

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LOCALIZADOR ESPACIAL PARA CIRUGÍA

AUTOR: MAURICIO ANDRES BARRIOS BARRIOS

ASESOR: M. en I. OSCAR YÁÑEZ SUÁREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UAM- IZTAPALAPA

MEXICO D.F. - MEXICO

19 de julio de 2010

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES	13
2. MARCO REFERENCIAL	14
2.1. ESTADO DEL ARTE	14
2.2. MARCO TEÓRICO	16
2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN BISTURÍ DE UN CIRUJANO	16
2.2.2. SENSORES MEMS DE ACELEROMETRIA	17
2.2.2.1. Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)	19
2.2.2.2. Principio de un acelerómetro MEMS	19

2.2.2.3.	Herramienta de adquisición de aceleración ZS-TAR3	20
2.2.2.4.	Acelerómetro MMA7456L	22
2.2.3.	ERRORES Y CALIBRACIÓN DE LOS ACELEROMETROS	23
2.2.3.1.	Calibración	24
2.2.4.	SISTEMAS DE NAVEGACIÓN CON SENSORES INERCIALES	25
2.2.4.1.	Matriz de transformación	27
2.2.5.	FILTROS INTEGRADORES	31
3.	METODOLOGÍA	38
3.1.	DESARROLLO DEL PROYECTO	38
3.2.	MODELO DEL SISTEMA	39
3.3.	ACONDICIONAMIENTO	41
3.3.1.	CALIBRACIÓN	42
3.3.2.	FILTRO PASA BAJOS	44
3.4.	ESTIMACIÓN DE LOS GIROS DE LOS EJES DE NAVEGACIÓN	44
3.5.	DETECCIÓN DEL INICIO Y FINAL DEL MOVIMIENTO	46
3.6.	TRANSFORMACIÓN DE LOS EJES DE REFERENCIA A LOS EJES DE NAVEGACIÓN	47

3.7. ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DE VELOCIDAD	48
3.8. BLOQUES DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA	48
3.9. REPRODUCCIÓN DE LA TRAYECTORIA	49
3.10. EXPERIMENTOS	50
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	51
4.1. RESULTADOS DE LOS MOVIMIENTOS	51
4.2. EVALUACIÓN DEL MODELO	57
5. DISCUSIÓN	59
5.1. ERRORES DEL SISTEMA	59
5.2. EL MODELO DE ERROR DEL SISTEMA	59
5.3. DISCUSIÓN DEL ERROR	62
5.4. COMPENSACIÓN DEL ERROR	63
5.4.1. COMPENSACIÓN DE ALTITUD	64
5.4.2. COMPENSACIÓN DE ACELERACIÓN	69
5.5. DETECCIÓN DEL MOVIMIENTO	70
6. CONCLUSIONES	71
A. REGISTROS DE MOVIMIENTOS	73

Índice de figuras

1.1. Modelo ideal de la solución al problema	12
2.1. Incisión lineal de un tejido y su cicatrización	16
2.2. Adquisición de la fuerza mecánica de la herida con el tiempo en la cicatrización normal, tardía y deteriorada	17
2.3. Toma adecuada del bisturí	18
2.4. Estructura interna de un acelerómetro tipo MEMS, tomado desde [38]	19
2.5. El transmisor y el receptor de ZSTAR3, tomado desde [35]	21
2.6. Acelerómetro MMA7456L , tomado desde [36]	22
2.7. Sistema de navegación con sensores de acelerometría, modificado desde [15]	26
2.8. Movimiento del apuntador a medida que gira su marco de referencia	27
2.9. Rotación del eje X con un ángulo Roll(ϕ)	28
2.10. Rotación del eje Y con un ángulo Pitch (θ)	28

2.11. Rotación del eje Z con un ángulo Yaw (ψ)	29
2.12. Diagrama de bloques de un sistema teórico de navegación inercial	30
2.13. Respuesta en frecuencia y fase del filtro ideal.	31
2.14. Respuesta en frecuencia y fase del filtro por sumas continuas. . .	32
2.15. Respuesta en frecuencia y fase del filtro trapezoidal.	33
2.16. Respuesta en frecuencia y fase del filtro por Simpson de 1/3. . .	34
2.17. Respuesta en frecuencia y fase del filtro por simpson de 3/8. . .	35
2.18. Análisis de los filtros integradores.	36
3.1. Diagrama de bloques del proyecto del localizador espacial	39
3.2. Sistema de navegación con sensores de acelerometría, modifica- do desde[15]	41
3.3. Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje x	42
3.4. Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje y	43
3.5. Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje z	43
3.6. Respuesta en frecuencia y de fase del filtro pasa bajos	44
3.7. Apuntador de sistema de navegación inercial con el interruptor de detección de inicio y final del movimiento.	47
3.8. Reproducción de la trayectoria de un movimiento	49

3.9. Apuntador sujetado por el soporte que limita el giro de los ejes .	50
4.1. Señales de aceleración original del movimiento	52
4.2. Señales de aceleración filtradas por un filtro pasa bajos	52
4.3. Señales de los ángulos Roll y Pitch y su estimación	53
4.4. Señales de aceleración transformadas	53
4.5. Señales de aceleración del movimiento no compensadas	54
4.6. Señales de velocidad no compensadas	55
4.7. Señales de aceleración compensadas	55
4.8. Señales de velocidad compensadas	56
4.9. Distancia recorrida	56
4.10. Histograma del error	58
4.11. Gráfica del error con respecto a cada registro de movimiento . .	58
5.1. Propagación de los errores básicos dentro del sistema.	61
5.2. Compensación de altitud a través del estimador	65
5.3. Descripción de cada uno de los ángulos de inclinación, modifi- cado desde [40]	66

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Al jurado que evaluó el contenido de esta tesis, el cuál estuvo

Presidente:	Dr. FERNANDO ARÁMBULA COSÍO	UNAM-CCADET
Secretario:	M.I. OSCAR YÁÑEZ SUÁREZ	UAM-I
Vocal:	M.C. CAUPOLICÁN MUÑOZ GAMBOA	UAM-I

A la Dra. Raquel Valdés Cristerna del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UAM Iztapalapa, por su amplia asesoría, conocimientos y apoyo.

Al Dr. Juan Ramón Alaniz, Director de posgrado de Ingeniería Biomédica de la UAM Iztapalapa, por su amplia asesoría, conocimientos y apoyo.

Al Ing. Omar Piña Ramírez y la Lic. Ana Irene de Ramírez, por la colaboración y asesoría a este proyecto y los buenos ratos compartidos. A la Ing. Gisella Borja Roncallo por su apoyo en la realización de este proyecto.

Al CONACYT, por la beca otorgada durante mis estudios como alumno del Posgrado en Ingeniería Biomédica a nivel de Maestría.

A Jehová Dios por todo los éxitos que me ha permitido conseguir y amigos que él me ha dado. A mis Padres y mi Hermano por su hermoso apoyo y las ganas de volverlos a ver. A mis amigos y colegas de laboratorio por la asesoría en este proyecto.

RESUMEN

Los médicos cirujanos se enfrentan diariamente al problema de posicionar en coordenadas espaciales sus instrumentos quirúrgicos en referencia al paciente. Para esto se creó la cirugía estereotáctica que se refiere a aquellos procedimientos quirúrgicos en los que es necesaria la ubicación de coordenadas espaciales respecto al paciente dentro de un marco de referencia. También existen herramientas de cirugía asistida que permiten al médico planear rutas de acceso y puntos de incisión antes de que el paciente entre a la sala de operaciones. En general estas herramientas combinan técnicas de imagenología médica anatómica y funcional para revelar la presencia de la patología que el cirujano decide intervenir pero surge el problema de conocer la posición espacial de la lesión durante el procedimiento quirúrgico.

Con el afán de resolver el problema de ubicar la posición del tejido, se han diseñado herramientas de navegación que emplean distintos principios físicos y matemáticos para calcular y ubicar las coordenadas de interés para el cirujano. Algunos ejemplos de las herramientas de navegación actuales son sistemas electromagnéticos, marcos estereotácticos y seguidores ópticos. Si bien estas herramientas cumplen su objetivo, también presentan limitaciones instrumentales y problemas al momento de ser usadas en una sala de operaciones.

La solución propuesta en este proyecto parte de que es teóricamente posible calcular la posición de un cuerpo conociendo su posición inicial y la aceleración que éste ha sufrido en un intervalo de tiempo dado. Esto se consigue con el diseño y la implementación de un apuntador dotado de sensores de aceleración manipulado por el cirujano, una unidad de procesamiento y un sistema de despliegue de coordenadas. Este sistema consta de un sensor de acelerometría triaxial, un algoritmo de transformación de marcos de referencias, un estimador de giro de los ejes, un detector de movimiento, un algoritmo de compensación de velocidad y filtros integradores.

Se realizaron 150 registros de movimientos de un trazo de una línea recta cuya distancia promedio es de 3cm, obteniendo los puntos inicial y final de cada movimiento y se utilizó un soporte que restringe el movimiento a un

desplazamiento lineal y el de los giros de los ejes de navegación para que varíen lentamente, siendo la trayectoria del movimiento en paralelo al eje **y** del sensor. Estos registros se adquirieron con la herramienta de adquisición de acelerometría ZSTAR3 con una frecuencia de muestreo de 120Hz. Estos registros de aceleración del movimiento, se procesaron para obtener la posición a través del sistema propuesto del cual se evaluó el error cuadrático medio de las distancias estimadas para validarlo. Se discute también en esta tesis un modelo del error del sistema para estudiar la propagación del error.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Diariamente los médicos cirujanos se enfrentan al problema de posicionar en coordenadas espaciales sus instrumentos quirúrgicos en referencia al paciente, para fines tan diversos como la instalación de clavos y prótesis en medicina de rehabilitación, el aislamiento de un foco epiléptico en neurocirugía o la extirpación de un tumor en oncología. Para esto se creó la cirugía estereotáctica que se refiere a aquellos procedimientos quirúrgicos en los que es necesaria la ubicación de coordenadas espaciales respecto al paciente dentro de un marco de referenci [1].

Existen herramientas de cirugía asistida que permiten al médico planear rutas de acceso y puntos de incisión antes de que el paciente entre a la sala de operaciones. En general estas herramientas combinan técnicas de imagenología médica anatómica y funcional permitiendo, por ejemplo, la ubicación de las regiones de alta actividad metabólica como las que presentan los focos epilépticos[2]. Una vez que las técnicas de imagenología anatómica y funcional han revelado la presencia de la patología y el cirujano decide intervenir al paciente surge el problema de conocer la posición espacial de la lesión durante el procedimiento quirúrgico. Estructuras como los tumores son fácilmente identificables ya que son anatómicamente distintas al tejido sano, pero en el caso de patologías como la epilepsia, el tejido sano y el tejido enfermo son idénticos a la vista.

Con el afán de resolver el problema de ubicar la posición del tejido asociado a estos tipos de patología en la sala de operaciones, se han diseñado herramientas de navegación que emplean distintos principios físicos y matemáticos para calcular y ubicar las coordenadas de interés para el cirujano[3]. Algunos ejemplos de las herramientas de navegación actuales son sistemas electromagnéticos, marcos estereotácticos y seguidores ópticos. Si bien estas herramientas cumplen su objetivo, también presentan limitaciones instrumentales y problemas al momento de ser usadas en una sala de operaciones.

Por ejemplo, los seguidores ópticos basan su funcionamiento en la búsqueda de patrones de imágenes dentro del quirófano. En estos sistemas el cirujano maneja un apuntador que genera o refleja radiación infrarroja y el sistema adquiere y analiza imágenes de la sala de operaciones. El cálculo de las coordenadas apuntadas por el cirujano se realiza a partir de un punto de referencia y las fuentes de radiación del apuntador detectadas por las cámaras. Estos sistemas tienen la desventaja de requerir de una línea de visión entre el apuntador y el sistema de adquisición, si cualquier cuerpo se interpone el sistema no puede calcular la ubicación del apuntador[4].

En la actualidad, existen herramientas para posicionar un instrumento quirúrgico en una sala de cirugía pero son muy costosos y poseen limitaciones. Sin embargo, el avance en la microelectrónica y en los microsistemas, ha hecho posible que los sensores de aceleración y de giro estén disponibles en la tecnología MEMS (Micro ElectroMechanical Systems), para medir variables que refieren a cambios de posición. Inclusive, se puede teóricamente estimar el ángulo de rotación a través de modelos de navegación inerciales y conociendo sus puntos estacionales del movimiento y que su marco de navegación gire levemente[8].

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema parte de que es teóricamente posible calcular la posición de un cuerpo conociendo su posición inicial y la aceleración que éste ha sufrido en un intervalo de tiempo dado. En la figura 1.1 se ilustra la idea principal que se pretende explorar en este proyecto: un apuntador dotado de sensores de aceleración manipulado por el cirujano, una unidad de procesamiento y un sistema de despliegue de coordenadas. El sistema de procesamiento calcula la ubicación del apuntador respecto a un marco de referencia.

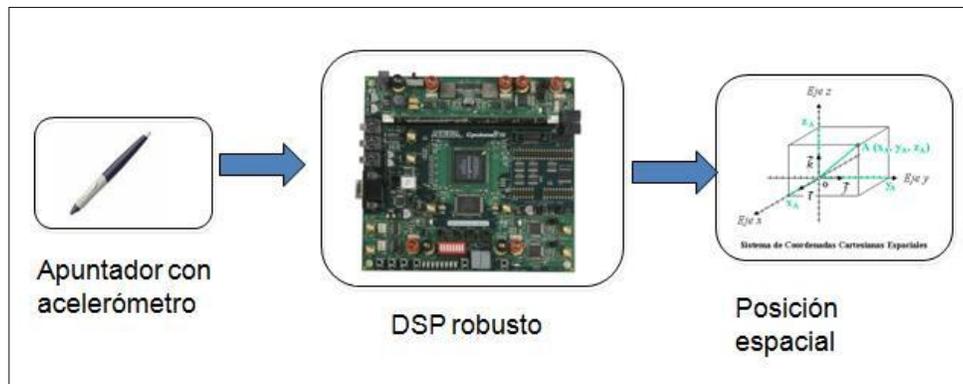


Figura 1.1 – Modelo ideal de la solución al problema

Algunos autores[5] sostienen que debido a las limitaciones de la instrumentación actual y a la naturaleza inestable de los filtros integradores no es posible realizar un cálculo confiable de la posición basándose en señales de transductores de aceleración o velocidad. Sin embargo el diseño propuesto en este trabajo partiría de los resultados de[4] [6] [7] quienes sostienen que es posible diseñar filtros integradores capaces de minimizar el error de cálculo. Lo anterior permite que se genere la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué tipo de sistema permitirá determinar la posición de un apuntador para cirugía?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema localizador en coordenadas 3D basado en acelerometría MEMS.

1.2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar y Realizar experimentos que permitan acotar las características estáticas y dinámicas del sensor acorde al movimiento típico de un cirujano.
- Evaluar las diferentes técnicas de procesamiento de integración en la obtención de la posición espacial a partir de la aceleración del apuntador.
- Diseñar y construir un sistema localizador en Hardware con interfaz al computador.

Capítulo 2

MARCO REFERENCIAL

2.1. ESTADO DEL ARTE

Los años tempranos del vigésimo siglo vieron el desarrollo del girocompás para la provisión de una referencia direccional y de ahí en adelante se pudo mejorar la estructura de los giroscopios y de los acelerómetros para ser utilizados en conjunto para aplicaciones de navegación, reconocimiento de movimientos y de manejo de objetos en la realidad virtual a través de guantes de proyección 3D[31].

Ademas, estos sensores en conjunto llamados unidades de medición inercial no se habrían desarrollado tanto sino fuera apoyado en el campo militar. Debido a que están usándose en la navegación muy extensamente, desde los aviones, los buques, submarinos, proyectiles estratégicos y naves espaciales. Hay además, una alta participación de ellos en los automóviles de carreras y para inspeccionar pozos subterráneos, navegación y trazado de tuberías[32] y también en nuevas aplicaciones en el campo de robótica en especial en la línea de cirugía asistida [3].

Tales aplicaciones requieren sistemas de navegación que posean un rango muy amplio de capacidades en su rendimiento, así como en las grandes dife-

rencias de los periodos de tiempo que exigen una precisión alta a medida que se navegue. Por ejemplo, los proyectiles tácticos, en esta aplicación se requiere navegación inercial para guiarlos con una burda exactitud de unos cientos de metros en periodo de minutos y por esa razón siempre viene con sensores auxiliares para compensar y mejorar su exactitud[33].

Existen varias categorías de sensor inercial y se ha conseguido un progreso significativo en la última década. El desarrollo de MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) han sido un avance grande y la precisión de estos sensores que pueden lograrse está muy cercana a la ideal de los sensores inerciales de mayor exactitud. El desarrollo de MOEMS (Micro-Opto-ElectroMechanical Systems) promete lograr una precisión muy alta por cada elemento. Se espera en las próximas décadas se de un paso grande desde el punto de vista de costos en los sensores para poder realizar investigaciones en los sistemas inerciales y mejorar la precisión de ellos a través de las técnicas de procesamiento[37].

Además de los sistemas de navegación inerciales se han desarrollado otros sistemas de navegación que se utilizan, principalmente en el campo de la medicina que emplean distintos principios físicos y matemáticos para calcular y ubicar las coordenadas de interés para el cirujano[3]. Estas herramientas permiten al médico planear rutas de acceso y puntos de incisión antes de que el paciente entre a la sala de operaciones y por lo general estas herramientas combinan técnicas de imagenología médica anatómica y funcional.

Algunos ejemplos de las herramientas de navegación actuales son sistemas electromagnéticos, marcos estereotácticos y seguidores ópticos; este último basa su funcionamiento en la búsqueda de patrones de imágenes dentro del quirófano. En estos sistemas el cirujano maneja un apuntador que genera o refleja radiación infrarroja y el sistema adquiere y analiza imágenes de la sala de operaciones. El cálculo de las coordenadas apuntadas por el cirujano se realiza a partir de un punto de referencia y las fuentes de radiación del apuntador detectadas por las cámaras[4].

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN BISTURÍ DE UN CIRUJANO

La cirugía es parte de la medicina que tiene por objeto tratar las enfermedades, las deformaciones, los traumatismos y otros[20], por medio de operaciones manuales o instrumentales realizando el menor traumatismo al tejido con la posibilidad de cerrar la incisión con la mayor estética posible. Se dice que una herida por incisión que es limpia y se cierra con suturas, cicatriza por primera intención y es la forma idónea de hacerla[21][22]. Ver figura 2.1.



Figura 2.1 – *Incisión lineal de un tejido y su cicatrización*

El cirujano tratará siempre de hacer un corte simple o heridas lineales, con bordes de piel poco variable, porque la cirugía en forma lineal permite una aproximación precisa de los bordes, al momento de la cicatrización en forma normal, lo que conlleva a una mejor fuerza mecánica de los pliegues o bordes de la herida[24] como se muestra en la figura 2.2.

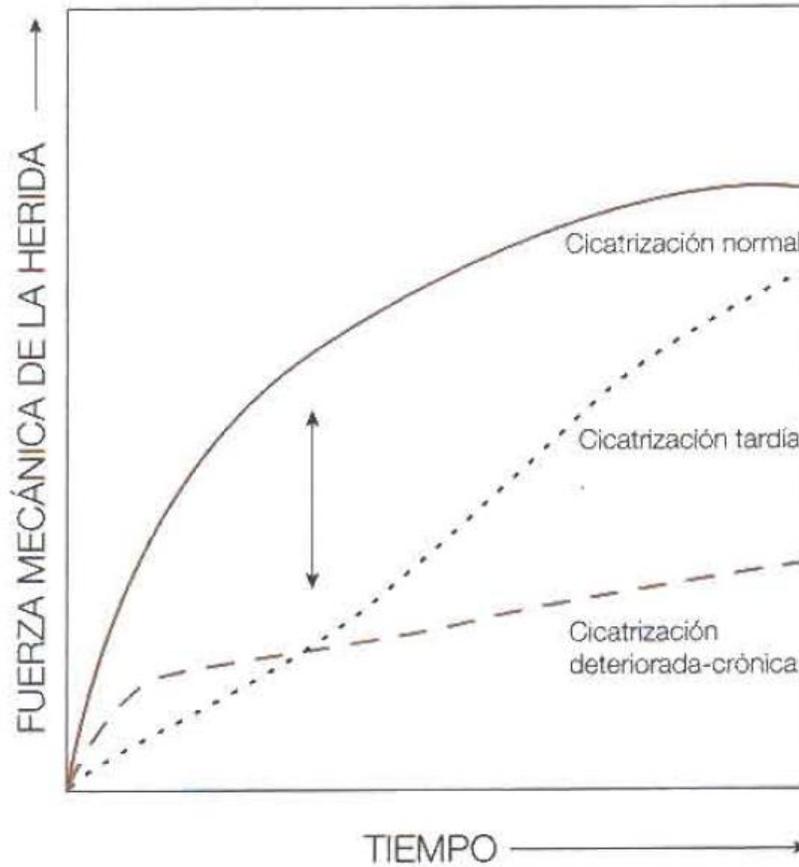


Figura 2.2 – Adquisición de la fuerza mecánica de la herida con el tiempo en la cicatrización normal, tardía y deteriorada

Un estudio del movimiento de la mano en una cirugía utilizando señales de acelerometría y del giroscopio[23] dio como resultados que el ancho de banda del movimiento es por debajo de 10Hz y con una amplitud de $\pm 1.5g$. Siendo la mejor forma de tomar el bisturí[24], con los dedos índice, pulgar y medio que formen un triángulo de presión, ver figura 2.3.

2.2.2. SENSORES MEMS DE ACELEROMETRIA

De la física elemental[13], se parte de que la posición es la segunda integración de la aceleración. Donde \mathbf{P} es la posición y la \mathbf{a} es la aceleración del apuntador en la navegación del marco respectivamente, y \mathbf{t} es el tiempo.



Figura 2.3 – *Toma adecuada del bisturí*

$$P = \int \int a dt dt \quad (2.1)$$

Por lo tanto, se pueden utilizar los acelerómetros para medir las aceleraciones en los ejes X, Y y Z durante el movimiento del cirujano y luego estimar la trayectoria y la posición del apuntador a partir de la integración doble de acuerdo a la anterior ecuación 2.1, cuyas condiciones iniciales de la doble integración se asumen iguales a 0.

Debido a la llegada de los MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), las herramientas tecnológicas para el estudio del movimiento se han vuelto cada vez más pequeñas.

2.2.2.1. Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)

MEMS significa Micro-Electro-Mechanical Systems, que integra unidades mecánicas y componentes electrónicos, a través de la micro-tecnología de fabricación en la sub-escala de micrometros. Con esta tecnología, podemos construir microestructuras a través de sistemas micro-mecanizado y crear sensores que son muy pequeños en tamaño y adecuados para el diseño de instrumentos para el estudio del movimiento.

2.2.2.2. Principio de un acelerómetro MEMS

El acelerómetro es un instrumento que se utiliza para medir la aceleración de un objetivo montado en otro objeto. Por ejemplo, el acelerómetro que se utilizó para el proyecto es el MMA7360L que es un dispositivo digital con un rango de $\pm 1.5g$ tri-axial[9] .

Hay un resorte de polisilicio dentro del sensor[18] que se utiliza para suspender una viga sobre la superficie de una oblea de silicio y proporciona una resistencia contra la fuerza aplicada como se muestra en la figura 2.4.

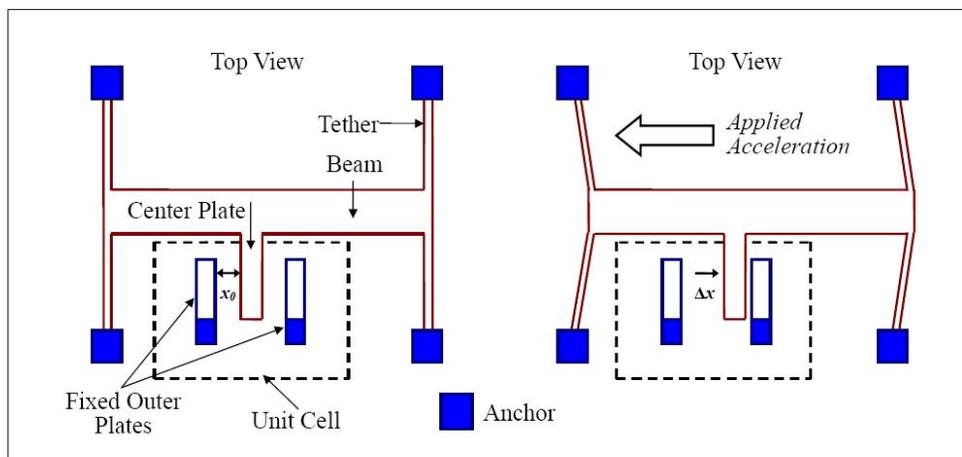


Figura 2.4 – Estructura interna de un acelerómetro tipo MEMS, tomado desde [38]

Cuando la aceleración se aplica al sensor, de acuerdo a la Ley de Hooke, se desplaza la viga como se describe en la ecuación 2.2.

$$\Delta x = \frac{F}{k} \quad (2.2)$$

Y un condensador diferencial es utilizado para medir la distancia del desplazamiento de la viga, como se muestra en la ecuación 2.3.

$$\Delta C \approx C_0 \frac{\Delta x}{x_0} \quad (2.3)$$

Por último, se puede medir la aceleración aplicada al sensor que es proporcional al desplazamiento de la viga como se describe en la ecuación 2.4.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{k\Delta x}{m} \quad (2.4)$$

donde \mathbf{F} es la fuerza aplicada, \mathbf{k} es la constante del resorte, Δx es la deflexión de la viga, a es la aceleración aplicada, \mathbf{m} es la masa de la viga, C_0 es la capacitancia de la unidad de celda medida en estado estacionario, ΔC es el cambio en la capacitancia durante la aplicación de la fuerza y x_0 es distancia de separación entre los planos en estado estacionario.

2.2.2.3. Herramienta de adquisición de aceleración ZSTAR3

La herramienta de desarrollo ZSTAR3 contiene un transmisor con un acelerómetro MMA7456L y un receptor con conexión a USB, ver figura 2.5. Un sistema de ZSTAR3 puede acomodar hasta 16 sensores de aceleración cada uno con su transmisor, conectados a través de una comunicación de RF a una frecuencia de 2,4 GHz a un nodo único conectado a un PC por USB. Los acelerómetros miden en los 3 ejes de referencia, utilizando un sensor digital como es el MMA7456L.

Las siguientes características son de la herramienta de adquisición ZSTAR3

- Medición de aceleración en los 3 ejes de referencia
- Comunicación inalámbrica con sensores a través de la banda de 2,4 GHz
- Protocolo de RF que soporta 16 sensores en un receptor a memoria USB
- Frecuencia de muestreo configurable de 30, 60 o 120 Hz
- Función de autocalibración
- Alcance inalámbrico típico de 20 m.
- Comunicación USB en la parte del receptor
- Puerto serie virtual para la interfaz gráfica de usuario
- Modos de trabajo de 8-bit/16-bit y 3 botones para el usuario
- Consumo en el modo de ejecución: 1,8 a 3,9 mA.
- Consumo en el modo de espera: menos de 900 nA.
- El Sensor es alimentado por una batería CR2032 3V.

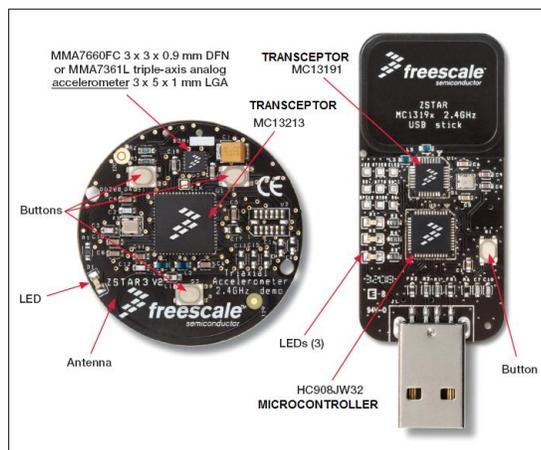


Figura 2.5 – El transmisor y el receptor de ZSTAR3, tomado desde [35]

2.2.2.4. Acelerómetro MMA7456L

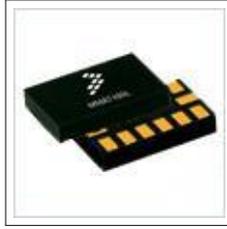


Figura 2.6 – Acelerómetro MMA7456L , tomado desde [36]

El acelerómetro MMA7456L que se muestra en la figura 2.6 posee las siguientes características:

- Medición en los 3 ejes de referencia.
- Auto Test para Z-Axis
- Salida digital I2C/SPI
- Operación a baja tensión: 2.4V - 3.6V
- Registros de Offset para la calibración
- Sensibilidad seleccionable, ver tabla 2.1.
- Magnitud del Ruido de $\frac{350\mu g}{\sqrt{B(Hz)}}$, siendo **B** el ancho de banda útil de la señal de aceleración.
- Diseño robusto, soporta hasta 5G
- Bajo Costo

Rango[g]	Sensibilidad[mg/LSB]	Resolución[bits]
±2	15.625	8
±4	31.25	8
±8	62.5	8
±8	15.625	10

Tabla 2.1 – Selección de sensibilidad.

2.2.3. ERRORES Y CALIBRACIÓN DE LOS ACELEROMETROS

En esta sección, se detallarán las principales fuentes de error de los acelerómetros, los métodos de calibración de los sensores y la técnica de corrección para eliminarlos o disminuirlos [37] [19].

1. Error de sesgo (Bias o offset)

El sesgo de un acelerómetro es la media sobre un tiempo determinado de la salida del sensor en condiciones específicas de funcionamiento que no tienen correlación con la entrada. El sesgo de un acelerómetro se expresa en metros por segundo cuadrado (m/s^2 o unidad g). Cuando el sesgo es constante se le llama offset que es una medida proporcionada por el sensor y puede ser determinada por la calibración o la hoja de datos del fabricante o basándose en la asimetría de los sesgos que es la media entre el sesgo del eje positivo y del negativo, paralelos a la gravedad [14], como se resumen en la ecuación 2.5. Siendo g^+ y g^- los valores medidos del sensor en paralelo a la dirección y en contra del vector de gravedad.

$$sesgo(b) = \frac{(g^+ + g^-)}{2} \quad (2.5)$$

2. Error por factor de escala

El factor de escala, denominado a veces como la sensibilidad, se define como la razón de cambio en la salida con respecto al cambio en la entrada del sensor destinada a ser medida, como se resumen en la siguiente ecuación 2.6, siendo los valores de entrada $+1g$ y $-1g$. El factor de escala se ven afectados por factores relacionados con el material y la construcción [14].

$$Escala(S) = \frac{(g^+ - g^-)}{2g} \quad (2.6)$$

3. Error por desalineación

La desalineación de los ejes es el error resultante de la imperfección del montaje de los sensores. Por lo general resulta en una no-ortogonalidad

de los ejes del marco del cuerpo de los sensores inerciales, dando como resultado que cada eje se ve afectado por las medidas de los otros dos ejes en el marco del cuerpo. Según el fabricante [9], existe un error de desalineación de 5 %, es decir que si el sensor del eje z esta paralelo a la gravedad, los sensores f_x y f_y de los ejes X y Y, medirán una aceleración de 0.05g que equivaldría a una perdida de ortogonalidad de 2.87° en los ejes X y Y, representados por los ángulos θ_x y θ_y . Estos ángulos son obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$f_x = g \sin^{-1}(\theta_x) \Rightarrow \theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{g}\right) \quad (2.7)$$

$$f_y = g \sin^{-1}(\theta_y) \Rightarrow \theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{f_y}{g}\right) \quad (2.8)$$

4. Ruido térmico

Este ruido se modela como un ruido blanco que es generado por energía térmica debido a la agitación del movimiento aleatorio de transporte de carga dentro de los sensores y se le conoce como movimiento browniano. También es conocido como ruido de Johnson-Nyquist [10]. Según la hoja de datos del fabricante[9], el ruido térmico esta dado por la siguiente ecuación 2.9 que depende de la frecuencia de Nyquist que esta relacionada con el ancho de banda de la señal (B).

$$N = \frac{350\mu g}{\sqrt{B(Hz)}} \quad (2.9)$$

2.2.3.1. Calibración

La calibración esta definida como el proceso de comparar la salida del instrumento con una información de referencia conocida y determinar los coeficientes que fueren a la salida para estar de acuerdo con la información de referencia en un rango de valores de salida. La calibración usualmente toma lugar en un laboratorio donde el sensor inercial es montado sobre un nivel de referencia y está en estado estacionario (sin movimiento) para medir el valor del sesgo en cada uno de los ejes de navegación mediante el siguiente proce-

dimiento: se mueve el sensor hasta el punto en que uno de sus ejes esté en la misma dirección del vector de gravedad y después se cambia en contra a la dirección de la gravedad para obtener el valor de escala para ese eje y así se hace sucesivamente para los otros dos ejes restantes [14]. Por el anterior método, es posible extraer la estimación de los errores de sesgo y del factor de escala por sumas y diferencias combinadas de las mediciones de los acelerómetros en estado estacionario y del error de desalineación de los ejes que se pueden compensar a través de las ecuaciones 2.7 y 2.8.

2.2.4. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN CON SENSORES INERCIALES

En la figura 2.7 se muestra el sistema que consiste de tres (3) acelerómetros y tres giroscopios. También el diseño de los sensores y las coordenadas de navegación del marco de referencia \mathbf{n} y el marco del cuerpo \mathbf{b} en el espacio. El marco de navegación \mathbf{n} esta fijo y los ejes X_n, Y_n, Z_n están perpendiculares a cada uno, donde la dirección del eje Z_n es idéntica a la dirección del vector de la gravedad. El marco del cuerpo \mathbf{b} sobre el apuntador es el que se mueve y los ejes X_b, Y_b, Z_b están perpendiculares a cada uno, donde la dirección del eje de Z_b esta alineado con el eje del núcleo del apuntador y las señales de los sensores de aceleración A_{ax}, A_{ay}, A_{az} están perpendiculares a cada uno. La orientación del sistema del apuntador esta representado por tres ángulos, yaw ψ , pitch θ , y roll ϕ que se consiguen al integrar las velocidades angulares provenientes de los giroscopios o al estimarlas a través de las señales de aceleración.

Para alinear el marco del cuerpo \mathbf{b} con los ejes del sensor se utiliza la siguiente ecuación 2.10, que da como resultado que la salida del sistema sean las aceleraciones $A_b = [A_{bx}, A_{by}, A_{bz}]^T$. Siendo la velocidad angular de los giroscopios $W_b = [W_{bx}, W_{by}, W_{bz}]^T$ del marco del cuerpo respectivamente. El origen del marco del cuerpo \mathbf{b} es el vector de posición $P_n = [P_{nx}, P_{ny}, P_{nz}]^T$ en el marco de navegación \mathbf{n} y la primera derivada de P_n es el vector de la velocidad $V_n = [V_{nx}, V_{ny}, V_{nz}]^T$ [27], como se resumen en las siguientes ecuaciones 2.11 al 2.13.

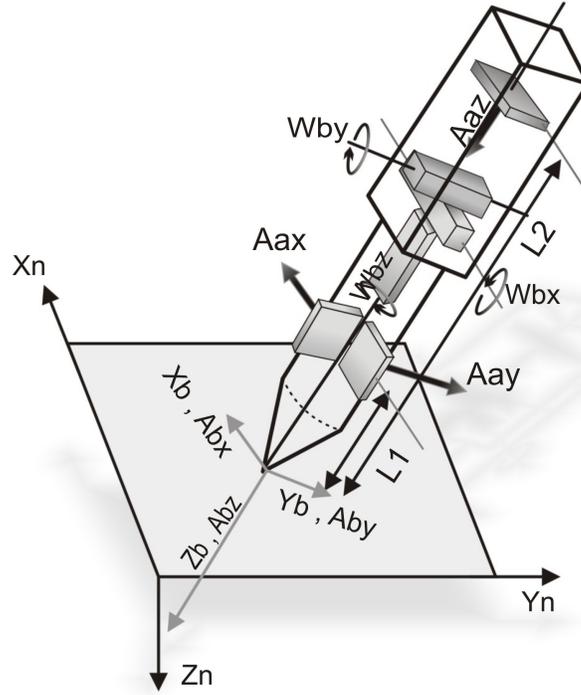


Figura 2.7 – Sistema de navegación con sensores de acelerometría, modificado de [15]

$$\begin{bmatrix} A_{bx} \\ A_{by} \\ A_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ax} + (W_{bx}W_{bz} - W'_{by})L_1 \\ A_{ay} + (W_{by}W_{bz} - W'_{bx})L_1 \\ A_{az} - (W_{bx}^2 + W_{by}^2)L_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$P'_n = V_n \quad (2.11)$$

$$V'_n = C_b^n(X)A_b - G \quad (2.12)$$

$$X' = W_b \quad (2.13)$$

donde $G \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ es el vector de gravedad $[0, 0, g]^T$ con una constante de la gravedad g y $C_b^n(X)$ es una matriz de transformación.

2.2.4.1. Matriz de transformación

Se necesita una matriz de transformación, es decir, de rotación $C_b^n(X) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ debido que a medida que se avanza en el movimiento el marco \mathbf{b} del cuerpo del apuntador gira acorde a la muñeca del operador haciendo variar el marco de navegación, como se muestra en la figura 2.8. Esta matriz se halla a partir de las siguientes matrices originada de los ángulos de rotación[12]:

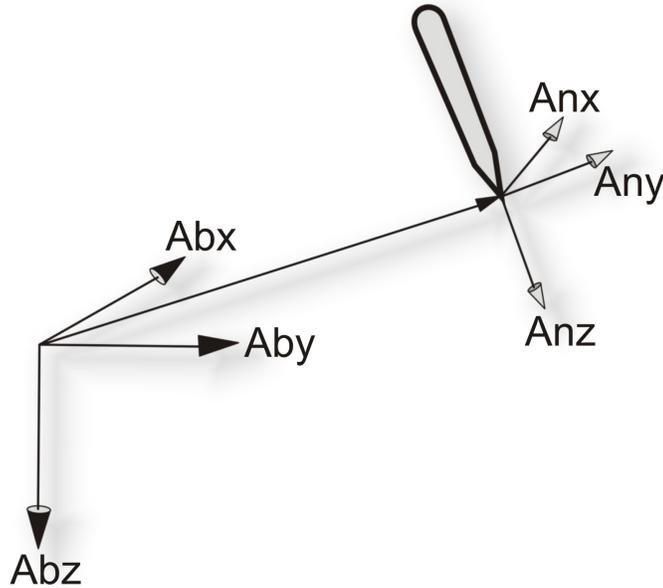


Figura 2.8 – *Movimiento del apuntador a medida que gira su marco de referencia*

- El ángulo Roll (ϕ) es el ángulo de rotación del eje \mathbf{x} que cambia en la transición del marco del cuerpo \mathbf{b} hasta el marco de navegación \mathbf{n} como se muestra en la figura 2.9 y su matriz se muestra en la ecuación 2.14.

$$C_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

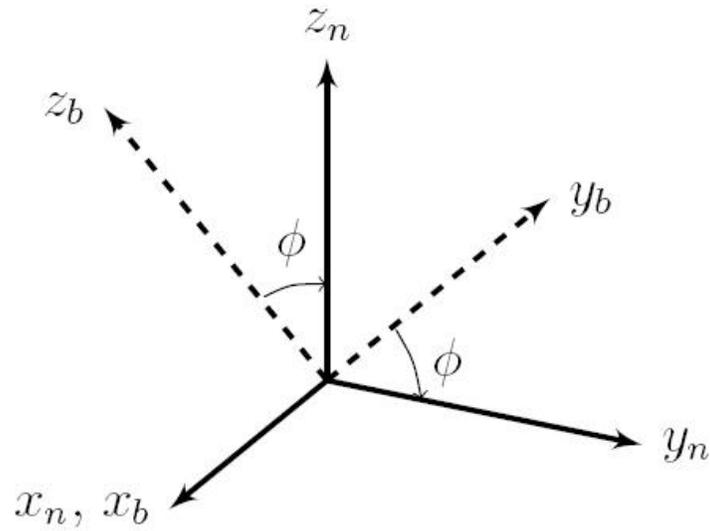


Figura 2.9 – Rotación del eje X con un ángulo $Roll(\phi)$

- El ángulo Pitch (θ) es el ángulo de rotación del eje y que cambia en la transición del marco del cuerpo \mathbf{b} hasta el marco de navegación \mathbf{n} como se muestra en la figura 2.10 y su matriz se muestra en la ecuación 2.15.

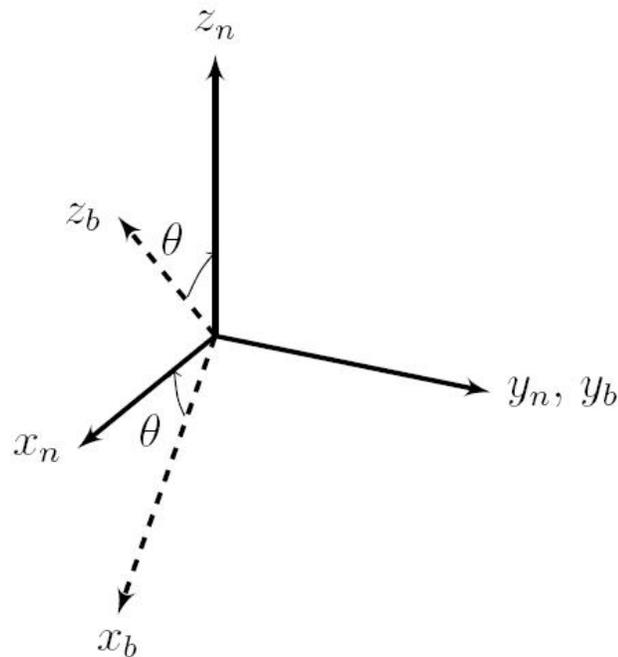


Figura 2.10 – Rotación del eje Y con un ángulo $Pitch(\theta)$

$$C_\theta = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

- El ángulo Yaw (ψ) es el ángulo de rotación del eje \mathbf{z} que cambia en la transición del marco del cuerpo \mathbf{b} hasta el marco de navegación \mathbf{n} como se muestra en la figura 2.11 y su matriz se muestra en la ecuación 2.16.

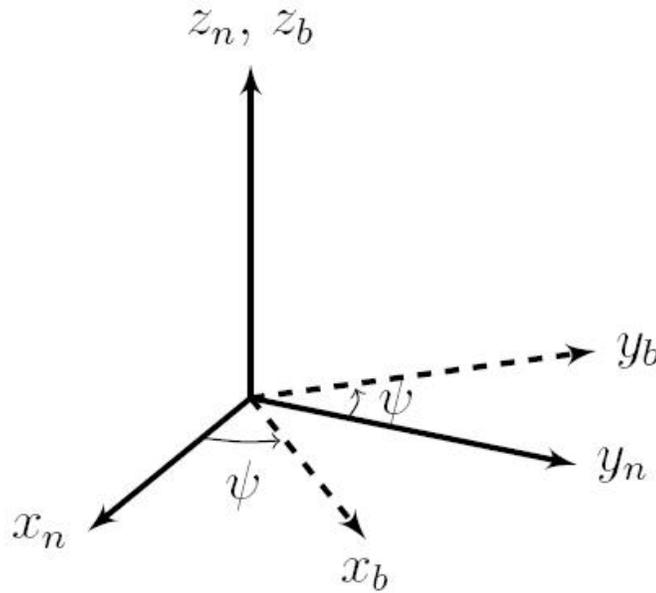


Figura 2.11 – Rotación del eje Z con un ángulo Yaw (ψ)

$$C_\psi = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Ahora bien, para obtener una transformación completa de los marcos de referencia \mathbf{b} al marco de referencia \mathbf{n} se multiplican las tres matrices 2.14 2.15 2.16, siendo su resultado como se muestra en la ecuación 2.17 y 2.18.

$$C_b^m = C_\phi C_\theta C_\psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$C_b^m(X) = \begin{bmatrix} \theta_c \psi_c & -\phi_c \psi_s + \phi_s \theta_s \psi_c & \phi_s \psi_s + \phi_c \theta_s \psi_c \\ \theta_c \psi_s & \phi_c \psi_c + \phi_s \theta_s \psi_s & -\phi_s \psi_c + \phi_c \theta_s \psi_s \\ -\theta_s & \phi_s \theta_c & \phi_c \theta_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donde $X = [\phi, \theta, \psi]^T$ son el vector de los ángulos de rotación, el subíndice s y c representa la función seno y coseno.

Como resumen de esta sección se presenta el siguiente diagrama 2.12 de un sistema teórico de navegación inercial.

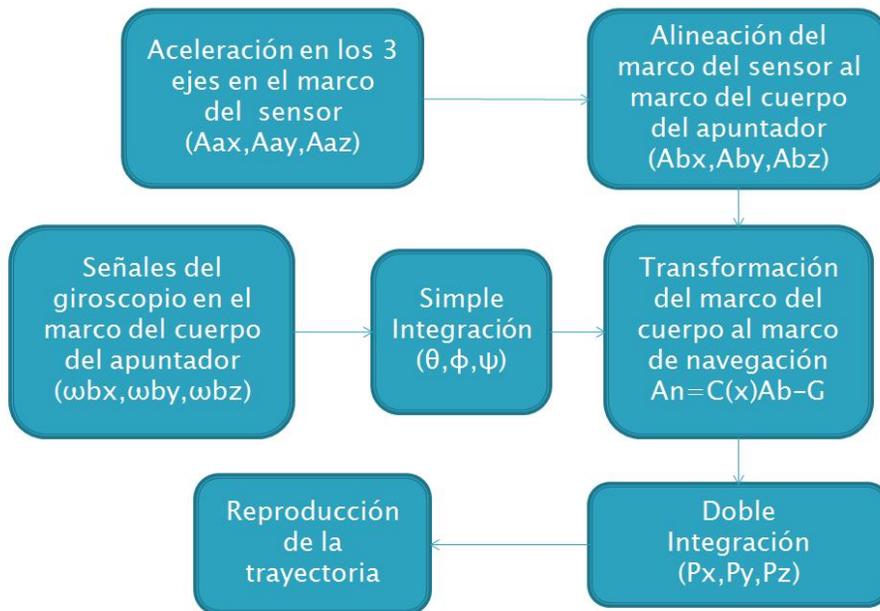


Figura 2.12 – Diagrama de bloques de un sistema teórico de navegación inercial

2.2.5. FILTROS INTEGRADORES

Un integrador perfecto o ideal es un filtro cuya salida $y(t)$, es la integral de su entrada[17], $x(t)$.

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \quad (2.19)$$

La respuesta en frecuencia[16] de un filtro analógico se obtiene aplicando una excitación $e^{j\omega}$ y expresando la salida como $H_{analógica}(\omega)e^{j\omega t}$, donde $H_{analógica}(\omega)$ es la respuesta en frecuencia analógica. Resolviendo esta integral, la salida resultará en $(1/j\omega)e^{j\omega t}$. Así, la respuesta en frecuencia de un integrador perfecto es:

$$H_{integrador}(\omega) = 1/j\omega \quad (2.20)$$

La característica en frecuencia y fase del filtro se muestran en la figura 2.13.

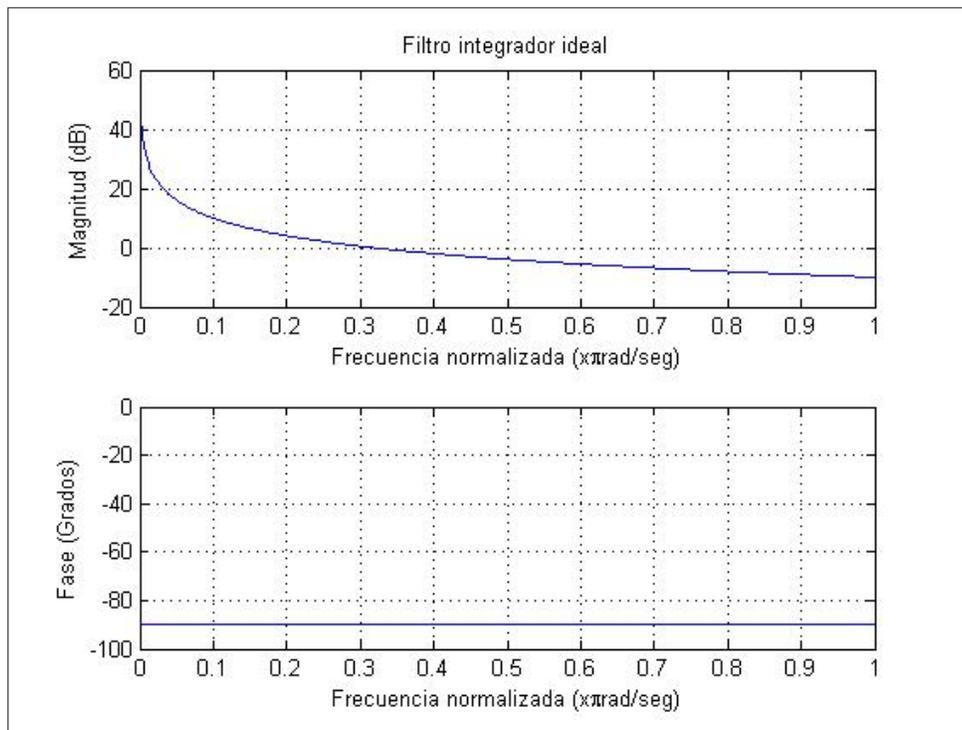


Figura 2.13 – Respuesta en frecuencia y fase del filtro ideal.

En el transcurso de la historia del procesamiento de señales se han diseñado filtros cuyas respuestas en frecuencia son aproximadas a la del filtro ideal. Por consiguiente, en esta sección, se considera los cuatros filtros integradores más utilizados:

1. FILTRO INTEGRADOR POR SUMA CONTINUA

La ecuación del filtro en el dominio del tiempo es:

$$y_k = x_k + y_{k-1} \quad (2.21)$$

La ecuación del filtro en el dominio de la frecuencia es:

$$H_{sc}(\omega) = \frac{1}{1 - e^{-j\omega}} \quad (2.22)$$

La característica en frecuencia y fase del filtro se muestran en la figura 2.14.

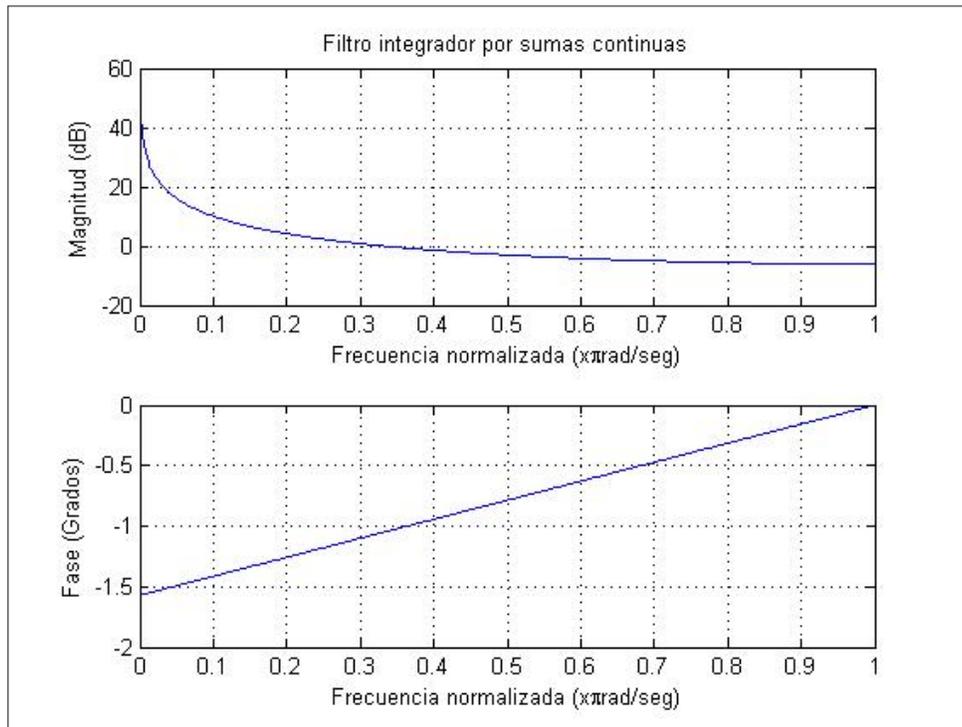


Figura 2.14 – Respuesta en frecuencia y fase del filtro por sumas continuas.

2. FILTRO INTEGRADOR TRAPEZOIDAL

La ecuación del filtro en el dominio del tiempo es:

$$y_k = 0,5x_k + 0,5x_{k-1} + y_{k-1} \quad (2.23)$$

La ecuación del filtro en el dominio de la frecuencia es:

$$H_{trap}(\omega) = \frac{0,5 + 0,5e^{-j\omega}}{1 - e^{-j\omega}} \quad (2.24)$$

La característica en frecuencia y fase del filtro se muestran en la figura 2.15.

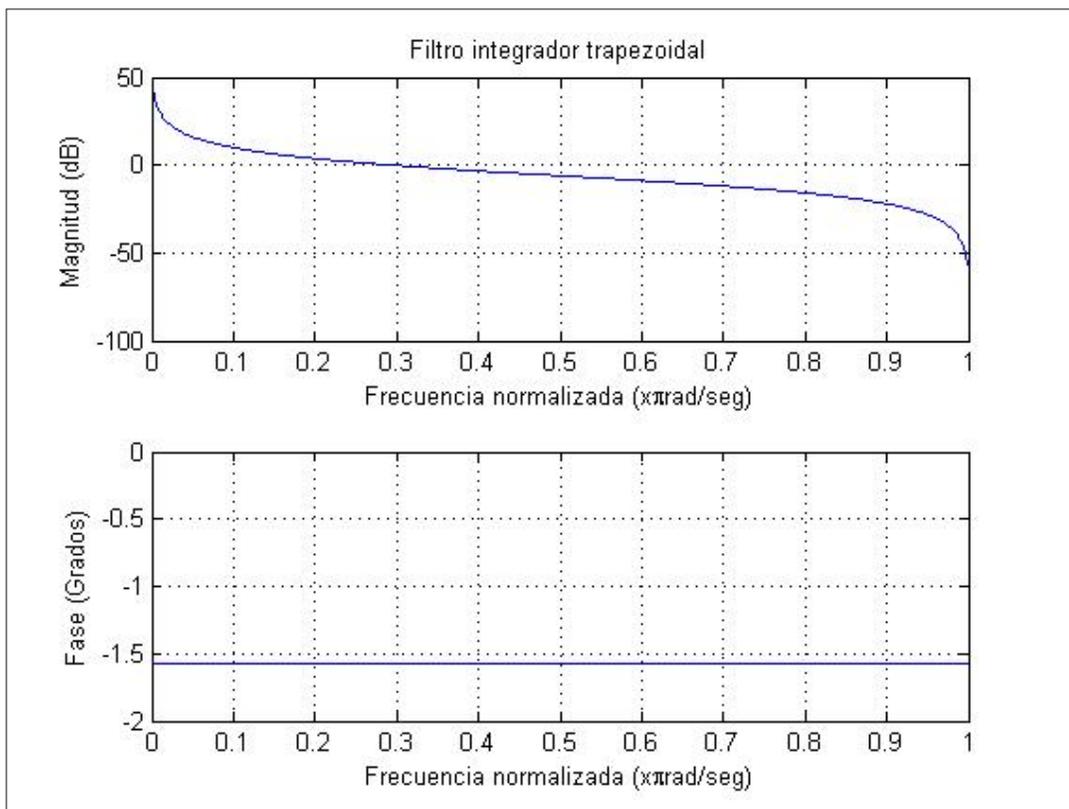


Figura 2.15 – Respuesta en frecuencia y fase del filtro trapezoidal.

3. FILTRO INTEGRADOR POR SIMPSON DE 1/3

La ecuación del filtro en el dominio del tiempo es:

$$y_k = 0,3x_k + 1,3x_{k-1} + 0,3x_{k-2} + y_{k-2} \quad (2.25)$$

La ecuación del filtro en el dominio de la frecuencia es:

$$H_{simp13}(\omega) = \frac{0,3 + 1,3e^{-j\omega} + 0,3e^{-2j\omega}}{1 - e^{-2j\omega}} \quad (2.26)$$

La característica en frecuencia y fase del filtro se muestran en la figura 2.16.

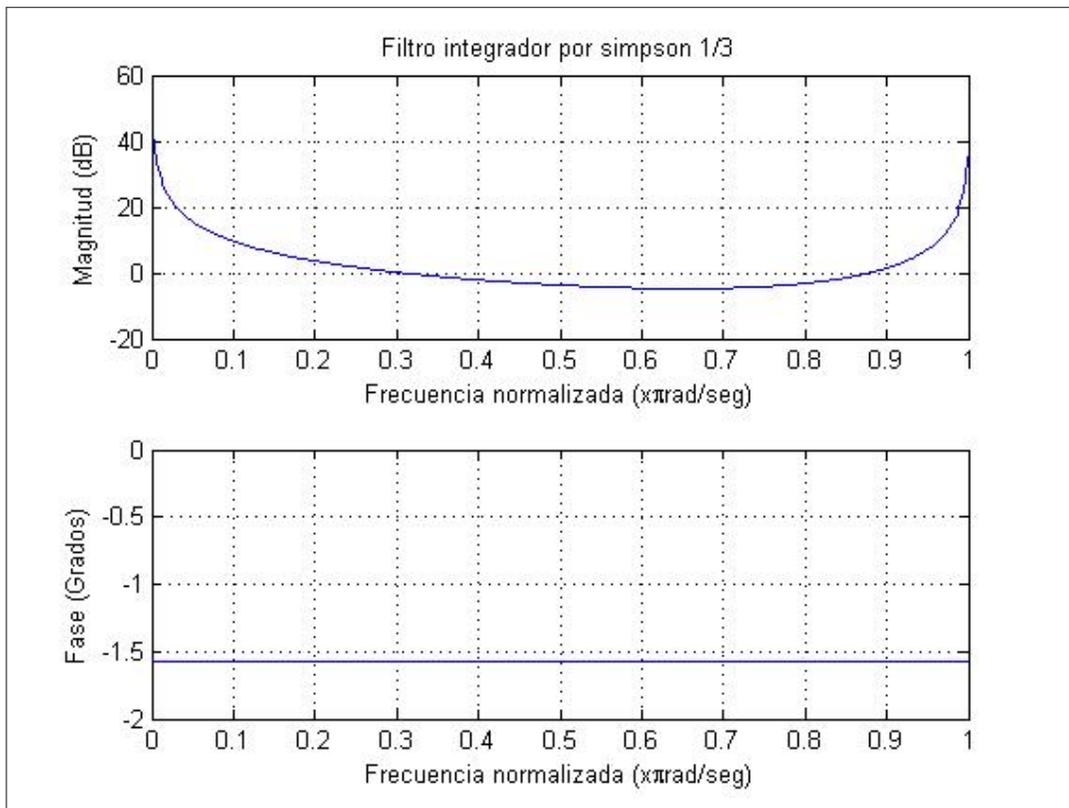


Figura 2.16 – Respuesta en frecuencia y fase del filtro por Simpson de 1/3.

4. **FILTRO INTEGRADOR POR SIMPSON DE 3/8** La ecuación del filtro en el dominio del tiempo es:

$$y_k = 0,25x_k + 0,75x_{k-1} + 0,75x_{k-2} + 0,25x_{k-3} + y_{k-2} \quad (2.27)$$

La ecuación del filtro en el dominio de la frecuencia es:

$$H_{simp38}(\omega) = \frac{0,25 + 0,75e^{-j\omega} + 0,75e^{-2j\omega} + 0,25e^{-3j\omega}}{1 - e^{-2j\omega}} \quad (2.28)$$

La característica en frecuencia y fase del filtro se muestran en la figura 2.17.

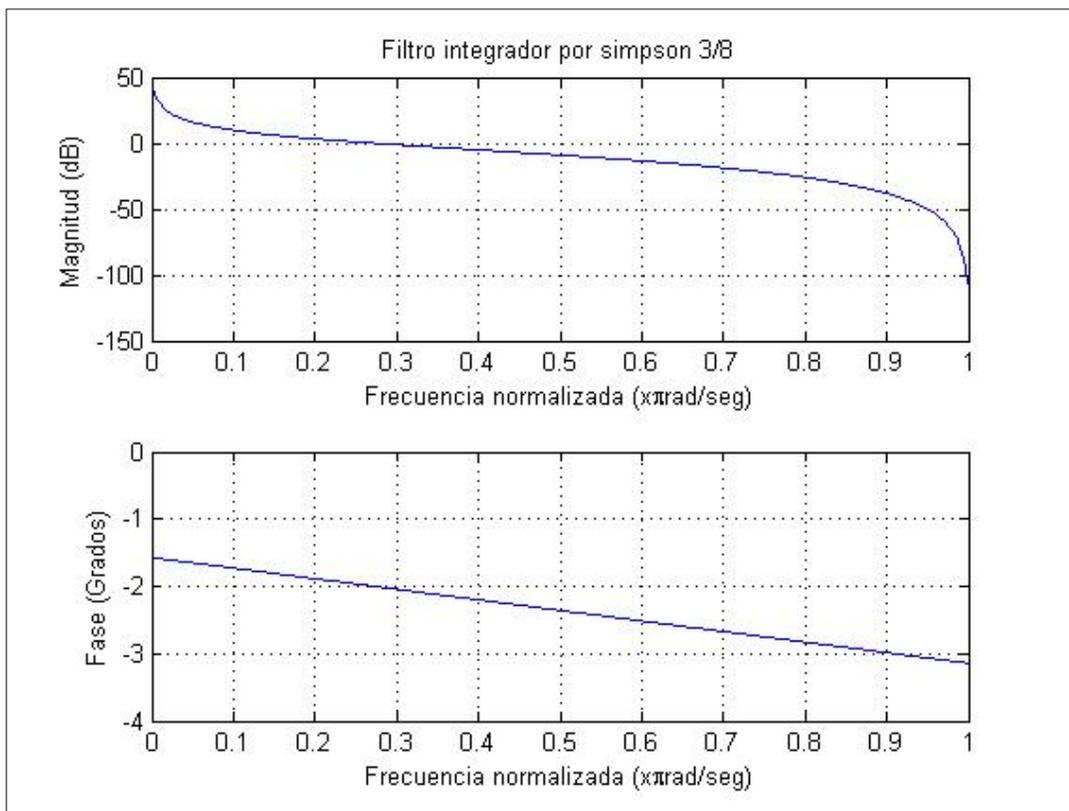


Figura 2.17 – Respuesta en frecuencia y fase del filtro por simpson de 3/8.

En la figura 2.18 se muestran que los cuatro filtros integradores poseen buena aproximación de su respuesta de frecuencia a la del filtro ideal en frecuencias que están por debajo de $0,3\pi$, pero se comportan muy distintos los cuatro en frecuencias altas. Para frecuencias altas la suma continua, tiene una ganancia mayor que el integrador perfecto, en cambio el filtro trapezoidal y por regla de Simpson de $3/8$, tienen una ganancia menor que la del filtro ideal y la regla de Simpson de $1/3$ representa una mejor aproximación al integrador perfecto para frecuencias menores que $0,6\pi$ después de esto se incrementa muy rápidamente y se dispara en $w = \pi$. Además, los únicos que su respuesta de fase son similares a la del filtro ideal son el filtro trapezoidal y el filtro de Simpson de $1/3$.

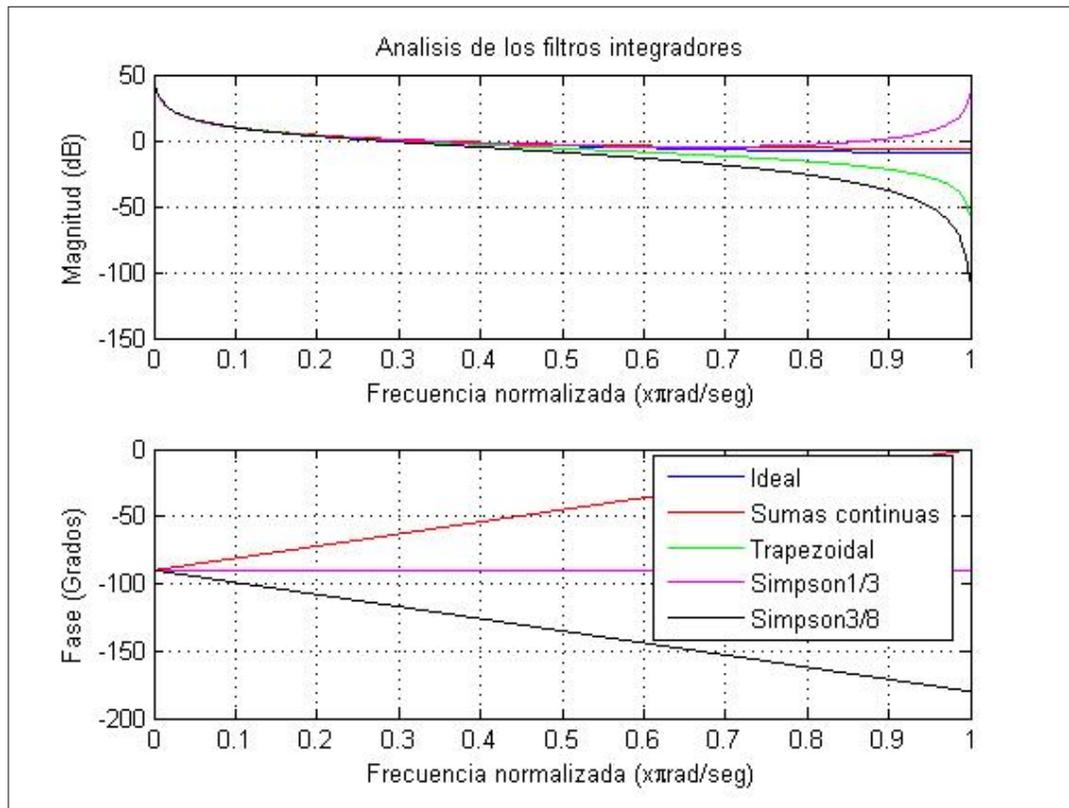


Figura 2.18 – Análisis de los filtros integradores.

La figura 2.18, también proporciona una vista de los cuatro integradores digitales y deja ver la información necesaria para seleccionar un integrador sobre otro. Por ejemplo si la señal de entrada esta restringida a frecuencias bajas todos los integradores proporcionaran un buen resultado. Sin embargo, si la entrada tiene algún contenido de frecuencia alta pero por debajo de $0,6\pi$, el integrador de Simpson de $1/3$ se desempeña mas próximo al integrador ideal y los otros tres generaran errores significativos. Si por otro lado se espera una entrada de alta frecuencia, habrá que evitar el integrador de Simpson de $1/3$ debido a que su ganancia infinita en π , siendo mejores opciones los integradores de suma continua a pesar que su desfase no es constante.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1. DESARROLLO DEL PROYECTO

En la figura 3.1 se muestra el diagrama del localizador espacial del movimiento del sistema del apuntador con tres acelerómetros [8] que después de ajustar sus parámetros de calibración se obtiene el vector A_b y con el estimador de los ángulos de rotación se obtiene el vector de los ángulos $X = [\phi, \theta, \psi]^T$ con ayuda de la detección de los puntos inicial y final del movimiento para después aplicar una transformación del marco del cuerpo del apuntador A_b al marco de navegación A_n para ajustar las componentes de gravedad y poder suprimirlas. Después de aplicar un filtro integrador para obtener la velocidad se emplea un algoritmo de compensación de velocidad a cero (ZVC) en los puntos inicial y final del movimiento para corregir el error ΔA_n en la señal de aceleración para después aplicar un filtro doble integrador y así obtener la estimación de la trayectoria y la distancia recorrida; esto se desarrolla todo a continuación.

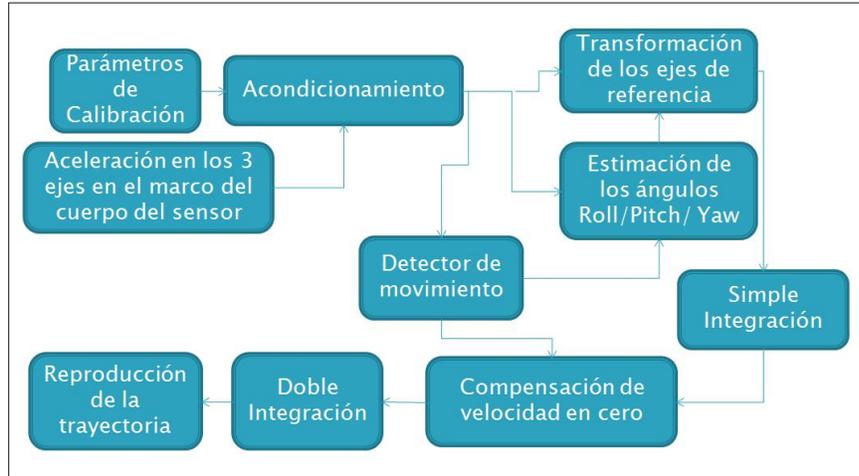


Figura 3.1 – Diagrama de bloques del proyecto del localizador espacial

3.2. MODELO DEL SISTEMA

Como se vio en la sección 2.2.4, se recordará que los estados de las ecuaciones del sistema son[25]:

$$P'_n = V_n \quad (3.1)$$

$$V'_n = C_b^n(X)A_b - G \quad (3.2)$$

donde $P_n = [P_{nx}, P_{ny}, P_{nz}]^T$ es el vector de posición en el marco de navegación \mathbf{n} y la primera derivada de P_n es el vector de la velocidad $V_n = [V_{nx}, V_{ny}, V_{nz}]^T$ y \mathbf{G} es el vector de gravedad $[0, 0, g]^T$ con una constante de la gravedad $g=9,81 \frac{m}{seg^2}$. También se mostró en el marco teórico, la necesidad de una matriz de transformación de rotación de los ejes $C_b^n(X)$, expresada en la ecuación 3.3.

$$C_b^n(X) = \begin{bmatrix} \theta_c \psi_c & -\phi_c \psi_s + \phi_s \theta_s \psi_c & \phi_s \psi_s + \phi_c \theta_s \psi_c \\ \theta_c \psi_s & \phi_c \psi_c + \phi_s \theta_s \psi_s & -\phi_s \psi_c + \phi_c \theta_s \psi_s \\ -\theta_s & \phi_s \theta_c & \phi_c \theta_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Donde $X = [\phi, \theta, \psi]^T$ es el vector de los ángulos de rotación, el subíndice s y c representa la función seno y coseno.

Cuando el apuntador no se mueve, se obtiene a partir de las ecuaciones 3.1 al 3.2 la siguiente ecuación.

$$C_b^n(X)A_b - G = 0 \quad (3.4)$$

De 3.4 y con la propiedad de ortogonalidad de C_b^n : $|C_b^n|^{-1} = |C_b^n|^T$ se obtiene la siguiente ecuación 3.5

$$Ab = |C_b^n(X)|^T G \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{bx} \\ A_{by} \\ A_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin(\theta) \\ -g \sin(\phi) \cos(\theta) \\ -g \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

y de 3.5 se despejan los ángulos y se obtienen las siguientes ecuaciones: 3.6 y 3.7

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-A_{by}}{-A_{bz}} \right) \quad (3.6)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{A_{bx}}{g} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}}{\sqrt{A_{by}^2 + A_{bz}^2}} \right) \quad (3.7)$$

Utilizando 3.6 y 3.7, es posible conocer roll θ y pitch ϕ en un punto estacionario.

En el sistema apuntador de navegación inercial de la figura 3.2 se tiene el problema de que los ejes de los tres acelerómetros no están alineados con los ejes de la punta del apuntador, sino que tienen una desviación muy pequeña entre ellos y según la ecuación 3.8 se asumirá que $L_1 = L_2 = 0$, para compensar la desalineación entre los ejes de los acelerómetros y los ejes de la punta del apuntador[28].

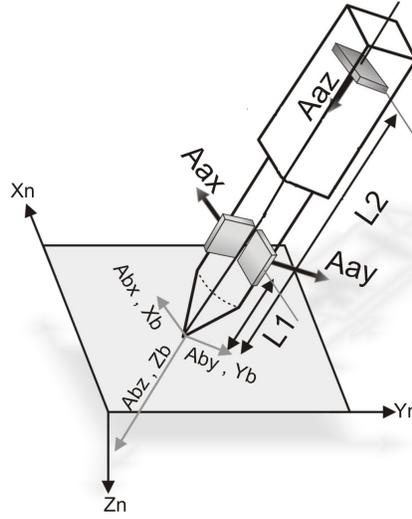


Figura 3.2 – Sistema de navegación con sensores de acelerometría, modificado desde[15]

$$\begin{bmatrix} A_{bx} \\ A_{by} \\ A_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ax} + (\omega_{bx}\omega_{bz} - \omega'_{by})L_1 \\ A_{ay} + (\omega_{by}\omega_{bz} - \omega'_{bx})L_1 \\ A_{az} - (\omega_{bx}^2 + \omega_{by}^2)L_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

donde A_{ax} , A_{ay} , y A_{az} son las mediciones de las aceleraciones de los ejes x_b , y_b , z_b y A_{bx} , A_{by} , y A_{bz} son las aceleraciones vistas desde la punta del apuntador de la figura 3.2.

3.3. ACONDICIONAMIENTO

Se acondicionan las señales de cada uno de los acelerómetros calibrando los sensores y aplicando un filtro pasa bajos para reducir el espectro de frecuencia al ancho de banda de trabajo que es de 10Hz.



Figura 3.3 – Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje x

3.3.1. CALIBRACIÓN

En esta etapa se corrige el error de desalineación a través de las ecuaciones 2.7 y 2.8, después se posiciona el apuntador en cada uno de los ejes de navegación en paralelo al vector de gravedad como se muestran en las figuras 3.3 al 3.5, para así obtener los valores de referencia g^+ y g^- en cada extremo de los ejes. Este valor se obtuvo del promedio de las mediciones de gravedad.

Después de obtener los valores de referencia de los extremos de los ejes paralelos al vector de gravedad se corrigen los errores del factor de escala y el de sesgo a través las ecuaciones 2.5 y 2.6.

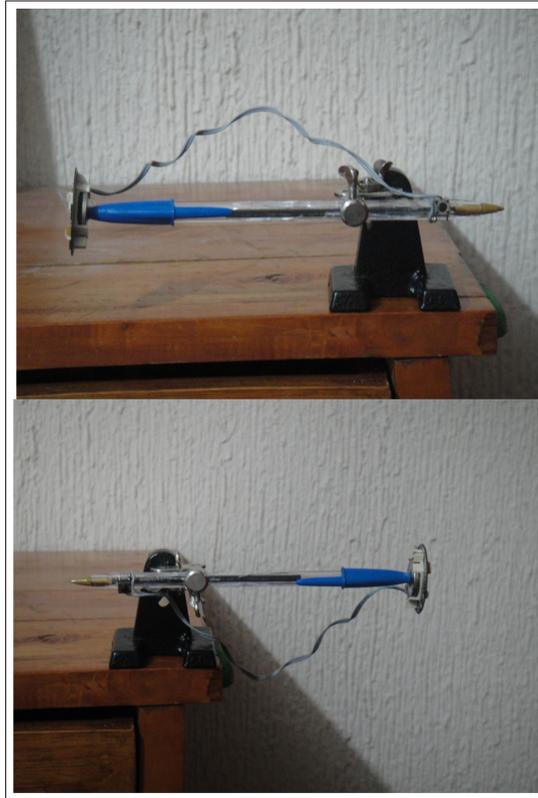


Figura 3.4 – *Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje y*

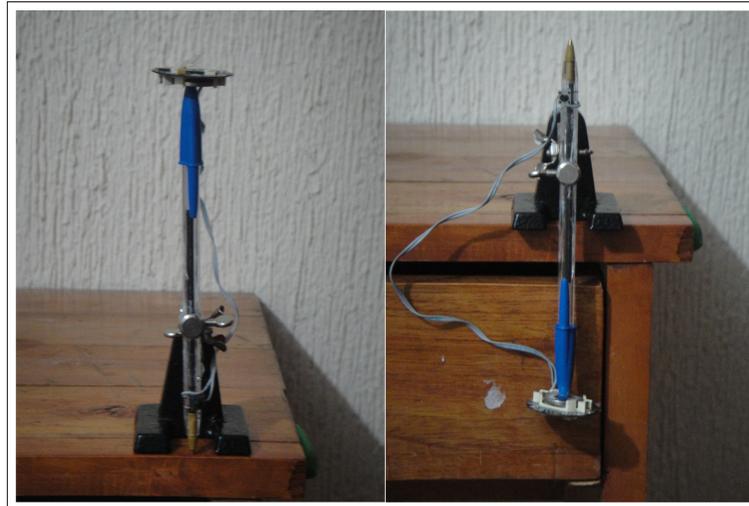


Figura 3.5 – *Posicionamientos del apuntador para corregir el factor de escala del eje z*

3.3.2. FILTRO PASA BAJOS

A partir de los resultados de [7] y [39] que encontraron que el ancho de banda de las señales de aceleración registradas por el movimiento es de 10Hz; por ende, se implementó un filtro pasa bajos FIR de orden 20 con ganancia en la banda de rechazo de -52.38dB y en la banda de paso de 0dB y cuya respuesta en frecuencia y fase se muestran en la figura 3.6.

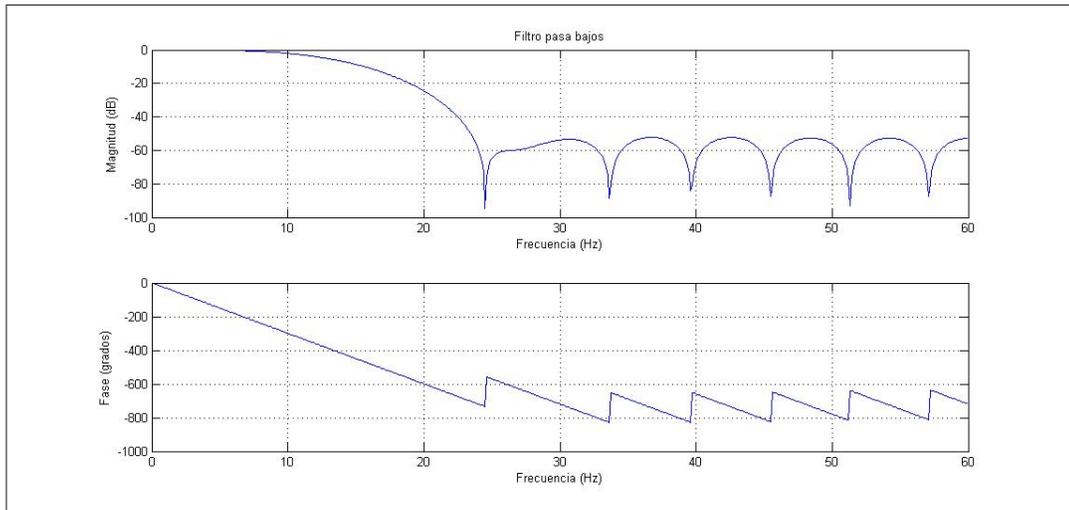


Figura 3.6 – Respuesta en frecuencia y de fase del filtro pasa bajos

3.4. ESTIMACIÓN DE LOS GIROS DE LOS EJES DE NAVEGACIÓN

A partir de [8], se encontró que los ángulos de rotación (roll ϕ , pitch ψ , yaw θ) no cambian mucho en un movimiento como es la escritura. Basado en esta observación, se propuso un método de aproximación lineal para estimar la rotación de los ángulos en el proceso de una cirugía lineal.

De las ecuaciones 3.6 y 3.7 se pueden calcular los ángulos roll ϕ y pitch θ cuando el sistema no esté en movimiento. Si se asume que el sistema no se mueve antes y después de la trayectoria; es posible calcular roll ϕ y pitch θ antes y después de la trayectoria y en el transcurso de la trayectoria se pueden

estimar los ángulos roll ϕ y pitch θ usando el siguiente método de aproximación lineal:

$$\phi(t) = at + b \quad (3.9)$$

$$\theta(t) = ct + d, \quad (3.10)$$

donde la constante **a**, **b**, **c**, y **d** esta dada como

$$a = \frac{\phi(t_2) - \phi(t_1)}{t_2 - t_1}; \quad (3.11)$$

$$b = -at + \phi(t_1) \quad (3.12)$$

$$c = \frac{\theta(t_2) - \theta(t_1)}{t_2 - t_1} \theta(t) \quad (3.13)$$

$$d = -ct_1 + \theta(t_1), \quad (3.14)$$

respectivamente. Usando las ecuaciones 3.9 y 3.10, se estima roll ϕ y pitch ψ en el intervalo de la trayectoria. De los resultados obtenidos en [8], se encontró que el ángulo yaw ψ no varia mucho su valor que es aproximadamente cero. Por ende, se fija $\psi = 0$. El algoritmo de estimación es resumido como sigue:

$$\phi(t) = \begin{cases} \phi_1 & t_0 \leq t < t_1 \\ at + b & t_1 \leq t < t_2 \\ \phi_2 & t_2 \leq t < t_e \end{cases}$$

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_1 & t_0 \leq t < t_1 \\ at + b & t_1 \leq t < t_2 \\ \theta_2 & t_2 \leq t < t_e \end{cases}$$

$$\psi(t) = 0 \text{ en } t_0 \leq t < t_e$$

donde las constantes ϕ_1, ϕ_2, θ_1 , y θ_2 son

$$\phi_1 = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{-A_{by}(t)}{-A_{bz}(t)} \right) \quad (3.15)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{t_f - t_2} \int_{t_2}^{t_e} \tan^{-1} \left(\frac{-A_{by}(t)}{-A_{bz}(t)} \right) \quad (3.16)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}(t)}{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) \quad (3.17)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{t_f - t_2} \int_{t_2}^{t_e} \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}(t)}{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) \quad (3.18)$$

siendo t_0 y t_e , el comienzo y la finalización de la adquisición de los datos de un movimiento y que t_1 y t_2 es el inicio y final del movimiento, respectivamente. Se asume que no hay movimiento cuando t esta en $t_0 \leq t < t_1$ y $t_2 \leq t < t_e$.

3.5. DETECCIÓN DEL INICIO Y FINAL DEL MOVIMIENTO

Como se necesita conocer el punto inicial y final del movimiento para poder determinar la estimación de la trayectoria del movimiento y también la estimación de las señales de los ángulos de rotación de los ejes; para ese propósito se utiliza un interruptor que al mantenerlo presionado indica el comienzo del movimiento y al soltarlo indica el final del movimiento, como se muestran en la figura 3.7.



Figura 3.7 – Apuntador de sistema de navegación inercial con el interruptor de detección de inicio y final del movimiento.

3.6. TRANSFORMACIÓN DE LOS EJES DE REFERENCIA A LOS EJES DE NAVEGACIÓN

Después de estimar los giros de los ejes en el transcurso de la navegación, se obtiene el vector de aceleración a través de la matriz de transformación expresada en las ecuaciones 3.3 al 3.5, la cual realiza una distribución de los componentes de la gravedad de los tres ejes de medición de los acelerómetros (referencia) y los transforman en los ejes de navegación haciendo que el vector de gravedad se ubique en el eje z y los componentes del movimiento sin influencia de la gravedad se ubiquen en los ejes X y Y .

3.7. ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DE VELOCIDAD

En el punto inicial y final del movimiento de la aceleración medida por los sensores no son cero debido al error presente en las señales de los acelerómetros que al ser integrado provoca que su velocidad registrada tenga un valor que no sea el verdadero de su velocidad inicial y final del movimiento porque tiende a crecer con el tiempo de adquisición

Por esta razón, se implemento un algoritmo de compensación de velocidad (ZVC), el cual se basa en la hipótesis de que el error es constante y crea una señal de velocidad que crece con el tiempo debido a su pendiente después de aplicar un filtro integrador [27].

Para compensar esto, se resta la pendiente de la señal de velocidad de la señal de aceleración conformada por $V_n(t_2)$ y $V_n(t_1)$ para disminuir o cancelar el error como se muestra en la ecuación 3.19.

Para aplicar esta técnica se necesita conocer exactamente el punto inicial y final del movimiento de un trazo lineal. El tiempo de inicio y final esta definido como t_1 y t_2 respectivamente.

$$A'_n(t) = A_n(t) - \frac{V_n(t_2) - V_n(t_1)}{t_2 - t_1}; \forall t \in [t_1, t_2] \quad (3.19)$$

3.8. BLOQUES DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA

La integración numérica simple es un filtro integrador de Simpson de 1/3, siendo su doble, la convolución del mismo filtro como es expresada en la sigui-

ente ecuación 3.20.

$$H_{sd}(\omega) = H_{simp13}(\omega) * H_{simp13}(\omega) = \frac{0,09 + 0,78e^{-j\omega} + 1,87e^{-j2\omega} + 0,78e^{-j3\omega} + 0,09e^{-j4\omega}}{1 - 2e^{-j2\omega} + e^{-j4\omega}} \quad (3.20)$$

3.9. REPRODUCCIÓN DE LA TRAYECTORIA

Esta etapa consiste en reproducir la trayectoria del movimiento del vector de posición P_n obtenido de la doble integración de $A'_n(t)$ y solo se grafican las componentes P_{nx} contra la componente P_{ny} , como se muestran en la figura 3.8.

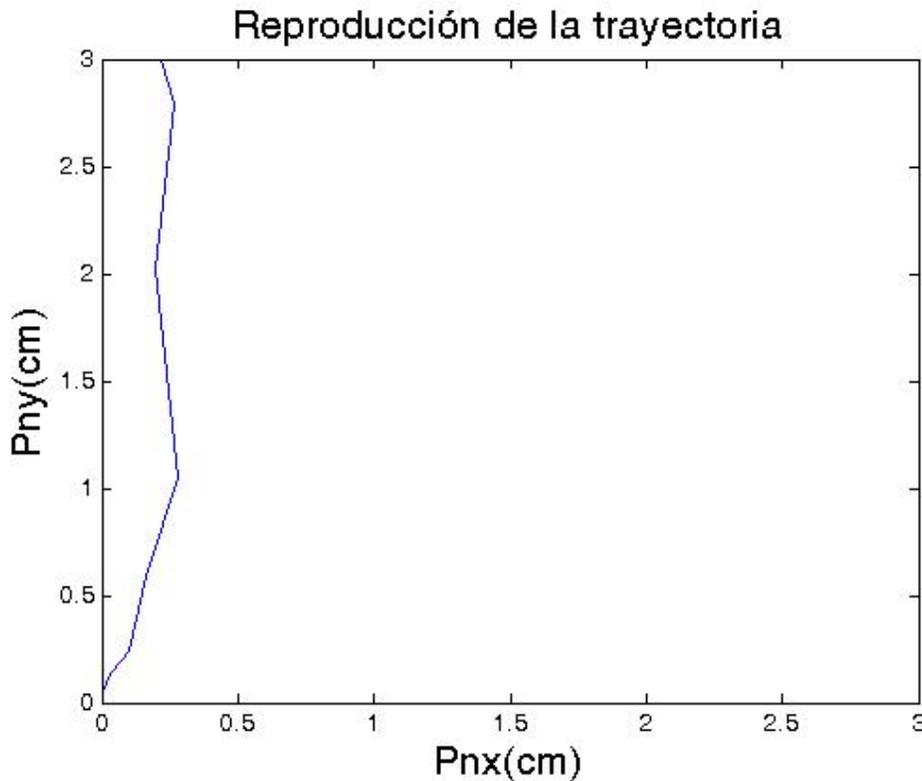


Figura 3.8 – Reproducción de la trayectoria de un movimiento

3.10. EXPERIMENTOS

Se realizaron 150 registros de movimientos de un trazo de una línea recta cuya distancia promedio es de 3cm, obteniendo los puntos inicial y final de cada movimiento y se utilizó un soporte que restringe el movimiento a un desplazamiento lineal y el de los giros de los ejes de navegación para que varíen lentamente, siendo la trayectoria del movimiento en paralelo al eje y del sensor. Estos registros se adquirieron con la herramienta de adquisición de acelerometría ZSTAR3 con una frecuencia de muestreo de 120Hz; en la figura 3.9 se muestra el soporte con la herramienta ZSTAR3. A partir de estos registros de aceleración del movimiento se procesan para obtener la posición a través del sistema propuesto, el cual se evaluó el error cuadrático medio de las distancias estimadas para validarlo.

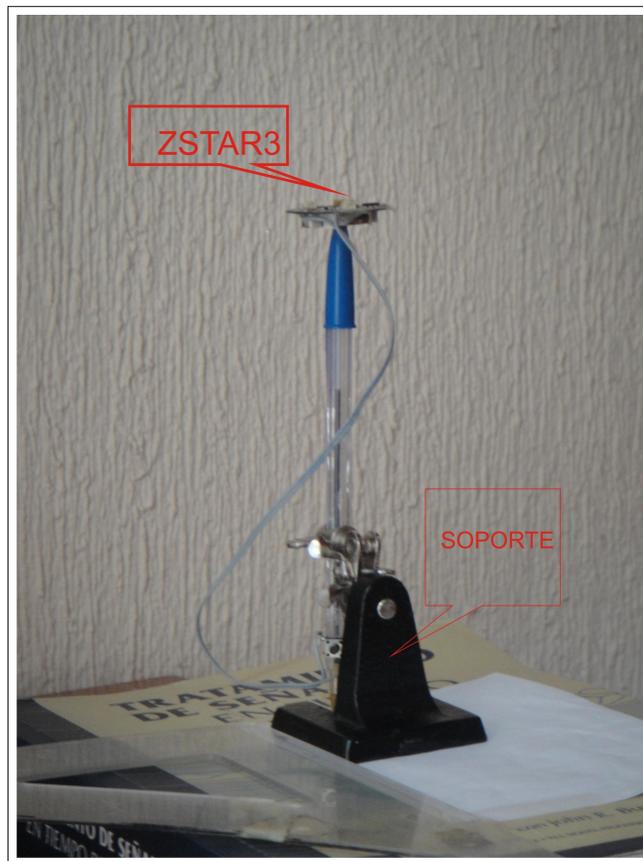


Figura 3.9 – Apuntador sujetado por el soporte que limita el giro de los ejes

Capítulo 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LOS MOVIMIENTOS

En la figura 4.1 se muestran las señales de aceleración A_{bx} , A_{by} , A_{bz} del registro de movimiento provenientes de la herramienta ZSTAR3 con los sensores ya calibrados con los valores de referencia (Vref) de cada eje de la tabla de calibración 4.1 y el inicio y final del movimiento esta representado con líneas verticales o puntos negros en las figuras.

Referencia del eje	Valor
Vrefx(+1g)	1,095238095
Vrefx(-1g)	-1,014578032
Vrefy(+1g)	1,015079365
Vrefy(-1g)	-1,007142857
Vrefz(+1g)	1,034126984
Vrefz(-1g)	-0,98015873

Tabla 4.1 – *Parámetros de calibración del sensor ZSTAR3.*

Se observa en la figura 4.1 que las señales poseen mucho ruido y la señal $A_{bz}(t)$ registra la gravedad más las perturbaciones generadas por el movimiento

debido a que el sensor esta paralelo a la gravedad y aproximadamente perpendicular al plano del movimiento.

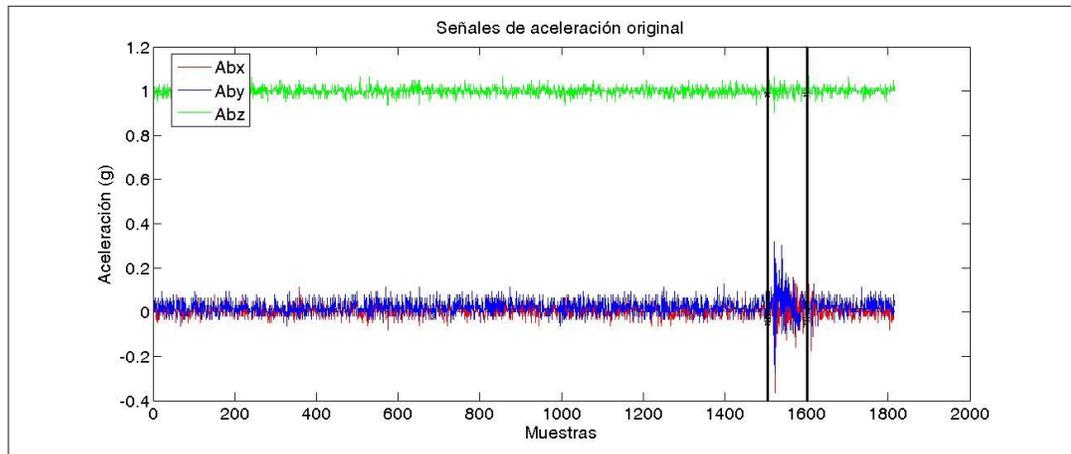


Figura 4.1 – Señales de aceleración original del movimiento

En la figura 4.2 se muestran las señales de aceleración filtradas por un filtro pasa bajos con frecuencia de corte de 10Hz y se observa que el ruido presente en las señales se ha reducido y tiende la señal a variar lentamente, casi constante, en las zonas donde no hay movimiento. También se observa al inicio de cada señal un fenómeno de retardo en la respuesta debido al filtro aplicado.

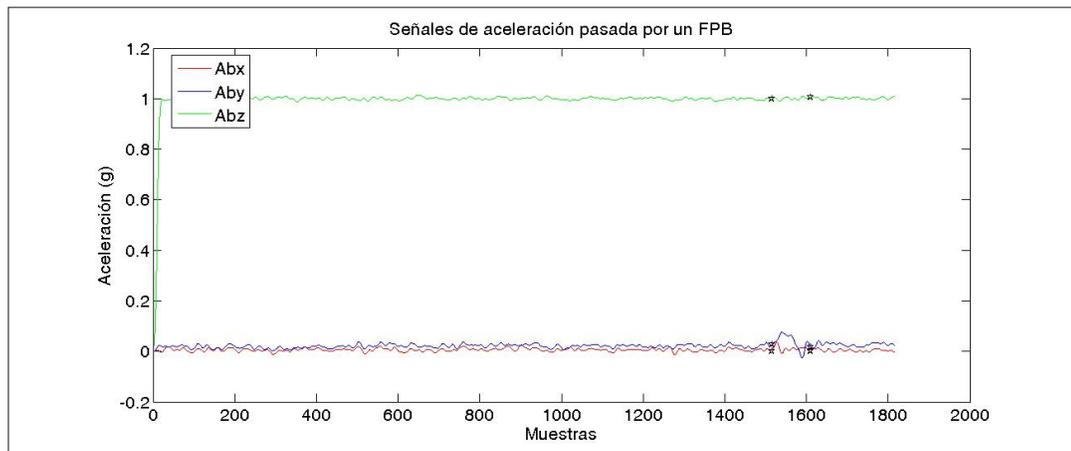


Figura 4.2 – Señales de aceleración filtradas por un filtro pasa bajos

En la figura 4.3 se muestran las señales de los ángulos Roll y Pitch obtenidas de la estimación a partir de las aceleraciones y se observa las señales de los ángulos calculados de Roll y Pitch representado por señales discontinuas que

varían mucho debido a que son obtenidos de señales oscilantes de las aceleraciones a pesar de que el apuntador este en estado estacionario. También se observa las señales de su correspondiente estimación de los ángulos de rotación representado por líneas continuas.

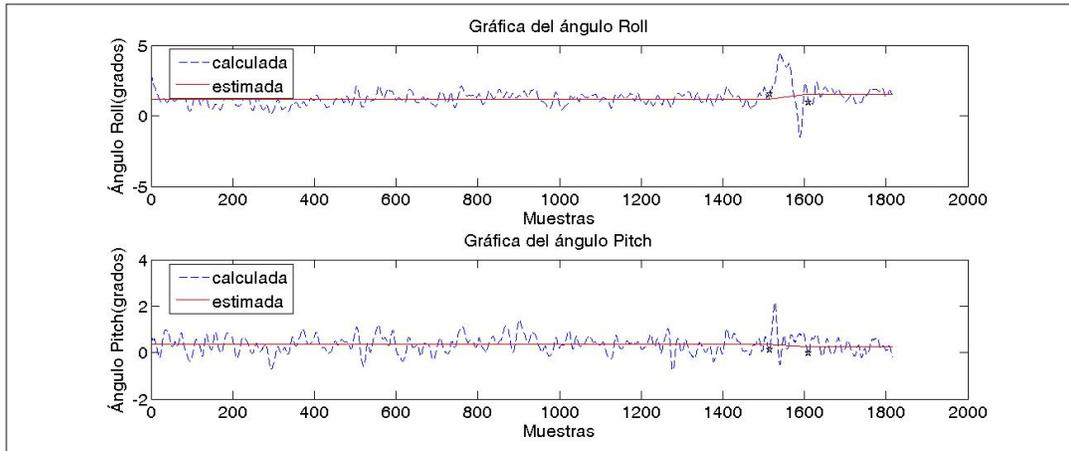


Figura 4.3 – Señales de los ángulos Roll y Pitch y su estimación

En la figura 4.4 se muestran las señales de aceleración transformadas A_{nx} , A_{ny} , A_{nz} a través de la estimación de los giros de los ejes en el transcurso del movimiento y se observa que las señales A_{bx} , A_{by} , A_{bz} se transformaron del marco de cuerpo \mathbf{b} del apuntador al marco de navegación \mathbf{n} logrando que la señal de A_{nz} registre el vector de gravedad por eso, tiende a ser constante a un valor de $+1g$ y las señales A_{nx} y A_{ny} registre la aceleración del movimiento.

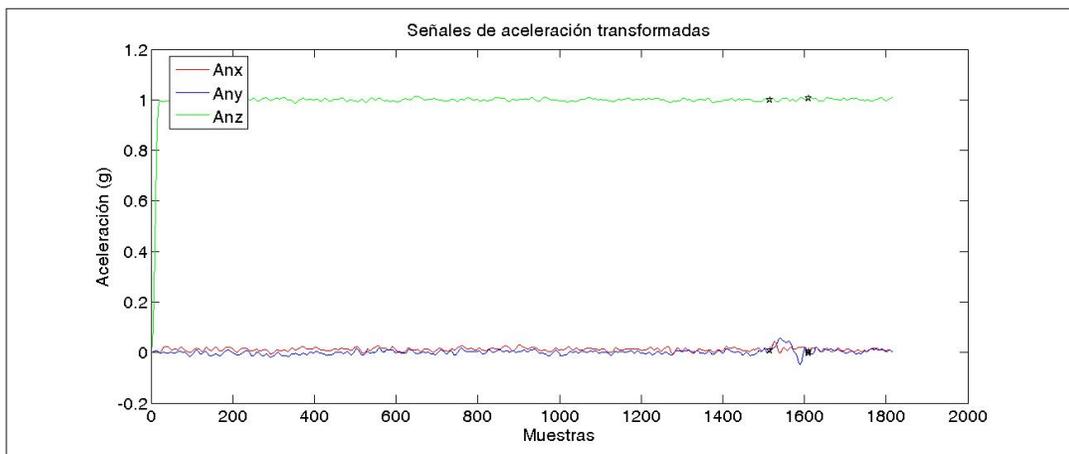


Figura 4.4 – Señales de aceleración transformadas

En la figura 4.5 se muestran las señales de aceleración del movimiento no compensadas A_{nx} , A_{ny} , A_{nz} en el intervalo de tiempo que ocurrió el movimiento y se observa que gran parte de la energía del movimiento la registra la señal A_{ny} en forma de una sinusoidal debido a la característica del acelerómetro y es razonable que diera ese resultado porque el movimiento solo se trazó en la proyección del eje y . También se muestran que las señales A_{nx} y A_{nz} registran un poco de la energía del movimiento en forma de perturbación.

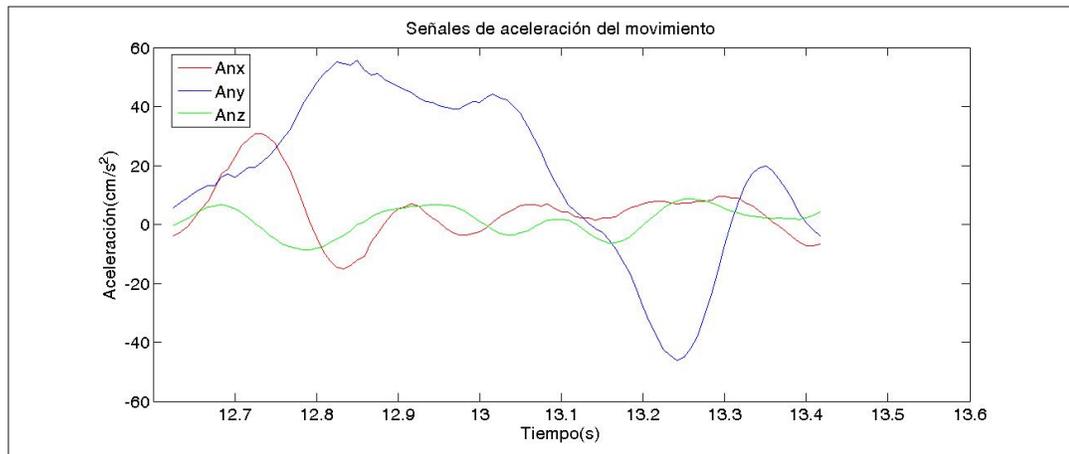


Figura 4.5 – Señales de aceleración del movimiento no compensadas

En la figura 4.6 se muestran las señales de velocidad del movimiento no compensadas V_{nx} , V_{ny} , V_{nz} en el intervalo de tiempo que ocurrió el movimiento y se observa que la mayor velocidad es la señal V_{ny} , como era de suponerse, en cambio la velocidad de la señal V_{nz} tiende a ser creciente debido al ruido porque no hubo un movimiento en la proyección del eje z .

También se observa que la señal V_{nx} registra valores de velocidad considerables pero esto, es debido a las perturbación del movimiento en la proyección del eje x que fue mínimo y del ruido.

En la figura 4.7 se muestran las señales de aceleración del movimiento compensadas A_{nx} , A_{ny} , A_{nz} en el intervalo de tiempo que ocurrió el movimiento. Como se puede observar, gracias al algoritmo de compensación de velocidad se disminuye el ruido presente en el sistema y también se ajusta los valores de inicio y final de la señal de aceleración para que resulte su velocidad en el inicio y final de la señal con valores cercanos a cero.

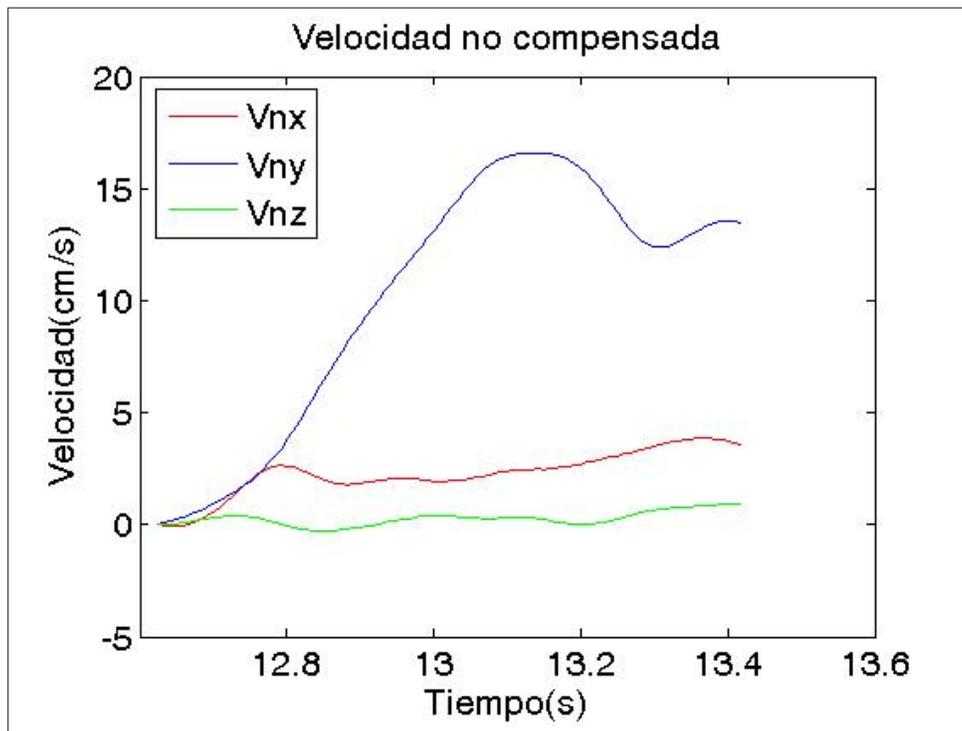


Figura 4.6 – Señales de velocidad no compensadas

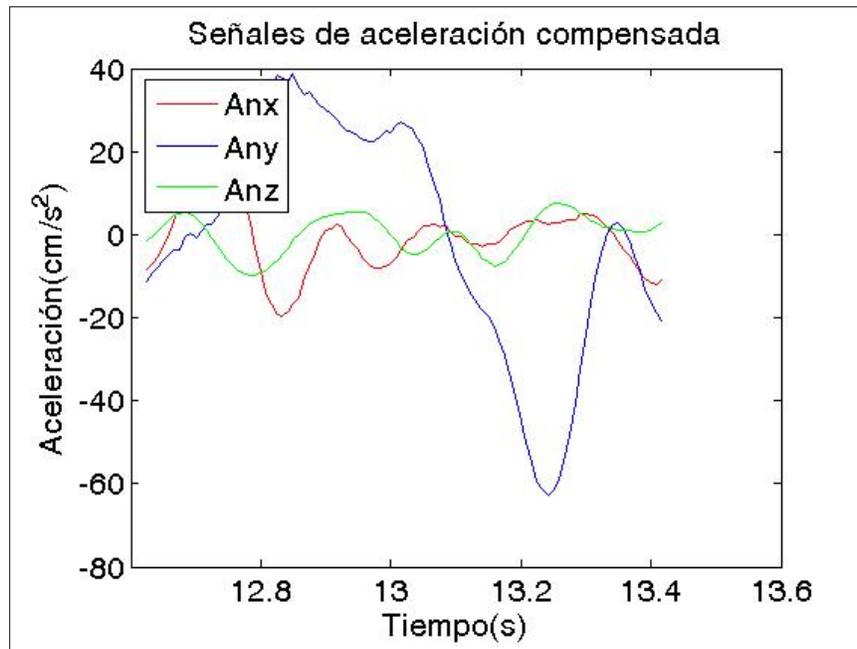


Figura 4.7 – Señales de aceleración compensadas

En la figura 4.8 se muestran las señales de velocidad del movimiento compensadas V_{nx} , V_{ny} , V_{nz} en el intervalo de tiempo que ocurrió el movimiento y se observa que resultó del algoritmo de compensación de la señal de la velocidad y también se observa el ascenso y descenso de la velocidad de la misma forma que se generó la velocidad en el trayecto del apuntador.

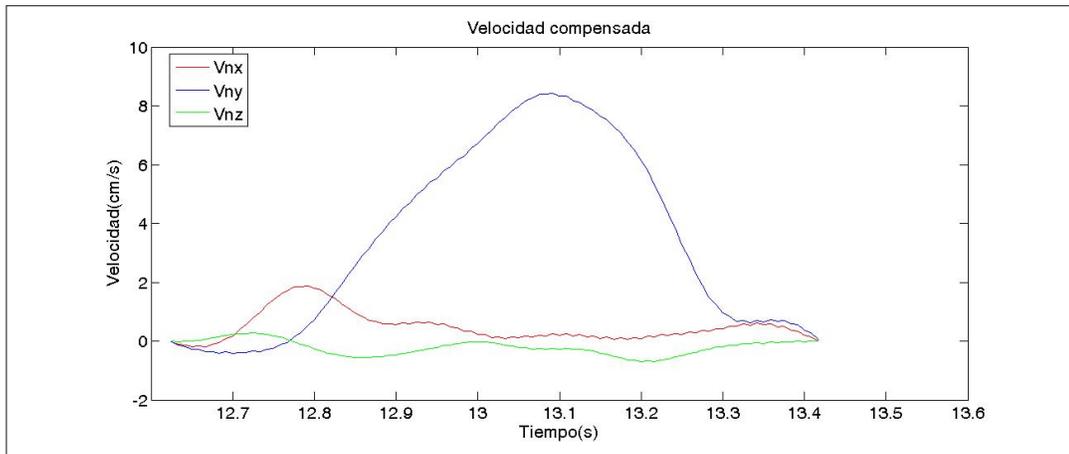


Figura 4.8 – Señales de velocidad compensadas

En la figura 4.9 se muestra la estimación de la distancia recorrida y su forma de trayectoria en el plano bidimensional P_{nx} con P_{ny} en el intervalo de tiempo que ocurrió el movimiento y se observa que se logra obtener una estimación de la trayectoria recorrida pero no se consigue el valor de la magnitud de la distancia. También se observa una pequeña desviación al inicio y al final de la trayectoria debido a la compensación de velocidad.

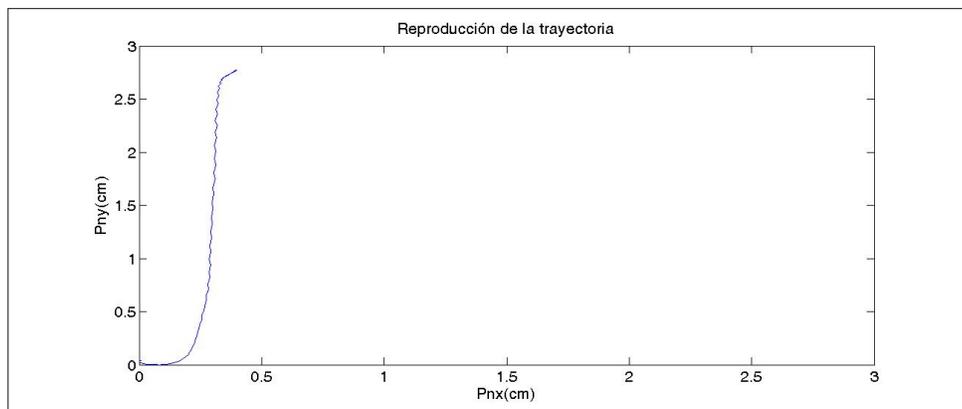


Figura 4.9 – Distancia recorrida

4.2. EVALUACIÓN DEL MODELO

En el Anexo A se muestran cada uno de los registros de movimiento con su media y desviación estándar de la aceleración del movimiento y de su distancia recorrida con su correspondiente error. A partir de estos resultados se obtiene una tabla de descripción estadística en general de dichos datos, ver la tabla 4.2 y una tabla de los errores que se obtuvieron de las mediciones, ver la tabla 4.3.

Datos	Promedio
Tiempo[s]	0,5735
Media[cm/s^2]	0,4955
Desviación Estándar[cm/s^2]	67,6676
Distancia[cm]	2,5723

Tabla 4.2 – Descripción estadística de los movimientos

Error	Valor[cm]
Cuadrático medio	1,2897
Medio	1,0713
Máximo	2,9571
Mínimo	0,0500

Tabla 4.3 – Valores de los errores

En la figura 4.10 se muestra el histograma del error de la distancia estimada recorrida de los registros de movimientos. Se observa en el histograma que 53 registros de movimiento obtuvieron un error menor a 0.5cm y 40 registros de movimiento obtuvieron un error entre 0.5cm y 1cm resultando en un total del 62 % de los 150 registros de movimientos con un error menor a 1cm y lo confirma la figura 4.11 que muestra que el error en general que esta por debajo del error cuadrático medio de 1.3cm.

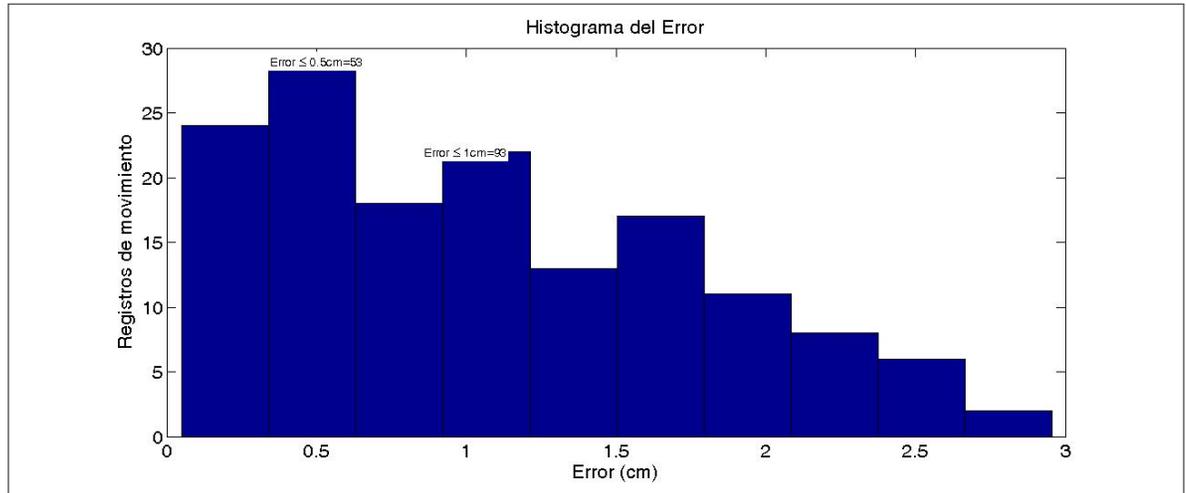


Figura 4.10 – Histograma del error

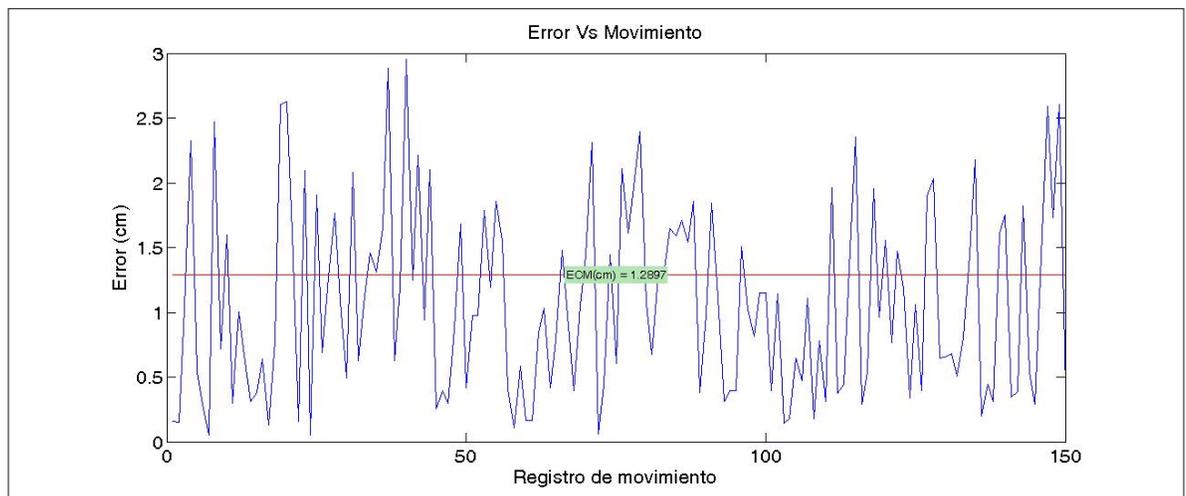


Figura 4.11 – Gráfica del error con respecto a cada registro de movimiento

Capítulo 5

DISCUSIÓN

5.1. ERRORES DEL SISTEMA

Según el modelo del sistema visto en la sección 3.2, el sistema del apuntador propuesto se ve afectado por la tendencia de los errores que crece con el tiempo. Esto es provocado por las diferentes fuentes de errores de los sensores que afecta el proceso de integración.

Ahora bien, para mejorar el rendimiento del sistema, es necesario conocer la influencia de cada fuente de error sobre el resultado de la posición y de su trayectoria. En esta sección, el modelo de error del sistema es construido para discutir la influencia de las fuentes de errores.

5.2. EL MODELO DE ERROR DEL SISTEMA

Los diferentes tipos de fuentes de errores del apuntador del sistema de navegación inercial, los cuales son los componentes fundamentales del presente sistema, son los siguientes:

- Error de Desalineación
- Error por Sesgo
- Error por Factor de escala
- Error por el Ruido térmico

En la figura 5.1, se muestra un diagrama de la propagación de estos errores en el sistema y en la tabla 5.1 se describe cada símbolo de las variables a utilizar en este modelo. De esta figura se discuten los siguientes conceptos: El error de la altitud (ángulos) es principalmente causado por los errores de la estimación de los ángulos de los ejes de navegación. Los errores en la posición y la velocidad son generados por los errores en la aceleración en el marco de referencia n Δa_n .

Símbolo	Descripción
δf_a	Error de los acelerómetros en el marco del sensor
δf_b	Error de los acelerómetros en el marco del cuerpo
$\delta \theta$	Error en la estimación del ángulo θ
$\delta \phi$	Error en la estimación del ángulo ϕ
$\delta \psi$	Error en la estimación del ángulo ψ
δt_0	Error en la detección del tiempo inicial
δt_e	Error en la detección del tiempo final
Δa_n	Error en el vector de navegación de la aceleración

Tabla 5.1 – Descripción de cada símbolo del sistema de error

En la ecuación 5.1, se muestra la relación que existe entre el error de los acelerómetros en el marco del sensor (δf_a) frente al error en el marco del cuerpo (δf_b) siendo la matriz M , la matriz de alineación entre ellos y δW_b el error que produce la medición de la rotación de los ejes, ver ecuación 5.2.

$$\delta f_b = \delta f_a + M\delta W_b \quad (5.1)$$

Pero si no hay rotación del apuntador, es decir que $W_b = 0$. Entonces $\delta f_b = \delta f_a$. Por ende, δf_b es independiente de los errores de la rotación y sí de los errores de los acelerómetros.

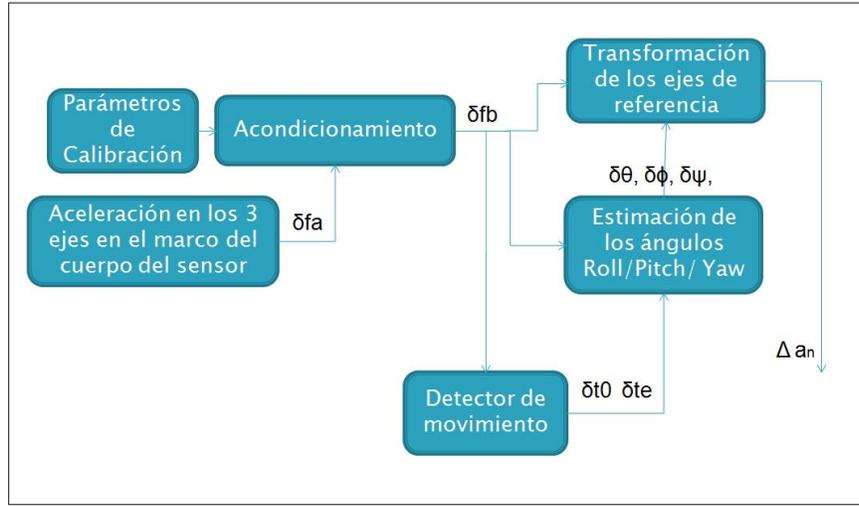


Figura 5.1 – Propagación de los errores básicos dentro del sistema.

$$M = \begin{bmatrix} L_1 W_{bz} & 0 & L_1 W_{bx} \\ 0 & L_1 W_{bz} & L_1 W_{by} \\ -2L_2 W_{bx} & -2L_2 W_{by} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Es conocido que el modelo ideal del apuntador satisface las ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$P'_n = V_n \quad (5.3)$$

$$V'_n = C_b^n(X)A_b - G \quad (5.4)$$

Aunque, debido a la influencia de los errores, el cálculo del movimiento del apuntador esta dado por el cálculo de la navegación del marco de referencia, el cual es definido como p (plataforma), de ahí se deduce las ecuaciones 5.5 y 5.6

$$P'_p = V_p \quad (5.5)$$

$$V'_p = C_b^p(f_b + \delta f_b) - G_p \quad (5.6)$$

Donde C_b^p es la matriz de transformación del marco b al marco p . Se define el error de posición como $\delta P = P_p - P_n$ y el error de velocidad como $\delta V = V_p - V_n$ respectivamente. Entonces el error de la velocidad es obtenido por la resta de las ecuaciones 5.3 con 5.5.

$$\delta P' = \delta V \quad (5.7)$$

El error de la aceleración es obtenido por la resta de las ecuaciones 5.4 con 5.6.

$$\delta V' = (I - C_p^n)C_b^p f_b + C_b^p \delta f_b - \delta G \quad (5.8)$$

Donde, $\delta G = G_p - G_n$ es el error de la gravedad del vector. En aplicaciones comunes, se asume que es $\delta G = 0$. C_p^n es la matriz de altitud del marco p al marco n , que es la matriz de error de los ángulos de altitud $C_p^n = \Delta C_b^n = f(\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi)$. los cuales están causados por los errores de la estimación de los ángulos de giro de los ejes.

5.3. DISCUSIÓN DEL ERROR

Basados sobre los principios de navegación de los sistemas inerciales el resultado de la posición final es hallado por la doble integración de $a_n(t)$, la cual se obtiene de la siguiente ecuación:

$$a_n(t) = C_b^n(t)a_b(t) \quad (5.9)$$

Donde $a_b(t)$, es la aceleración del marco de referencia \mathbf{b} , excluyendo la gravedad y $C_b^n(t)$ es la matriz de transformación del marco b al n . Según la figura 5.1 y la ecuación 5.8, con la suposición de que $\delta G = 0$, la siguiente ecuación 5.10 es obtenida donde cada termino se define en la tabla 5.2.

$$\Delta a_n(t) = f(\Delta C_b^n, C_b^n, \delta f_b, f_b(t), t) = [I - C_p^n(t)]C_b^p(t)f_b(t) + C_b^p(t)\delta f_b(t) \quad (5.10)$$

Símbolo	Descripción
$\Delta a_n(t)$	Error en el vector de navegación de la aceleración
$\delta f_b(t)$	Error de los acelerómetros en el marco del cuerpo b
$f_b(t)$	Vector de aceleración en el marco del cuerpo b
$C_b^p(t)$	Matriz de transformación del marco b al marco p
$C_p^n(t)$	Matriz de error de los ángulos de altitud $f(\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi)$

Tabla 5.2 – Descripción de cada símbolo del sistema de error

Cuando las mediciones de aceleraciones son transformadas del marco **b** al marco **n**, el primer término sobre el lado derecho de 5.10 muestra la desviación de la aceleración causada por el cálculo de la matriz de altitud C_b^p . El segundo término del lado derecho de 5.10, muestran que $\delta f_b(t)$ influye en $a_n(t)$ en forma dependiente de $C_b^n(t)$.

Además, al utilizar un método para eliminar la gravedad como es la resta de una unidad de gravedad ocasionaría residuos de gravedad. Por ejemplo, si la influencia de la gravedad en el sistema fuera de 1.001 g, faltaría eliminar 1mg esto ocasionaría un error de la estimación de los ángulos de 0.057° y un error de distancia acumulativo de 12.26 cm en 5 segundos.

Esta ecuación 5.10 es una función no lineal sobre el tiempo. Si no hay cambio de altitud, la constante del error de aceleración en el marco **b** conduce a una constante de error de aceleración en el marco **n**. Aun cuando los errores de las aceleraciones son constantes, su influencia en $\Delta a_n(t)$, cambiaría con el tiempo según la relación no lineal de la variable del error de altitud que incrementa la complejidad de esta relación no lineal.

5.4. COMPENSACIÓN DEL ERROR

Ahora bien, para compensar el error del sistema se necesita una información de referencia adicional para comparar pero no se tiene sensores auxiliares, lo único que se tiene es la siguiente observación al momento de realizar un movimiento. Durante el trazo de la línea, es natural tener algunas pausas

entre dos movimientos. Entonces el periodo del trazo puede ser dividido en los siguientes tres intervalos.

1. $0 \leq t \leq t_1$ Indica la pausa antes del comienzo del movimiento
2. $t_1 < t < t_2$ Indica la realización del movimiento
3. $t_2 \leq t \leq t_{end}$ Indica la pausa después de la finalización del movimiento

Entonces cuando el apuntador esta cuasi-estático; esto significa que el sistema está en el comienzo de una pausa o en la finalización de la pausa por lo que:

- La velocidad y la aceleración debería ser ser cero.
- Los ángulos de los ejes del apuntador pueden ser obtenidos mediante las mediciones con respecto a la gravedad.

5.4.1. COMPENSACIÓN DE ALTITUD

Durante el periodo en el cual el apuntador está estacionario, el apuntador no experimenta aceleraciones lineales, sino que sus tres acelerómetros solamente miden el vector de gravedad de la tierra. Por ende, la mediciones de cada acelerómetro están determinada por la altitud del apuntador. Ver la ecuación 5.11.

$$f^b = f^a = C_n^b G \quad (5.11)$$

Donde, $C_n^b = (C_n^b)^{-1} = (C_n^b)^T$. Entonces las mediciones de los acelerómetros en el marco b, (f_x^b, f_y^b, f_z^b) son: 5.12 al 5.14

$$f_x^b = -g \sin(\theta) \quad (5.12)$$

$$f_y^b = g \sin(\phi) \cos(\theta) \quad (5.13)$$

$$f_z^b = g \cos(\phi) \cos(\theta) \quad (5.14)$$

En esta situación, el ángulo roll y el ángulo pitch son calculado directamente desde las mediciones de los acelerómetros como las siguientes:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{f_y^b}{f_z^b}\right) \quad (5.15)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{-f_x^b}{g}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-f_x^b}{\sqrt{(f_y^b)^2 + (f_z^b)^2}}\right) \quad (5.16)$$

Cuando los ángulos de altitud son así obtenidos sus errores no se incrementarían con el tiempo, solamente depende del ruido de los acelerómetros. Por lo tanto, cuando el apuntador este estacionario, podría ser usado como medidor de altitud de referencia. Yaw ψ no puede ser obtenido de las mediciones de los acelerómetros. En el sistema general, el valor inicial de yaw es ajustado a cero grados en el comienzo del movimiento, debido a las observaciones realizadas en el movimiento, este ángulo no cambia.

El error del ángulo de altitud es considerado como una función lineal con el tiempo durante el periodo del movimiento como se puede apreciar en la figura 5.2. Entonces la parte del error de altitud es estimada con un modelo lineal sobre el tiempo. Los coeficientes del modelo son determinados por el cálculo de la altitud a través de las mediciones de aceleración y de los ángulos de inclinación del apuntador cuando esta en estado estacionario.

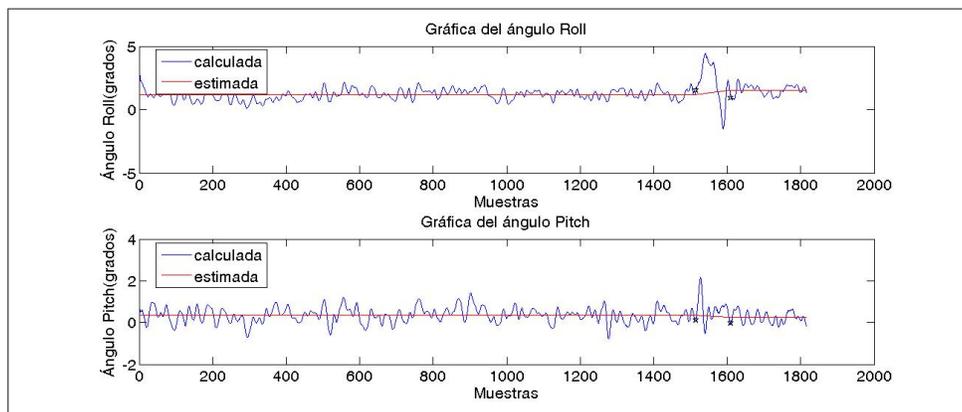


Figura 5.2 – *Compensación de altitud a través del estimador*

Se define los ángulos de inclinación obtenidos como $\phi_{inc}(t)$, $\theta_{inc}(t)$ y $\psi_{inc}(t)$ en el intervalo $(0 \leq t \leq t_e)$, ver figura 5.3. Se define la estimación de los ángulos de giro como $\phi_{acc}(t)$ y $\theta_{acc}(t)$ en el intervalo $(0 \leq t \leq t_1, t_2 \leq t \leq t_e)$. Dado que la información de referencia está disponible en los siguientes tres intervalos, se discute en estos intervalos de tiempo los errores de los ángulos Roll ϕ , Pitch θ y Yaw ψ .

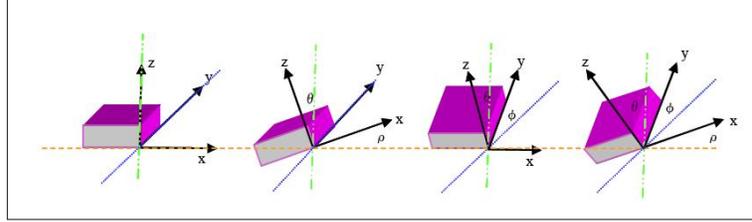


Figura 5.3 – Descripción de cada uno de los ángulos de inclinación, modificado desde [40]

1. $0 \leq t \leq t_1$

El error del ángulo Roll es:

$$\delta\phi(t) = \phi_{inc}(t_1) - \phi_{acc}(t_1) \quad (5.17)$$

Siendo el valor de $\phi_{inc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.18 y el valor de $\phi_{acc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.19

$$\phi_{inc}(t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{A_{by}(t)}{\sqrt{A_{bx}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) dt \quad (5.18)$$

$$\phi_{acc}(t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{A_{by}(t)}{A_{bz}(t)} \right) dt \quad (5.19)$$

El error del ángulo Roll $\delta\phi$ es aproximadamente cero debido a que el apuntador está en estado estacionario haciendo que la componente A_{nx} sea aproximadamente cero logrando igualar las ecuaciones 5.18 con 5.19.

El error del ángulo Pitch es:

$$\delta\theta(t) = \theta_{inc}(t_1) - \theta_{acc}(t_1) \quad (5.20)$$

Siendo el valor de $\theta_{inc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.21 y el valor de $\theta_{acc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.22

$$\theta_{inc}(t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}(t)}{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) dt \quad (5.21)$$

$$\theta_{acc}(t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}(t)}{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) dt \quad (5.22)$$

El error del ángulo Pitch $\delta\theta$ es cero porque el ángulo de inclinación y el ángulo de estimado de navegación son iguales debido a que sus ecuaciones para obtenerlos 5.21 y 5.22 también lo son.

El error del ángulo Yaw es:

$$\delta\psi(t) = \psi_{inc}(t_1) - \psi_{acc}(t_1) \quad (5.23)$$

Siendo el valor de $\psi_{inc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.24 y el valor de $\psi_{acc}(t_1)$ como se expresa en la ecuación 5.25

$$\psi_{inc}(t_1) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bx}^2(t)}}{A_{bz}(t)} \right) dt \quad (5.24)$$

$$\psi_{acc}(t_1) = 0. \quad (5.25)$$

El error del ángulo Yaw $\delta\psi$ es igual al ángulo de inclinación del eje z con respecto al vector contrario de la gravedad, ver ecuación 5.24 y la figura 5.3. Debido a que el valor estimado de Yaw se estableció cero y por eso es constante el error en los tres intervalos.

2. $t_2 \leq t \leq t_e$

El error del ángulo Roll es:

$$\delta\phi(t) = \phi_{inc}(t_1) - \phi_{acc}(t_2) \quad (5.26)$$

Siendo el valor de $\phi_{acc}(t_2)$ como se expresa en la ecuación 5.27

$$\phi_{acc}(t_2) = \frac{1}{t_e - t_2} \int_{t_2}^{t_e} \tan^{-1} \left(\frac{A_{by}(t)}{A_{bz}(t)} \right) dt \quad (5.27)$$

El error del ángulo Pitch es:

$$\delta\theta(t) = \theta_{inc}(t_1) - \theta_{acc}(t_2) \quad (5.28)$$

Siendo el valor de $\theta_{acc}(t_2)$ como se expresa en la ecuación 5.29

$$\theta_{acc}(t_2) = \frac{1}{t_e - t_2} \int_{t_2}^{t_e} \tan^{-1} \left(\frac{A_{bx}(t)}{\sqrt{A_{by}^2(t) + A_{bz}^2(t)}} \right) dt \quad (5.29)$$

El error del ángulo Yaw es:

$$\delta\psi(t) = \psi_{inc}(t_1) - \psi_{acc}(t_2) \quad (5.30)$$

Siendo el valor de $\psi_{acc}(t_2)$ como se expresa en la ecuación 5.31

$$\psi_{acc}(t_2) = 0. \quad (5.31)$$

El error del ángulo Roll $\delta\phi$ varia de acuerdo al valor del ángulo $\phi_{acc}(t_2)$ debido a que puede variar dependiendo de los errores de los acelerómetros que crece con el tiempo que lo demuestran el cambio de nivel de sesgo de la señal de aceleración; igualmente sucede para el error del ángulo Pitch $\delta\theta$.

3. $t_1 < t < t_2$

Durante este intervalo sólo la información de la altitud de referencia obtenido en otros intervalos es utilizada.

El error del ángulo Roll es:

$$\delta\phi(t) = \phi_{inc}(t_1) - \frac{\phi_{acc}(t_2) - \phi_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1} t + \frac{\phi_{acc}(t_2) - \phi_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1} t_1 - \phi_{acc}(t_1) \quad (5.32)$$

El error del ángulo Pitch es:

$$\delta\theta(t) = \theta_{inc}(t_1) - \frac{\theta_{acc}(t_2) - \theta_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1}t + \frac{\theta_{acc}(t_2) - \theta_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1}t_1 - \theta_{acc}(t_1) \quad (5.33)$$

El error del ángulo Yaw es:

$$\delta\psi(t) = \psi_{inc}(t_1) - \frac{\psi_{acc}(t_2) - \psi_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1}t + \frac{\psi_{acc}(t_2) - \psi_{acc}(t_1)}{t_2 - t_1}t_1 - \psi_{acc}(t_1) \quad (5.34)$$

El error del ángulo Roll $\delta\phi$ presenta una tendencia lineal debido a que se estima los ángulos de navegación a través de una ecuación lineal obtenido a partir de los ángulos $\phi_{acc}(t_1)$ y $\phi_{acc}(t_2)$. Por ende, entre mayor sea el ángulo de la pendiente de la función lineal del estimador mayor será el error de la estimación de la trayectoria y su distancia recorrida. En cambio si el ángulo de la pendiente de la función del estimador es cercano a cero, es decir, que son $\phi_{acc}(t_1) \approx \phi_{acc}(t_2)$. Esto provocará un menor error en la estimación de la trayectoria.

5.4.2. COMPENSACIÓN DE ACELERACIÓN

La verdadera velocidad en t_1 y t_2 son casi cero debido a las pausas del movimiento pero la velocidad procesada V_n indica valores diferentes de cero en las pausas del movimiento que son compensadas por ZVC (compensación de velocidad en cero) que se resume en la siguiente ecuación:

$$a'_n(t) = a_n(t) - \Delta a^n(t) \quad (5.35)$$

Siendo $a'_n(t)$ el vector de aceleración compensados y el error de aceleración $\Delta a^n(t)$ que es constante por el modelo lineal con el tiempo, que se representa en la siguiente ecuación: [5.36](#)

$$\Delta a^n(t) = k_a t + b_a \quad (5.36)$$

Donde k_a y b_a es determinado por $a^{n'}(t)$ en $0 \leq t \leq t_1$ y $t_2 \leq t \leq t_e$. Si se supone que no existen variaciones en el error, $k_a = 0$, entonces la compensación del error de aceleración llega a hacer constante, lo que genera una pendiente en la velocidad, como se resume en la ecuación 5.37

$$\Delta a_n(t) = \frac{v^n(t_2) - v^n(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (5.37)$$

5.5. DETECCIÓN DEL MOVIMIENTO

Como se mencionó anteriormente, es necesario separar el movimiento de los intervalos donde no hay movimiento para ser utilizado el algoritmo de compensación de velocidad y el estimador de los ángulos de rotación de los ejes. El tiempo exacto desde que comienza el movimiento t_1 hasta su finalización t_2 es importante hallarlo para reducir la acumulación de errores y obtener la posición exacta.

Para ese propósito se utiliza un interruptor que al mantenerlo presionado indica el comienzo del movimiento y al soltarlo indica el final del movimiento. Pero habrá un lapso de demora en la respuesta de parte del operador del apuntador en el momento del inicio del movimiento y de presionar el interruptor que se define como el error del tiempo de inicio δt_0 y el error del tiempo final δt_e del movimiento que es el tiempo de demora que el operador finaliza el movimiento y de soltar el interruptor agregando errores en el sistema navegación logrando una inexactitud en la posición.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una propuesta de diseño para un localizador espacial para cirugía basado en acelerometría MEMS, en el cual se concluye lo siguiente:

Todos los filtros integradores digitales vistos en esta tesis son filtros IIR y son por definición marginalmente inestables porque sus polos están en el círculo unitario $|Z| = 1$, es decir que la región de convergencia (ROC) es $|z| > 1$ y no lo incluye. Por esta razón son sumamente vulnerables a señales con ruido, por ende, cualquier valor a la entrada distinto de cero provocará que a la salida del filtro la salida crezca aún cuando físicamente no se este llevando a cabo ningún movimiento.

El modelo del sistema descrito, se ha comprobado su funcionamiento en un trazo de línea recta y se ha conseguido su reproducción a través de este sistema. También se creó un modelo de error basado en el funcionamiento del sistema y se discutió las fuentes de error y la ruta principal de propagación de los errores.

Que el problema de hallar la distancia a partir de la señal de aceleración no radica en los filtros integradores sino en el error acumulativo del sistema, el error aleatorio proveniente de los sensores y del error en la detección inicial y final del movimiento.

Con el fin de compensar estos error se utiliza la información que se obtiene de los acelerómetros del apuntador cuando está en estado estacionario para ayudar a obtener una estimación de los ángulos de giro en la realización del movimiento debido a que se conoce el inicio y el final del movimiento. Y los errores de aceleración fueron compensados con el ajuste de velocidad en cero (ZVC), lo que permitió estimar la trayectoria del movimiento.

La utilización de un algoritmo de compensación de velocidad en cero (ZVC) reduce el error general de aceleración del sistema pero no por completo porque deja un error residual que varia con el tiempo que afecta el resultado de la distancia recorrida por el apuntador.

El estimador de los ángulos de giro de los ejes funcionó satisfactoriamente con respecto a los valores de inclinación del apuntador debido a que sus formulas coinciden cuando el apuntador está en estado estacionario. También funciono satisfactoriamente la transformación de los marcos de referencia del cuerpo con el de navegación debido a que transfiere las proyecciones del vector de gravedad de los ejes x , y , z a una sola proyección que está en el eje z , la cual es suprimida.

El proyecto se limitó a la adquisición (medición) y visualización del movimiento en un trazo de una linea recta, lo que conllevo nuevamente a diseñar el proyecto a este especifico movimiento. También a no generar cambios gruesos en los ángulos de rotación de cada eje para poder estimar dichos ángulos en el transcurso del movimiento, a partir de los valores de aceleración obtenidos en el inicio y final del movimiento permitiendo prescindir de los sensores de medición de giro.

El trabajo futuro en este proyecto es mejorar el funcionamiento del sistema actual agregando otros sensores como giroscopios y magnetómetros para mejorar la estimación de la trayectoria y poder localizar el apuntador para cumplir los requerimientos exigidos en una cirugía asistida.

Apéndice A

REGISTROS DE MOVIMIENTOS

Numero	Tiempo[s]	Aceleración Media[cm/s ²]	Desviación Estándar de la Aceleración[cm/s ²]	Distancia[cm]	Error[cm]
1	0.791666667	0.007659857	26.80051058	2.765316306	0.234683694
2	0.725	-0.031083604	24.27577586	2.722137705	0.277862295
3	2.4	-0.082126086	8.33487746	0.485624535	2.514375465
4	0.683333333	0.079915022	14.47103129	0.463026803	2.536973197
5	1.116666667	0.068626549	15.09064132	1.943596105	1.056403895
6	0.85	0.152126623	23.84545981	2.442608058	0.557391942
7	0.833333333	-0.405398957	34.91594527	3.193766795	0.193766795
8	0.933333333	0.246322529	27.19683655	1.810236573	1.189763427
9	0.9	0.643807881	33.23358465	2.486006906	0.513993094
10	0.9	0.123372906	25.43881587	1.098093747	1.901906253
11	0.6	1.525150144	37.14987344	2.115957937	0.884042063
12	0.666666667	1.640511599	37.93964448	3.679977499	0.679977499
13	0.6	0.482127866	39.67547102	1.87413066	1.12586934
14	0.633333333	0.548971945	30.80816807	2.379474446	0.620525554
15	0.7	0.634061245	44.35164958	3.427274128	0.427274128
16	0.866666667	0.146662185	27.26186978	3.063675468	0.063675468
17	0.733333333	0.37979292	22.38763127	2.616765295	0.383234705
18	0.866666667	-1.079565549	37.93095825	0.469600409	2.530399591
19	0.833333333	0.095162365	68.6268594	5.716916323	2.716916323
20	0.666666667	1.695379649	37.9049714	0.221393861	2.778606139
21	0.533333333	1.425026888	69.57166702	4.191586304	1.191586304
22	0.5	-0.222844042	64.50157086	3.559824311	0.559824311
23	0.766666667	-1.734398918	65.83220648	6.203486246	3.203486246
24	0.8	-1.324644127	46.08903657	3.021892966	0.021892966
25	1.033333333	0.636502501	28.95316644	0.767544375	2.232455625
26	0.533333333	0.228435609	69.50324286	2.603018936	0.396981064
27	0.466666667	1.579839006	53.16577346	1.832562348	1.167437652
28	0.633333333	0.493855785	48.62305925	0.697315759	2.302684241
29	0.6	1.267309192	30.45613613	2.012605063	0.987394937
30	0.433333333	0.967265023	79.18018967	2.774508224	0.225491776
31	0.666666667	-0.806872221	75.01344136	5.747386087	2.747386087
32	0.433333333	-4.942871294	103.2681152	3.742611848	0.742611848
33	0.4	5.006102386	59.23977189	2.561011849	0.438988151
34	0.433333333	-0.445908552	51.65233057	0.619550318	2.380449682
35	0.5	0.113285637	70.54841804	4.286278106	1.286278106
36	0.466666667	-2.528301886	69.43051751	1.216171914	1.783828086
37	0.266666667	3.463312864	26.2243249	0.054519237	2.945480763
38	0.5	0.018595856	60.72944665	2.766927373	0.233072627
39	0.466666667	4.677966731	54.63149709	2.000265271	0.999734729
40	0.6	-2.43320139	85.57067354	1.255636667	1.744363333

Tabla A.1 – Resultados de cada registro de movimiento

Numero	Tiempo[s]	Desviación		Distancia[cm]	Error[cm]
		Aceleración Media[cm/s ²]	Estándar de la Aceleración[cm/s ²]		
41	0.733333333	2.397516875	45.20641172	2.330785808	0.669214192
42	0.5	3.382947458	60.55746387	0.408343344	2.591656656
43	0.5	-3.688445973	78.49748636	2.223288244	0.776711756
44	0.566666667	1.584053257	67.04346064	5.268336553	2.268336553
45	0.433333333	-2.568632376	83.80995537	3.980232619	0.980232619
46	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
47	0,6	1,525150144	37,14987344	2,115957937	0,884042063
48	0.433333333	-0.510898507	72.95491413	2.114954264	0.885045736
49	0.566666667	-0.077706455	36.81383746	0.925524052	2.074475948
50	0.366666667	-2.677299994	159.2339705	4.433021238	1.433021238
51	0.333333333	-0.365602344	131.0295415	2.99707934	0.00292066
52	0.833333333	1.627855911	65.40097082	7.15387871	4.15387871
53	0.6	1.545272399	56.18027433	1.282735753	1.717264247
54	0.5	1.784246068	98.48051725	4.247560556	1.247560556
55	0.5	1.904759715	48.16039723	0.192998712	2.807001288
56	0.566666667	-1.584955865	46.73338727	1.930074215	1.069925785
57	0.533333333	0.878058358	41.07058489	0.234777989	2.765222011
58	0.766666667	0.397222449	44.67134658	2.872955625	0.127044375
59	0.433333333	-2.048729879	80.08652883	1.685572254	1.314427746
60	0.5	2.990460209	94.87536624	2.466861849	0.533138151
61	0.566666667	0.941370264	54.81106302	2.51061217	0.48938783
62	0.466666667	-0.851712122	69.77927819	3.152177066	0.152177066
63	0.466666667	2.752785228	98.9319934	3.040212547	0.040212547
64	0.6	2.48742761	81.06015177	3.568842898	0.568842898
65	0.866666667	0.394899419	83.35913714	1.112527535	1.887472465
66	0.8	1.011621329	61.36638276	5.116425267	2.116425267
67	0.5	0.024098412	92.17325882	2.749427124	0.250572876
68	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
69	0.533333333	2.294227672	59.73459597	2.282957077	0.717042923
70	0.366666667	-8.138423853	136.9433481	3.374309411	0.374309411
71	0.6	-0.937291179	44.55511262	0.131992001	2.868007999
72	0.333333333	-2.593548348	96.4207941	0.350707991	2.649292009
73	0.6	1.422023673	72.67613328	3.155795965	0.155795965
74	0.4	5.772472896	99.85135201	3.098790535	0.098790535
75	0.366666667	0.979999009	135.8191891	3.774738367	0.774738367
76	0.366666667	-6.217093544	64.85631377	1.16925971	1.83074029
77	0.4	-5.10908074	87.28448028	2.684609377	0.315390623
78	0.3	-3.996046566	83.7894265	1.222853948	1.777146052
79	0.266666667	-8.117205075	70.57703146	0.2391617	2.7608383
80	0.333333333	5.946008417	53.49434911	1.487171976	1.512828024

Tabla A.2 – Resultados de cada registro de movimiento

Numero	Tiempo[s]	Aceleración Media[cm/s ²]	Desviación		Error[cm]
			Estándar de la Aceleración[cm/s ²]	Distancia[cm]	
81	0.566666667	0.200369253	43.61996183	1.948668811	1.051331189
82	0.366666667	-5.154696222	85.73856248	0.731182485	2.268817515
83	0.4	0.09718319	332.7037725	10.02000786	7.020007859
84	0.366666667	-2.917665044	90.8105401	3.066853818	0.066853818
85	0.266666667	-0.663123347	99.72410487	1.961097854	1.038902146
86	0.4	-0.470281571	67.14770856	0.650716407	2.349283593
87	0.266666667	5.190114663	107.5467533	1.693006528	1.306993472
88	0.3	12.72479706	75.5001752	0.462598636	2.537401364
89	0.366666667	0.35194158	95.06322853	2.8030394	0.1969606
90	0.433333333	1.513037729	119.8039955	4.315971445	1.315971445
91	0.6	3.323004493	57.16235436	1.677024218	1.322975782
92	0.333333333	1.950361402	113.2497321	0.364246656	2.635753344
93	0.766666667	-0.290359621	38.09155105	3.400586431	0.400586431
94	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
95	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
96	0.533333333	0.688320371	57.12139082	1.072767043	1.927232957
97	0.466666667	-1.050113222	101.2881339	3.474695764	0.474695764
98	0.7	0.871689372	59.69294987	1.751741036	1.248258964
99	0.766666667	1.228782552	61.03311018	3.553797954	0.553797954
100	0.433333333	3.013838073	88.47898827	3.257052591	0.257052591
101	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
102	0.433333333	2.581942983	44.85000963	1.682274004	1.317725996
103	0.7	1.089198495	70.13790321	3.17507883	0.17507883
104	0.566666667	1.250606433	48.3356486	2.9147866	0.0852134
105	0.666666667	0.878921677	97.57897889	2.528044973	0.471955027
106	0.6	1.449533524	87.91697405	3.751561257	0.751561257
107	0.5	0.442816543	62.38109353	1.951121127	1.048878873
108	0.633333333	0.201230111	70.02185029	2.853431955	0.146568045
109	0.5	-0.608061791	64.05926322	0.727855127	2.272144873
110	0.733333333	-1.77023377	47.01649599	0.075004011	2.924995989
111	0.5	0.90082041	119.1725661	4.683767509	1.683767509
112	0.5	-0.938583578	148.1440177	2.5016187	0.4983813
113	0.5	0.784973661	107.4935381	3.363927214	0.363927214
114	0.566666667	-0.013712699	92.21128842	3.732673513	0.732673513
115	0.633333333	-0.231108467	37.20557851	0.009002892	2.990997108
116	0.6	-0.848582811	57.76027206	3.44342468	0.44342468
117	0.833333333	0.345273686	64.0931389	1.728666025	1.271333975
118	0.566666667	-0.182474147	84.00825173	5.701218643	2.701218643
119	0.433333333	3.027493403	89.36905769	0.968238701	2.031761299
120	0.433333333	4.237177531	98.26071854	3.352430684	0.352430684

Tabla A.3 – Resultados de cada registro de movimiento

Numero	Tiempo[s]	Aceleración Media[cm/s ²]	Desviación		Error[cm]
			Estándar de la Aceleración[cm/s ²]	Distancia[cm]	
121	0.7	0.958702045	54.95038715	2.893615441	0.106384559
122	0.7	1.318843388	75.88909971	4.143399534	1.143399534
123	0.666666667	-0.055506311	29.56081467	0.910804561	2.089195439
124	0.733333333	1.617699202	87.21866079	2.466129147	0.533870853
125	0.766666667	1.130638133	87.72882623	1.779936209	1.220063791
126	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612
127	0.533333333	1.986490491	63.86750045	4.635211313	1.635211313
128	0.6	2.572277606	66.8559582	4.80133635	1.80133635
129	0.6	0.620120143	77.23519829	2.815703206	0.184296794
130	0.533333333	0.445156816	74.65353562	2.294126896	0.705873104
131	0.733333333	-0.001808535	51.12596374	0.023092276	2.976907724
132	0.466666667	1.282568595	69.01511603	3.1069069	0.1069069
133	0.5	0.674520304	133.7087411	3.672971079	0.672971079
134	0.5	0.798380476	114.8442264	4.346214279	1.346214279
135	0.966666667	-1.94115968	63.72050412	5.837310427	2.837310427
136	0.366666667	2.027607529	127.0695084	4.043671949	1.043671949
137	0,5	0,784973661	107,4935381	3,363927214	0,363927214
138	0,633333333	0,548971945	30,80816807	2,379474446	0,620525554
139	0.566666667	0.292836187	77.91597545	3.5282231	0.5282231
140	0.433333333	1.672937115	149.5330847	4.612630454	1.612630454
141	0.4	2.797792221	112.6757508	2.816917403	0.183082597
142	0.566666667	3.108154321	80.04943657	3.634638828	0.634638828
143	0.466666667	-1.071553627	40.51514629	0.670516492	2.329483508
144	0.366666667	3.873769751	95.35756838	2.054509162	0.945490838
145	0.533333333	1.186095013	57.38872305	3.279745833	0.279745833
146	0.733333333	-1.902880621	94.92563146	4.709886492	1.709886492
147	0.433333333	1.082922587	85.5955435	3.131708068	0.131708068
148	0.8	-0.295724703	74.65388215	3.604263898	0.604263898
149	0.7	0.490742689	100.4400124	0.036106944	2.963893056
150	0.366666667	3.438698487	89.47137105	2.552580388	0.447419612

Tabla A.4 – Resultados de cada registro de movimiento

Bibliografía

- [1] F. Cohadon.: *Advances and Technical Standads in Neurosurgery*, Vol 24, p. 79, 1998.
- [2] V. Medina Bañuelos R. Gonzalez Barrera: *Funsion de imágenes cerebrales anatómicas y funcionales.*, Congreso Nacional de Ingeniería biomédica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica, 2005.
- [3] Z. Jiang F.G.Diaz L. Zamorano, F.C. Vinas: *Use of surgical wands on neurosurgery*, Advances and Technical Standards in Neurosurgery, 1998.
- [4] R. Gaitán: *Diseño y construcción de un localizador utilizando acelerómetros*, Reporte de proyecto terminal de la Licenciatura en Ingeniería Biomédica de la Universidad Autónoma Metropolitana Campus Iztapalapa p.4,7, 2007.
- [5] V. Macellari D. Giansanti: *Is it feasible to reconstruct body segment 3d position and orientation using accelerometric data?*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, P.50, 2003.
- [6] D. H. Mugler Y. Wu.: *A robust dsp integrator for accelerometer signals*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 51(2),2004.
- [7] N. Gi-Joon L. Seungbae: *Two-dimensional position detection system with mems accelerometers, readout circuitry and microprocessor for pad-less mouse applications*, IEEE Transactions on Biomedical Engeneering, 13(10), 2005.

-
- [8] E. Choi W.Chang: *Development of the Gyro-free Handwriting Input Device based on Inercial Navigation System Theory*, SICE Annual Conference in Sapporo, August 46,2004.
- [9] Freescale Semiconductor: *Document Number: MMA7360L*, Tecnical Data. Rev 2, August,2007.
- [10] Mohinder S. Grewal Lawrence R. Weill Angus P. Andrews: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration.*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2007
- [11] David H. Titterton and John L. Weston: *Strapdown Inertial Navigation Technology.*, The Institution of Electrical Engineers. 2nd Edition,2004
- [12] Robert M. Rogers: *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems.*, AIAA Education series. 2nd Edition, 2003
- [13] Burbano S. Garcia M.: *FÍSICA GENERAL.*, Tebar, 1st Edition, 2007.
- [14] Wei Tech Ang: *Nonlinear Regression Model of a Low MEMS Accelerometer*, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 1, JANUARY 2007
- [15] Yasuhiro Sato: *Novel Device for Inputting Handwriting Trajectory.*, Ricoh Technical Report No.27, NOVEMBER, 2001
- [16] Oppenheim A. Schafer R.: *TRATAMIENTO DE SEÑALES EN TIEMPO DISCRETO.*, PRENTICE HALL. 2da. Edicion. pags. 41-43.
- [17] Barrios J.: *INTRODUCCION A LOS FILTROS DIGITALES.*, UAM. 1ra. Edicion. pags. 89-91.
- [18] Stephen D. Senturia: *MICROSYSTEM DESIGN*, KLUWER ACADEMIC. 1st edition, 2001.
- [19] Y K Thong: *Dependence of inertial measurements of distance on accelerometer noise.*, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING. 1st edition,2002.
- [20] Rodríguez C.: *Diccionario de Medicina.*, Espasa Calpe, 2000.
- [21] Schwartz: *Principios de cirugía*, Mc GrawHill, 8th edition, 2000.

-
- [22] Sabiston: *TextBook of Surgery*, Saunders, 18th Edition, 2007.
- [23] Cameron N. Riviere: *Characteristics of hand motion of eye surgeons.*, In Proc. 19th Annu. Conf. IEEE Engineering in medicine and biology society. 1997, pp. 1690-1693.
- [24] Pestana-Tirado RA., Moreno LR., González A.: *Dominio motor y destreza. La verdadera esencia del cirujano*, REVISTA COLOMBIANA DE CIRUGÍA. Vol. 19, january - december de 2004
- [25] Dissanayake G., Sukkarieh S.: *The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications*, IEEE transactions on Robotics and Automation, vol. 17. pp. 731-747, Oct. 2001.
- [26] Jing Yang, Eun-Seok Choi: *A Novel Hand Gesture Input Device Based on Inertial Sensing Technique*, the 30th annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2- 6, 2004, Busan, Korea.
- [27] Won-Chul Bang, Wook Chang: *Self-contained Spatial Input Device for Wearable Computers*, Proceeding of the Seventh IEEE international Sympsiom on Wearable Computers 2003.
- [28] Jing Yang, Won-Chul Bang, Wook Chang: *Analysis and Compensation of Errors in the input Device Based on Inertial Sensors.*, Proceeding of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing, 2004
- [29] Rodriguez Luis: *FISICA I*, Departamento de fisica, Universidad Santiago de Chile. pags. 13-25.
- [30] SORG, H. W.: *From Serson to Draper - two centuries of gyroscopic development*, Journal of Institute of Navigation, 1976-77, 23 (4)
- [31] BRITTING, K.: *Inertial navigation system analysis*, Wiley Interscience, New York, 1971.
- [32] DRAPER, C, WRIGLEY, W., and HOVORKA, J.: *Inertial guidance*, Pergamon Press, 1960.

- [33] WRIGLEY, W., HOLLISTER, W.M., and DENHARD, W.G.: *Gyroscopic theory, design and instrumentation*, MIT Press, 1969.
- [34] OPPENHEIM A. WILLSKY S.: *SIGNALS AND SYSTEMS*, Prentice Hall International, Inc. 2nd Edition. pags 778.
- [35] FREESCALE: *DATOS DEL ZSTAR3*, http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=RD3172MMA7456L fecha de visita: Marzo 09 del 2010.
- [36] FREESCALE: *DATOS DEL MMA7456L*, http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MMA745xLnodeId=01126911184209 fecha de visita: Marzo 09 del 2010.
- [37] Titterton, D. H.: *Strapdown inertial navigation technology*, Institution of Electrical Engineers, 2nd Edition, Pags. 11-15.
- [38] Analog Devices Inc.: *ADXL50 Monolithic Accelerometer With Signal Conditioning Datasheet*, Analog Devices Inc. 1996.
- [39] Robert Baron: *Acceleration Measurement with an Instrumented Pen for Signature Verification and Handwriting Analysis*, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT VOL. 38 NO. 6 DECEMBER 1989.
- [40] Freescale Semiconductor: *Tilt Sensing Using Linear Accelerometers. Application Note: AN3461*, Technical Data. Rev 2, June,2007.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA – IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
LOCALIZADOR ESPACIAL PARA CIRUGÍA**

Tesis que presenta
Mauricio Andrés Barrios Barrios
Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Biomédica

Asesor: M.I. OSCAR YÁÑEZ SUÁREZ

Jurado calificador:

Presidente: Dr. FERNANDO ARÁMBULA COSÍO UNAM-CCADET

Secretario: M.I. OSCAR YÁÑEZ SUÁREZ UAM-I

Vocal: M.C. CAUPOLICÁN MUÑOZ GAMBOA UAM-I

México, D.F. julio 2010