas, inalámbricas activas	Pasivas, inalámbricas activas		pasivas	pasivas	pasivas	pasivas

Principales características de los localizadores ópticos, en la tabla se muestran los más utilizados a nivel mundial en la actualidad.

Estos sistemas, al trabajar con marcadores pasivos, funcionan mediante la emisión de ases de luz infrarroja los cuales son reflejados en los objetos de la habitación en la que se encuentre la cámara inundando la habitación y facilitando la tarea de captura de la posición de los objetos iluminados en el medio ambiente. Es posible utilizar también marcadores activos de luz visible presentes en la escena, y mediante la captura de una imagen del video en tiempo real es posible determinar la posición espacial del objeto. El rastreo de objetos depende a su vez de la

generación de tecnología de sistema empleada. Los marcadores activos operan mediante cables o existen también inalámbricos, los cuales funcionan por medio de baterías. Por otra parte, los marcadores pasivos son siempre inalámbricos. La Figura 2 muestra un sistema de navegación quirúrgico basado en un localizador óptico.

Figura 2.1. Sistema de navegación con localizador óptico.



Localizadores laser

Para la tecnología de rastreo laser, más allá de localizar un conjunto de leds, se monta un arreglo de fotosensores en una base rígida, se reflejan en espejos de rotación dos o tres haces de luz láser con patrón coherente emitidos por un semiconductor convencional. El haz de láser en forma de abanico inunda el volumen del sólido a digitalizar. La posición del cuerpo rígido es estimada mediante el muestreo simultáneo de posición de la escena inundada y la señal del fotosensor (Cash, 2007). Este tipo de localizadores no son muy utilizados en el área médica. Un ejemplo de este, es el localizador laserBIRD2 de Ascension Technology (Burlington, Vermont, USA). Este localizador es ilustrado en la Figura 3.

Figura 2.2. Localizador laser.



2.2.2 Localizadores Mecánicos.

Estos dispositivos miden la posición y la orientación utilizando una conexión mecánica entre un punto de referencia y su objetivo. Por lo general, un brazo mecánico conecta mediante una banda de cabezales a una caja de control, además se utilizan sensores tipo encoders colocados en las uniones del brazo medidor, sensando así el cambio en la posición y la orientación con respecto al punto de referencia (Bullo, 1997). El tiempo de retraso para los localizadores mecánicos es menor a 5 mili segundos y su principal desventaja es que el movimiento del usuario se ve limitado por los grados de libertad del brazo mecánico. Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el desarrollado por los laboratorios Fake Space y se ilustra en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Dispositivo localizador mecánico.



Ejemplo de un dispositivo localizador mecánico desarrollado por los laboratorios Fake Space.

Los dispositivos mecánicos de rastreo inercial utilizan un par de giroscopios para medir los cambios de orientación. Para esta tarea se necesita la habilidad del dominio de brazos de 6 grados de libertad además de que deben ser complementados por otro dispositivo de rastreo de posición. Este tipo de dispositivos se basan en el principio de conservación del momento angular el cual es el momento de la cantidad de movimiento de una partícula respecto a un punto O dado por la Ecuación 1.

$$M = p * r \quad (1)$$

Donde M representa el momento angular de la partícula, p representa la cantidad de movimiento y r el vector que une el punto de origen con la posición de la masa puntual (Marion, 1996).

2.2.3 Localizadores Ultrasónicos.

Este tipo de sistemas utilizan ondas de alta frecuencia para medir la posición de un objetivo. Este procedimiento se lleva a cabo de dos formas diferentes. La localización de tiempo de luz y la localización de coherencia de fase.

Para la localización de tiempo de luz, se mide el tiempo que tarda un sonido dado por emisores, en alcanzar sensores colocados en posiciones estratégicas en su medio ambiente. Los emisores trabajan en intervalos de tiempos conocidos y se activan solo uno a la vez. A través de la medición del instante de tiempo en el que el sonido llega a varios sensores, el sistema puede determinar la cantidad de tiempo que tomó el sonido en viajar desde el objetivo hasta los sensores y de este modo calcular la distancia desde el objetivo hacia cada uno de los sensores. Un ejemplo de aplicaciones de este tipo de sistemas es el utilizado para el análisis del comportamiento de animales (Lucas, 1990) o bien la navegación por sonares en submarinos militares (Konsberg, 2006).

Para la localización de coherencia de fase se mide la diferencia de fase entre las ondas de sonido emitidas sobre el objetivo y otras generadas por un emisor desde un punto de referencia específico. La fase producida por un sonido representa la posición de la onda, esta onda es medida en grados, de este modo 360° equivalen a una diferencia de longitud de onda. Un buen ejemplo de esto es cuando la onda producida se asemeja a la función seno, ya que las gráficas de seno y coseno representan una circunferencia a la vez que el ángulo avanza desde cero hasta 360° . Posterior a un ciclo o a una longitud de onda, la gráfica regresa a su origen. Mientras más decrece la distancia recorrida por un objetivo respecto a un periodo entre refrescos de medición, el sistema puede calcular en tiempo real la posición del objetivo. La mayor desventaja de este tipo de dispositivos es la acumulación del error de posición debido a su necesidad periódica de medición. La Figura 2.4. Ilustra un display digital de este tipo de sistemas.

Figura 2.4. Interface de navegador ultrasónico.



La interface de un sistema de navegación ultrasónico muestra regularmente en tonos de color más intensos, los objetivos más próximos al emisor de ondas de sonido.

2.2.4 Localizadores Electromagnéticos.

Este tipo de sistemas se basan en dispositivos articulados que registran la posición y orientación por medio de sensores y otros componentes electrónicos como codificadores o potenciómetros en cada una de sus articulaciones (De León, 2012). Existen sistemas de este tipo con latencia de hasta 5 milisegundos capaces de rastrear múltiples objetivos simultáneamente, asimismo este tipo de localizadores son utilizados en cirugías oculares (Verma, 2003) y de manera similar, para cirugías de órganos internos (Krücker, 2007).

Para aplicaciones quirúrgicas, estos sistemas constan de varios dispositivos. Una superficie integrada por sensores magnéticos donde se recuesta al paciente y una unidad electrónica que trabajan en conjunto con un transductor ultrasónico. Un buen ejemplo de ello es el sistema de navegación ultrasónico NDI Aurora. La Figura 2.5. Ilustra los principales componentes de este sistema (Wang, 2013).

Figura 2.5. Sistema de navegación NDI Aurora

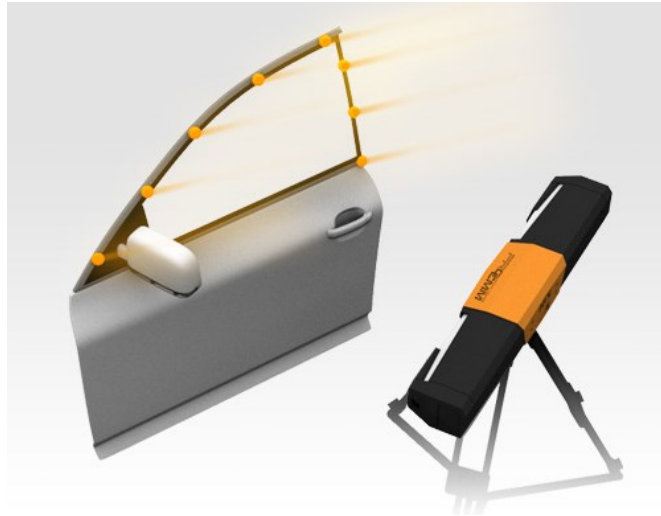


2.3 Aplicaciones a los sistemas de navegación.

2.3.1 Aplicaciones Industriales

Entre las aplicaciones de los sistemas de navegación con localizadores ópticos se pueden mencionar: metrología industrial, análisis de deformación de partes automotrices, ingeniería inversa de piezas sólidas, medición robótica, reconstrucción virtual de sólidos, inspección de piezas sólidas auxiliados por diseños CAD, aplicaciones biomecánicas de análisis motriz y operaciones en el área médica. La Figura 2.6 ilustra algunas de estas aplicaciones.

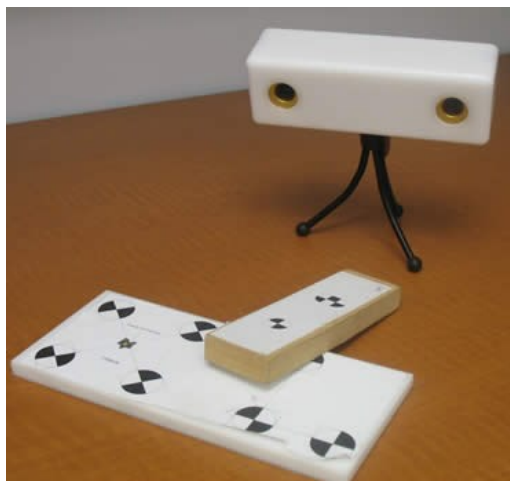
Figura 2.6. Aplicaciones de los sistemas de navegación que utilizan localizadores ópticos.



Los sistemas de navegación con localizadores ópticos son utilizados para el análisis de deformaciones de partes automotrices.

Las imágenes adquiridas por este tipo de localizadores, pueden ser reproducidas en tiempo real en un monitor a la vez que obtienen mediciones, por ello, estos localizadores hacen que el su sistema de navegación pueda ser clasificado, como un sistema videométrico. Estos sistemas identifican patrones de referencia en base a sus marcadores en imágenes de secuencias de video, para lo cual utilizan normalmente una o más cámaras calibradas. Un ejemplo de estos sistemas es el localizador Claron (Claron Technology Inc., Toronto, Ontario, Canada) Ilustrado en la Figura 2.7.

Figura 2.7. Sistema de navegación con localizador Claron.



Otros sistemas de navegación destacados utilizados recientemente en el área médica permiten realizar cirugías de varias regiones anatómicas, tal es el caso del Airo Mobile (Brainlab AG Germany, 2014), o el sistema Praxim ART (OMNIlife, 2011).

2.3.2 Aplicaciones Médicas.

Los sistemas de navegación son también utilizados en el área médica con la finalidad de reducir riesgos y daños en cirugías de invasión mínima (Stiehl, 2007). Este tipo de cirugía permite realizar operaciones sin llevar a cabo incisiones muy amplias lo que se refleja en menores tiempos de recuperación, hospitalización y mejores resultados cosméticos.

Los sistemas de navegación quirúrgicos permiten realizar operaciones basadas en imágenes 3D y localizadores ópticos de marcos de referencia dinámicos lo que brinda más información de la que el ojo humano es capaz de percibir. Este concepto también se ha utilizado en sistemas de entrenamiento para cirujanos, cuya finalidad es proporcionar experiencia previa a la operación. Una ventaja notable de estos sistemas es que evitan utilizar pacientes o sujetos ex-vivo durante el entrenamiento (Sutherland, 2006), de esta forma se evita la experimentación con

pacientes, animales o cadáveres (Montserrat, 1999), El entrenamiento quirúrgico consiste en el desarrollo de habilidades cognitivas, clínicas y técnicas, con la asesoría de un experto (Satava, 2003), así pues resulta bastante útil un sistema de entrenamiento para cierto tipo de operaciones que bien pueden basarse en modelos *phantom* de la anatomía humana prefabricados para replicar situaciones quirúrgicas (Vega, 2012).

Entre los sistemas de entrenamiento destacados actualmente se encuentran los desarrollados por la empresa alemana Phacon GmbH, mediante los cuales el cirujano puede entrenar en especímenes artificiales, asistidos por un navegador quirúrgico. Adicionalmente, Es posible detectar las heridas e indicarlo automáticamente durante el entrenamiento. Entre los sistemas destacados se encuentran los de entrenamiento para cirugías del hueso temporal, operación de senos paranasales, de espina dorsal, endoscopía, y estribos. En la Figura 2.8 se ilustra un sistema de entrenamiento para cirugía de senos paranasales. (Phacon, 2013).

Figura 2.8. Sistema de navegación quirúrgico.



Sistema de navegación aplicado a un sistema de entrenamiento para cirugías de senos paranasales.

Para ello, un dispositivo ideal de navegación quirúrgico debe de cumplir con las siguientes características:

- La frecuencia de refresco de las imágenes no debe de ser mayor a 100Hz. Y tener una latencia de menos de 1ms.
- Debe de existir una concurrencia de hasta 30 sensores.

- Debe de contar con un volumen de trabajo efectivo para un tamaño de habitación de hasta 5m³.
- Los sensores deben ser inalámbricos y deben de funcionar por varias horas, asimismo el hardware debe de estar distribuido de tal manera que no obstruya acceso al paciente, además de que no debe de interferir con otros dispositivos que se utilicen al momento de la cirugía.
- Los sensores deben de ser suficientemente pequeños en cualquier herramienta y brindar al menos 6 grados de libertad.
- La precisión del sensor debe de ser de al menos 0.1mm y .1°.

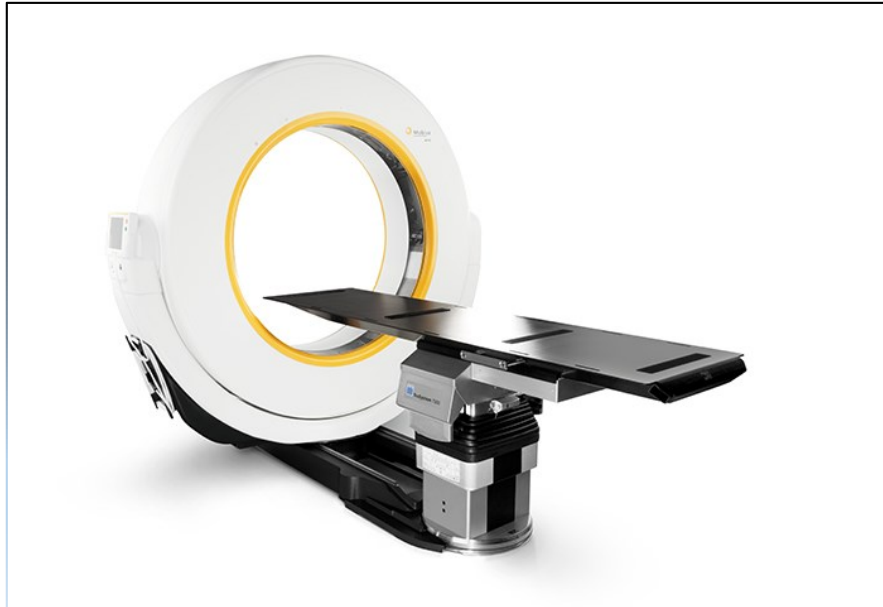
El sistema debe de ser robusto. Esto quiere decir que no debe de afectar al ambiente de la cirugía con variables adicionales tales como luz, sonido o alterar materiales ferromagnéticos (Welch, 2002).

El sistema Airo de Brainlab, por ejemplo, es utilizado para la adquisición de imágenes durante cirugías de columna, dependiendo del enfoque médico, este puede ser utilizado también para cirugías craneales. Asimismo, permite a los cirujanos visualizar completamente la columna mediante un solo escaneo y proyectar más contenido anatómico que las cámaras “C-arms” convencionales. Sus mayores atributos son:

- Imagen completa de tejidos blandos.
- Volumen de escaneo de 50 x 100 cm.
- Adecuado para cirugías de columna, traumatismos, y craneales.

La Figura 2.9. ilustra este sistema de navegación.

Figura 2.9. Sistema de Navegación Airo.



Brainlab Airo® Mobile Intraoperative CT Navigation System

Por su parte, el Sistema de navegación ART de Praxim, es utilizado para cirugías de reconstrucción de rodilla. Este sistema trabaja en base a las tecnologías de Omnilife Science y Praxim. Las siglas en inglés ART (Apex Robotic Technology) dan nombre al sistema ilustrado en la Figura 2.10.

Figura 2.10. Sistema de navegación Praxim ART.



Figura 2.10. A la izquierda: Sistema de navegación ART con guía robótica de corte Praxim. A la derecha: Marcadores con material retro-reflejante.

Este sistema cuenta con cuatro piezas fundamentales, las cuales incluyen una cámara estereoscópica, un panel de computadora con pantalla táctil, Una caja de control para la guía robótica de corte Praxim, y un cajón contenedor del pedal para de pie y el cable de encendido. Este sistema utiliza marcadores con formas de letras comunes para verificar posición.

Así como estos sistemas, en el área médica existen varias tecnologías aplicables a diversos procedimientos por ello en la Tabla 2.2 se muestran los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada a cerca de sistemas de navegación quirúrgicos comerciales, su aplicación, la forma en la cual registran las imágenes, en que cirugías que se utilizan y el tipo de localizador utilizado en el sistema.

Tabla 2.2. Principales sistemas de navegación quirúrgicos disponibles actualmente.

Sistema de Navegación	Marca	Tipo de localizador	Registro de imagen	Modalidad / método de adquisición	Aplicación en cirugías	Referencia
ART - Praxim	Omnilife Science	óptico	marcadores reflejantes sin marco (frameless) de 3a generación	Sonografía - Ultrasonido, Endoscopia	Rodilla	Omnilife Science, 2011, "Apex knee surgical navigation with the PRAXIM robotic cutting guide. Independent cuts - Measured Resection. Surgical technique", Global orthopaedic technology, Omnilife Science Inc., East Taunton, MA.
Stealth Station i7	Medtronic Inc.	óptico	sin marco (frameless), con tracking de 3a generación	Resonancia Magnética, Tomografía Computarizada	Columna Vertebral	Medtronic, 2009, "Stealth Station i7 Integrated Navigation System.", Medtronic Navigation 826 Coal Creek Circle Louisville, USA.

2.4 Tipos de Cámaras

Es difícil concebir la navegación sin un dispositivo principal capaz de interpretar y mostrar sus datos de posicionamiento adquiridos, estos datos son entregados de diversas formas, radares, mapas termodinámicos o imágenes del medio ambiente, a diferencia del GPS o los sonares marítimos, para la navegación con localizadores ópticos es posible emplear, además de imágenes auxiliares, diversos dispositivos de video que permiten interactuar a la vez con objetos físicos mediante marcadores estos objetos bien pueden ser cualquier tipo de herramienta mientras se encuentre dentro del área de visión del localizador. Estos dispositivos de interacción, son comúnmente cámaras y existen en diversas formas, cada una proporciona diferentes características, ventajas y desventajas. Existen diferentes tipos de cámaras. Entre los más destacados se encuentran las RGB (Martínez, 2003) utilizadas comercialmente como cámaras fotográficas y cámaras web.

2.4.1 Cámaras RGB Convencionales.

Las cámaras RGB convencionales de una sola lente, también denominadas mono-cámaras, proyectan en la imagen una determinada cantidad de píxeles de acuerdo a su configuración y capacidad. Cada píxel es pigmentado de un color resultante de la combinación entre tres colores primarios: Rojo, Verde y Azul (RGB). Estos píxeles toman la combinación de color que mejor se aproxime a la del objeto capturado. Este tipo de cámaras normalmente utilizan tres diferentes dispositivos independientes de carga acoplada para adquirir las tres señales de color. Las cámaras RGB se utilizan para adquisición de imágenes de alta precisión de color (National Instruments, 1997).

Los sistemas que utilizan una única cámara calibrada son capaces de reproducir imágenes captadas a partir de su entorno. Las de video particularmente se basan en la captura de imágenes en un intervalo de tiempo determinado, aquellas que logran capturar una mayor cantidad de imágenes en un menor tiempo son capaces de proporcionar una mayor cantidad de cuadros (frames), proporcionando así una mejor calidad de continuidad en el video. La calidad de la

información capturada por cámaras fotográficas como de video, depende también de la resolución de las imágenes que se capturan, ello debido a que una imagen de mayor resolución puede representar considerables ventajas tanto en la apreciación de la imagen como en la captura de colores y figuras, a consecuencia de un mayor costo de memoria (Borenstein, 2011). Estos dispositivos son capaces de determinar la posición de un objeto en dos dimensiones y analíticamente hasta en 3 sin embargo con menor precisión que un sistema conformado por un mayor número de cámaras.

2.4.2 Estéreo-Cámaras.

Los sistemas con dos o más cámaras son denominados estereo-cámaras. Las estereo-cámaras cuyas aplicaciones son con propósitos de mayor precisión, y reconstrucción tridimensional de imágenes, han llegado a ser utilizadas en misiones espaciales (Neukum, 2004). Estos dispositivos utilizan un modelo matemático de triangulación para determinar con precisión sub-milimétrica la posición de un objeto en tres dimensiones. La Tabla 2.3 muestra las características de los sistemas ópticos utilizados hasta ahora de acuerdo a su número de cámaras (n).

Tabla 2.3. Desempeño de sistemas por cantidad de cámaras.

Característica	a) Monocular	b) Estéreo	c) $n \geq 3$
Tiempo de refresco	+++	+++	+++
Concurrencia	++	++	+++
Volumen de trabajo	+	++	+++
Impertinencia	+	-	--
Sistema completo	+++	+++	+++
Precisión	+	++	+++
Latencia	+++	+++	+++
Robustez	+	++	+++
Costo	+	-	---

En la Tabla 2.3 se muestran las características de los diferentes tipos de sistemas de rastreo. a) Sistemas de una sola cámara, b) Estéreo-cámaras, c) Sistemas con más de dos cámaras. La cantidad de signos más indica que tan positivas son las diferentes características, y los signos menos, indican un efecto negativo de las mismas.

Los sistemas basados en estéreo-cámaras necesitan tres o más marcadores posicionados sobre un objetivo a reconocer en una configuración espacial conocida, de esta manera es posible cumplir con cierto estándar de precisión requerido. Los sistemas de localización actuales que utilizan arreglos de dos o más cámaras, las cuales permiten la determinación de posición y orientación de objetos en tres dimensiones, a diferencia de las mono-cámaras, son utilizados para aplicaciones donde la precisión juega un papel importante.

Los objetos capturados por estéreo-cámaras, así como su posición en tres dimensiones, pueden ser reproducidos en pantalla, además esta información puede ser complementada por imágenes adquiridas de la anatomía de los pacientes. Esta tarea de adquisición de imagen se facilita mediante el uso de marcos de referencia contruidos de material reflejante para una mayor apreciación en el sistema. Los objetos de referencia pueden ser acoplados a las herramientas que se pretendan utilizar en procedimientos quirúrgicos. Cabe destacar que este tipo de cámaras también son considerados como sistemas ópticos. En la Figura 2.11 se ilustra uno de estos sistemas.

Figura 2.11. Estéreo-cámara.



El objetivo de un localizador óptico que forma parte de un sistema de navegación es el de representar en pantalla y en tiempo real la posición y

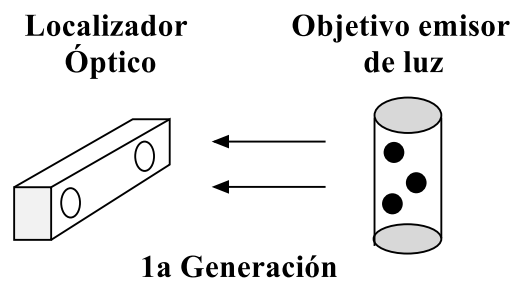
orientación actual de uno o varios objetivos en relación a una referencia con precisión sub-milimétrica.

Existen 3 principales generaciones de localizadores ópticos que se han desarrollado para realizar tareas de detección y reconocimiento, cada una de ellas funciona de manera distinta de acuerdo a los recursos disponibles.

2.4.2.1 Primera Generación.

En la primera generación de localizadores ópticos se realiza el reconocimiento de objetivos activos. Estos objetivos son denominados así debido a que necesariamente deben emitir luz para ser reconocidos por el localizador. Esta técnica permite que la estéreo-cámara reconozca inmediatamente el objetivo capturando la luz que emite a diferencia de los demás objetos opacos en la escena. En la imagen en una pantalla se distingue claramente el brillo que en ocasiones no es perceptible por el ojo humano debido al tipo de luz utilizada. La luz es una variable importante, ya que por su naturaleza reflejante, es capturada con mayor facilidad por el localizador óptico, sin embargo puede ocasionar ruido o la adquisición de falsos objetivos en una escena al ser emitida por objetos emisores del mismo tipo de luz pero que no corresponden a un objetivo a detectar. La Figura 2.12 ilustra esta generación de localizadores ópticos.

Figura 2.12. Primera generación de localizadores ópticos.

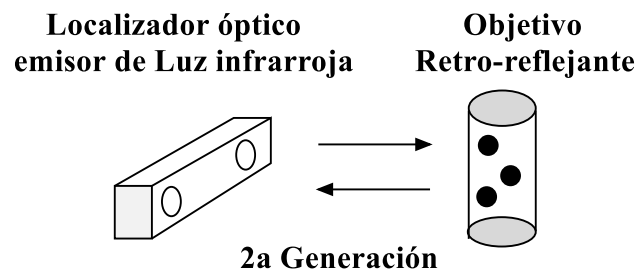


Sistema de navegación de primera generación. Los marcadores utilizados es la luz que emiten los objetos que se reconocen. Esta emisión de luz hace que a los objetos se les denomine objetivos activos.

2.4.2.2 Segunda Generación.

Para la segunda generación la metodología varía en cuanto al uso de la luz, ya que la cámara es la que emite luz infrarroja, esta luz es reflejada en el objetivo a rastrear, y de acuerdo al brillo, se calcula la distancia y posición del objeto en el espacio físico. Esta cámara es capaz de realizar estas operaciones al mismo tiempo que reproduce el video de las imágenes capturadas, y dependiendo del software utilizado, también es posible visualizar en pantalla las coordenadas de los objetivos. Para esta generación se utilizan objetivos pasivos, los cuales son denominados así porque no emiten luz de ningún tipo. La Figura 2.13 ilustra este procedimiento.

Figura 2.13. Segunda generación de localizadores ópticos.

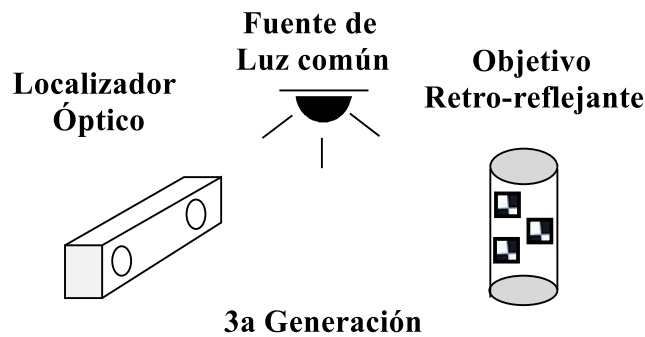


El localizador óptico emite haces de luz infrarroja que son reflejados por el objeto a reconocer. La posición y tiempo de retorno de los haces de luz, determinan la localización del objetivo.

2.4.2.3 Tercera Generación

Finalmente la tercera generación aprovecha la luz que existe en el ambiente de tal forma que ésta es reflejada en el objetivo a reconocer. Este procedimiento requiere que el objetivo cuente con material reflejante el cual puede ser de diferente forma o geometría, de acuerdo a la anatomía del objetivo, los puntos en los que este material es reflejado, deben ser colocados estratégicamente para la obtención de patrones de referencia útiles para la estéreo-cámara. El material retroreflejante cumple así la función de fiduciales dentro de un sistema de navegación. La Figura 2.14 ilustra esta última generación de metodología de navegación para sistemas ópticos (Claron Technology, 2012).

Figura 2.14. Tercera generación de localizadores ópticos.



Sistema óptico rastreando un objetivo con marcadores que reflejan mayormente la luz del medio ambiente, en este caso emitida por una lámpara común.

2.5 Cámaras de Profundidad.

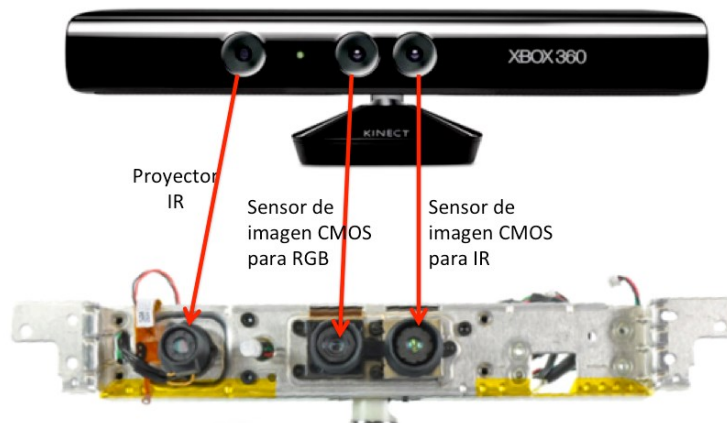
A diferencia de las cámaras RGB, las cámaras de profundidad (RGB-D) son capaces de detectar la posición de los objetos en 3D, es decir, se puede determinar la distancia a la que se encuentran del sensor incluido en el dispositivo. Los datos adquiridos por este tipo de cámaras contienen información visual y geométrica de la escena, asimismo permite la implementación de algunos procedimientos complicados de implementar con cámaras RGB convencionales, como la triangulación de un objetivo. Un ejemplo de estas aplicaciones es la posibilidad de realizar reconocimiento del esqueleto humano en tiempo real la cual es una estructura ampliamente utilizada en las interacciones basadas en gestos (Cruz, 2012).

Actualmente existen distintos dispositivos capaces de realizar el reconocimiento de figuras y su posición en el espacio, algunos de ellos han bajado considerablemente sus precios logrando así ser introducidos en el mercado. La compañía Microsoft puso a la venta un sensor, para su consola de videojuegos Xbox 360, capaz de interactuar con el usuario mediante su detección y reconocimiento de manera inalámbrica Kinect™, Microsoft © (Microsoft, 2012). Este dispositivo es un sistema de visión que brinda, además de una cámara RGB, imágenes que representan la distancia de objetos hacia el sensor. Con estos datos es capaz de

posicionar además de objetos, usuarios en un plano tridimensional, reconociendo diferentes posturas y gesticulaciones corporales mediante el desarrollo de aplicaciones específicas (NITE, 2013). A diferencia de las cámaras tradicionales, las cuales recogen la luz que rebota en los objetos que se encuentran frente a ellas convirtiéndola en una imagen que reconstruye lo que vemos con nuestros propios ojos, Kinect, identifica la distancia de los objetos que se encuentran colocados enfrente. Utiliza una luz infrarroja para crear una imagen de profundidad para mostrar no tanto la apariencia de los objetos, sino su posición en el espacio.

Este dispositivo cuenta con dos cámaras una de ellas con tecnología RGB (Martínez, 2011), la otra, un emisor y receptor de luz infrarroja. La luz infrarroja tiene una longitud de onda más amplia que la de la luz visible, por lo que no es aprehensible a simple vista. Este tipo de luz es inofensiva y nos exponemos a ella todos los días mediante la luz solar. La Figura 2.15 ilustra el Kinect y la posición de su sensor y de sus cámaras.

Figura 2.15. Hardware del Kinect.



Microsoft Kinect mostrando (de izquierda a derecha) proyector infrarrojo, cámara RGB, y cámara Infrarroja

Para llevar a cabo la determinación de posición, el proyector infrarrojo del Kinect dispara una red de puntos sobre cualquier objeto que se encuentre frente a él. Estos puntos no son visibles para el ojo humano, pero es posible captar una imagen de ellos utilizando una cámara infrarroja (Borenstein, 2011).

Las cámaras como el sensor Kinect tienen el potencial de ser usadas en aplicaciones de mapeo donde los requerimientos de precisión son menos estrictos. Para comprender este potencial es esencial analizar la calidad de la geometría de los datos adquiridos por el sensor (Khoshelham, 2012).

El bajo costo del Kinect siendo concebido como un dispositivo de visión comercial, permite el desarrollo de sistemas mucho más accesibles que los implementados con escáner laser y los sistemas de navegación que utilizan localizadores ópticos. Debido a la flexibilidad de programación de este dispositivo, puede ser considerado también para la retroalimentación de sistemas mecánicos.

La cámara de profundidad del Kinect tiene un rango mínimo de 8 cm. los objetos que se encuentren a una menor distancia, son tomados por la cámara como si estuvieran a una distancia infinitamente lejana, por ello se muestran como partes oscuras en la imagen de profundidad adquirida por la cámara, de la misma manera, todo aquel objeto que se encuentre fuera del rango de visión de la cámara debido a su lejanía será interpretado como un punto oscuro para efectos de reproducción de la imagen. El rango de alcance del Kinect tiene como límite los 4m. El fabricante recomienda utilizar el dispositivo en un rango de 1.2m a 3.5m.

El ruido en las orillas es provocado debido a que el Kinect solo puede calcular la profundidad donde los puntos proyectados por su emisor infrarrojo brillan con mayor intensidad. Los puntos reflejados en las orillas alteran en ocasiones el ángulo de reflexión por lo que los puntos no rebotan la luz hacia el sensor. Esta situación conlleva un grave problema al tratar de implementarse este dispositivo con fines de navegación sub-milimétrica.

3. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN BASADO EN UN LOCALIZADOR ÓPTICO DE SEGUNDA GENERACIÓN.

La idea de la tesis es utilizar un sistema de navegación que permita localizar objetos con precisión sub-milimétrica, para ello se utilizarán tecnologías diversas de localizadores y marcadores. Primeramente se utilizará un sensor de profundidad para documentar su desempeño y ver la factibilidad de utilizarlo como dispositivo rastreador en el sistema de navegación. Posteriormente se utilizará un localizador óptico con diferentes marcadores para documentar su desempeño con ambos. Cabe señalar que este último, cumple con los estándares necesarios para formar parte de un sistema de navegación quirúrgico, y en base a su precisión se pretende el desarrollo de una aplicación de similares resultados.

La principal característica de los sistemas de navegación quirúrgicos es que deben ser capaces de localizar objetivos con precisión sub-milimétrica, ya que es de gran ayuda para un médico que pretende ejecutar exitosamente una cirugía de invasión mínima, de esta forma se reduce la probabilidad de dañar tejido sano o de realizar cortes innecesarios para los movimientos que se deseen realizar, asimismo se reduce el riesgo de causar daño irreversible a tejido nervioso. Para este tipo de aplicaciones, es necesario un sistema de navegación que brinde precisión por sobre otras características.

Un sistema de navegación quirúrgico, trabaja con localizadores ópticos que brindan precisión sub-milimétrica al cirujano, cabe señalar que existe una amplia gama de sistemas de navegación quirúrgicos actualmente disponibles en el mercado internacional, más no dentro del mercado nacional, y para tener acceso a este tipo de tecnología se requiere de una gran inversión. Es por ello que se requiere la reducción de costos, el cual es uno de los objetivos principales del desarrollo de la presente investigación.

Una forma de reducir costos es la implementación de accesorios menos costosos dentro del sistema de navegación. El accesorio más costoso en este tipo de sistemas es sin duda el dispositivo localizador, y a juzgar por los resultados

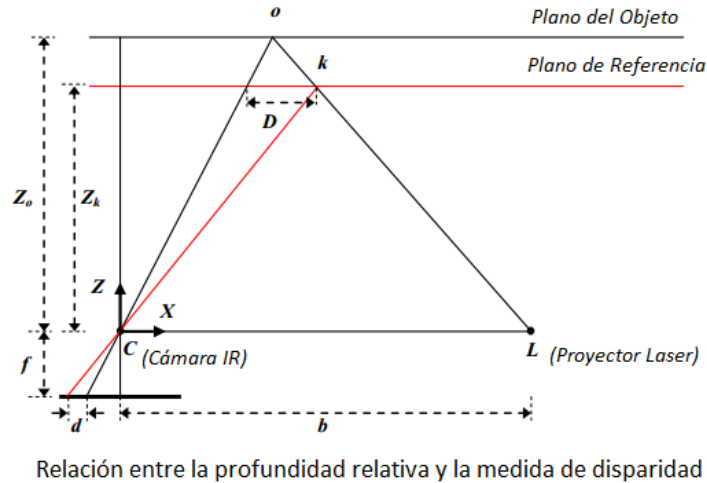
obtenidos en la primera parte de esta tesis, no es viable la implementación de una cámara de profundidad para aplicaciones que demanden un alto grado de precisión como la navegación quirúrgica. Pero no es el caso para los localizadores ópticos de segunda generación. Para éste tipo de tecnología se utilizan marcadores pasivos los cuales reflejan la luz infrarroja emitida por el localizador.

3.1 Sensor de profundidad

El sensor de profundidad adquiere una imagen en escala de grises de acuerdo a la proximidad de los objetos. De este modo mientras más cerca se encuentre un objeto más claros serán los pixeles correspondientes a ese punto en el espacio en la imagen proyectada en la computadora. Estas imágenes tienen una resolución de 640x480 pixeles.

La profundidad de las imágenes se describe como un proceso de triangulación, el cual consiste en la obtención de relación existente entre la distancia de un objeto k y el sensor con respecto a un marco de referencia y la medición de disparidad d . Para expresar las coordenadas tridimensionales de los puntos del objeto se considera un sistema de coordenadas de profundidad el cual tiene su origen en el centro de la perspectiva de la cámara infrarroja. El eje Z es ortogonal al plano de la imagen hacia el objeto, el eje X es perpendicular al eje Z en dirección de la línea base b entre el centro de la cámara infrarroja y el proyector laser, asimismo el eje Y es ortogonal a los ejes X y Z , formado así un sistema de coordenadas bien estructurado (Khoshelham, 2012). Esta descripción puede ser mejor apreciada en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Triangulación del sensor de profundidad.



En la Figura 3.1 se muestra el modelo de la metodología de triangulación utilizada por el Kinect basado en un marco de referencia preestablecido en el sistema, esta metodología es utilizada para la localización de objetivos y rastreo de usuarios.

Para la Figura 3.1 se tienen las siguientes representaciones para las variables aplicadas al modelo de triangulación:

- z_0 = Distancia del objeto al foco.
- z_k = Profundidad de un punto en el espacio.
- f = Ancho del foco al sensor.
- b = Distancia entre emisor laser y el sensor.
- k = punto objetivo en el espacio.
- o = Plano de referencia del objeto.
- C = Camara Infraroja.
- L = Proyector Laser.
- d = disparidad en el espacio de un punto k .
- D = Desplazamiento del punto k en el espacio.

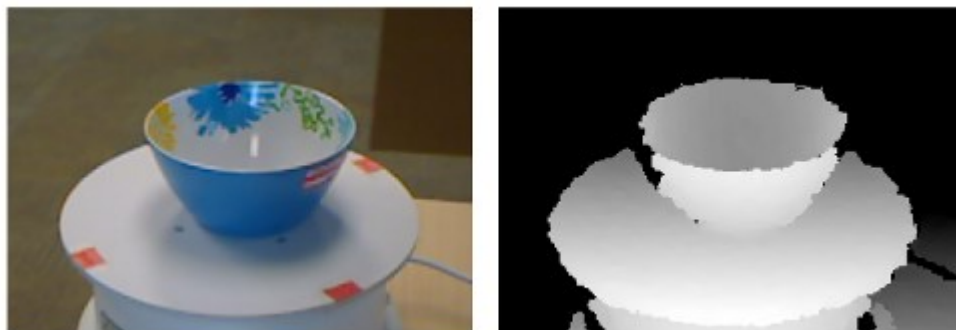
Para la obtención de la coordenada en el espacio, se aplica la similitud de triángulos, la cual se describe en la ecuación 2.

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0} \quad (2)$$

Resolviendo para Z_k en el modelo anterior es posible determinar la profundidad de un punto en el espacio o coordenada en el eje Y. En sentido estricto la variación del dato dependerá de la distancia entre el foco y el sensor, en cuyo caso esta constante se define en las especificaciones o calibración de fábrica del dispositivo.

Se realizaron pruebas de la calidad obtenida en las imágenes de cámaras de profundidad. Es posible realizar el registro de las dos imágenes, RGB y de profundidad adquiridas al mismo tiempo por el Kinect, esto da como resultado una tercer imagen RGB-D, sin embargo la diferencia de posición entre la cámara y el sensor de profundidad afectan directamente a la medición tridimensional de cualquier objetivo (OpenKinect, 2013). La Figura 3.2 muestra la captura de ambas imágenes, RGB y profundidad adquiridas en el mismo instante de tiempo (CL NUI, 2011).

Figura 3.2. Imagen RGB y de profundidad.



En este ejemplo se puede observar ambas imágenes RGB a la izquierda y de profundidad a la derecha.

En la Tabla 3.1 se muestran algunos trabajos recientes en los que se reporta la precisión del Kinect para diferentes aplicaciones.

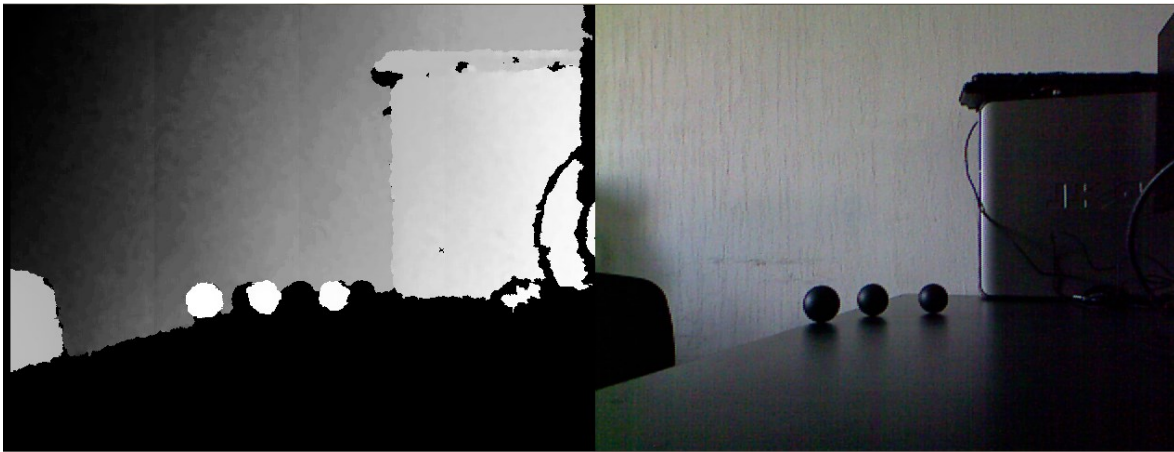
Tabla 3.1. Precisión del Kinect en aplicaciones recientes.

Título	Autor	Año	Aplicación	Precisión	Referencia
Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease	Galna	2014	Medición de Movimiento	10.5 mm	Galna B. Barrya G, Jacksonb D, Mhiripiria D, Olivierb P, Rochestera L. 2014. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. <i>Gait & Posture</i> Volume 39. Issue 4. April 2014. Pages 1062–1068.
Comparación de desempeño de una cámara de profundidad comercial y un LIDAR en explotaciones agrícolas	Correa	2013	Medición de Objetos	9 mm.	Correa C. 2013. <i>Comparación de desempeño de una cámara de profundidad comercial y un LIDAR en explotaciones agrícolas</i> . En: "VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas.", 26/08/2013 - 29/08/2013, Madrid.
Accuracy and Robustness of Kinect Pose Estimation in the Context of Coaching of Elderly Population	Obdrzalek	2012	Identificación de Posturas	12 mm.	Obdrzálek S. Accuracy and Robustness of Kinect Pose Estimation in the Context of Coaching of Elderly Population. <i>Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.</i> 2012;2012:1188-93. doi: 10.1109/EMBC.2012.6346149. PMID: 23366110.
Accuracy Analysis of Kinect depth data	Khoshelham	2012	Medición de profundidad	5 mm	Khoshelham, K., Elberink, S.O. 2012. "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications". <i>Sensors</i> 2012, 12, 1437-1454.

La columna de precisión hace referencia a la mejor medición obtenida en cualquier ensayo en la literatura, o bien al promedio de mediciones realizadas dependiendo del experimento realizado.

La experimentación el sensor de profundidad consiste en la búsqueda de algún material o artefacto que se pueda utilizar como fiducial, a partir del cual sea posible obtener una referencia para la localización de posiciones de una herramienta. Para ello se utilizaron esferas pintadas de color mate para evitar brillos adicionales a los reflejados por las ases de luz láser emitidos por el Kinect. Estas esferas se ilustran en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Marcadores utilizados para el Kinect.



Del lado izquierdo se observa la imagen obtenida de la escena en donde se colocaron las tres esferas utilizadas como referencia. Del lado derecho se observa la misma escena capturada con la cámara RGB. Se puede observar que la visibilidad de la cámara convencional del Kinect, no es impedimento para la detección del objeto, ya que el contraste de colores en la escena real, no afecta a la determinación de la profundidad por parte del sensor.

Para utilizar estos marcadores, se calcula un punto medio de la figura, este punto medio es mejor conocido como centroide. El centroide de un área en una imagen no es necesariamente el punto medio de una figura geométrica, ya que el cálculo se puede hacer también para figuras no uniformes, en cuyo caso el centroide puede ser calculado próximo a un extremo de la figura, sin embargo para el caso de las esferas, el centroide es determinado como el punto medio de la misma debido a su forma geométrica. La adquisición de estos puntos se realiza mediante el

procesamiento de la imagen y a partir de estos, se adquiere una referencia de la distancia entre las mismas.

El sensor de profundidad, también fue puesto a prueba mediante la adquisición de una imagen de profundidad. Esta imagen se extrajo pixel por pixel en una matriz de dimensiones 640x480, posteriormente se realizó el análisis de las coordenadas en dos y en tres dimensiones que proporciona la imagen. Las coordenadas en el plano se extrajeron directamente de la posición de los píxeles en la matriz bidimensional, mientras que la coordenada de profundidad se obtuvo por medio del valor de profundidad obtenido por el sensor en cada uno. Esta profundidad se distingue en la imagen con un color más claro si está más próxima al sensor y de un color más oscuro cuando está más lejos del mismo. Los píxeles fuera de rango son considerados con un valor 0 y se representan en color negro en la imagen de profundidad, los píxeles de color blanco adquieren un valor numérico de 255 de acuerdo a los parámetros manejados por la librería SimpleOpenNI (OpenNI, 2013) utilizada con el lenguaje Processing de programación.

Los resultados obtenidos muestran una pérdida de datos considerable, ya que la medición real de los puntos centrales de las esferas para la experimentación, fue de 123.5 mm entre cada una, mientras que el dato adquirido mediante el programa arroja un resultado de 136.35 mm.

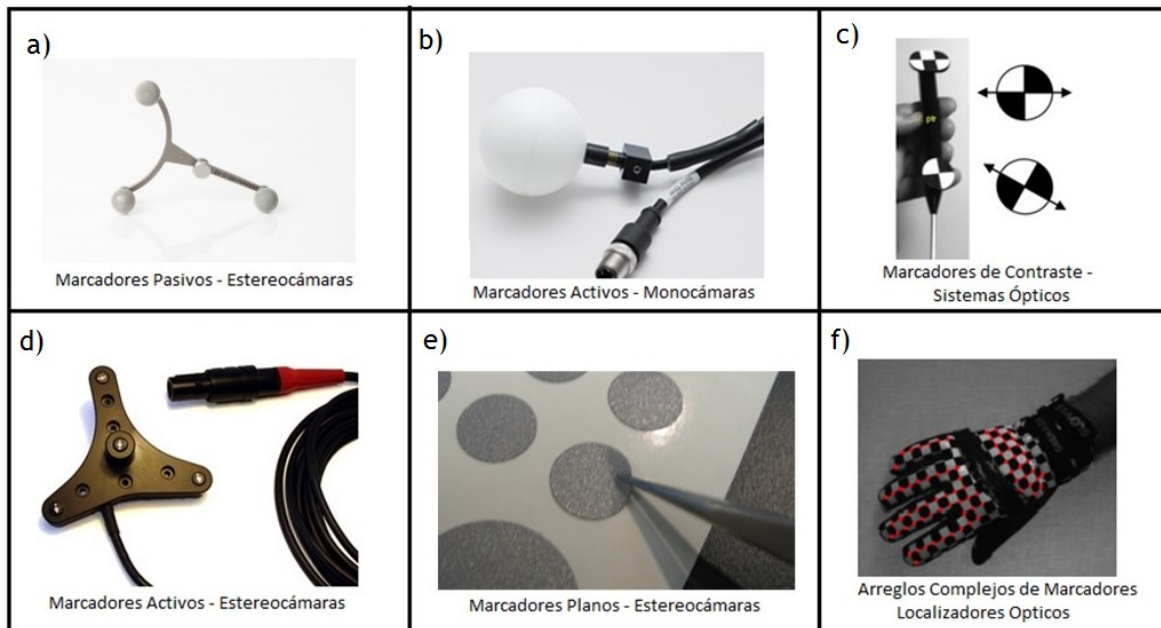
Este sensor también fue puesto a prueba mediante la reconstrucción de una imagen de profundidad en una malla de puntos de acuerdo a la matriz de datos de posición adquiridos. La media de proximidad entre píxeles vecinos en la reconstrucción de la imagen es de *1.95 mm*. Esto último se obtiene tomando en cuenta únicamente los más próximos al sensor, mientras que la media del error del total de puntos en la imagen completa resultó ser de *18.47mm*. Este error se calcula mediante la diferencia del valor real menos el valor teórico obtenido.

3.2 Marcadores.

Un marcador en un sistema de navegación puede ser ocupado con más de algún propósito, ya que puede ser utilizado desde objetivo de localización hasta un marco de referencia.

A grandes rasgos, los marcadores son estructuras de geometría definida que incluyen en su constitución física componentes electrónicos o materiales especiales para trabajar en conjunto en el tipo específico de localizador que se pretende usar. Existen varios tipos ellos, existen activos, pasivos, de alto contraste, entre otros. La Figura 3.4 ilustra a grandes rasgos los marcadores comúnmente utilizados para sistemas de navegación comerciales de para diversas aplicaciones.

Figura 3.4. Diferentes tipos de marcadores.



Algunos marcadores utilizados para diferentes tipos de localizadores ópticos y mono-cámaras.

En este momento cabe diferenciar entre un fiducial y un marcador. Un fiducial es una estructura que sirve como referencia a un sistema de rastreo. Un conjunto de varios fiduciales colocados en una geometría determinada y en una misma estructura puede conformar un marcador. De esta forma podemos entender

que los marcadores utilizados para el desarrollo de este proyecto están compuestos por fiduciales posicionados estratégicamente en los bordes de la estructura.

La Figura 20 a) Muestra un ejemplo de marcadores pasivos con fiduciales esféricos retro-reflejantes. Este tipo de marcadores es comúnmente utilizado en sistemas de navegación de aplicación médica, este tipo de marcadores son conocidos como marcadores pasivos, debido a que no emiten ningún tipo de luz para ser detectados por los localizadores ópticos.

En la parte b) se ejemplifica un marcador activo utilizado más comúnmente para sistemas de navegación que utilizan mono-cámaras como sus dispositivos localizadores.

En el inciso c) se muestran figuras planas con cuadros de colores blanco y negro alternado, esta diferencia de color genera un cambio de contraste en el punto central donde los dos colores se invierten, por ello este tipo de marcador es conocido como marcadores de alto contraste.

Para el caso d) se tiene un marcador cuyas aristas tienen la capacidad de emitir luz infrarroja. Por ello reciben el nombre de marcadores activos. Esta luz es detectable por un sistema navegación de primera generación.

En el inciso e) se ejemplifica el mismo material con el que están diseñados los fiduciales de los marcadores ilustrados en el inciso a). A diferencia de los fiduciales esféricos, los marcadores que utilizan fiduciales planos aún no son utilizados para aplicaciones de similar importancia.

Finalmente, en el inciso f) se ejemplifica un arreglo de puntos de alto contraste detectables por un sistema óptico de tercera generación. Cada punto de contraste puede ser identificado por el sistema y asignado como un objetivo o una referencia.

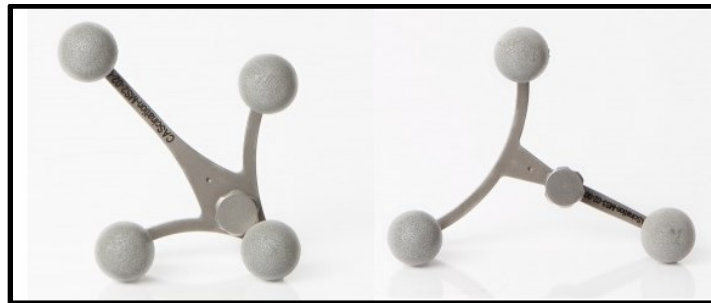
Al hacer referencia a un sistema de navegación se habla de todos los dispositivos y material que permiten ejecutar la tarea de localización de objetivos.

El localizador óptico puede ser el dispositivo de rastreo utilizado en un determinado sistema de navegación.

Esta tesis se enfoca en el diseño y construcción de marcadores capaces de trabajar con un localizador óptico de segunda generación. Estos marcadores están compuestos de material adhesivo en su parte posterior y en su parte frontal de material retro-reflejante lo cual es una innovación del sistema que se estudiará y cuyo reporte no ha sido documentado hasta ahora.

Los marcadores pasivos comerciales utilizados en los sistemas de navegación de segunda generación están conformados por una estructura metálica de titanio, debido a requerimientos de biocompatibilidad, cuentan también con fiduciales esféricas que permiten la captura del marcador considerando diversas posiciones, sin embargo, el mismo material que se utiliza para los fiduciales de los marcadores mostrados en la Figura 3.5, puede ser implementado en marcadores con diseño y fabricación plana para sustituir estos costosos arreglos.

Figura 3.5. Marcadores pasivos.



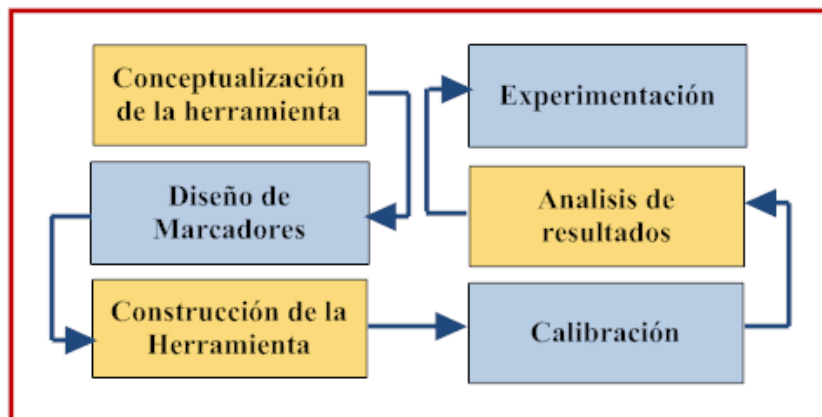
Este tipo de marcadores con fiduciales esféricos recubiertos de un polímero reflejante, son utilizados en los sistemas de navegación de segunda generación.

Cada uno de estos marcadores tiene actualmente un precio aproximado de \$30,000 MX, mientras que un marcador elaborado puede reducir el costo hasta aproximadamente en un 90% dependiendo del material y de su técnica de fabricación.

3.3 Estrategia de desarrollo.

En esta sección se describe el procedimiento para llevar a cabo la conceptualización, el diseño y la construcción de la herramienta. Así como el procedimiento de calibración, la determinación del error en el procedimiento y la implementación de la herramienta con los marcadores construidos en la ejecución de la navegación. Se documentan los resultados obtenidos que derivarán en las conclusiones posteriormente incluidas en el presente trabajo. La Figura 3.6 resume las tareas necesarias para completar el estudio de la tecnología de marcadores planos utilizando fiduciales adhesivos retro-reflejantes a la luz infrarroja emitida por el localizador disponible.

Figura 3.6. Metodología para la implementación de nuevos marcadores.



“Se presenta la metodología propuesta para el análisis del desempeño de navegación con fiduciales de discos reflejantes de luz infrarroja aplicables a estéreo-localizadores de segunda generación”.

Se parte de la idea de estudiar el desempeño de componentes diferentes a los utilizados comúnmente con un localizador óptico de segunda generación. La parte a analizar en este caso son los marcadores de fiduciales esféricos que se utilizan comúnmente en aplicaciones médicas.

El material seleccionado para reemplazar los fiduciales esféricos de los marcadores fue el mismo polímero del recubrimiento de las esferas solo que esta vez colocado sobre una plantilla adhesiva, este material es proporcionado también en el kit de trabajo de algunos localizadores ópticos. Teniendo en cuenta el tamaño

de los stickers del polímero retro-reflejante, se diseñó mediante un software CAD, el modelo de la geometría del marcador que posteriormente se llevó al plano físico mediante una impresora 3D.

Estos marcadores al igual que los marcadores esféricos, existen con el objetivo de proporcionar una referencia de posición entre un objetivo determinado y el plano que conforman. Por ello se pensó montar el marcador impreso e integrado con sus fiduciales en una herramienta que permitiera efectuar la determinación de posición de una parte de la misma respecto al marcador.

3.4 Conceptualización de la Herramienta.

Para el desempeño adecuado de una aplicación de navegación específica es necesario seleccionar de manera correcta la herramienta a utilizar. Por ello se realizó un diseño a la medida de las herramientas que se deben utilizar para alcanzar físicamente un objetivo deseado. Asimismo se tuvieron en consideración aspectos como: tamaño, peso, material precisión, metodología de calibración y compatibilidad entre herramientas.

Con una herramienta señaladora es suficiente para lograr atravesar por regiones estrechas para un contacto físico con diversos objetivos. Por lo tanto, se toma la determinación de diseñar una herramienta puntiaguda que permita al sub-ensamble de marcadores y herramienta, moverse apropiadamente durante el proceso de calibración, dentro del rango de visibilidad del localizador óptico y que sea capaz de señalar sus objetivos sin que la estructura provoque algún tipo de interferencia entre objetos físicos y además entre objetivos y el rango de visión del localizador óptico.

Existen muchos tipos de herramientas, con diversas puntas, materiales y formas. Algunos de estos materiales pueden ser: titanio, aluminio, acero inoxidable, plástico, resina, etc. La punta o *Tool Center Point* (TCP) puede ser pinzas, agujas, o brocas de diversos tamaños o cualquier otro objeto puntiagudo o filoso como los ejemplificados en la Figura 3.7.

Figura 3.7. Tipos de puntas de herramientas quirúrgicas



a) Pinzas quirúrgicas, b) broca esférica, c) broca puntiaguda, d) aguja quirúrgica.

Se escogió la punta más sencilla que cumpliera con los requisitos de dureza, precisión y compatibilidad con los marcadores. Con estos requerimientos, se elaboró previamente un diseño CAD de la herramienta mostrada en la Figura 3.8.

Figura 3.8. Diseño de herramienta apuntadora.



Diseño CAD de la herramienta para montar marcadores, realizar la calibración respecto al localizador óptico y realizar pruebas de navegación.

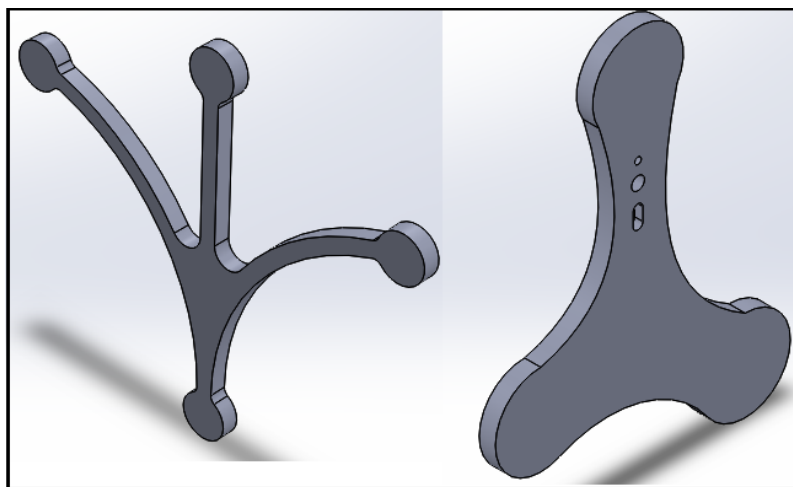
La compatibilidad de esta herramienta con los marcadores se consideró al agregar un barreno con rosca de 3mm que permite atornillar, una a la vez, varias geometrías de marcadores a la herramienta, y a manera de brindar mayor estabilidad, se incluyó en el diseño un tope que sirve a para sujetar tanto marcadores construidos como marcadores incluidos en el kit de herramientas del localizador óptico. De esta forma los marcadores se sujetan a la herramienta de tal manera que impiden el movimiento de los marcadores durante el proceso de calibración o la navegación posterior. Para complementar la herramienta y ejecutar la calibración, es necesario montar un marcador sobre ella.

3.5 Diseño de marcadores

El localizador óptico disponible permite trabajar con la tecnología de marcadores pasivos para sistemas de navegación de segunda generación, por lo que la intención, es crear diseños menos costosos que los proporcionados por el fabricante de un sistema de navegación que utiliza marcadores de fiduciales planos.

Los marcadores se diseñan de tal manera que son compatibles con la herramienta de navegación construida, para ello se utiliza un barreno con rosca de 3mm. y un orificio correspondiente al tope de la herramienta. La Figura 3.9 presenta los diseños previos a la impresión de los marcadores que fueron construidos.

Figura 3.9. Diseño de marcadores.



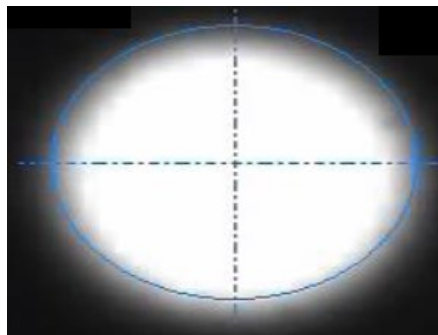
Se diseñaron dos diferentes tipos de marcadores, con variación de medidas en cuanto a la geometría y al tamaño de sus fiduciales.

Posteriormente estos diseños se llevan al plano físico mediante impresión tridimensional en un plástico de color mate para evitar ruidos producidos por brillos adicionales a los fiduciales durante la calibración y la navegación. Estos marcadores, una vez impresos, se montan en la herramienta y se calcula su posición espacial mediante el método de transformación de posición con coordenadas espaciales y obtención de vectores unitarios a partir de la referencia de los fiduciales.

3.5.1 Detección de Marcadores.

Para la obtención de un marco de referencia se requiere de la localización e identificación de cada uno de los fiduciales, ya que estas varían de acuerdo a la posición del marcador y al refresco de la imagen respectivamente. Para ello se determinan las distancias entre cada fiducial y se asignan como variables a los centroides de las figuras capturadas en cada frame, la determinación de estos puntos se lleva a cabo mediante las librerías que incluye el localizador óptico. Este procedimiento se ilustra en la Figura 3.10. Una vez determinadas estas referencias se procede al cálculo de las distancias entre ellas para la identificación de las mismas por el programa desarrollado.

Figura 3.10. Determinación del punto de referencia de un fiducial plano.

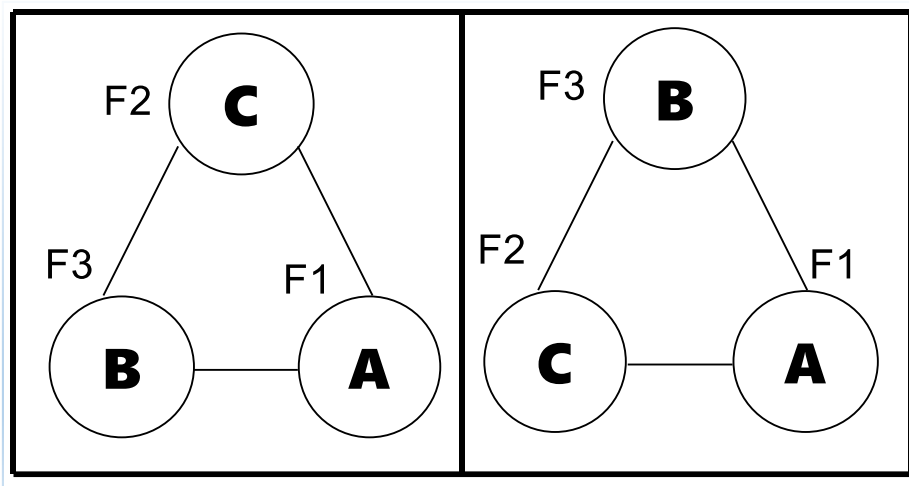


La determinación de los puntos de referencia se realiza mediante la adquisición de posición del centroide de la parte de la imagen de mayor contraste

en un frame. Por la forma geométrica de los fiduciales el centroide suele ser regularmente el punto medio de la esfera o de la circunferencia.

Una vez determinados los centroides es posible obtener la posición espacial de un marco de referencia conforme a la geometría resultante. La Figura 3.11 muestra dos grafos cuya representación son dos de las 6 combinaciones posibles de posicionamiento para un marcador de 3 fiduciales determinando el centroide de cada uno. Estas combinaciones se deben de tomar en cuenta dentro de la programación para que cuando la imagen sea refrescada, no exista discrepancia de datos al asignar erróneamente una variable a un fiducial asociado a otra variable en los frames anteriores.

Figura 3.11. Grafos de geometrías de un marcador construido.



El reconocimiento de fiduciales es necesario para impedir la variación de variables asociadas en la captura de un nuevo frame, el cual entregará nuevas medidas de posición al procedimiento de calibración o navegación.

Las medidas respectivas entre los fiduciales de ambos marcadores construidos se muestran en la Tabla 3.2 tomando como referencia el lado izquierdo en la Figura 3.11.

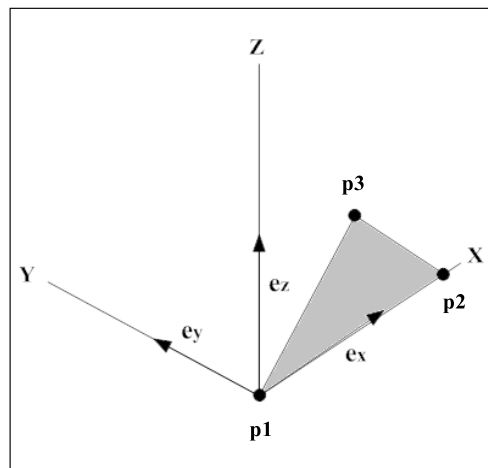
Tabla 3.2. Medidas de las distancias entre fiduciales

Marcador/Distancias	CB	AB	CA
Fiduciales de 25mm.	112mm.	68mm.	84mm
Fiduciales de 13mm.	100mm.	118mm.	100mm.

Las medidas de las distancias son necesarias para la identificación de cada nodo en los dos arreglos de marcadores
construidos.

Detectando la posición de cada uno de los fiduciales colocados en los extremos de un marcador es posible calcular la transformación espacial desde el punto de origen de coordenadas de la cámara hacia un nuevo punto de origen de coordenadas pero esta vez desde el un marco de referencia montado sobre la misma herramienta, este punto es denominado marco de referencia dinámico (DRF), la obtención de este marco se encuentra en función de las posiciones de cada fiducial, por lo que el diseño del marcador debe ser determinado anterior a la implementación del modelo matemático para la obtención de la referencia. La Figura 3.12 ilustra el procedimiento para determinar esta referencia.

Figura 3.12. Obtención del marco de referencia a partir de los fiduciales de un marcador.



La posición de los centroides de los fiduciales con utilizados como vectores unitarios para la obtención de un punto de referencia necesario para el cálculo de la transformación desde la cámara hacia el marcador.

La obtención de los vectores unitarios a partir de los tres fiduciales se realiza mediante las ecuaciones 3 a 11 y a partir de los resultados se puede determinar la transformación ${}^{cam}T_{DRF}$ de la cámara al marco de referencia del marcador montado en la herramienta, o bien Marco de Referencia Dinámico (DRF).

$$x = p_2 - p_1 \quad (3)$$

$$e_x = \frac{x}{|x|} \quad (4)$$

$$\frac{x}{|x|} = \frac{p_2 - p_1}{|p_2 - p_1|} \quad (5)$$

$$e_x = \frac{p_2 - p_1}{|p_2 - p_1|} \quad (6)$$

$$z = e_x \cdot (p_3 - p_1) \quad (7)$$

$$e_z = \frac{z}{|z|} \quad (8)$$

$$\frac{z}{|z|} = e_x \cdot \frac{p_3 - p_1}{|p_3 - p_1|} \quad (9)$$

$$e_y = e_z \cdot e_x \quad (10)$$

$$e_z = e_x \cdot e_y \quad (11)$$

Con los datos de los fiduciales, es posible calcular la transformación como se muestra en la ecuación (12).

$${}^{cam}T_{3P} = \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z & p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

De la matriz anterior se puede leer que la transformación del localizador óptico al marcador de tres fiduciales (3P) se obtiene a partir de los tres vectores unitarios e_x , e_y y e_z además del vector de posición ' p_1 '.

3.5.2 Matrices Homogéneas.

Para la obtención de marcos de referencia y transformaciones espaciales, se utiliza el concepto de matrices homogéneas, puesto que este tipo de matrices permite almacenar los datos adquiridos del localizador óptico. Este tipo de matrices de datos son contienen información de rotación, traslación, perspectiva y escalado.

La matriz homogénea es una matriz de dimensión 4x4 que representa la transformación de un objetivo desde un sistema de coordenadas hacia un punto específico y está definida por la ecuación 13.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

En la matriz anterior, el elemento ' R_{3x3} ' representa una matriz de rotación de dimensión 3x3. La sub-matriz ' p_{3x1} ' representa el vector de posición x, y, z, y tiene una dimensión de 3x1. ' f_{1x3} ' representa los valores de perspectiva y finalmente ' w ' el cual hace referencia a un valor de escalado que a su vez completa la matriz de transformación homogénea de dimensiones 4x4.

Para nuestra aplicación, la sub-matriz f_{1x3} que representa una transformación de perspectiva, es nula, de la misma forma, la matriz de representación de escalado w_{1x1} , será simplemente la unidad. Este concepto se aplica a las transformaciones obtenidas a partir de los datos capturados por el localizador óptico, dando lugar a la matriz homogénea representada en la ecuación 14.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Esta forma representa la orientación y la posición de un sistema O-X₀Y₀Z₀ que ha adquirido una rotación y un valor de traslación respecto a un sistema de coordenadas de referencia O-XYZ.

Así, si se pretende representar la posición y orientación de un sistema girado y trasladado, respecto a un marco de referencia de origen O con componentes en X, Y, Z, puede ser representado como se muestra en la ecuación 15.

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

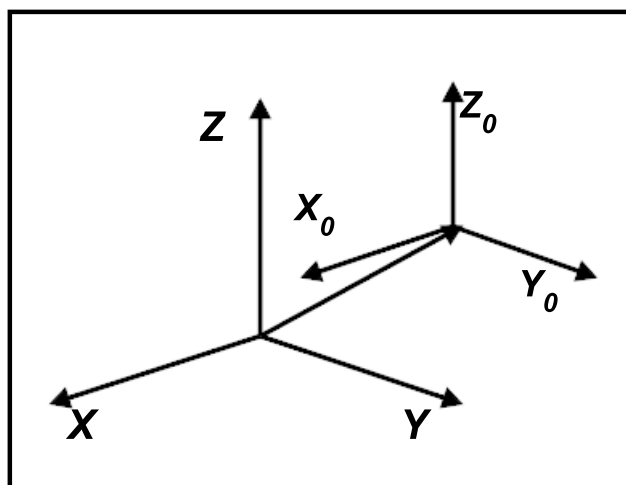
Donde r representa la rotación del objeto posicionado en X, Y, Z. Y el resultado es un vector de dimensiones 4x1.

De la misma forma, para trasladar un origen de un sistema de coordenadas X, Y, Z, a un sistema X_0, Y_0, Z_0 , se obtiene la ecuación 16.

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r_{X_0} \\ r_{Y_0} \\ r_{Z_0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Esta transformación se ilustra en la Figura 3.13.

Figura 3.13. Transformación de un sistema de coordenadas a otro eje en el espacio.



La transformación adquirida puede ser utilizada para la localización de herramientas y otros marcos de referencia. El origen de la transformación representa un marco de referencia adicional a una referencia predeterminada, esta referencia para fines prácticos representa el sistema de coordenadas de un localizador óptico.

Este tipo de transformaciones son también utilizados en otro tipo de localizadores y aplicaciones mecánicas como brazos robóticos con aplicaciones específicas.

3.6 Construcción de la Herramienta.

Para este paso, se llevó al plano físico, el diseño conceptualizado en el primer paso de la metodología, esta vez el modelo se verá realizado de un material solido con rigidez suficiente para su manipulación, con la finalidad de soportar primeramente los marcadores anexados y que además sea capaz de soportar movimientos de presión, necesarios para la calibración. El material seleccionado para este paso fue una aleación de aluminio lo suficientemente rígida, y moldeada mediante máquina de control numérico. Finalmente se construyó una herramienta con punta rígida de 5 cm. y un mango de 15 cm. de largo para la sujeción de marcadores y manipulación. La herramienta resultante se ilustra en la fotografía de la Figura 3.14.

Figura 3.14. Herramienta apuntadora construida.



En la herramienta construida para ejecutar la calibración y navegación, se puede apreciar el barreno de montaje del marcador y el tope de sujeción de marcadores. Estas características aseguran la compatibilidad aun para los

marcadores incluidos en el kit de desarrollo del localizador óptico InfiniTrack (Atracsys LLC, Lausame, Switzerland),

La posición del marcador montado sobre esta herramienta no adquiere un valor significativo por sí misma, pero si al momento de realizar los cálculos de posición de la punta de la herramienta, ya que esta es la función primordial que debe ejecutar con precisión el sistema de navegación. Para ello es necesario haber calculado previamente la transformación desde el sistema de coordenadas del marcador hasta el TCP. Este proceso se conoce comúnmente como calibración.

3.7 Técnicas de Calibración.

Mediante la calibración es posible conocer con precisión la punta de la herramienta con respecto al DRF de la herramienta y a la vez del marco de referencia del localizador óptico. Para calibrar existen varias técnicas, tales como: unidad de calibración, medición directa y Pivoteo, siendo esta última la aplicada a la herramienta construida.

3.7.1 Medición Directa.

Un método que puede ser utilizado para la calibración, consiste en realizar una medición directa de la posición del TCP con un sistema basado en instrumentación laser o bien, utilizando un brazo mecánico. Esta opción no es muy utilizada debido a que requiere de un dispositivo adicional para ejecutar la medición.

3.7.2 Unidad de Calibración.

Una forma directa de calibrar la herramienta, es utilizando una unidad de calibración con una geometría previamente conocida. Una unidad de calibración debe tener montado un marcador, y mediante el registro de posición de un punto origen en la superficie del mismo se tomará la referencia para la determinación de nuevas posiciones. Para llevar a cabo esta técnica es necesario que la distancia desde el eje del marcador hasta el punto O , sea previamente conocida.

Para asegurar una precisión aceptable, se requiere que la unidad de calibración sea maquinada con CNC o bien, deberá ser una impresión tridimensional de alta resolución. Su construcción debe ser precisa de tal forma que la distancia conocida de la posición ${}^{cam}\mathbf{P}_{TCP}$ sea sub-milimétricamente precisa. Así, cuando se toca el punto O con el TCP, la relación queda establecida como se expresa en la ecuación 17

$${}^{cam}\mathbf{T}_{marker} \cdot {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} = {}^{cam}\mathbf{T}_{Cal} \cdot {}^{Cal}\mathbf{P}_o \quad (17)$$

En base a la ecuación 17 se puede obtener el resultado deseado tal como se expresa en la ecuación 18

$${}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} = ({}^{cam}\mathbf{T}_{marker})^{-1} \cdot {}^{cam}\mathbf{T}_{Cal} \cdot {}^{Cal}\mathbf{P}_o \quad (18)$$

Utilizando este método, el error de calibración debe encontrarse dentro del estándar del localizador óptico.

3.7.3 Pivoteo.

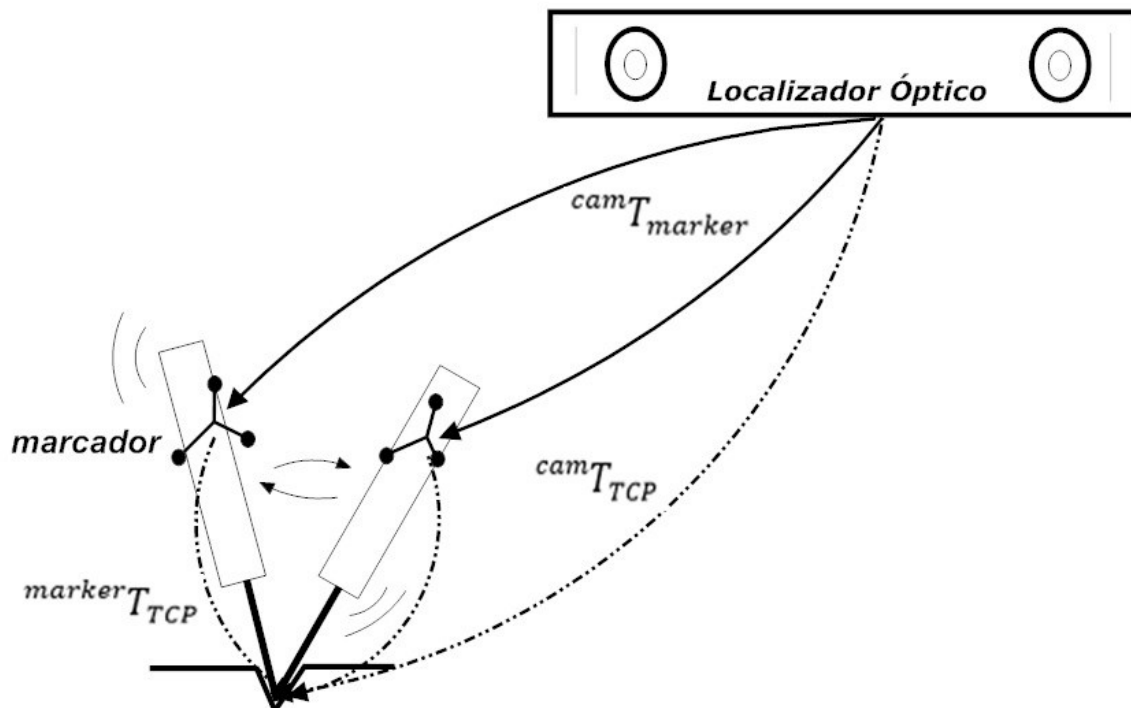
El pivoteo es una técnica relativamente fácil de implementar, sin embargo el éxito de su ejecución depende también de la habilidad técnica de quien lo ejecute. La ventaja de este método es que solo necesita del localizador óptico, la herramienta y un divot. Este método se ejecuta de la siguiente manera: con el marcador montado sobre la herramienta, se coloca la punta de la misma en un orificio que sirve para fijarla, este orificio se denomina *divot*, todo ello dentro del rango de visión de la cámara con lo cual se localiza la posición del DRF. La precisión de este método se basa en la captura de múltiples frames del marcador de la herramienta. Cada frame arroja diferentes datos de rotación y posición.

Para la obtención de estos datos, la punta de la herramienta debe permanecer fija en el divot mientras la parte superior se manipula con movimientos diversos aleatoriamente, el divot puede ser un agujero lo suficientemente pequeño para permitir a la punta permanecer en un punto constante mientras se mueve la parte superior de la herramienta y junto con ella el DRF. Estos movimientos son necesarios para permitir a la cámara tomar medidas desde diversas perspectivas, la información extraída en estas mediciones mediante programación incluye datos de matrices de rotación, ángulo y posición de cada uno de los frames capturados con un tiempo de *refresco* de 30 Hz. Cada una de estas mediciones es diferente a la anterior, ya que al mover un poco la herramienta, los datos de las matrices varían significativamente.

Existen variables que causan la obtención de falsos positivos en las matrices extraídas durante el proceso de pivoteo, sin embargo, mediante la programación de filtros de acuerdo a cada variable, es posible descartar este tipo de datos ocasionados por *refresco* de buffer o identificación precisa del orden de fiduciales en la geometría del marcador para su correcta localización.

El proceso de adquisición de medidas se repite hasta obtener miles de mediciones las cuales integrarán una sola matriz de dimensiones $n \times 4$. Con n múltiplo de cuatro para mantener la cuadratura de la matriz. En esta parte cabe mencionar que debido a tiempos de ejecución dispares a tiempos de adquisición, el programa entregaba matrices incompletas al principio del desarrollo. En esta matriz se guardan tantas mediciones de posición del DRF como frames se hayan adquirido. La Figura 3.15 ilustra la forma en la cual la herramienta debe ser desplazada únicamente de la parte superior mientras la punta permanece fija en el divot, al mismo tiempo en que la cámara se encarga de medir las diferentes posiciones.

Figura 3.15. Procedimiento de calibración.



Procedimiento de calibración con sistemas de coordenadas y transformación de pivoteo. Las flechas continuas indican las transformaciones conocidas mientras que las flechas discontinuas representan las transformaciones desconocidas que se adquieren al concluir esta técnica.

El procedimiento de adquisición de datos continua mientras la persona que ejecuta la calibración debe llevar a cabo diferentes movimientos para capturar diversas mediciones, esto se repite hasta tener datos suficientes para obtener una calibración con un mínimo de error. Posterior a la adquisición de los datos, se ordenan de acuerdo a la ecuación 19.

$$\begin{bmatrix} {}^{Cam}\mathbf{R}(1)_{Marker} & | & \vdots \\ \vdots & | & -\mathbf{I} \\ {}^{Cam}\mathbf{R}(n)_{Marker} & | & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{Marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ - \\ {}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^{Cam}\mathbf{P}(1)_{Marker} \\ \vdots \\ -{}^{Cam}\mathbf{P}(n)_{Marker} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para este modelo en particular, n representa la cantidad de veces que se obtuvo una medición. ${}^{Cam}\mathbf{R}_{Marker}$ y ${}^{Marker}\mathbf{P}_{TCP}$ representan las matrices de rotación y posición respectivamente de cada una de las transformaciones medidas mediante programación y basadas en la información adquirida a través del localizador óptico, ${}^{cam}\mathbf{P}_{TCP}$ representa la posición de la punta de la herramienta que debe ser obtenida, I representa la matriz identidad necesaria también para que las dimensiones de las matrices coincidan a fin de lograr las operaciones correspondientes y encontrar la traslación. Una vez que todas las mediciones son adquiridas, se debe resolver la ecuación 19 para las matrices de posición del TCP ${}^{Marker}\mathbf{P}_{TCP}$ y ${}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP}$. Esta matriz resultante es un vector de dimensión 6x1 que contendrá la información de posición de la punta de la herramienta. Para este arreglo, las primeras tres filas representan las coordenadas x , y , y z del vector de posición del TCP respecto al DRF, y los tres valores restantes, son los valores x , y , y z del vector posición del TCP con respecto al marco de referencia situado en medio de los lentes de la estéreo-cámara. El resultado de la solución para las matrices de posición de la punta de la herramienta respecto a la cámara y al marco de referencia se muestra en la ecuación 20.

$$\begin{bmatrix} {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ {}^{cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} = [{}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}^t \cdot {}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}]^{-1} \cdot {}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}^t \cdot {}^{Cam}\mathbf{P}_{marker} \quad (20)$$

En la ecuación anterior ${}^{cam}\mathbf{P}_{marker}$ y ${}^{cam}\mathbb{R}_{marker}$ representan todas las transformaciones de posición y rotación respectivamente medidas durante el proceso de pivoteo, mientras que del lado izquierdo, las matrices de posición adquiridas estarán dadas respecto a la punta de la herramienta, siendo ${}^{marker}\mathbf{P}_{TCP}$ La posición espacial de la punta de la herramienta respecto al marco de referencia dinámico y ${}^{cam}\mathbf{P}_{TCP}$ la posición espacial de la punta de la herramienta respecto al eje de coordenadas de la cámara.

Esta técnica de calibración permite a su vez que si se adapta el marcador a una herramienta con una punta más prolongada, o si se toma un punto de referencia diferente, igualmente el vector de posición arrojará los datos correctos para cada

procedimiento de calibración ejecutado. No es el caso, para cuando se ha realizado la calibración y se pretende realizar una adaptación diferente de marcador o herramienta o si la cámara ha sido movida una vez terminado el procedimiento. En cuyo caso la calibración debe ser ejecutada nuevamente.

3.8 Estimación del Error de Calibración.

Cuando se completa el proceso de calibración, el vector de posición entrega los valores x , y , y z del TCP con respecto al localizador óptico, asimismo permite conocer la posición del TCP respecto al DRF. Sin embargo, la precisión de esta medición debe ser puesta a prueba calculando su error, el método utilizado es la sustitución de los datos adquiridos en la ecuación 21 de mínimos cuadrados.

$$e_{rms}(\text{marker}\mathbf{P}_{TCP}) = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\text{Cam}\mathbb{R}_{\text{marker}} \begin{bmatrix} \text{marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ \text{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} - \text{Cam}\mathbb{P}_{\text{marker}} \right]^2} \quad (21)$$

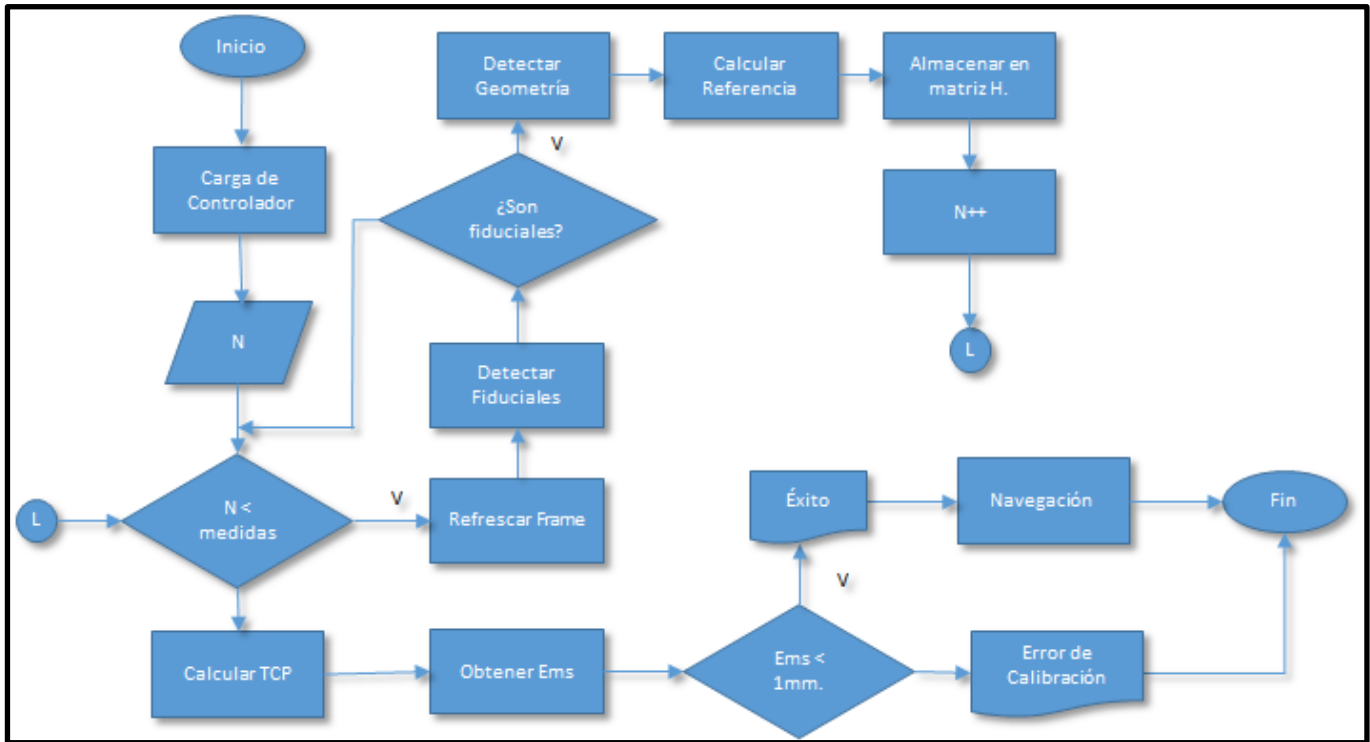
En la ecuación 21, e_{rms} representa el cálculo del error existente del valor real de transformación del TCP al DRF con el valor obtenido a partir de la calibración. Esta metodología permite minimizar la suma de residuos entre los datos medidos con el localizador y los correspondientes al valor real (Abdi, 2003).

3.9 Programa de Navegación.

La programación desarrollada consiste en un algoritmo de adquisición y procesamiento de información. El procedimiento de adquisición de información se llevó a cabo mediante las librerías del localizador óptico. Una vez adquiridos estos datos son exportados a archivos de texto para su procesamiento en Matlab. Debido a la cantidad y la estructura matricial de los datos se vuelve más conveniente trabajarlos sobre dicha plataforma que seguir hacerlo en C++, si bien es un lenguaje poderoso y capaz de trabajar con las matrices, los cálculos matemáticos de Matlab son aún más precisos.

La estructura del código realizado en ambas plataformas corresponde al diagrama de flujo ilustrado en la Figura 3.16.

Figura 3.16. Diagrama de flujo de calibración y navegación.



El diagrama de navegación es explicado paso a paso a continuación.

El inicio del controlador del localizador óptico se debe de tener en cuenta especialmente cuando existen otras aplicaciones que puedan estar utilizándolo. Ya que la cámara hasta el momento no es capaz de reproducir imágenes de dos aplicaciones diferentes con los controladores entregados por el fabricante.

El segundo paso en el programa es la introducción de la cantidad de mediciones deseada. Esto es para realizar la captura de tantas mediciones como se especifiquen desde un principio y se pueda encontrar un fin al ciclo de captura de datos necesarios para la realización de la calibración. Esta característica puede o no estar disponible también en el procedimiento de la navegación, aunque por lo general se detiene el programa de navegación al considerar que se han obtenido suficientes mediciones para cumplir con un objetivo específico.

El refresco del frame se lleva a cabo dentro del ciclo de adquisición de datos y este es el que permite obtener la captura de diversos datos de acuerdo al posicionamiento de las referencias. Si no existiera este paso, el programa se ciclaría de tal manera que siempre estaría almacenando los datos de la posición inicial del marcador. Asimismo, la función desarrollada para este paso, se encarga de realizar la extracción y almacenamiento de las medidas adquiridas en cada refresco de imagen, este proceso se realiza mediante la exportación de archivos de texto que contienen las transformaciones de cada uno de los refrescos de la imagen para la posición de los objetivos de referencia.

La detección de los fiduciales se logró mediante una función adquirida junto con el kit de desarrollo del localizador óptico. Esto se lleva a cabo mediante la extracción de la probabilidad de que un brillo detectado corresponda o no al del polímero que conforma el material reflejante de los fiduciales.

Como la distancia entre centroides de los fiduciales varía de acuerdo a la posición del marcador, la identificación de los fiduciales se realizó mediante parámetros de distancia entre los bordes, de tal manera que la distancia entre AB y BC no debe ser la misma para evitar conflictos. Este problema se corrigió mediante la impresión de un segundo marcador con fiduciales distribuidos de forma asimétrica. En cada refresco de imagen, el programa puede asignar identificadores arbitrariamente, por ello no es posible aplicar la matemática para la adquisición de un patrón de referencia sin asegurarse de que cada fiducial sea asignado con el mismo identificador que adquirió desde el inicio del programa.

Es necesario dar de alta las medidas aproximadas de los fiduciales en ambos marcadores en el programa, de esta forma se puede identificar desde el inicio el marcador que se está localizando.

Al concretar el ciclo los datos obtenidos se utilizan para aplicar la matemática asociada al proceso de calibración, como se tratan de matrices grandes, se utiliza Matlab para la determinación de los valores definitivos.

Si el error es menor a 1 mm. Entonces el procedimiento de calibración ha sido exitoso, de no ser así, el programa arrojará un mensaje de error y será necesaria la recalibración de la herramienta.

Una vez concluido el proceso de calibración se procede a realizar la navegación. Este proceso puede realizarse con varios fines. Los datos adquiridos en este paso, se utilizan para graficar la trayectoria de la punta de la herramienta, de esta manera se pone a prueba la precisión del sistema.

4. RESULTADOS GENERALES

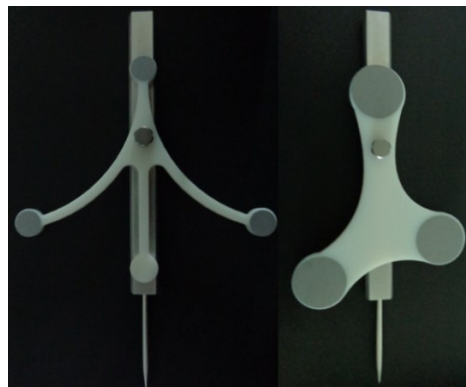
Además de los datos adquiridos experimentalmente, también se obtuvieron resultados tangibles, tales como la construcción de la herramienta apuntadora y los marcadores impresos.

Primeramente, se construyó un apuntador de aluminio para poner a prueba el desempeño de los marcadores con fiduciales de discos reflejantes. Esta herramienta puede ser utilizada para diversas aplicaciones, tales como: registro, digitalización de objetos, etc. Fue construida en con aluminio debido a que es un material rígido, fácil de maquinar y no es muy costoso.

4.1 Resultados para navegación con fiduciales planos.

Se diseñaron y construyeron dos marcadores para dos tamaños diferentes de discos fiduciales, el primero, con fiduciales de 13mm. de diámetro y el segundo con fiduciales de 25 mm de diámetro, de esta manera se pueden poner a prueba a fin de decidir cuál brinda un mejor desempeño. Una vez que el diseño CAD estuvo terminado, los marcadores fueron impresos con una impresora 3D en material lo suficientemente rígido de polímero opaco para evitar que los reflejos afectaran al localizador al momento de llevar a cabo la calibración o la navegación en sí. Los fiduciales fueron colocados cuidadosamente en las superficies de los extremos de la estructura de los marcadores. El ensamble final se muestra en la Figura 4.1.

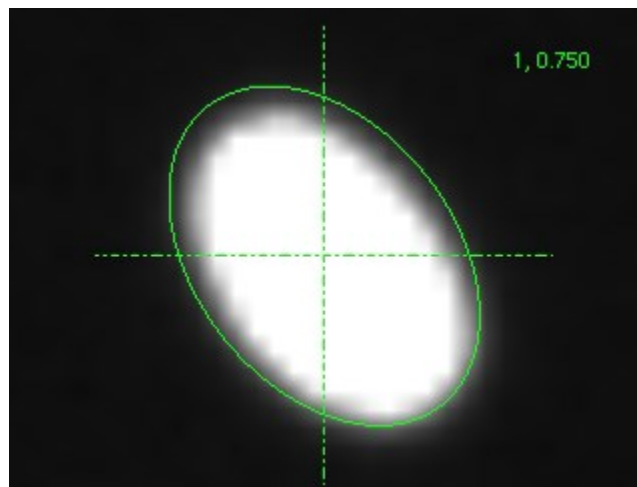
Figura 4.1. Ensamble de herramienta y marcadores construidos.



Marcadores construidos unidos a la herramienta apuntadora con fiduciales de 13 y 25 mm de diámetro de izquierda a derecha.

El proceso de calibración fue ejecutado utilizando el estéreo-localizador InfiniTrack (Atracsys LLC, Lausame, Switzerland), Esta cámara es un sistema óptico de segunda generación, capaz de emitir luz infrarroja y reflejarla en los fiduciales de los marcadores. A comparación de otros localizadores ópticos de este tipo, los cuales solo pueden detectar fiduciales esféricos, está cámara es capaz de rastrear los fiduciales pasivos planos que conforman los marcadores fabricados. Este proceso se ilustra a mayor detalle en la Figura 4.2.

Figura 4.2. Detección del centroide de un fiducial esférico.



El localizador óptico detecta los centroides de los fiduciales que se encuentren dentro de su rango de visión. El centroide será el punto de referencia en el espacio respecto a la cámara para realizar otro tipo de cálculo u obtener un marco de referencia central de tres o más fiduciales en un marcador. Este procedimiento es el mismo que se utiliza para calcular los centroides de los fiduciales planos adhesivos.

Las librerías de C++ que entrega el fabricante del localizador óptico InfiniTrack proporcionan un módulo con marcadores de disco como opción adicional para detectar discos reflejantes con precisión sub-milimétrica. Estos fiduciales pueden ser adheridos en una superficie plana, o bien, pueden pegarse sobre tejido suave. Debido a su capacidad adhesiva, y sus propiedades reflejantes fue posible su incorporación a las geometrías de marcadores construidos.

Una vez que la calibración se ha realizado exitosamente, podemos utilizar el vector de posición obtenido para calcular la posición del TCP con respecto al localizador óptico, utilizando la ecuación 22:

$${}^{cam}\mathbf{P}_{TCP} = {}^{cam}\mathbf{T}_{marker} \cdot {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \quad (22)$$

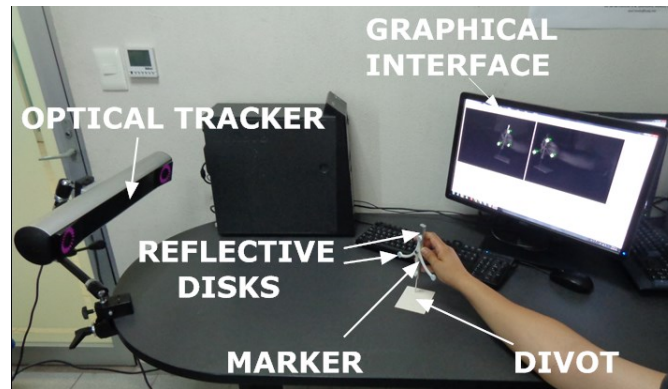
En este caso, la mayor desventaja es que solo se obtiene como resultado la posición del TCP respecto al localizador óptico imposibilitando la obtención de la matriz de rotación. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones, solo es necesaria la posición del TCP.

Es importante agregar que el proceso de calibración debe ser ejecutado de vez en cuando dependiendo del tiempo de uso o al menos una vez antes de comenzar con la aplicación de la navegación, para asegurar que no se pierda precisión. Esto último debido a que las herramientas pueden estar sujetas a deformación en consecuencia al estrés que sean sometidos, o a la manipulación mecánica. El proceso de calibración debe ser ejecutado nuevamente también en caso de que el localizador haya sido movido accidentalmente o en caso de que no se haya logrado mantener fijo el TCP al momento de la ejecución de la calibración misma.

En comparación con los fiduciales esféricos, los de discos planos pueden salirse fácilmente del rango de visibilidad de la cámara cuando el ángulo de pivoteo es muy estrecho. Por lo que su utilidad es más fiable en una superficie inmóvil que como DRF's, sin embargo son detectables mediante funciones del localizador que arroja un porcentaje de detección de fiducial. Esta función es útil para discriminar datos de brillos que no corresponden a fiduciales, y ayuda a disminuir la obtención de falsos positivos. Para el presente trabajo, solo se consideraron mediciones de reflejos cuyo porcentaje alcanzaba un rango mayor al 50%. Posterior a ser tomado en cuenta, los vectores de rotación e_x , e_y and e_z se calculan utilizando las ecuaciones de la 3 a la 11 y con esta información una sola pose puede ser medida. Mientras que en el procedimiento de calibración por pivoteo se adquirieron 3000 diferentes poses para realizar el cálculo de la matriz de posición ${}^{marker}\mathbf{P}_{TCP}$. En la Figura 4.3

se ilustra este procedimiento y los componentes principales que se construyeron y los adicionales necesarios para realizar la calibración y la adquisición de datos.

Figura 4.3. Configuración para calibración.



Se muestran los componentes principales del sistema de navegación durante el procedimiento de calibración de la herramienta.

La punta de la herramienta debe permanecer fija sobre el divot mientras que se requieren movimientos por parte del practicante que varíen la posición del DRF sin despegar la punta. En caso de que la punta se mueva, será necesaria la recalibración de la herramienta. La interface muestra la posición del marcador y los fiduciales y el programa arroja las medidas necesarias para la aplicación de la matemática.

Utilizando la ecuación 13, se realizó el cómputo del error, el cual representa la variación posible en referencia a la posición real del TCP. Una vez realizada la calibración se obtuvo un error de 0.25mm para el marcador de 13 mm de diámetro, mientras que para el marcador de 25mm. Se obtuvo un resultado de 0.19mm como error mínimo obtenido de tres mil mediciones en diferentes calibraciones realizadas. Estos resultados se ilustran en la Tabla 4.1.

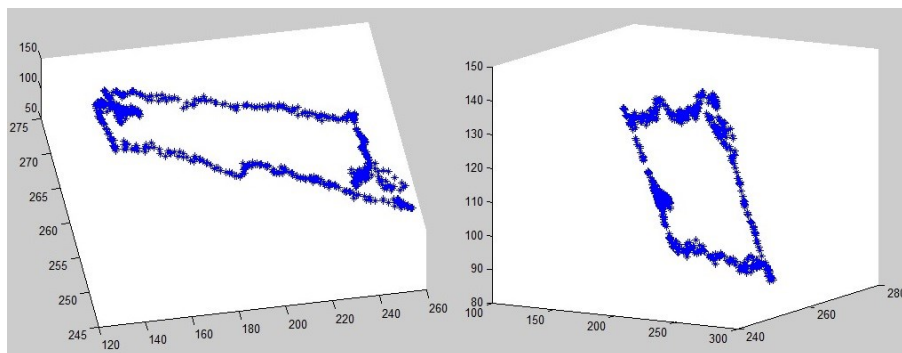
Tabla 4.1. Errores de calibración de marcadores construidos.

Marcador con fiduciales de 25 mm.	Marcador con fiduciales de 13mm.
e_{rms}	e_{rms}
0.19 mm	0.25 mm

Se puede apreciar que mientras más grande sea la circunferencia el error disminuye.

La precisión adquirida fue puesta a prueba mediante la reconstrucción de objetos físicos. Esto se llevó a cabo con una superficie rectangular. Recorriendo con la punta de la herramienta durante la adquisición de mediciones se adquieren las matrices correspondientes a las posiciones en cada instante de tiempo, estos vectores de posiciones son coordenadas tridimensionales que pueden ser graficadas, obteniendo así la reconstrucción del objeto físico en un plano virtual. Estos puntos consecutivos, ilustran la trayectoria de la punta de la herramienta durante la navegación y son mostrados en la Figura 4.4.

Figura 4.4. Reconstrucción de un objeto mediante navegación.



Reconstrucción de la superficie de una caja mediante la obtención de su posición con el localizador óptico y la herramienta apuntadora construida con marco de referencia adjunto y calibrado.

Se puede apreciar que la reconstrucción no es una gráfica exactamente igual al modelo físico real, esto es debido a variables adicionales, tales como: variación de pulso al momento de recorrer la superficie del sólido o bien, la distancia del TCP al localizador.

4.2 Resultados con Fiduciales Esféricos.

Utilizando marcadores pasivos de fiduciales esféricos, se llevó a cabo la reconstrucción virtual del mismo objeto físico, mediante la detección de la posición del TCP en cada frame, extrayendo sus transformaciones espaciales y graficando sus posiciones de cada uno.

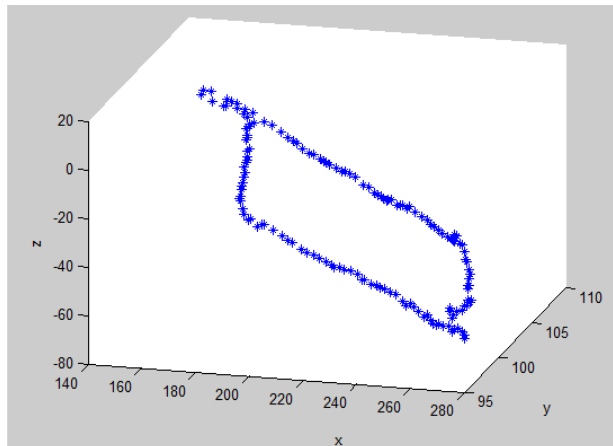
Para esta prueba, se agregó al sistema, un segundo marco de referencia durante el proceso de navegación. Debido a este ajuste, fue necesaria la obtención de la matriz de transformación primeramente de la cámara al nuevo marcador de referencia ${}^{Cam}\mathbf{T}_{REF}$, como ${}^{Cam}\mathbf{T}_{Marker}$ y ${}^{Marker}\mathbf{P}_{TCP}$ son matrices conocidas por los métodos de rastreo óptico y calibración respectivamente, entonces la posición de la punta respecto al marcador de referencia se puede obtener al invertir la transformación desde la cámara hacia el marcador de referencia y multiplicarla como se muestra en la ecuación 23.

$${}^{REF}\mathbf{P}_{TCP} = {}^{REF}\mathbf{T}_{Cam} \cdot {}^{Cam}\mathbf{T}_{Marker} \cdot {}^{Marker}\mathbf{P}_{TCP} \quad (23)$$

Del lado izquierdo del modelo anterior se observa que es posible obtener la transformación del marco de referencia fijo hacia el DRF, además el producto de la transformación desde la cámara hacia el marco de referencia incluido en el modelo permite utilizarlo para el cálculo de una transformación más corta en distancia que si se calculara únicamente ${}^{Cam}\mathbf{T}_{Marker}$.

La implementación de un segundo marco de referencia (REF) al sistema de navegación permite realizar el rastreo del TCP desde una distancia más corta, esto ayuda a reducir considerablemente el error en los datos de posición, ya que la transformación calculada es considerablemente menor desde el DRF al REF que del DRF al localizador óptico. Esta precisión se ve reflejada en la Figura 4.5, donde se muestra la reconstrucción del mismo objeto utilizando el REF. Cabe destacar que el REF implementado para esta segunda experimentación, debe permanecer completamente fijo a fin de no obtener falsos positivos producidos por un eventual desplazamiento del mismo respecto a la herramienta.

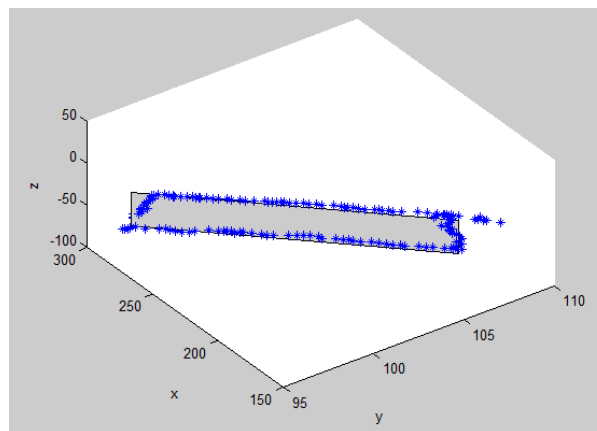
Figura 4.5. Reconstrucción de un sólido utilizando un segundo marco de referencia.



Se muestra cada uno de los puntos capturados en un proceso de navegación de 12000 puntos. Con un marco de referencia REF adicional al marcador montado en la herramienta.

Se puede observar que la reconstrucción de la trayectoria de la punta de la herramienta incrementa considerablemente su precisión. Estos datos son comparados con los valores de la superficie del objeto real. Y su resultado se puede observar en la Figura 4.6.

Figura 4.6. Comparación de reconstrucción con valor real del sólido.



El rectángulo gris de la gráfica representa la superficie plana del objeto que ha sido trazado, mientras que los puntos representan la trayectoria de la punta de la herramienta durante la navegación.

Para poner a prueba los resultados obtenidos, se traza una recta que va desde un vértice hasta otro. Esta recta representa la superficie real del objeto sólido. Por ello es la mejor referencia que existe a partir del plano real, así se puede calcular

el error existente entre los datos obtenidos en la navegación al trazar la pieza y la posición real del sólido. Para ello se utiliza la metodología del cálculo de la distancia de un punto a una recta descrito en la ecuación 24.

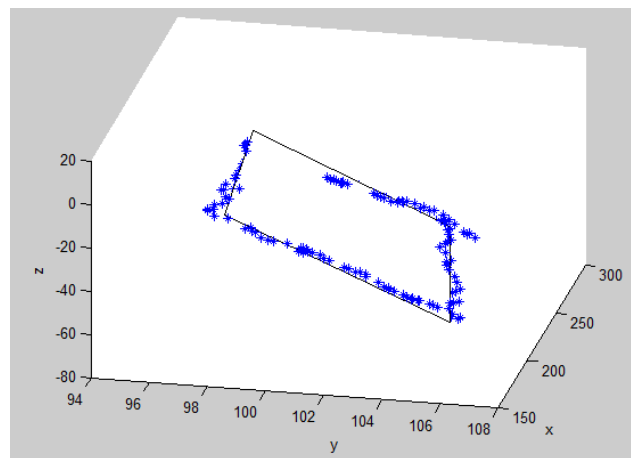
$$d(P, r) = \frac{A \cdot p_1 + B \cdot p_2 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (24)$$

Donde p_1 representa la ordenada al origen y p_2 la abscisa. Siendo A, B y C, los coeficientes de la ecuación de dicha recta para x,y, z respectivamente.

El trazado de los puntos de referencia de las esquinas del rectángulo se hace mediante la captura de la posición de la punta de la herramienta cuando esta toca el vértice deseado. A partir de la obtención de las 4 coordenadas espaciales de los vértices se pueden determinar las rectas que pasan por esos puntos en dos dimensiones.

En la Figura 4.7 se ilustra el polígono resultante de esta regresión y la comparativa con los datos medidos en la navegación.

Figura 4.7. Regresión lineal aplicada a los datos obtenidos.



La línea continua representa el resultado de la aproximación lineal a los datos obtenidos representados por los puntos azules.

El resultado del error obtenido a partir de estos datos fue de 0.19 mm.

5. CONCLUSIONES.

5.1 Sensor de Profundidad.

Basados en la investigación realizada en la literatura actual, y en que un navegador con fines quirúrgicos debe trabajar a con precisión sum-milimétrica y además en los resultados obtenidos en la reconstrucción de las imágenes con los datos de posición y profundidad obtenidos por el sensor de profundidad, se puede concluir que no es factible su implementación como sistema de navegación con fines quirúrgicos. Sin embargo es una buena opción para aplicaciones menos cruciales como mediciones de profundidad a menor escala.

5.2 Marcadores planos.

La precisión obtenida en el desarrollo de marcadores que utilizan discos reflejantes en lugar de esferas, fue bastante similar a los niveles de precisión que se manejan con los fiduciales esféricos, sin embargo, los fiduciales esféricos tienen un mejor comportamiento ya que el ángulo de los marcadores, en relación a la cámara, no se encuentra limitado tal como se produce en la navegación con los fiduciales de discos reflejantes. Sin embargo, el desarrollo de marcadores con *stickers* demostró ser un prototipo de opción rápida, de bajo costo y con precisión suficiente. Se puede afirmar que este tipo de marcadores son una buena opción cuando se debe de trabajar con una aplicación no comprometida en un determinado momento en el que la cámara dejase de rastrear la herramienta a causa de ángulos críticos. En la digitalización de objetos o en metrología, no debe representar un problema.

Adicionalmente, como se trata de una opción que representa un prototipo rápido y económico, estos marcadores pueden ser utilizados como parte de marcadores más complejos para navegación sobre anatomía o rastreo de objetos.

5.3 Marcadores de Fiduciales Esféricos.

Respecto a marcadores esféricos se confirmó la precisión sub-milimétrica con la que, en conjunto con localizadores ópticos, son capaces de trabajar. Estos

eran los resultados esperados, ya que es esta tecnología la mayormente utilizada actualmente en aplicaciones médicas.

5.4 Trabajo a Futuro.

Entre las tareas principales complementarias a esta investigación cabe hacer mención de: Pruebas de desempeño de mono-cámaras, Pruebas de desempeño de los marcadores de alto contraste con mono y estéreo-cámaras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, H., M. Lewis-Beck, A. Bryman, T. Futing, 2003, "Least-squares", Eds. Encyclopedia for research methods for the social sciences. Thousand Oaks CA. Sage. pp. 792-795.
- Bhatnagar, D. K. (1993). Position trackers for Head Mounted Display systems: A survey. *University of North Carolina, Chapel Hill TR93, 10*.
- Borenstein G. 2011 "Making Things See", O' R EILLY, Canadá, 1a Ed, ISBN: 978-1-449-30707-3 1317923969, 416 pp.
- Brainlab 2014 Airo.Mobile Intraoperative CT. IOR-BR-E-Airo-0612-Rev3.
- Buchholz, H., Bohnet, J., & Döllner, J. 2005. Smart navigation strategies for virtual landscapes. *Trends in Real-Time Visualization and Participation, Wichmann, Heidelberg*, 115-131.
- Bullo F. 1997. Tracking for Fully Actuated Mechanical Systems: A Geometric Framework. Control and Dynamical Systems. California Institute of Technology. Pasadena, CA. 91125, USA.
- Cash DM, Miga MI, Glasgow SC, Dawant BM, Clements LW, Cao Z, Galloway RL, Chapman WC 2007. Concepts and preliminary data toward the realization of image-guided liver surgery. *J Gastrointest Surg*, 11(7), 844–59.
- Claron Technology. 2012. "Some choices are simply BLACK and WHITE". Micron Tracker 3. Toronto, Canada. 8 pp.
- CL NUI, Plataforma estable de Code Laboratories para los dispositivos de Audio, Cámara y Motor NUI, 2011, <http://codelaboratories.com/nui>, última consulta 13 Marzo 2013.
- Corbasi. 1998. Sistemas de navegación desde el compás magnético hasta la navegación por satélite. S.A. McGraw-Holl ISBN: 9788448120573. Madrid España. 320 pp.
- Correa Farias, Christian; Garrido Izard, Miguel; Moya Gonzalez, Adolfo; Valero Ubierna, Constantino y Barreiro Elorza, Pilar (2013). *Comparación de desempeño de una cámara de profundidad comercial y un LIDAR en*

- explotaciones agrícolas*. En: "VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas.", 26/08/2013 - 29/08/2013, Madrid.
- Cruz L., Lucio D., Velho L., 2012, "Kinect and RGBD Images: Challenges and Applications", IMPA – VISGRAF Lab., Rio de Janeiro Brasil.
- D’Orazio T., Cicirelli G., 2012, "People re-identification and tracking from multiple cameras: A review", Institute of Intelligent Systems for Automation – C. N. R., Via Amendola 122/D-I, 70126, Bari Italy, 4 pp.
- De León A., 2012, "Metodología para la calibración de herramientas devastadoras de material con un sistema de navegación óptico", Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Informática, Tesis. Ingeniería en Computación. 24 p.
- FAST, 2013 "Middleware para facilitar la integración del control mediante el cuerpo en juegos y aplicaciones de realidad virtual", <http://projects.ict.usc.edu/mxr/faast/>, última visita 13 Marzo 2013.
- Galna B. Barrya G, Jacksonb D, Mhiripiria D, Olivierb P, Rochestera L. 2014. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease. *Gait & Posture* Volume 39. Issue 4. April 2014. Pages 1062–1068. Institute for Ageing and Health, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, United Kingdom Culture Lab, School of Computing Science, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, United Kingdom.
- Herda, L., Fua, P., Plänkers, R., Boulic, R., & Thalmann, D. (2001). Using skeleton-based tracking to increase the reliability of optical motion capture. *Human movement science*, 20(3), 313-341.
- Hernández D., Suárez A., Pérez D., García M., Barrera J., 2003, "Cirugía asistida con ordenador en las artroplastias de rodilla. Estudio prospectivo", *Rev. Ortop Traumatol* 2003,47:328-335, Departamento de Cirugía. Facultad de Medicina. Oviedo. Hospital San Agustín (Asociado a la Universidad de Oviedo), Avilés, España.
- Khoshelham, K., Elberink, S.O. 2012. "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications". *Sensors* 2012, 12, 1437-1454.
- Khoshelham K. 2011. ACCURACY ANALYSIS OF KINECT DEPTH DATA. ITC Faculty of Geo-information Science and Earth Observation, University of

- Twente. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, 2011 ISPRS Calgary 2011 Workshop, 29-31 August 2011, Calgary, Canada
- Kongsberg 2006. Acoustic Tracking System. Sonar Type 2059. 11 The Brairs Waterberry Drive Waterlooville Hants PO7 7YH. Kongsberg Maritime LTD. Publication Ref: KS2059
- Krücker J, Xu S, Glossop N, Viswanathan A, Borgert J, Schulz H, Wood B, 2007. Electromagnetic Tracking for Thermal Ablation and Biopsy Guidance: Clinical Evaluation of Spatial Accuracy. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* Volume 18, Issue 9, September 2007, Pages 1141–1150. SIR. National Institutes of Health Clinical Center, Development Agreement between the National Institutes of Health and Philips Medical Systems. Published by Elsevier Inc.
- Kurt S, Schramm A, Gellrich N. 2001 La navegación quirúrgica en el campo de la cirugía craneofacial: una revisión y evaluación de la tecnología y sus aplicaciones prácticas. *Cirugía Plástica* Vol. 11. Núm 3. Septiembre-Diciembre 2001. pp. 131-142. 2001; 11(3):131-142
- Lucas MC. 1990 Spawning activity of male and female pike, *Esox Lucius L.*, determined by acoustic tracking. Department of Zoology, University of Aberdeen, Tillydrone Avenue, Aberdeen AB9 2TN, Scotland, October.
- Marion, Jerry B. 1996. *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*. Barcelona: Ed. Reverté. ISBN 84-291-4094-8.
- Martínez M. 2011. “Monitorización del cuerpo humano en 3D mediante tecnología Kinect”, Ministerio de Ciencia e Innovación. TIN2010-20529. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática de la Universidad de Valladolid. España.
- Martínez V. Francisco M. Pujol R. Capilla P., 2003, “Characterization of a digital camera as an absolute tristimulus colorimeter”, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 47, No. 4 (July-Aug), ISSN 1062-3701, pp. 279-295
- Microsoft, 2012, www.xbox.com/kinect/ (última consulta: 10/08/2012)

- Montserrat C., Alcañiz M., Meier U., Poza J., Lizandra J., Grau V., 1999, “Simulador para el entrenamiento en cirugías avanzadas”, Universidad Politecnica de Valencia, España, 10 pp.
- Nagel M, Schmidt G, Petzold R, KalenderWA 2005. A navigation system for minimally invasive CT-guided interventions. Ed. Springer, pp. 33-40.
- National Instruments. 2012. “What is an RGB Camera?”. Document ID: 129AKPQQ: URL:”
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/46BE3912D75112C58625652C005B8422> ”
Última actualización: 09/04/2012. Última Consulta: 24 Mayo 2013.
- Neukum, G., Jaumann, R., 2004, “HRSC: the High Resolution Stereo Camera of Mars Express”, In: Mars Express: the scientific payload, Ed. by Andrew Wilson, scientific coordination: Agustin Chicarro, ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands, ESA Publications Division, ISBN 92-9092-556-6, 2004, p. 17 - 35
- NITE, 2013. “Infraestructura algorítmica para la identificación de usuarios, detección de características y reconocimiento de gestos”,
<http://www.primesense.com/?p=515>, última visita 13 Marzo 2013.
- Northern Digital Inc. Corporate website. <http://www.ndigital.com/medical/technology/opticalactpass.php>. Última consulta: 1 de Enero del 2015.
- Obdrzálék S1, Kurillo G, Ofli F, Bajcsy R, Seto E, Jimison H, Pavel M. 2012. Accuracy and Robustness of Kinect Pose Estimation in the Context of Coaching of Elderly Population. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2012;2012:1188-93. doi: 10.1109/EMBC.2012.6346149. PMID: 23366110.
- OpenKinect, Comunidad de gente interesada en hacer uso del hardware de Kinect en PCs y otros dispositivos, 2013, http://openkinect.org/wiki/Main_Page, última visita 13 Marzo 2013.
- OpenNI, Plataforma para promover la interoperabilidad entre dispositivos, aplicaciones y middleware de Interacción Natural (NI), www.openni.org, última visita 13 Marzo 2013.
- PHACON, 2013, Source web site: “<http://www.phacon-leipzig.de/index.php/en/simulation-and-products>”, Last view: 04 de March 2013.

- Rice, H., Mendelsohn, L., Aarons, R., & Mazzola, D. 2000. Next generation marine precision navigation system. In *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000* (pp. 200-206). IEEE.
- Satava RM, Gallagher AG, Pellegrini CA, 2003, "Surgical competence and surgical proficiency: definitions, taxonomy, and metrics", *J Am Coll Surg.* 2003, 196:933–937.
- Stiehl J. B., Konermann W. H., Haaker R. G., DiGioia 2007. Navigation and MIS in Orthopedic Surgery, Ed. Springer, pp. 3-5.
- Sturman, D. J. (1994). A brief history of motion capture for computer character animation. *SIGGRAPH 94, Character Motion Systems, Course notes, 1.*
- Sutherland, L. M. Middleton PF, Anthony A, Hamdorf J, Cregan P, Scott D, Maddern GJ. 2006 "Surgical Simulation: A Systematic Review", *Annals of Surgery*, Volume 243, Number 3, March
- Treiber M. 2010 "An Introduction to Object Recognition: Selected Algorithms for a Wide Variety of Applications", Springer, U.K., 1ª Edición,
- Vahala, E., Ylihautala, M., Tuominen, J., Schiffbauer, H., Katisko, J., Yrjänä, S., ... & Koivukangas, J. (2001). Registration in interventional procedures with optical navigator. *Journal of magnetic resonance imaging*, 13(1), 93-98.
- Vega S., Tovar S., De León A., Vargas J., 2012, "Modelo electrónico como sistema de entrenamiento para cirugías en el lóbulo temporal en ORL", 11º Congreso Nacional de Mecatrónica, Villahermosa, Tabasco, México, Octubre 4 y 5, 4 pp.
- Verma D, Wills D, Verma M, 2003 Virtual reality simulator for vitreoretinal surgery, Department of Ophthalmology Hull Royal Infirmary Hull, UK, Department of Computer Science University of Hull, Hull, UK, *Eye* 17, 71–73. doi:10.1038/sj.eye.6700166, ISSN: 0950-222X/EISSN: 1476-5454© 2014 The Royal College of Ophthalmologists.
- Wang Y, Spangler C, Tai B, Shih A. 2013. Positional accuracy and transmitter orientation of the 3D electromagnetic tracking system. *Meas. Sci. Technol.* 24 105105. Measurement Science and Technology. IOP Publishing Ltd.
- Welch G., Foxlin E. 2002. "Motion Tracking: No Silver Bullet, but a Respectable Arsenal", *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 22(6), pp. 24-38

i. PUBLICACIONES

Design and Construction of Tools with Reflecting-disks Fiducials for Optical Stereo Trackers

An affordable technique for navigation tools development

Pérez-Arreguín Jorge Israel, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, Querétaro, México
israel_1985@live.com.mx

Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, Querétaro, México, caryoko@yahoo.com

Alvares-Servín Jorge, Instituto Tecnológico de Querétaro, Departamento de Ingeniería Industrial, Querétaro, México, joalservin@yahoo.com.mx

system [2] to locate vehicles around the world via satellite or even smaller but not less complex Tovar-Arriaga Saúl. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, Querétaro México
saul.tovar@uaq.mx

Vargas-Soto José Emilio, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, Querétaro, México, emilio@mecatronica.net

Vega-Hernández Susana, Instituto Tecnológico de Querétaro, Departamento de Ingeniería Electrónica, Querétaro, México, suvegah@gmail.com

Abstract — *In this article, a rapid prototyping tool design and construction for the development of tools for navigation optical systems is presented. These markers differentiate from commonly used ones because they use cheap reflective stickers as markers fiducials. We built markers with a 3D printer and tested two different sized circular reflective stickers with calibration errors bellow to 0.25 mm. The reflection angle of the sticker fiducials are their mayor problem. Nevertheless, the obtained calibration accuracy (quite similar to state of the art fiducials) could be a fast and cheap option to be used with non-risky applications, such as metrology or object digitalization in which the reflection loss due to critical angles is not an issue.*

Keywords— *Reflective-stickers fiducials, pivoting calibration, stereo-camera markers, optical trackers.*

I. INTRODUCTION

Navigation can be conceived as the process of provide position and measurement data of a specific object, like a robot, a car, a tool or any device that needs to be located. This drifts into different techniques to provide position information [1] and also accurate information. These systems have evolved into different application areas, such as the global position

applications like spatial tool positioning. Navigation systems are used via mapping applications to guide tools through possible paths to reach a target, these systems have progressed recently with the rapid advances in positioning communication, spatial data storage and processing technologies [3]. Computer systems are an important aid to complement navigation, thus the data processing algorithms became important to determine accurate measurements [4].

Accuracy is an important and desirable characteristic for most of the navigation systems. To satisfy this need mathematical techniques and algorithms have been developed [5][6]. A good example for accurate navigation system applications is the navigation in surgery. In this case the surgeon needs to know exactly the path he has to follow to avoid damage to health tissue [7].

There are navigation systems that work with different sensor technologies [8] like electromagnetic trackers [9], mechanical arms and

optical systems which include depth sensing [10] stereo and mono-cameras.

In this work we propose a strategy for the rapid prototyping of tools using reflective stickers as fiducials for the markers.

II. BACKGROUND

978-1-4799-6230-3/14/\$31.00 ©2014 IEEE

These are tracking devices that can have one or more cameras. They work in conjunction to others devices known as 'markers' which are pieces of particular materials or light emitters. These markers have the property to shine more than any other object inside the camera vision area allowing to capture their spatial position of different markers.

Unlike common cameras (only one camera embedded in a system), stereo-cameras provide better accuracy. There are more complex systems using more than two cameras but they are quite rare and expensive, and therefore out of the scope of this study. Table 1 provides a comparison about optical systems performance.

Feature/System	a) Monocular	b) Stereo	c) $n \geq 3$
Latency and refresh time	+++	+++	+++
Concurrency	++	++	+++
Work volume	+	++	+++
Impertinence	+	-	--
Complete System	+++	+++	+++
Accuracy	+	++	+++
Robust	+	++	+++
Cost	+	-	---

Tab. 1. Optical systems features according to their number of cameras used n . Plus signs indicate a good response, while minus signs indicate a lower referred feature performance.

There are three different types of stereo-cameras optical system that have been developed to perform tracking and recognition tasks, each one of them operating according to available resources, Fig. 1.

The first types of stereo cameras use IR emitter diodes which are attached to a reference frame. This light spot that can be easily detected by the tracker is normally referred as a fiducial and they are used as reference positions in a camera captured frame. The cameras locate of each of the fiducial position using triangulation based on pinhole camera models. With three or more of these positions it is possible to know the position and orientation of the frame.

In the second type of optical system, the tracker projects infrared light all over the area waiting to be reflected over a reflective surface.

For the third type neither the camera nor the marker has to emit any kind of light to perform the tracking, this is possible because the camera takes advantage from the environmental light. This light illuminates high contrast markers, which consist high contrast black and white configurations (like a chess board). Fig. 1 illustrates the three optical systems types available till now.

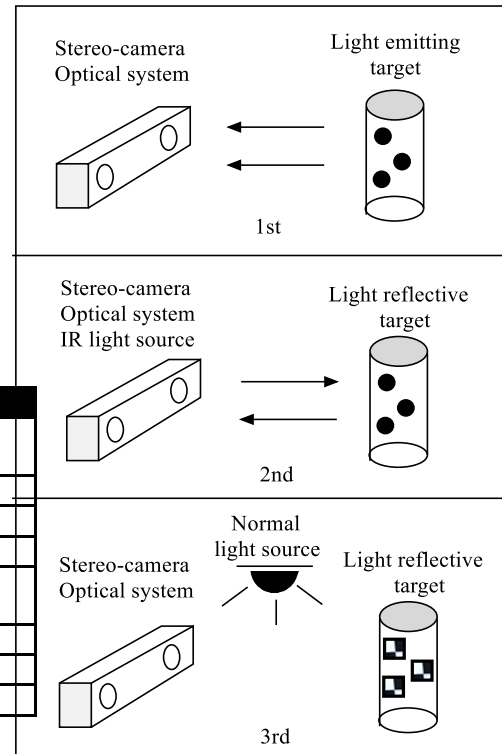


Fig. 1. How the three optical locator types detect different kinds of markers.

B. Markers

There are different kinds of markers that can be used depending of optical tracker type. Fig. 2 illustrates some of the actual markers technology used for surgical interventions.

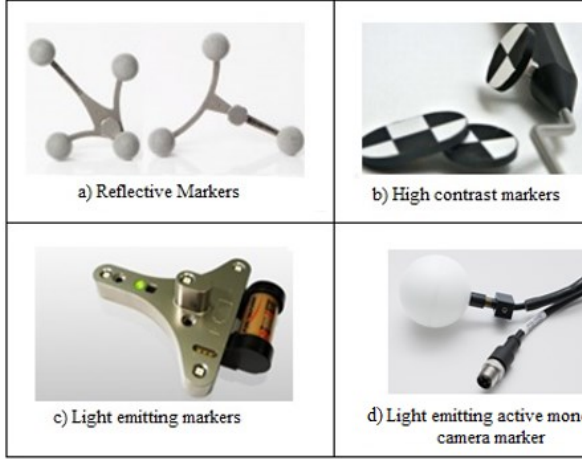


Fig. 2. Markers used by different kinds of optical localizers.

Fig. 2a shows a pair of passive markers usually used with second type optical trackers, they are passive because they don't emit any light, but they reflect back infrared light sent by the tracker.

In Fig. 2b, high contrast markers are shown, this markers are recognized with 3rd type optical trackers detecting the position where the high contrast is located, this point is called x point.

Fig. 2c. shows an active marker for 1st type optical trackers, it can be seen the LED's placed strategically to be tracked.

Finally Fig. 2d shows an active marker usually used with mono-cameras to determine position [11].

This paper is focused in the design and construction of markers capable to work with the 2nd type of optical trackers. These markers deploy stickers like disk fiducials, which is one innovation of the tracker system we are using and which evaluation has not yet been reported.

III. METHODOLOGY

In this section, the procedure to perform the tool conceptualization, design and construction is introduced. Fig. 3 summarizes the tasks to be done to achieve this goal.

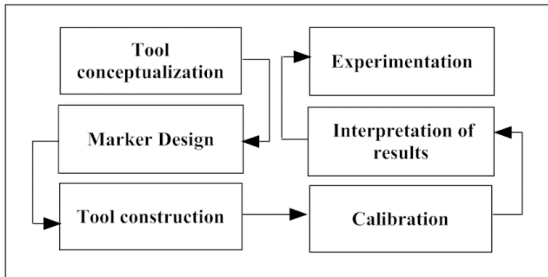


Fig. 3. Proposed strategy for marker design with reflective stickers. Minor typos solved in image

A. Tool conceptualization

First of all, it is necessary to select the tool that will be used depending on the application. There are many kinds of tools, various tips forms and materials, such as titanium, aluminum stainless steel, plastic, resin etc. The tool center point (TCP) could be the tip of tweezers, needles, milling tools, or any other sharp as can be seen in Fig. 4. The TCP is the part which usually directly interacts with the target object. For example, in surgery, this means that the tool will be interacting with delicate structures. That is why an accurate TCP calibration is crucial. Tools for surgery are usually made of biocompatible materials because they should not be subject to corrosion and must remain clean. In this case, a very good material to select is titanium (although very expensive).



Fig. 4. Different types of surgical tools tips.

B. Marker Design

As showed in previous section, there are several kinds of markers, being the formed by reflective fiducials the one used in for this work. The stereocamara only locates the position of these fiducials, but the main idea is to calculate the transformation (3DOF position y 3DOF orientation) between the tracker and the marker ${}^{cam}T_{marker}$ which is a transformation matrix that represents a translation and a rotation; this concept is shown in eq. 1:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

In this matrix 'R3x3' represents a rotation sub-matrix with a 3x3 dimension, 'p3x1' represents a position sub-matrix whit a 3x1 dimension, 'f1x3' represents the perspective values and finally 'w' which means to a scalar value to complete the square matrix.

While acquisition the camera measures the position of the fiducials that are attached to the marker. With three positions it is possible to calculate a transformation as follows.

$${}^{cam}T_{3P} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z & \mathbf{p}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

It can be read from the matrix above that the transformation from the cam to the 3 three point marker (3P) is obtained by the three unitary vectors \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y and \mathbf{e}_z the position vector 'p1', the perspective vector which in this case is zero and the scalar value "1". According to Fig. 5, these vectors are calculated as follows:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{e}_x = \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|} \quad (4)$$

$$\frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|} = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|} \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_x = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1|} \quad (6)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{e}_x \cdot (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1) \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_z = \frac{\mathbf{z}}{|\mathbf{z}|} \quad (8)$$

$$\frac{\mathbf{z}}{|\mathbf{z}|} = \mathbf{e}_x \cdot \frac{\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1}{|\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1|} \quad (9)$$

$$\mathbf{e}_y = \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{e}_x \quad (10)$$

$$\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_y \quad (11)$$

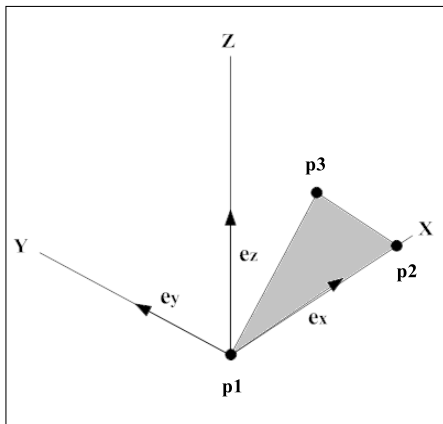


Fig. 5. Calculation of the reference frame by using three points positions.

The stereo-camera gives back each fiducial position which are then processed into a transformation homogenous matrix using the equations described above.

C. Tool construction

This step has to do with the construction of the tool. It can be done with a common CAD software. The machining is normally done with a CNC or a 3D printer with high resolution.

D. Calibration

In reality, the position of the marker is not valuable by itself. Instead, we are interested in the position of the TCP. Therefore, it is necessary to know beforehand the transformation from the marker coordinate system to the TCP. This procedure is normally known as calibration.

There are many ways to do it, some of them are next:

- Pivoting
- Calibration unit
- Direct measurement

Pivoting is a technique which is easy to implement but difficult to carry out by a user with no technical skills. The advantage of this method is that it only needs the tracker system and a divot.

i. Pivoting

Pivoting is the process where a marker mounted over a tool is placed in the camera viewing range, so the camera can capture the reference frame position. The tip of the tool must remain fixed in a divot while the top of the tool is being moved, this divot could be a little hole or any other structure that allows the tip to remain fixed. The movements in the top are necessary to allow the camera to take different measurements in different angles. Information about rotation, angle and position is extracted from each frame which usually is different of any other measurement done before, this feature can be also be filtered via programming.

When the information is being acquired the program saves in a file the homogenous matrix at least a thousand times to get an accurate estimation of the TCP position. Fig. 6 illustrates when the tool

is being moved and the camera is measuring some poses.

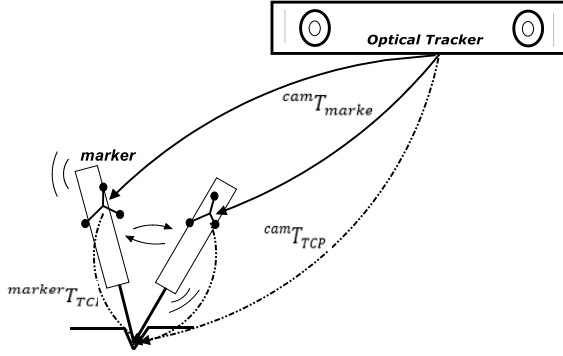


Fig. 6. Calibration with coordinate systems and transformations pivoting. Continuous arrows indicate known transformations while shaped ones represents the unknown transformations

The process of data acquisition continues while the performer is doing movements with the marker mounted in the tool until having enough data to get a minimum calibration error. Finally the pivoting is carried out with the acquired data applied to the following equations.

$$\begin{bmatrix} {}^{Cam}\mathbf{R}(1)_{Tool} & | & \vdots \\ \vdots & | & -\mathbf{I} \\ {}^{Cam}\mathbf{R}(n)_{Tool} & | & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{Tool}\mathbf{P}_{TCP} \\ - \\ {}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^{Cam}\mathbf{P}(1)_{Tool} \\ \vdots \\ -{}^{Cam}\mathbf{P}(n)_{Tool} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Where n is the measurement times, ${}^{Cam}\mathbf{R}(i)_{Tool}$ and ${}^{Cam}\mathbf{P}(i)_{Tool}$ are the rotation and translation tool matrix of a transformation measured by programming with the delivered data from the stereo-camera. ${}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP}$ is the position that has to be obtained. i represents the identity matrix needed to find the translation. Solving for the position matrix once the whole measurements have been done it can be obtained:

$$\begin{bmatrix} {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ {}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}^t \cdot {}^{Cam}\mathbb{R}_{marker} \\ {}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}^t \cdot {}^{Cam}\mathbb{P}_{marker} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ {}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Where ${}^{Cam}\mathbb{P}_{marker}$, ${}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}^t$ and ${}^{Cam}\mathbb{R}_{marker}$ represent all the measured transformations during the pivoting process.

ii. Error estimation

When the calibration process is completed the position matrix delivers the distance values for the x, y and z components, of the distance between the camera to the TCP and the marker to the TCP. However, the accuracy of this measurement has to be tested calculating its error via the next equation

$$e_{rms}({}^{marker}\mathbf{P}_{TCP}) = \sqrt{\frac{1}{N} \left[{}^{Cam}\mathbb{R}_{marker} \begin{bmatrix} {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \\ {}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP} \end{bmatrix} - {}^{Cam}\mathbb{P}_{marker} \right]^2} \quad (13)$$

Where e_{rms} represents the error in millimeters given by the previous model and N represents the number of measurement times.

iii. Calibration unit

A more direct way to do calibration is using a calibration unit with a before known geometry. A calibration unit should have a marker on it, and a point O on the surface should be marked. The distance from the marker axis to O should be known in advance. The calibration unit should be machined in a CNC or a 3D printer with high accuracy. It must be very well constructed so that the known distance ${}^{Cam}\mathbf{P}_{TCP}$ should be accurate enough. When the O point is touched with the TCP the relation

$${}^{Cam}\mathbf{T}_{marker} \cdot {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} = {}^{Cam}\mathbf{T}_{Cal} \cdot {}^{Cal}\mathbf{P}_O \quad (14)$$

It is obtained so the desired result can be derived as follows:

$${}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} = ({}^{Cam}\mathbf{T}_{marker})^{-1} \cdot {}^{Cam}\mathbf{T}_{Cal} \cdot {}^{Cal}\mathbf{P}_O \quad (15)$$

Using this method, the calibration error should be within the accuracy of the tracker.

• iv. Direct measurement

A third method is to measure the TCP position with a laser based measurement system or a very accurate mechanical arm. This option is not very used due to the need of the measurement device.

E. Interpretation of results

Once calibration is done, we can use the obtained position vector to calculate the position of the TCP in relation to the tracker as follows:

$${}^{cam}\mathbf{P}_{TCP} = {}^{cam}\mathbf{T}_{marker} \cdot {}^{marker}\mathbf{P}_{TCP} \quad (16)$$

Note that the biggest disadvantage of the presented methods is that they only give as a result the position of the TCP in relation to the tracker (the rotation matrix is not obtained). Nevertheless, for most applications only the TCP position is necessary.

It is important to add that the calibration process should be performed once in a while, depending of course, on the using time. The last is due to the fact that the tools a subject to deformation resulting from stress or mechanical wear.

F. Experimentation

For the experimentation step, it could be very helpful carry out the digitalization of objects or registration images with the tracker. Only then some possible error will be discarded.

G. Results

This section describes a practical example using the presented methodology. An aluminum pointer tool was constructed to test the performance of the markers with reflective stickers. This tool can be used for many applications like registration, digitalization of objects, etc. It was built out of aluminum because it is stiff, cheap and easy to machine. The tool can have different markers attached as it uses a screw to attach to it.

Two markers were designed for different circular-reflective stickers (13 mm and 25 mm) in order to test both types. Once the design was done with CAD software, the markers were built out with a 3D printer in a rigid opaque photo-polymer material which is hard enough for our purposes. The stickers were carefully placed on the fiducials surface designed for it. Fig. 8 shows the fiducial disk mounted over the 3D printed markers.

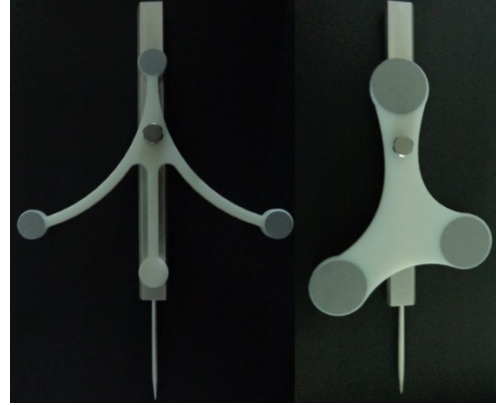


Fig. 8. Constructed markers attached to the tool pointer with 13 mm and 25 mm fiducials.

The calibration process was performed using an InfiniTrack stereo-camera (Atracsys LLC, Lausanne, Switzerland). This camera is a 2nd type optical system but, in comparison to other kind of these systems which only tracks spherical fiducials, it is also possible to track passive retro-reflective stickers, Fig. 10.

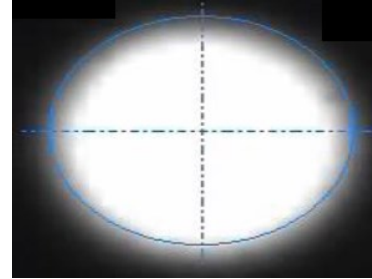


Fig. 10. The InfiniTrack libraries include a disk marker tracking module in option to detect reflective disks with high precision. These disks can be stuck on planar surface or glued on soft tissues. Costless compact markers can also be realized with reflective disks.

In comparison to spherical fiducials, planar sticker fiducials are easily out of sight when the pivoting angle is too narrow. The InfiniTrack camera gives a percent of certainty if the reflection detected is a fiducial. In order to filter undesired reflections, only certainty values bigger than 50 % the measurement are taking into account. Then, the rotational vectors e_x e_y and e_z are calculated using equations 3 to 11 and with this information one pose is measured. While pivoting 1000 different poses were acquired and the matrix ${}^{marker}\mathbf{P}_{TCP}$ was calculated.

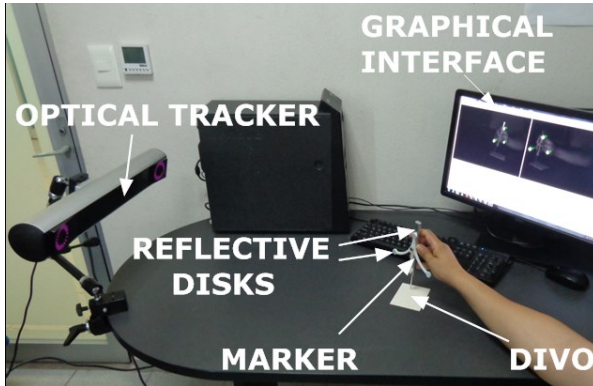


Fig. 9. Setup for the pivoting calibration method.

Using equation 13 the error was computed. It represents the possible mistake ratio referred to the real TCP position. For the marker with 13 mm fiducials the resulting error was of 0.25 mm (rms) and the marker with 25 mm fiducials was of 0.19 mm (rms), Table 2.

Maker with 25 mm fiducials	Maker with 13 mm fiducials
e_{rms}	e_{rms}
0.19 mm	0.25 mm

Table 2. RMS accuracy errors for the calibration of constructed tools.

H. Conclusions

The accuracy we got in the developing of markers using reflective stickers was quite similar to the accuracy levels using commonly used reflective spheres. Spherical fiducials have better performance because the angle of the markers in relation to the camera is not limited as it is with the reflective stickers. Nevertheless, the development of sticker markers proved to be a rapid prototyping option, cheap, and with a good accuracy. We can state that these kinds of markers are a very good option when we are dealing with an application which is not compromised when the camera stops tracking the tool due to critical angles. In digitalization of objects or metrology it should not be a problem.

In addition, as being a cheap and rapid prototyping option, these markers could be used for more complex markers for body tracking.

I. References

[1] Lunay F. Et. Al. "A Corridors Lights Based Navigation System Including Path Definition Using a Topologically Corrected Map For

Indoor Mobile Robots", Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on V. 4, ISBN: -7803-7272-7

[2] Petovello M. "Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation". Phd. Tesis, Calgary Alberta, April 2003, University of Calgary. Alberta Canadá.

[3] Schiller J. Voisard A. "Location -Based Services", Elsevier, 2004, ISBN: 1-55860-929-6, San Franciasco, U.S.A.

[4] Beller, S., Hünerbein, M., Lange, T., Eulenstein, S., Gebauer, B. and Schlag, P. M, "Image-guided surgery of liver metastases by three-dimensional ultrasound-based optoelectronic navigation". 2007, Br J Surg, 94: 866-875. doi: 10.1002/bjs.5712

[5] Syed Z F, et. Al. "A new mulyi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems", Measurement Science and Technology, May 2007, Department of Geomatics Engineering of Calgary, Canada. IOP Ltd. UK.

[6] Vcelák J. et. Al. "AMR navigation systems and methods of their calibration", February 2005, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement, Technická 2, 166 27 Praha 6, Czech Republic, Eurosensors XVIII 2004 - The 18th European conference on Solid-State Transducers.

[7] Casap N. et. Al. "Computerized Navigation for Surgery of the Lower Jaw: Comparison of 2 Navigation Systems", Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. Volume 66, Issue 7, July 2008, Pages 1467-1475.

[8] Leonart J, Durrant-Whyte. "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation", Massachusetts Institute of Technnology, University of Oxford Parks Road, United Kingdom. 184 pages

[9] Johann B Hummel, Michael R., Michael L., Kang Y, Calvin M., Wolfgang W. Birkfellner, Bergmann, Shahidi R. "Design and application of an assessment protocol for electromagnetic tracking systems", 2005 American Association of Physicists in Medicine, Medical Physics, The international Journal of Medical Physics Research and practice.

[10] Borenstein G. 2011 "Making Things See", O R EILLY, Canada, 1a Ed, ISBN: 978-1-449-30707-3 1317923969, 416 pages.

[11] Lange S., Protzel P., " Cost-Efficient Mono-Camera Tracking System for a Multirotor

UAV Aimed for Hardware-in-the-Loop Experiments”, 2012. 9th International Multi-conference on systems, signals and devices. Department of electrical engineering and information technology. Chemnitz University of Technology, 09126 Chemnitz Germany. 978-1-4673-1591-3/12/ IEEE.

- [12] Fischer Et al. “Optical System Design,” 2nd Ed., Mc Graw Hill, ISBN: 0-07-159358-6 809 pages, DOI: 10.1036/0071472487.