

SISTEMA DE REGISTRO DE LOS MIEMBROS
INFERIORES DURANTE LA MARCHA

Edwin García Ospina

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Mecatrónica

Bogotá D. C. 2012

SISTEMA DE REGISTRO DE LOS MIEMBROS
INFERIORES DURANTE LA MARCHA

Edwin García Ospina

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero en Mecatrónica

Tutor del proyecto Ing. Nelson Velasco

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Programa de Mecatrónica

Bogotá D. C. 2012

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente

Primer Jurado

Segundo Jurado

Septiembre 10 de 2012

DEDICATORIA

A lo largo de mi vida he tenido la grata sorpresa de contar con personas que siempre han estado apoyándome en las buenas y sobre todo en las malas, mi madre a la que le agradezco todo el cariño que me ha brindado, a la cual le admiro su carácter y su disposición por la familia, a mi padre quien al lado de mi madre me ha dado un gran ejemplo de respeto y moderación, de él admiro su lucha inagotable y a mi hermana quien con su valentía me ha demostrado que todo lo que se quiere se alcanza con un poco de esfuerzo. Gracias al apoyo de estas personas hoy se convierte en una realidad lo que en algún momento fue un sueño.

AGRADECIMIENTOS

Nelson Velasco Ing. Mecatrónico, profesor de la facultad de Ing. Mecatrónica, por su contante supervisión y aportes en el desarrollo de este trabajo.

William Gómez Ing. mecánico, profesor de la facultad de Ing. Mecatrónica, por sus acertadas correcciones y constantes consejos.

A la Universidad Militar Nueva Granada, por la formación académica y la disponibilidad de las instalaciones donde se construyo la parte física del proyecto.

Iván Mendoza joven investigador de Ingeniería mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada y compañero del proyecto Y aquellas personas que de una u otra forma apoyaron el proyecto.

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Captura de movimiento	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo general:	10
1.2.2. Objetivos específicos:	11
1.3. Antecedentes	11
2. Sistema de captura de movimiento	18
2.1. Sistemas en tiempo real (STR)	18
2.1.1. Clasificación de los sistemas en tiempo real.	18
2.2. Captura de movimiento	19
2.2.1. Sensores	19
2.2.2. Software del micro-controlador.	22
2.2.3. Modulo de comunicación	26
2.2.4. Verificación de los datos	27
2.3. Sistema Real de Captura de Movimiento	29
3. Filtros Digitales	32
3.1. Ventajas del filtro Digital	33
3.2. Funcionamiento de los filtro digitales	34
3.3. Filtro FIR	35
3.3.1. Característica de los filtros FIR	35
3.3.2. Expresión matemática de los filtros FIR	36
3.3.3. Estructura	36
3.3.4. Métodos de diseño de un filtro FIR	36
3.4. Filtro Adaptativo	38
3.4.1. Característica de los filtros adaptativos	38
3.4.2. Algoritmo	39
3.4.3. Estructura	40
4. Cinemática de la marcha	42
4.1. Movimiento de cuerpo rígido	42
4.1.1. Aceleración y velocidad media e instantanea	43

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	7
4.1.2. Componentes intrínsecas de la aceleración: aceleración tangencial y normal o centrípeta	44
4.2. Cinemática de las extremidades inferiores	45
4.3. Obtención de variables cinemáticas	46
5. Implementación del sistema de registro	55
5.1. Introducción	55
5.2. Acondicionamiento de la señal	56
5.2.1. Disminución de ruido	56
5.2.2. Adaptación de los sensores	58
5.2.3. Aplicación filtro adaptativo	60
5.3. Interfaz gráfica	63
5.3.1. Descripción del código de la interfaz gráfica	64
6. Conclusiones y Trabajos futuros	66

Capítulo 1

Introducción

En el presente libro se hablará del desarrollo de un sistema de registro durante la marcha, el cual se lleva a cabo por medio de un sistema de captura de movimiento, este sistema de captura de movimiento consta de cuatro acelerómetros, un PIC, un módulo de comunicación de radio frecuencia de protocolo ZigBee (XBee) y un computador donde se van a procesar las señales. Cada acelerómetro toma las señales en tres coordenadas que es indispensable para la ubicación en un sistema de referencia, para digitalizar las señales se usó el pic18f4550 que contiene 13 entradas análogas/digitales, de las cuales se usaron 12, cada una acondicionada a 10 bit. Las señales son transmitidas al computador por medio del módulo de comunicación. Ya obtenidas las señales en el computador se les hace el debido procesamiento para obtener la aceleración, cuyo dato se encuentra enmascarado por las condiciones del sensor, después de obtener la curva de aceleración, se generan las curvas de velocidad y posición, que luego son llevadas a una interfaz gráfica donde se muestran los resultados obtenidos.

La marcha en el ser humano es una serie de movimientos rítmicos de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad y que gracias a la fricción que hacen los pies con el suelo se puede obtener un desplazamiento. El ciclo comienza cuando el pie hace contacto con el suelo y termina con el siguiente contacto del mismo pie en el suelo. En otras palabras se puede decir que es lo que constituye la locomoción elocuente de desplazamiento de las personas.

Para una persona con sobre peso, la marcha ayuda a la movilidad del sistema óseo y colabora en la movilización de los líquidos en el cuerpo, ya que al realizar marchas constantes colaboran con el sistema cardiovascular y ayuda a que la persona baje de peso.

En el desarrollo de los niños, la marcha es una de las habilidades motoras básicas, que asientan las bases de actividades motoras más avanzadas y específicas, como son las deportivas. Correr, saltar, lanzar, dar patadas a un balón, escalar, saltar a la cuerda y correr a gran velocidad son ejemplos típicos de las consideradas actividades motoras básicas. Las adquisiciones motoras del niño se

producen gradualmente, el niño va adquiriendo la fuerza muscular mínima para poder realizar un movimiento determinado.

Es comprensible que el estudio biomecánico se haya vuelto imprescindible para el estudio del desarrollo motor, ya que las leyes de la mecánica proporcionan una base firme y lógica para analizar y evaluar el movimiento. Además, sirven como norma para medir la validez del movimiento humano y permiten la comprensión del desarrollo motor por encima de un nivel puramente descriptivo.

El desarrollo de las técnicas de análisis de la marcha ha experimentado su mayor desarrollo, principalmente desde la introducción de programas informáticos que proporcionan datos numéricos y gráficos y permiten la realización de un estudio objetivo de la marcha normal y patológica, de los factores que pueden modificarla. Es por eso que en el siguiente trabajo es preciso hacer una captura de movimientos de la marcha para luego llevarlos a un ordenador y analizar los diferentes datos obtenidos del registro

1.1. Captura de movimiento

La captura de movimientos es el proceso por el cual se toman o copian los movimientos de un objeto real para llevarlos a un objeto generado por un motor gráfico. A lo largo de los años, la captación de movimientos ha tomado muchas formas, cada una con sus propias ventajas e inconvenientes [12]. Existen tres tipos de captura de movimiento

- Electromagnética que es un conjunto de receptores con respecto a un transmisor magnético estático. Habitualmente este tipo de captura de movimientos es combinado con animaciones que provienen de otros dispositivos de entrada. Las Ventajas: de este tipo de captura es que las posiciones son absolutas, las rotaciones son totalmente medidas y que puede ser en tiempo real. Los inconvenientes son, la distorsión magnética aparece al aumentar las distancias, los datos pueden ser ruidosos, Propenso a interferir con campos magnéticos, la persona lleva cables conectándolo al ordenador, lo cual limita su libertad de movimientos.
- Ópticos se lleva un traje con puntos reflectantes que son seguidos por varias cámaras y la información es triangulada entre ellos. Estos puntos pueden ser tanto reflectantes como emisores de infrarrojos. Fue desarrollado en primer lugar para aplicaciones biomédicas (como lesiones deportivas). Las ventajas que tiene es que la persona tiene libertad de movimientos ya que no existen cables que conecten su cuerpo con el equipo, se obtienen datos muy depurados y detallados. Los Inconvenientes que tiene es que es propenso a interferir con la luz, los puntos reflectantes pueden ser ocultados por la persona u otros objetos causando así pérdidas de datos, las rotaciones de las partes del cuerpo deben ser calculadas y no son absolutas, la persona debe llevar un traje con puntos y bolas que puede resultar incómodo, es difícil de ser presentada en tiempo real, es muy costoso, el

post-procesado puede llevar de uno a dos minutos por cada segundo capturado para datos simples (para datos más complejos puede llevar de quince a treinta minutos por segundo).

- Mecánica los sensores en cada articulación capturan las rotaciones, otros tipos de captura de movimientos mecánica utilizan guantes, brazos mecánicos o modelos articulados, la ventaja es que no interfiere con luces o campos magnéticos y no es muy costoso. Los inconvenientes que presenta es que el equipo debe ser calibrado frecuentemente y las posiciones absolutas no son conocidas pero se calculan a partir de las rotaciones.

En este trabajo en específico se hace la captura de movimiento mecánico con sensores acelerómetros debido a su bajo costo y también a las características que representa este sensor, ya que mide la aceleración, que es una magnitud física descriptiva del movimiento.

En el desarrollo del proyecto se logra capturar los diferentes datos que generan los acelerómetros durante la marcha, los cuales arrojan tres datos que se toma como referencia en un sistemas de coordenadas, este sistema de coordenadas por ser escogido por el observador se denomina movimiento relativo. Por medio de un desarrollo matemático se encontró una relación entre el ángulo y la aceleración en cada instante de tiempo, tomando los datos de los sensores, filtrando esas señales y por medio de cálculos matemáticos se obtiene la señal que luego por filtros adaptativos semejan una marcha.

Es necesario conocer los movimientos que realiza una persona durante la marcha para determinar las curvas de movimiento mediante el sistema de registro. Estas curvas de movimiento son tenidas en cuenta para ser analizadas y así obtener el modelo, para desarrollar el sistema de control.

Es por esta razón que nace la necesidad de capturar los datos, procesar las señales y dar a conocer las curvas de movimientos que serán analizadas en trabajos posteriores.

Este trabajo de grado se enfoca en adquirir y procesar las señales que arrojan los acelerómetros durante la marcha natural de miembros inferiores de tal forma que estos datos sean interpretados y así poder hacer un análisis que permita calcular la cinemática en la marcha. A diferencia de otros trabajos previos, este adquiere las señales por medio de acelerómetros diferente a los trabajos realizados anteriormente en la Universidad militar Nueva Granada como es el caso de el trabajo de Angélica Flores que se menciona más adelante, pero que al igual que ella se usan filtros adaptativos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general:

Implementar un sistema de registro del movimiento de los miembros inferiores durante la marcha humana normal.

1.2.2. Objetivos específicos:

- Realizar el acondicionamiento de acelerómetros para la toma de datos.
- Implementar la comunicación desde los acelerómetros hasta un computador de forma inalámbrica.
- Calcular las curvas de posición, velocidad y aceleración para cada acelerómetro durante la caminata.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita calibrar el sistema y mostrar los resultados.

En la siguiente sección se mencionarán los diferentes aspectos teóricos que se involucran en el proyecto.

1.3. Antecedentes

En esta sección se hará una breve reseña acerca de los diferentes trabajos que se han elaborado en el campo del análisis cinemático del movimiento, adquisición de señales y filtros digitales de algunos trabajos realizados sobre exoesqueletos que se enfocan un poco más en el proyecto global.

1. Los ingenieros Elkin Veslin, Jules Ghislain Slama y Max Suell Dutra desarrollaron un análisis cinemático del movimiento de los miembros superiores, es importante definir los segmentos, definir los grados de libertad de cada una de las juntas, las cuales, dependiendo del número de movimientos pueden ser uni, bi o multiaxiales, es decir, permiten movimientos en un, dos o tres grados de libertad y planos oblicuos generados por la rotación de los segmentos[3]. Todas las juntas fueron consideradas ideales. Se analizó en cada punto del brazo los diferentes tipos de movimiento.

- Hombro:
 1. Flexión-Extensión: el movimiento que lleva al bíceps para al frente o para atrás del plano frontal del cuerpo, el rango de movimientos va de 130° a 180° para la flexión, mientras que para la extensión va de 30° a 80°
 2. Abducción- Aducción: el movimiento que lleva el brazo hacia o fuera de la línea media del cuerpo, el hombro puede alcanzar 180° de abducción, pero sólo 50° de aducción.
 3. Circundición: el movimiento realizado alrededor del húmero. La rotación puede ser interna con movimientos que van desde los 60° hasta los 90° , o externa donde alcanza los 90°
- Codo:

1. Flexión-Extensión: el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del brazo, la palma puede alcanzar una inclinación de 140° .
2. Pronación- Supinación: la rotación alrededor del eje del antebrazo. La pronación es el movimiento que lleva la palma de la mano para abajo de los pulgares, con una rotación de hasta 80° , mientras que la supinación lleva la mano para afuera, con un ángulo máximo de 80° .

■ Muñeca:

1. Flexión-Extensión: el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del antebrazo, la palma puede alcanzar una inclinación de 90° .
2. Abducción- Aducción: el movimiento alrededor del eje antero-posterior que mueve la mano hasta la ulna (abducción), o hasta el radio (aducción), los ángulos van desde los 30° o 40° para abducción y 15° para aducción.

en la siguiente figura se describen los movimientos

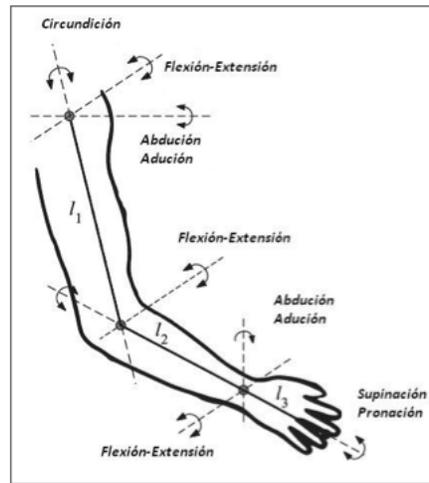


Figura 1.3.1: Sistema de referencias, imagen extraída del libro, Wearable Robots: Biomechatronical Exoskeleton, J. L. Pons, 2005.

A través del método de las matrices de transformaciones homogéneas se adquiere las rotaciones en torno de los tres ejes X, Y y Z a partir de los parámetros de D-H, mientras que las traslaciones en cualquiera de los ejes se describen en una matriz de posición.

$$R_z(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La descripción de las transformaciones a lo largo del sistema se pueden observar en la siguiente figura donde se puede observar que existe cuatro puntos de referencia.

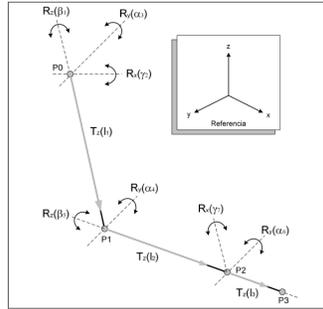


Figura 1.3.2: Transformación de referencia

De esta forma la matriz de transformaciones resultante, definirá la posición en XYZ y la orientación con respecto al origen (P0) de cada uno de los finales de segmento.

El mejor modelo que describe los movimientos T_0^1 en el hombro está basado en una combinación de rotaciones de tipo YXZ que esta descrita por la ecuación:

$$T_0^1(\beta_1, \alpha_2, \gamma_3) = R_y(\alpha_2) R_x(\gamma_3) R_z(\beta_1) T_z(l_1)$$

Se implementó este modelo, para la determinar el espacio de trabajo, el cual define los límites de desempeño del mismo. La medición del desempeño en el sistema mecánico relaciona con capacidad de todas la áreas de el espacio de trabajo del operador, esto esta relacionado con el diseño que tenga el sistema

para acompañar de la mejor forma posible los movimientos del operario, y en consecuencia, desempeñar una mejor función que es lo que se busca en estos sistemas.

Ahora entrando un poco en detalle en los sensores acelerómetros quienes van a registrar los datos es bueno tener en cuenta un poco de los análisis realizados específicamente con estos.

2. El ingeniero Julian Santiago Prowald en su trabajo de doctorado hace una calibración de acelerómetros para casos específicos importante para la calibración en nuestro caso. para calibrar los sensores se basa en obtener las señales sometiendo a los sensores a un sistema de péndulo donde hace la fusión de transferencia y por medio de varios métodos de calibración obtiene la señal que luego calibra[9].

La instalación de calibración consta de:

- Péndulo de calibración
- Sistema de excitación
- Sistema de medida de oscilación
- Sistema de nivelación y orientación de acelerómetros
- Circuitos de tratamiento y adquisición de señales

La instalación se completa con la instrumentación del péndulo, este esquema se ve mejor en la siguiente figura donde se muestra el péndulo el ordenador y la tarjeta análoga

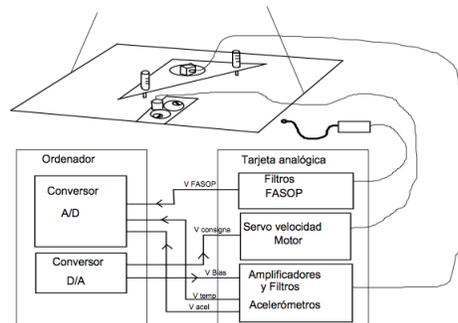


Figura 1.3.3: Esquema de instalación

La calibración correcta del captador óptico es la base de la técnica, ya que mide el desplazamiento del péndulo y por tanto la aceleración que entra por el eje sensible y su frecuencia. Con la frecuencia de la señal generada por el captador óptico y la tensión de consigna del servo de velocidad, se calibra el sistema de excitación. Con la magnitud del desplazamiento, la frecuencia y la salida del acelerómetro, se determina su función de respuesta.

El trabajo presentado en esta Tesis ha consistido en el desarrollo de técnicas de calibración de acelerómetros específicas para los ambientes micro-gravitatorio y micro-vibratorio. Las técnicas tradicionales, como la calibración sobre vibra-

dores, no permiten alcanzar los niveles de aceleración ni los rangos de frecuencias requeridos sin la utilización de costosos sistemas de excitación y medida, además de no incorporar adecuadamente la gravedad local en los modelos de respuesta de acelerómetros e instrumentos de referencia.

3. Pasando al campo de la adquisición de señales se plantea como poder desarrollar la base del proyecto que es el sistemas de captura de movimiento y el procesamiento de las señales, el estudio de los diversos métodos de captura de movimientos (Motion Capture, Mocap)[13] es un aspecto importante para determinar el más adecuado para cada una de las tantas aplicaciones que requieren la combinación de movimientos muy cambiantes, complejos y con buena precisión, pensando en esto la UNAM de México basó su estudio en obtener de tres formas diferentes la captura de los movimientos, lo que permite registrar y visualizar en tiempo real el movimiento de las articulaciones del cuerpo humano. La principal ventaja de este sistema es que puede operar completamente, aún utilizando un equipo PC de bajo costo; otras ventajas importantes son:

- El bajo costo de hardware del sistema y de los sensores,
- No requiere de ambientes controlados
- El tiempo requerido para su calibración es mínimo

El prototipo del sistema está formado básicamente por 3 partes.

- Un conjunto de sensores que detectan el movimiento de las articulaciones.
- Un circuito que permite digitalizar las señales de los sensores.
- Una aplicación encargada de adecuar y visualizar la información, este software se ejecuta en una computadora que se denomina como externa.

Los sensores están hechos de materiales flexibles y permiten medir la magnitud de la deformación a que son sometidos. En caso de que el sensor sea doblado, el voltaje en sus terminales puede relacionarse con el ángulo de flexión. Si se acopla uno de estos sensores a una articulación y esta se dobla deformando al sensor, entonces es posible registrar su movimiento. El circuito del sistema permite capturar la información de 64 sensores, la magnitud del voltaje en las terminales de cada uno de ellos es digitalizada y enviada a una computadora externa por medio de un puerto serial. El circuito entrega las lecturas de los sensores en forma de un vector de 64 enteros delimitados por un par de caracteres especiales.

$\langle 0a1a2a3\dots a63 \rangle$

Luego de capturar la información de 64 sensores en el vector, es enviada al puerto serial como se ve de manera grafica en la siguiente notación.

HardwaredeCaptura-----> *Driver*

Los caracteres especiales permiten a la computadora externa reconstruir el vector de datos. La lectura correspondiente a cada sensor es un entero cuyo valor varía de 0 a 255, si se quiere interpretar como un ángulo se debe aplicar una transformación lineal:

$$\text{AnguloFlexión} = \text{LecturaSensor} * \text{Factor} + \text{Offset}$$

El circuito está formado básicamente por un multiplexor analógico y un micro-controlador el cual tiene un módulo de conversión A/D y otro de comunicación serial. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente este circuito.

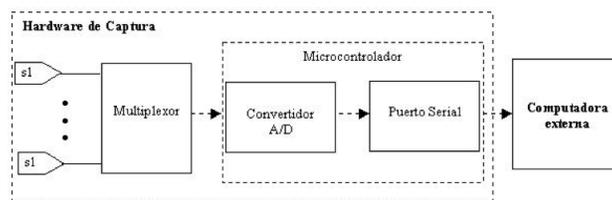


Figura 1.3.4: Hardware del sistema de captura de movimiento

El software del sistema se ejecuta en la computadora externa y permite leer la información proveniente del hardware de captura. El comportamiento de los datos capturados puede visualizarse directamente en la aplicación, o bien puede transferirse a otras aplicaciones. En el primer caso, la visualización se realiza utilizando un modelo formado por una estructura de eslabones que representan al cuerpo humano, esta estructura es similar a un maniquí que emula los movimientos al tiempo que estos son capturados. En el segundo caso, las aplicaciones pueden conectarse al software a través de un socket y así obtener la información al tiempo que esta es capturada.

5. En la Universidad Militar Nueva Granada se hizo un trabajo para registrar el movimiento de la pierna humana que fue “Sistema de Tracking para Generación de Trayectorias de un Bípido Robótico” desarrollado por Angélica Florez[1].

El desarrollo del trabajo consiste en la adquisición de los datos de un bípido pasivo desarrollados con potenciómetros para cada articulación (cadera, rodilla y tobillo).

La frecuencia de muestreo con la que se registran los datos fue de 30ms, que es un dato que se tuvo en cuenta para el desarrollo de este trabajo.

En el desarrollo del trabajo se realiza la captura del bípido pasivo y esta información se le trasmite al bípido activo, para reproducir los mismos movimientos. La gráfica de Posición Vs Tiempo se obtuvo a partir de los valores registrados por el bípido pasivo y la gráfica de Valor de los Sensores Vs Tiempo registra el valor de los potenciómetros ubicados en cada articulación del bípido robótico. En la figura 1.3.5 se observan las dos gráficas mencionadas anteriormente.

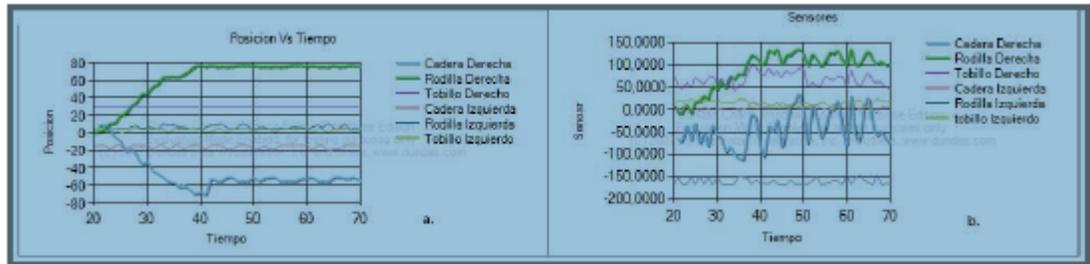


Figura 1.3.5: Imagen tomada de “Sistema de Tracking para Generación de Trayectorias de un Bípedo Robótico” a. Gráfica Posición Vs Tiempo. b. Gráfica Sensores Vs Tiempo

Ya que existe concordancia entre cada señal, se filtra por medio de un filtro digital pasa bajo cada una para disminuir el ruido y luego hacer un filtro adaptativo para corregir el desfase con respecto a la señal filtrada.

El resultado que se obtiene es una señal bastante parecida a la deseada. Como se muestra en la figura 1.3.6

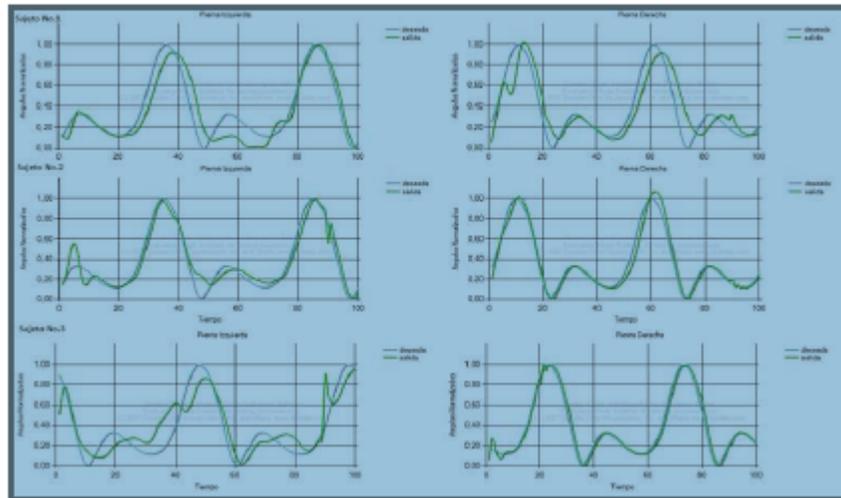


Figura 1.3.6: Imagen tomada de “Sistema de Tracking para Generación de Trayectorias de un Bípedo Robótico” a. Aproximación de funciones filtro adaptativo

Como se muestra en este trabajo la utilización de los filtros adaptativos, facilita al sistema de captura, ya que aproxima los datos recolectados a la señal deseada. El desarrollo de este trabajo sirvió como ejemplo para poder realizar este trabajo de grado, ya que fue la base principal con la que se partió para analizar el registro de los acelerómetros.

Capítulo 2

Sistema de captura de movimiento

En este capítulo se presenta el sistema de captura de movimiento que es mediante el cual se capturan las señales del movimiento de un objeto verdadero y se copia sobre un objeto creado en computador por medio de sensores o por medio de un lente. Este capítulo fue el resumen del trabajo de grado de Ivan Mendoza Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Militar que se puede consultar en la siguiente cita[2] compañero de trabajo.

2.1. Sistemas en tiempo real (STR)

Antes de entrar al tema de los sistema de captura es preciso hacer una introducción a los sistemas en tiempo real para hacer una consideración del sistema.

Sencillamente un sistema de tiempo real es un sistema que interactúa activamente con un medio físico. Los STR no solo dependen de la exactitud de los resultados de computo sino también del momento de entrega de los resultados, los STR son sistemas que se caracterizan por tener que producir una salida como respuesta a una entrada en un tiempo determinado, el intervalo de tiempo que presenta a la entrada y la salida debe ser bastante pequeño para que la respuesta del sistema sea aceptable.

2.1.1. Clasificación de los sistemas en tiempo real.

Los sistemas de tiempo real se pueden clasificar de dos tipos de acuerdo al tratamiento adecuado de los errores que puedan presentar dichos sistemas, se clasifican en sistemas de tiempo real blandos o sistemas de tiempo real duros. A continuación se mencionara cada uno de ellos un poco más a fondo.

- *Sistemas de tiempo real blandos (Soft real-time systems)*: representan aquellos sistemas con restricciones de tiempo en las que una respuesta tardía

no produce graves daños pero si un deterioro del funcionamiento global.

- *Sistemas de tiempo real duros (Hard real-time systems)*: son aquellos sistemas en los que el tiempo de respuesta debe garantizarse a toda costa. Una respuesta tardía puede tener consecuencias fatales.

2.2. Captura de movimiento

En este capítulo se abordara el sistema de captura de movimiento el cual se puede considerar como un sistema en tiempo real blando.

Para facilitar un poco la comprensión del sistema es preciso hacer un diagrama en bloques que permite visualizar de forma general la captura del movimiento por medio de los sensores.



Figura 2.2.1: Diagrama en bloques del sistema de captura de movimiento

En la figura 2.2.1 se observa el diagrama en bloques del sistema de captura de movimiento el cual consta de 4 elementos como lo son la sensórica, el software del micro-controlador, el módulo de transmisión y la visualización de los datos . Durante el desarrollo del capítulo se hará una descripción detallada de cada bloque del sistema, mirando sus componentes y sus características que los involucran en el sistema.

2.2.1. Sensores

Esta sección trata la parte de sensórica del sistema, en la cual se describirá el sensor utilizado en el proyecto y sus respectivas características.

Un acelerómetro es un sensor que captura la variable física de la aceleración y la convierte en variable eléctrica que en este caso es voltaje, existen diferentes tipos de acelerómetros como lo son acelerómetro piezó-eléctrico, acelerómetro piezo-resistivo, acelerómetro de galgas extensiométricas, ya para nuestro caso en específico usamos los acelerómetros MMA7260Q que son de tipo capacitivo que consta de tres señales que coincide con los tres ejes de coordenadas x, y y z

El dispositivo Acelerómetro MMA7260Q, cuenta con elementos de acondicionamiento de señales internos como son filtros pasa bajos, cuenta con la facilidad de poder elegir la sensibilidad a la cual va a funcionar, esta sensibilidad está dada por unos rangos descritos en el manual del sensor como son 1.5g / 2g / 4g / 6g, para nuestro caso utilizamos el rango de 1.5g que describe al sensor con una sensibilidad de 800mV/g, tiene un bajo consumo de potencia, aproximadamente 500uA, con esto el tiempo de operación del dispositivo aumentará independientemente de que si tiene o no alimentación estable. El acelerómetro

cuenta con un modo de espera (Sleep Mode), el cuál le permite al dispositivo inhabilitarse automáticamente, y en este transcurso el consumo bajará a $3\mu A$.

El acelerómetro consta de dos placas paralelas con una área de exposición (A) y una masa (m) suspendida en el medio por un elemento con rigidez (k) como se observa en la figura 2.2.2:

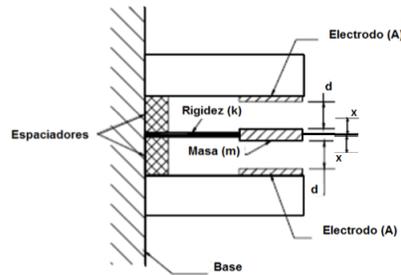


Figura 2.2.2: Funcionamiento del Acelerómetro

El elemento donde esta suspendida la masa se afecta en el movimiento por lo que se presenta una fuerza inercial (F), proporcional a la aceleración que sufre la masa (m). Esta fuerza produce que la masa tenga un desplazamiento (x) cercana y lejana, respectivamente al electrodo inferior y al electrodo superior. El cambio en la distancia corresponde a los cambios en la capacitancia (C), por lo que se puede observar que es una variación de distancias (d) entre el elemento que sostiene la masa y la placa superior y entre el elemento que sostiene la masa y la placa inferior, esta capacitancia se ve reflejado en la variación de la permisividad del aire (ϵ) para describir el cambio de capacitancias se tiene:

$$C1 = (A\epsilon)/(d \pm x) \quad (2.2.1)$$

$$C2 = (A\epsilon)/(d \mp x) \quad (2.2.2)$$

y el desplazamiento se expresa como :

$$x = F/K(3 - 2) \quad (2.2.3)$$

Estos acelerómetros incorporan circuitos micro-eléctricos, que usan puentes capacitivos para convertir el cambio de capacitancia a una señal de voltaje útil.

Los acelerómetros entregan una señal, esta señal está dada en rangos de voltajes por lo que es preciso de algún modo llevarlo a rangos de aceleración, como se había mencionado se utilizó la sensibilidad de $1,5g$ a $800mV/g$ es decir que para llevarlo a señales correspondientes a aceleración es preciso multiplicarlo por la sensibilidad del sensor y por la gravedad por lo que se aplica la siguiente formula:

$$a = B [V] * \frac{[g]}{0,8 [V]} * \frac{9,8 [m]}{[s^2]} \quad (2.2.4)$$

Donde a es la aceleración del sensor y B la señal en voltaje del sensor. la ecuación general de aceleración es la siguiente:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.2.5)$$

Integrando esta ecuación se puede obtener el voltaje e integrando dos veces esta misma se puede obtener la posición de tal modo que queda de la siguiente forma:

$$v = \int \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dx}{dt} \quad (2.2.6)$$

$$x = \int \int \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.2.7)$$

Como la señal se va ver afectada por ruido debido a diversos factores se elimina un poco por medio de filtros pasa-bajo en cada señal que corresponde a los tres ejes del sensor, que estarán ubicados entre el sensor y el PIC de tal modo que queda como un filtro externos como se muestran en la figura 2.2.3

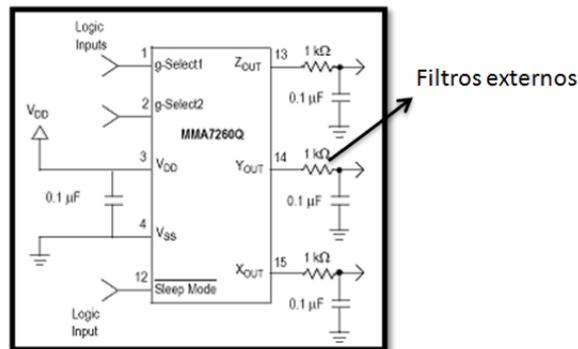


Figura 2.2.3: Diagrama de acondicionamiento del sensor, tomada del datasheet de la tarjeta MMA7260Q

La tarjeta MMA7260 funciona adecuadamente en el sistema de captura de movimiento ya que su tamaño es bastante pequeño y su acondicionamiento es sencillo, esto permite mucha facilidad a la hora de ensamblar los sensores a la estructura. Para este sistema se realizó el sensado de las variables con 4 acelerómetros. En cada pierna se ubicaron 2 acelerómetros, uno para tomar los datos del muslo como si fuera un eslabón y el segundo se ubico en la pantorrilla ya que describe el movimiento de un segundo eslabón para poder analizarlos como cuerpos rígidos en cada una de las piernas.

2.2.2. Software del micro-controlador.

Para esta etapa del proyecto se requiere tener tres aspectos importantes que es la captura de la señales, la comunicación con el equipo de cómputo y la frecuencia con que es transmitida esta información, pensando en esto se planteó la idea de trabajar con un PIC específicamente de referencia 18f4550, ya que este PIC cuenta con 13 entradas análogas/digitales de 10 bits, además cuenta con diferentes módulos de comunicación como lo es I2C, SPI y UART 232, para el caso se va a usar

- 12 Entradas análogas/digitales
- Comunicación Serial (Uart 232)
- Interrupción por timer1.

Para poder realizar el proceso de muestreo de las señales que llegan de los acelerómetros es necesario utilizar las interrupciones del micro-controlador, las interrupciones son eventos que hacen que el micro controlador deje de ejecutar tareas que están realizando en el momento para responder a ese acontecimiento y luego regresar a las funciones que estaba realizando antes de que se presente la interrupción. El micro controlador 18f4550 consta con 21 fuentes de interrupciones que se dividen en dos grupos los cuales se mostraran a continuación:

■ **Grupo general de interrupciones:**

Interrupción del Temporizador 0
Interrupción por cambio en PORTB
Interrupción externa 0
Interrupción externa 1
Interrupción externa 2

■ **Grupo de interrupciones de periféricos**

Interrupción del SPP	Interrupción de fallo del oscilador
Interrupción del A/D	Interrupción del comparador
Interrupción de recepción de la EUSART	Interrupción del USB
Interrupción de transmisión de la EUSART	Interrupción de escritura en Flash/EEPROM
Interrupción del MSSP	Interrupción de colisión de bus (MSSP)
Interrupción del CCP1	Interrupción del detección de anomalías en V_{DD}
Interrupción del Temporizador 2	Interrupción del Temporizador 3
Interrupción del Temporizador 1	Interrupción del CCP2

Figura 2.2.4: Interrupciones del 18f4550, figura tomada del manual PIC 18f4550 de la Universidad Politécnica de Valencia

Para el manejo de las interrupciones del 18f4550 hay que tener en cuenta que las interrupciones disponen de dos niveles de prioridad alto y bajo, todas las interrupciones pueden ser programadas en alguno de los dos niveles de prioridad, excepto la interrupción externa 0 la cual permanece siempre en alto, además de eso todas las interrupciones cuentan con 3 bits de configuración:

- Bit de habilitación de interrupción : permite habilitar a nivel individual la interrupción
- Flag de interrupción : se pone a “1” cuando se produce la condición de interrupción independientemente de si la interrupción está habilitada o no. Este Flag debe ponerse a “0” por software cuando se procesa la interrupción.
- Bit de prioridad de interrupción : establece si la interrupción es de alta o de baja prioridad, este bit no está disponible para la interrupción externa 0.

Para poder lograr las muestras de las señales es necesario utilizar la interrupción por timer, para el caso del proyecto se utiliza el TIMER1, como herramienta para facilitar los cálculos para determinar el tiempo de desborde de la interrupción se utiliza el software Red Pic Calculator el cual obtiene el tiempo de desborde de la interrupción teniendo parámetros como la frecuencia del cristal, el número de bits del registro del timer y la prescala que se desea a utilizar.

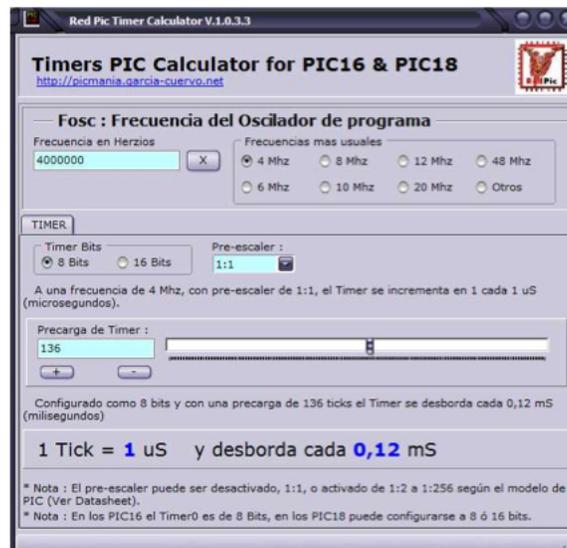


Figura 2.2.5: Software Red Pic Calculator

En la figura 2.2.5 se puede observar el valor calculado por este software del timer para un determinado tiempo, en el ejemplo se utiliza un cristal de 4MHz, se configura el TIMER1 a 8 bits y un Pre-escalas 1:1, el tiempo que se desea para el desborde de la interrupción es de 0,12 ms y con las configuraciones anteriores el software genera un valor de 136, que es el valor de la precarga del Timer del micro controlador. Para verificar el funcionamiento de las interrupciones se realizaron diferentes pruebas, esto con el fin de garantizar el periodo de muestreo

de las señales generadas por los acelerómetros, estas pruebas son mencionadas a continuación.

La primera etapa de desarrollo era la más sencilla de todas, simplemente consistía en lograr activar la interrupción del PIC para encender un led cada vez que a interrupción se desbordaba, para esto se encoje un tiempo de 30ms y así mismo se calcula el valor con el que se debe cargar la interrupción en el PIC mediante el software Red Pic Calculator.

La primera prueba era la más sencilla de todas, simplemente consistía en lograr activar la interrupción del PIC para encender un led cada vez que a interrupción se desbordaba, para esto se encoje un tiempo de 30ms y así mismo se calcula el valor con el que se debe cargar la interrupción en el PIC mediante el software Red Pic Calculator.

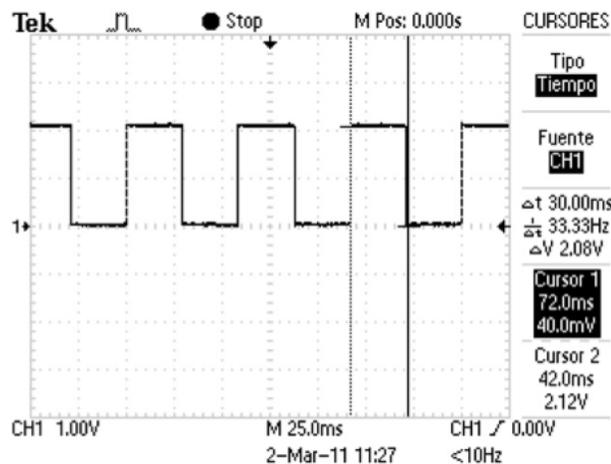


Figura 2.2.6: Señal de la interrupción

Por medio de un osciloscopio tomamos la señal en una salida específica del PIC 18f4550 de tal forma que envíe un alto y un bajo cada vez que la interrupción se desborde en la figura 2.2.6 se observa la señal que genera la interrupción del PIC.

Luego de verificar mediante la prueba anterior que la interrupción se desborde en el tiempo indicado y que funciona adecuadamente se procede a realizar la segunda prueba, la cual consiste en agregar la conversión análoga-digital para que suceda lo mismo que envíe un alto o un bajo lo que permite observar en la simulación un led prendido o apagado. Las pruebas se realizaron con el led en forma real, más la percepción del ojo humano no es capaz de percibir el cambio, por lo que se tomo como referencia la prueba anterior para darle valor.

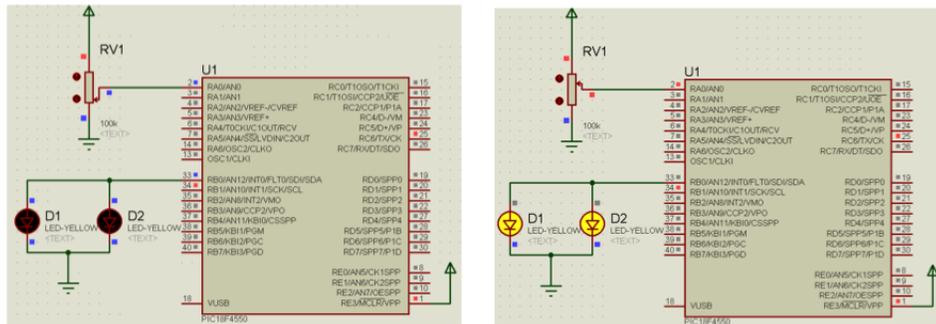


Figura 2.2.7: Cambio de estado de los leds mediante conversión A/D

Como se observa en la figura 2.2.7 el estado del led cambia a medida que el valor del potenciómetro varía, este tipo de prueba se realizo para lograr verificar que la conversión análoga-digital funcione correctamente dentro de la interrupción4.

La última prueba que se realizo fue realizar la transmisión de los datos mediante el puerto serial del PIC, esta prueba consiste en envía el dato que se encuentra en el conversor análogo-digital por el puerto serie mediante RS-232.

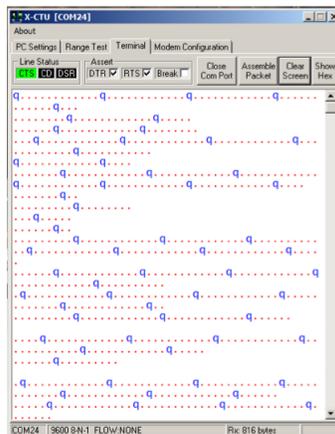


Figura 2.2.8: Transmisión de los datos mediante puerto serial.

En la figura 2.2.8 se observa la letra q la cual le ordena al micro controlador que realice el envío de los datos además se observa una trama de puntos que corresponden a los 12 datos que el micro controlador debe enviar al computador.

Una vez garantizado el periodo de muestreo de las señales de los acelerómetros, se procede a utilizar un micro-controlador, el cual será el encargado de recibir las 12 señales de los acelerómetros y posteriormente enviar los datos mediante su puerto serial.



Figura 2.2.9: Captura de movimiento

En la figura 2.2.9 se observa el diseño final del sistema, el cual es el indicado ya que simplemente se utiliza un solo micro controlador, esta implementación funciona correctamente por lo cual se procedió a realizar el diseño del circuito impreso del sistema y se procede a realizar el circuito impreso, el cual consta de los acondicionamientos de los cuatro acelerómetros y el micro controlador PIC.

2.2.3. Modulo de comunicación

Básicamente lo que se pretende es comunicar el dispositivo de forma inalámbrica para que se pueda hacer las pruebas de manera que el dispositivo de captura no esté conectado por cable al computador ya que esto interfiere en la marcha y la toma de las señales de los acelerómetros no son las mas adecuadas. Pensando en esto se escogió el módulo Xbee que es un módulo de radio frecuencia, fácil de manejar, es confiable, su alcance es apropiado para nuestra investigación y demás características.

El Xbee es módulo de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4GHz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por MAXSTREAM. El protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 (Zigbee) es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricadel diseño de la figura 3.13s de del diseño de la figura 3.13área personal con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal área network, LR-WPAN). La actual revisión del estándar se aprobó en 2006, el grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo.

En la figura, se muestra los componentes de la captura de movimiento que fueron mencionados en diagrama en bloques de la figura 2.2.1, lo que satisface la adquisición adecuada de los datos al computador.

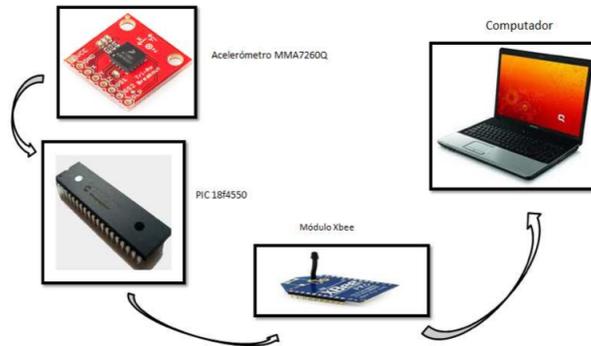


Figura 2.2.10: Componentes sistema de captura de movimiento

2.2.4. Verificación de los datos

El modulo Xbee es muy confiable sin embargo es necesario hacer una prueba de la obtención de datos al computador sea correcta por lo que se realizo la siguiente prueba:

Desde el PIC se envía un dato conocido en este caso particular se escogió la letra q , esta letra en binario es 01110001 lo que hace fácil el reconocimiento visual por medio del osciloscopio, para saber cual es la señal que le llega al computador se colocó la sonda del osciloscopio en el Xbee receptor y se capto la siguiente señal que se muestra en la figura 2.2.11

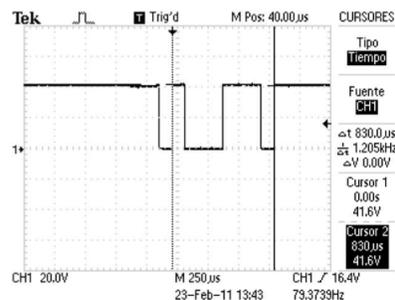


Figura 2.2.11: Imagen del osciloscopio en el receptor del modulo Xbee

Para observar la señal es necesario tener en cuenta que el número binario se lee de izquierda a derecha de tal forma que al enviar la trama de datos el receptor obtiene el primer dato en binario lo que hace ver la trama en función del tiempo en el osciloscopio de izquierda a derecha por lo que se puede constatar de la imagen que efectivamente está llegando altos y bajos que corresponden al numero 01110001 en binario y que corresponde a la letra q enviada desde el PIC.

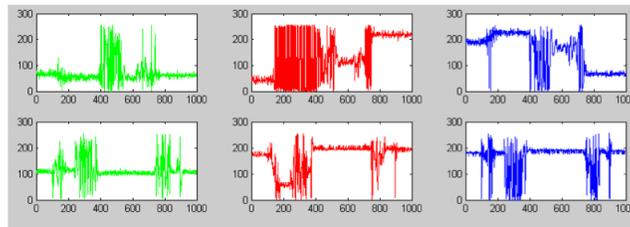


Figura 2.2.13: Señal de los datos de matlab

Una vez que se verificó la llegada correcta de los datos al computador, ahora se procede a verificar que la conversión y el envío de los datos por parte del PIC al computador sea correcta.

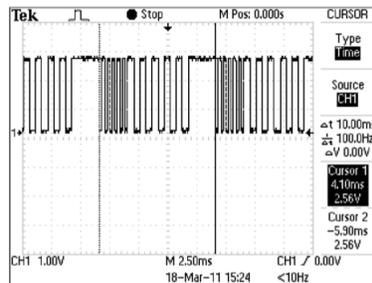


Figura 2.2.12: Señal de conversión y envío vista en el osciloscopio

Para esta prueba se observa la señal en un pin específico del micro controlador, para esto se utiliza la función toggle del compilador Custom Coputer Services Inc(CCS) que basicamente trabaja en lenguaje C, esta función sirve para tomar el cambio de estado en el pin después de realizar la conversión y después de realizar el envío, el toggle se utilizó con el fin de medir el tiempo en que el micro controlador gastaba realizando el proceso de conversión y envío de los datos por el puerto serial del PIC, la sección de la gráfica con mayor frecuencia corresponde a la conversión de los datos capturados por los acelerómetros, mientras que la sección con una frecuencia menor corresponde al envío de los datos al computador con una velocidad de 57600 baudios y la última parte de la grafica corresponde al tiempo que tarda para hacer la interrupción, en la gráfica 2.2.12 se puede observar el periodo y la frecuencia de muestreo del sistema, esta frecuencia se tiene en cuenta para más adelante el tratamiento de las señal.

Luego se realiza visualización de los datos, para esto se utiliza el software Matlab, el cual permite habilitar el puerto serie para recibir los datos que llegan del micro controlador mediante el módulo Xbee.

En la figura 2.2.13 se muestra las señales de cada eje de los acelerómetros con su respectivo color, en la figura se muestran las señales de 2 acelerómetros.

Matlab guarda los datos en un arreglo el cual su longitud varía de acuerdo al número de ciclos que se le coloque en el software del computador. Con la llegada de los datos en el computador ya se tiene el sistema de captura de movimiento.

2.3. Sistema Real de Captura de Movimiento

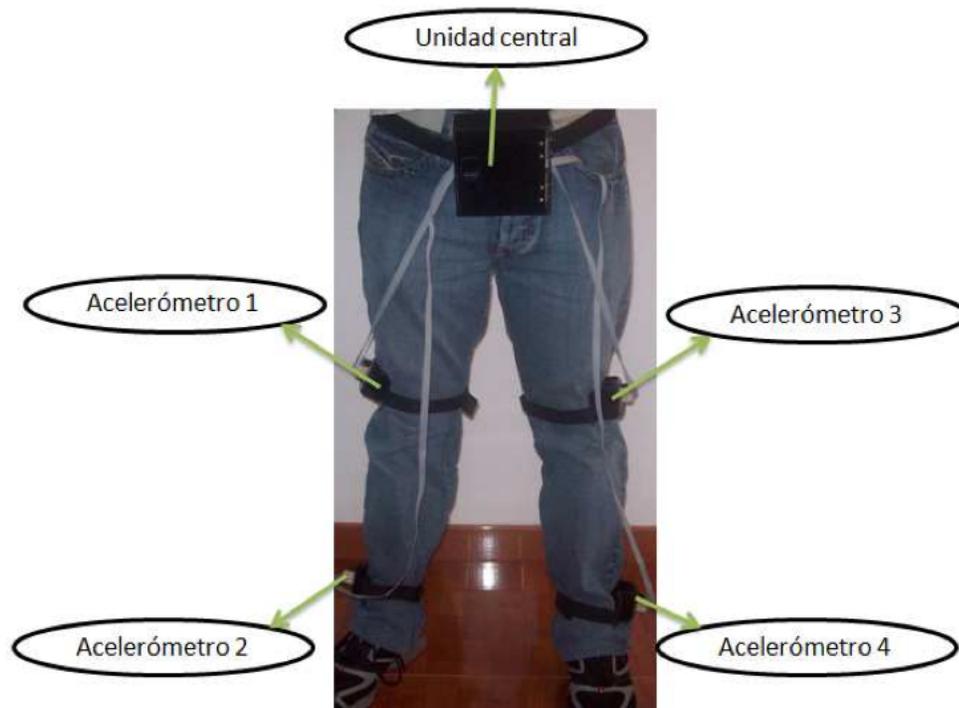


Figura 2.3.1: Sistema real de captura de movimiento

La figura 2.3.1 corresponde al sistema real de captura de movimiento, en las imágenes se puede observar las diferentes ubicaciones de los acelerómetros en las piernas de la persona y donde está ubicada la unidad de acondicionamiento y procesamiento de los datos.

Los acelerómetros se encuentran fijados a los miembros inferiores de la persona mediante una cinta velcro la cual permite que el sensor no se desplace por la pierna a la hora que se realiza algún movimiento. Los acelerómetros se encuentran ubicados en posiciones específicas en cada una de las piernas como se muestra en la figura 2.3.2, para facilitar los cálculos para realizar algún tratamiento de los datos en el computador es preciso ubicarlos en la misma posición con respecto una pierna de la otra.

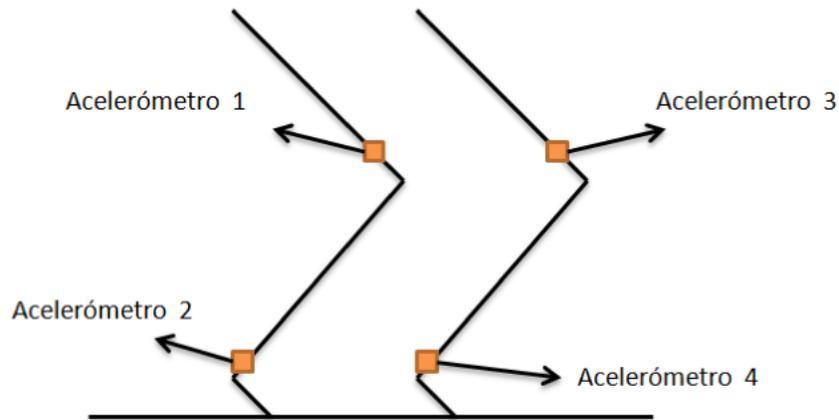


Figura 2.3.2: Posición de lo acelerómetros

Una vez obtenidas las posiciones exactas de los acelerómetros se procede a realizar la ubicación de los ejes coordenados de los sensores (x,y,z) , la figura 2.3.3 muestra la ubicación de cada uno de los ejes coordenados correspondientes a los cuatro sensores utilizados para el sistema.

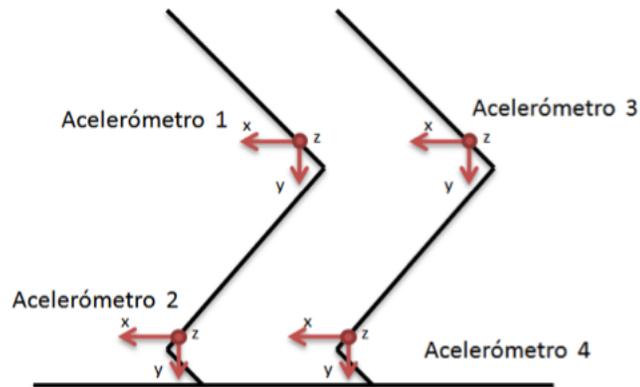


Figura 2.3.3: Ubicación de los ejes de coordenadas en los acelerómetros

Para simplificar un poco los sistemas de referencias es preciso ubicar los sensores de tal manera que coincidan los ejes de coordenadas, lo cual facilitará el procesamiento de las señales, que en el siguiente capítulo se hablará del tema.

Para verificar la captura de movimiento se calcula el tiempo en que se demora el computador en recibir los datos, donde se toma un número específico de muestras y se toma el tiempo que tardó en enviar esas muestras al computador.



Figura 2.3.4: No. muestras vs tiempo

La grafica correspondiente al número de muestras vs tiempo es la siguiente:

El sistema de captura se comporta como un sistema de tiempo real blando debido a que se presenta un retardo mínimo en la respuesta del sistema. Cada muestra está calculada para un tiempo de muestreo de 0.01s, lo que quiere decir que en 100 muestras el tiempo es de 1s y está dando 1.75s lo cual indica que tiene un retardo de 0.75s.

Capítulo 3

Filtros Digitales

En este capítulo se habla del tema de los filtros digitales los cuales son importantes para el procesamiento de las señales.

El filtro digital es un sistema de tiempo discreto que puede realizar funciones de filtrado de señales. Aprovecha los avances de la tecnología digital para emular sistemas análogos. Debe cumplir los requisitos necesarios para procesar las señales analógicas (Teorema del muestreo).

Un filtro digital requiere un procesador digital para realizar cálculos numéricos en los valores muestreados de la señal. El procesador puede ser un ordenador corriente, como un PC, o un chip DSP (Digital Signal Processor) especializado[4].

La parte analógica de la señal debe ser previamente muestreada y digitalizada por un convertidor AD (analógico-digital). En este caso en particular la conversión la hace previamente el PIC antes de enviar la información. Los números binarios resultantes de la conversión son de 10bits, que representan valores sucesivos muestreados de la señal de entrada, estos datos llegan al computador y se procesan realizando cálculos numéricos sobre ellos. Estos cálculos suelen ser multiplicaciones de los valores de entrada por unas constantes y suma de las anteriores multiplicaciones. Después del filtrado se procede a analizar las señales de tal forma que se puedan utilizar en algo en específico que para este caso será la obtención de medidas de aceleración de los sensores.

La figura 3.0.4 muestra la configuración básica de un filtrado digital:

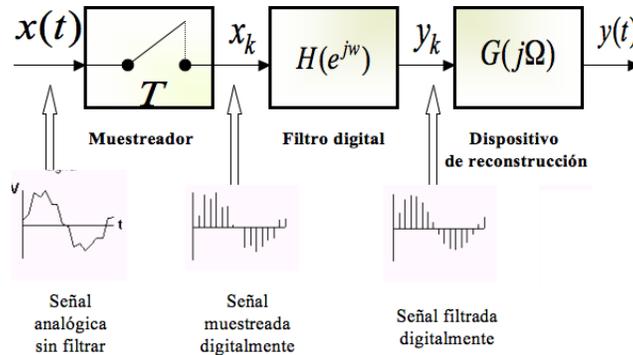


Figura 3.0.1: Funcionamiento básico de un filtro digital, imagen extraída del artículo Filtro Digital, Fabian Hernandez Perez, 2011

Que con más detalle queda como se observa en la figura 3.0.5.

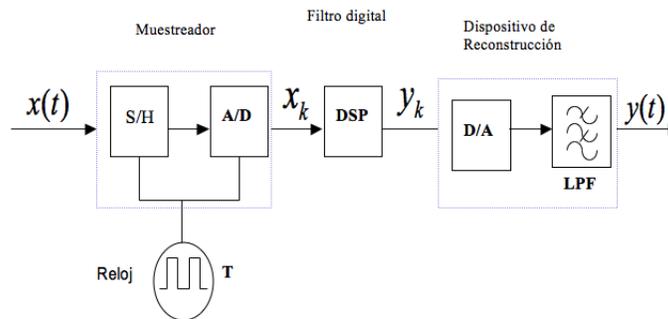


Figura 3.0.2: Funcionamiento interno del filtro, imagen extraída del artículo Filtro Digital, Fabian Hernandez Perez, 2011

3.1. Ventajas del filtro Digital

1. Un filtro digital es programable, su función está determinado por un programa almacenado en el procesador. Esto significa que el efecto del filtro puede ser cambiado fácilmente sin modificar su circuitería (hardware). Un filtro analógico solo puede cambiar re-diseñando el circuito de filtrado.
2. Los filtros digitales son fácilmente diseñados, ratificados e implementados en un ordenador convencional o en una estación de trabajo (workstation).
3. Las características de los circuitos de filtrado analógico (particularmente aquellos que contengan componentes activos) son susceptibles a las variaciones de velocidad y de temperatura. En cambio, los filtros digitales

no sufren este problema, y son extremadamente estables con respecto al tiempo y la temperatura.

4. A parte de sus correspondientes partes analógicas, los filtros digitales solo pueden tratar señales de baja frecuencia con gran exactitud. A medida que la velocidad de la tecnología DSP aumente, los filtros digitales podrán empezar a poderse aplicar en señales de alta frecuencia en el dominio de las frecuencias de radio, el cual fue un campo exclusivo reservado a la tecnología analógica.
5. Los filtros digitales son mucho más versátiles en su capacidad de procesar señales de diferentes formas. Esto significa que algunos filtros digitales tienen la capacidad de adaptarse a los cambios en las características de la señal.
6. Los procesadores DSPs más rápidos pueden tratar combinaciones complejas de filtros en paralelo o en cascada, haciendo que los requerimientos de hardware sean relativamente simples y compactas en comparación con la circuitería analógica.
7. Alta inmunidad al ruido.
8. Alta precisión (limitada por los errores de redondeo en la aritmética empleada).
9. Muy bajo coste.

3.2. Funcionamiento de los filtro digitales

En esta sección se desarrollará la teoría básica del funcionamiento de los filtros digitales. Esto es esencial para comprender porque son diseñados y utilizados los filtros [4].

Suponemos una señal pura que va a ser filtrada digitalmente tiene la forma de onda descrita por la función:

$$V = x(t) \tag{3.2.1}$$

donde t es la variable del tiempo.

Esta señal se muestrea en cada intervalo h de tiempo, cada h es un intervalo de muestreo. El valor muestreado en el tiempo $t = ih$ es:

$$x_i = x(ih) \tag{3.2.2}$$

De este modo los valores digitales transferidos del convertidos analógico-digital pueden ser representados por:

$$x_0, x_1, x_2, x_3, \dots \tag{3.2.3}$$

que corresponden a los valores de una señal ondulada en

$$t = 0, h, 2h, 3h, \dots \quad (3.2.4)$$

en la que $t = 0$ es el instante en el que comienza el muestreo:

En el instante $t = nh$ (donde n es un entero positivo), los valores disponibles en el procesador, almacenados en memoria, son:

$$x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (3.2.5)$$

Nota: los valores muestreados x_{n+1}, x_{n+2} etc no están disponibles, pues aun no se han generado.

La señal de salida del procesador al convertidor digital-analógico consiste en una secuencia de valores

En general, el valor de y_n es calculado con los valores $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. La forma en que las y 's son calculadas desde las x 's determina la acción del filtro digital.

$$y_0, y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \quad (3.2.6)$$

El orden de un filtro digital es el número de las entradas anteriores (almacenadas en la memoria del procesador) utilizadas para calcular la salida de la señal actual como por ejemplo:

$$\text{Orden Cero: } y_n = a_0 x_n$$

$$\text{Primer Orden: } y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1}$$

$$\text{Segundo Orden: } y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2}$$

...

3.3. Filtro FIR

Este filtro es utilizado después de la toma de datos para disminuir el ruido en la entrada de los sensores acelerómetros. FIR es un acrónimo en inglés para Finite Impulse Response o Respuesta finita al impulso. Se trata de un tipo de filtros digitales cuya respuesta a una señal impulso como entrada tendrá un número finito de términos no nulos.

3.3.1. Característica de los filtros FIR

Las características principales de los filtros FIR es que no cuentan con retroalimentación es decir que no tienen polos y siempre son estables, por lo cual cuenta con mayores localidades de memoria. Por otro lado, estos filtros son muy utilizados en problemas de filtrado donde hay un requerimiento de característica de fase lineal en la banda de paso del filtro. Su requerimiento en cuanto a recursos es mayor y dada la mayor cantidad de operaciones estos filtros son más sensibles a errores. Estos filtros no tienen una contraparte analógica y son más fácil de implementar que un filtro IIR.

3.3.2. Expresión matemática de los filtros FIR

La expresión matemática de los filtros FIR Para obtener la salida sólo se basan en entradas actuales y anteriores [10]. Su expresión en el dominio n es:

$$y_n = \sum_{K=0}^{N-1} b * x(n - k) \quad (3.3.1)$$

En la expresión anterior N es el orden del filtro, que también coincide con el número de términos no nulos y con el número de coeficientes del filtro. Los coeficientes son b .

La salida también puede expresarse como la convolución de la señal de entrada $x(n)$ con la respuesta al impulso $h(n)$:

$$y_n = \sum_{K=0}^{N-1} h * x_{n-k} \quad (3.3.2)$$

Aplicando la transformada Z a la expresión anterior:

$$H_z = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^{-k} = h_0 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{N-1} z^{-(N-1)} \quad (3.3.3)$$

3.3.3. Estructura

La estructura básica de un FIR es:

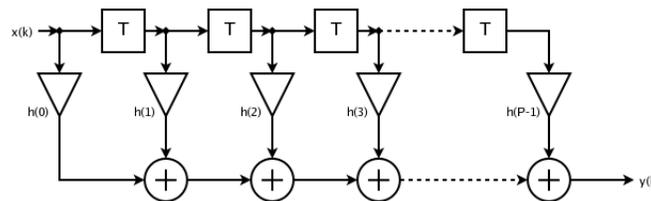


Figura 3.3.1: Estructura FIR

En la figura 3.3.1 los términos $h(n)$ son los coeficientes y los T son retardos.

Pueden hacerse multitud de variaciones de esta estructura. Hacerlo como varios filtros en serie, en cascada, etc.

3.3.4. Métodos de diseño de un filtro FIR

Hay cuatro métodos básicos para diseñar este tipo de filtros[8]:

1. Método de las ventanas: Una ventana es simplemente una secuencia de muestras de longitud $M+1$ que se multiplica por las muestras originales de la respuesta impulsional $h_d[n]$, a fin de obtener un filtro FIR, minimizando

los efectos de distorsión en frecuencia respecto al filtro pasa bajo $H_d(e^{j\omega})$. Estas ventanas deben cumplir con dos objetivos:

- a) Aproximarse a una delta, en el sentido que su transformada de Fourier se concentre alrededor de $\omega = 0$ (módulo estrecho alrededor de $\omega = 0$ y muy realzado respecto al módulo de frecuencias $\omega \neq 0$)
- b) Su cálculo no debe ser difícil, ya que ello alargaría el periodo de muestreo de la señal.

Las ventanas mas usadas son:

VENTANA	EXPRESIÓN
Rectangular	$\omega[n] = 1$ para $0 \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro valor
Barlett o Triangular	$\omega[n] = \frac{2n}{N-1}$ para $0 \leq n \leq \frac{N-1}{2}$ $\omega[n] = 2 - \frac{2n}{N-1}$ para $\frac{N-2}{2} \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro valor
Hann	$\omega[n] = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\Pi n}{N-1}\right) \right]$ para $0 \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro caso
Hamming	$\omega[n] = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\Pi n}{N-1}\right)$ para $0 \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro valor
Blackman	$\omega[n] = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\Pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\Pi n}{N-1}\right)$ para $0 \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro valor
Kaiser	$\omega[n] = \frac{I_0\left[\omega_d \sqrt{\left(\frac{N-1}{2}\right)^2 - \left(n - \frac{N-1}{2}\right)^2}\right]}{I_0\left[\omega_d \left(\frac{N-1}{2}\right)\right]}$ para $0 \leq n \leq N - 1$ $\omega[n] = 0$ para cualquier otro valor siendo I_0 la función de Bessel de primer tipo de orden cero

Cuadro 3.1: Ventanas más usadas

2. Muestreo en frecuencia. El muestreo en frecuencia se hace ajustando la respuesta frecuencial del filtro a diseñar $h(\omega)$ a la de las especificaciones de la respuesta frecuencial del filtro deseado $H_d(\omega)$ directamente en el dominio frecuencial, sin calcular la transformada inversa de Fourier $h_d[n]$ como en el caso anterior. Para realizar el ajuste del filtro a diseñar $H(\omega)$, este método consiste en muestrear en frecuencia la respuesta frecuencial del filtro deseado $H_d(\omega)$, de modo que $H(\omega)$ estará formado por todas las muestras que se obtengan de $H_d(\omega)$ y la respuesta impuncional $h(n)$ del filtro diseñado se obtendrá por la transformada de Fourier Discreta Inversa de $H(\omega)$.
3. Rizado constante (Aproximación de Chebyshev y algoritmo de intercambio de Remez):.Llamado también Aproximación de Chebyshev; los métodos

son relativamente simples y presentan una carencia de control preciso de las frecuencias críticas tales como ω_P y ω_S , este método proporciona filtros con rizados en la banda tanto en la banda de paso como en la banda de rechazo, se lo considera óptimo ya que el error de aproximación ponderado entre la respuesta de frecuencia deseada y la respuesta de frecuencia que tenemos es distribuido uniformemente en las banda de paso y rechazo respectivamente del filtro para minimizar el error máximo. En la siguiente tabla se describen los Filtros FIR de fase lineal que se podrían diseñar con este método:

4. Mínimos Cuadrados el diseño consiste en determinar el error sin ponderar y se determina por los coeficientes del filtro, este filtro permite el control explícito de bordes de banda y ganancia del borde de la banda. Este es un método analítico que no implica cálculos complicados, lo que ayuda a agilizar el desarrollo computacional. Se asume que la respuesta ideal tiene funciones de transición spline y no permite ponderaciones a la banda pasante, banda suprimida o banda de transición.

En nuestro caso particular se usó el método de la ventana de Hamming ya que como ventaja se tiene que el cálculo no es difícil, para que el periodo de la señal sea corto, que era lo que se buscaba, además la distorsión producida por las discontinuidades se pueden atenuar.

Una vez de aplicarle el filtro FIR a cada señal es preciso señalar que se necesita aplicarle a estas señales un filtro adaptativo donde en el siguiente capítulo se explicará de manera más detallada el porque aplicar un filtro adaptativo, sin embargo en este mismo capítulo se hablará de los filtros adaptativos y como aplicarlos, de tal manera que se concluya este capítulo con la información requerida para el desarrollo del proyecto.

3.4. Filtro Adaptativo

La definición de filtro adaptativo es un dispositivo que intenta modelar la relación entre señales en tiempo real de forma iterativa.

El término "FILTRADO ADAPTATIVO" implica que los parámetros que caracterizan al filtro, tales como ancho de banda, frecuencias de los ceros.... cambian con el tiempo, esto es, los coeficientes, también llamados PESOS, de los filtros adaptativos cambian con el tiempo, en contraposición a los coeficientes de los filtros fijos que son invariantes con el tiempo[7].

3.4.1. Característica de los filtros adaptativos

Se diferencia de los filtros digitales comunes tipo IIR o FIR, en que éstos tienen coeficientes invariantes en el tiempo, mientras que un adaptativo puede cambiar su forma de comportarse, es decir pueden cambiar sus coeficientes de acuerdo con un algoritmo adaptativo. De hecho no se saben los coeficientes del filtro cuando se diseña, éstos coeficientes son calculados cuando el filtro se

implementa y se reajustan automáticamente en cada iteración mientras dura su fase de aprendizaje.

El hecho de que estos filtros no sean invariantes temporales y que tampoco sean lineales hace que su estudio sea más complejo que el de un filtro digital, ya que no se pueden aplicar, salvo en un par de excepciones, las transformaciones en frecuencia, dominio Z , etc.

3.4.2. Algoritmo

Un algoritmo de aprendizaje de un sistema adaptativo podría ser[5]:

1. Inicializar de forma aleatoria los pesos
2. Elegir un valor α
3. Calcular la salida $y(n)$
4. Calcular el error $e(n)$
5. Actualizar los pesos con la función de coste elegida
6. Repetir un determinado número de veces desde el punto 3.

Para tener una mejor percepción un filtro adaptativo es una red neuronal que va actualizando los pesos y es una aplicación de la red ADALINE que puede resolver problemas linealmente separables.

Se necesita un nuevo componente, una línea de retardo para hacer un uso completo de la red ADALINE. La señal de entrada, entra a la línea de retardo y pasa a través de $N - 1$ retrasos. La salida de la línea de retardo (TDL) es un vector de N dimensiones, formada por la señal de entrada en el instante actual, la señal de entrada anterior, etc.

Se puede combinar una línea de retardo con una red ADALINE para crear el filtro adaptativo como se muestra en la figura siguiente.

La salida del filtro está dada por:

$$a(k) = \sum_{i=1}^R w_{1,i} a(k-i+1) + b \quad (3.4.1)$$

En el procesamiento de señal digital, la red se conoce como una respuesta al impulso finita (FIR). Lo que nos da como resultado una aplicación del filtro FIR.

El uso de los diferentes algoritmos determina los pesos de los coeficientes del filtro. Mientras que los algoritmos se diferencian en sus implementaciones de detalle, el LMS y RLS comparten un enfoque operacional común, minimizar el error entre la salida del filtro y la señal deseada.

El algoritmo LMS (del inglés, Least-Mean-Square algorithm) se usa en filtros adaptativos para encontrar los coeficientes del filtro que permiten obtener

el valor esperado mínimo del cuadrado de la señal de error, definida como la diferencia entre la señal deseada y la señal producida a la salida del filtro.

El algoritmo RLS (del inglés, Recursive-Least-Squares algorithm) se usa en filtros adaptativos para encontrar los coeficientes del filtro que permiten obtener el mínimo cuadrado de la señal de error (definida como la diferencia entre la señal deseada y la señal producida a la salida del filtro) en forma recursiva.

3.4.3. Estructura

La estructura de un filtro adaptativo es un sistema al que le llegan dos señales: $x(n)$ señal de entrada y $e(n)$ señal de error, ésta última se llama señal de error y viene de la resta de una señal a la que se llama señal deseada, $d(n)$, y otra que es la salida del filtro $y(n)$. A los coeficientes del filtro se les llama $w(n)$, que son los pesos del filtro, estos pesos multiplican a la señal de entrada $x(n)$ en un bloque que es en si un filtro adaptativo como se ve en la figura para obtener la salida $y(n)$ donde se compara con la señal deseada $d(n)$.

$$y(n) = w(n) * x(n) \tag{3.4.2}$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{3.4.3}$$

Como se muestra en la figura 3.4.1:

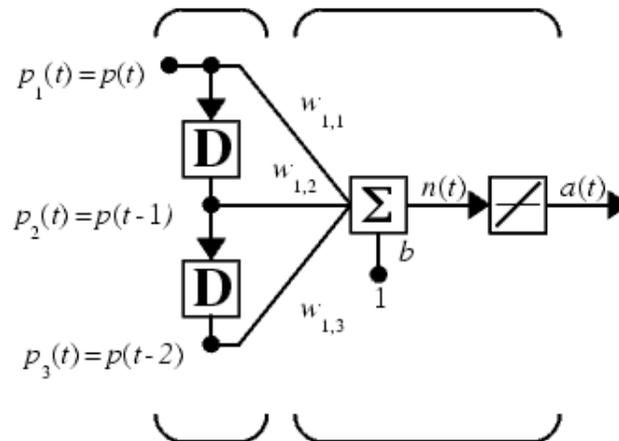


Figura 3.4.1: Retardo y Red ADALINE, esta imagen es extraída de la ayuda de MatlabR2010b

Ya teniendo la parte teórica de los filtros se hará la implementación en un capítulo posterior donde se muestra la aplicación de estos dos tipos de filtros y la importancia para el procesamiento de las señales.

Capítulo 4

Cinemática de la marcha

En este capítulo se hablará de los modelos matemáticos que se abarcaron para el desarrollo del proyecto.

La marcha humana es un movimiento complejo y su análisis requiere de un modelo de representación del cuerpo humano a partir de un sistema de cuerpos articulados rígidos con diversos grados de libertad.

Para hacer esta representación es preciso hacer uso de la cinemática que es la rama de la mecánica clásica específicamente de la mecánica vectorial que deriva de las leyes de Newton donde es aplicable a cuerpos que se mueven con relación a un observador sin tener en cuenta las causas que lo producen, limitándose, esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo.

En cinemática es importante hablar de un sistema de coordenadas para describir las trayectorias mediante un sistema de referencia. Dichas trayectorias involucran la velocidad y la aceleración que son dos principales cantidades que describen como cambia la posición en función del tiempo.

4.1. Movimiento de cuerpo rígido

La mecánica de un cuerpo rígido es aquella que estudia el movimiento y equilibrio de materiales sólidos ignorando sus deformaciones. Se trata, por tanto, de un modelo matemático útil para estudiar una parte de la mecánica de sólidos, ya que todos los sólidos reales son deformables. Se entiende por cuerpo rígido un conjunto de puntos del espacio que se mueven de tal manera que no se alteran las distancias entre ellos, sea cual sea la fuerza actuante (matemáticamente, el movimiento de un cuerpo rígido viene dado por un grupo uni-paramétrico de isometrías)[6].

En física la aceleración es una magnitud vectorial que nos indica el cambio de velocidad por unidad de tiempo.

4.1.1. Aceleración y velocidad media e instantánea

En cada punto de la trayectoria, queda definido un vector velocidad que en general, cambia tanto en módulo como en dirección al pasar de un punto a otro de la trayectoria. La dirección a la velocidad cambiará debido a que la velocidad es tangente a la trayectoria y está, por lo general no es rectilínea[11].

Se define la aceleración media de la partícula, en el intervalo de tiempo Δt , como el cociente:

$$\langle a \rangle = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4.1.1)$$

Que es un vector paralelo a Δv y dependerá de la duración del intervalo de tiempo Δt considerado. La aceleración instantánea se la define como el límite al que tiende el cociente incremental $\Delta v/\Delta t$ cuando $\Delta t \rightarrow 0$; esto es la derivada del vector velocidad con respecto al tiempo:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (4.1.2)$$

Puesto que la velocidad instantánea v a su vez es la derivada del vector posición r respecto al tiempo, la aceleración es la derivada segunda de la posición con respecto del tiempo:

$$a = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (4.1.3)$$

De igual forma se puede definir la velocidad instantánea a partir de la aceleración como:

$$v - v_0 = \int_{t_0}^t \left(\frac{dv}{dt} \right) dt \quad (4.1.4)$$

Se puede obtener la velocidad a partir de la integración de la aceleración

$$v = \int_0^t a dt + v_0 \quad (4.1.5)$$

4.1.2. Componentes intrínsecas de la aceleración: aceleración tangencial y normal o centrípeta

En tanto que el vector velocidad v es tangente a la trayectoria, el vector aceleración a puede descomponerse en dos componentes (llamadas componentes intrínsecas) mutuamente perpendiculares: una componente tangencial a_t (en la dirección de la tangente a la trayectoria), llamada aceleración tangencial, y una componente normal a_n (en la dirección de la normal principal a la trayectoria), llamada aceleración normal o centrípeta (este último nombre en razón a que siempre está dirigida hacia el centro de curvatura)[11].

Derivando la velocidad con respecto al tiempo, teniendo en cuenta que el vector tangente cambia de dirección al pasar de un punto a otro de la trayectoria (esto es, no es constante) obtenemos :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(v\hat{e}_t) = \frac{dv}{dt}\hat{e}_t + v\frac{d\hat{e}_t}{dt} = a_t\hat{e}_t + v(\omega \times \hat{e}_t) \quad (4.1.6)$$

Siendo \hat{e}_t el vector tangente a la trayectoria en la misma dirección que la velocidad y ω la velocidad angular. Resulta conveniente escribir la expresión anterior en la forma:

$$a = \frac{dv}{dt} = a_t\hat{e}_t + \frac{v^2}{\rho}\hat{e}_n = a_t\hat{e}_t + a_n\hat{e}_n \quad (4.1.7)$$

siendo \hat{e}_n el vector normal a la trayectoria, esto es dirigido hacia el centro de curvatura de la misma, ρ el radio de curvatura de la trayectoria, esto es el radio de la circunferencia osculatriz a la trayectoria.

Las magnitudes de estas dos componentes de la aceleración son:

$$a_t = \frac{dv}{dt} \quad (4.1.8)$$

y

$$a_n = \frac{v^2}{\rho} \quad (4.1.9)$$

Representando estas dos aceleraciones en las componentes radiales de la aceleración. Dado que $v = \omega r$, la aceleración tangencial y centrípeta también se puede escribir como:

$$a_t = \dot{\omega}r \quad (4.1.10)$$

y

$$a_n = r\omega^2 \quad (4.1.11)$$

donde el vector de la velocidad angular ω , definido por:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.1.12)$$

4.2. Cinemática de las extremidades inferiores

Para entrar un poco a lo que es la cinemática es preciso señalar que el algoritmo con el que se desarrolló la obtención del modelo fue por medio Denavit Hartenberg, que es un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón i de una cadena articulada pudiéndose determinar las ecuaciones de la cadena completa.

Cada eslabón se refiere en nuestro caso a cada parte de las extremidades inferiores rígidas que se ve representado como un eslabón y tiene como punto en común una articulación como es la rodilla y el tobillo como se muestra en la figura 4.2.1

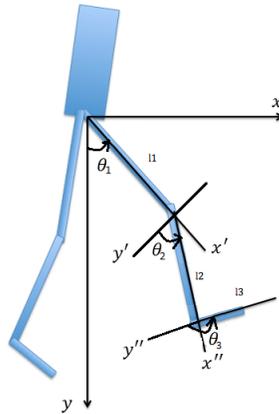


Figura 4.2.1: Cinemática extremidades inferiores

Según la representación Denavit Hartenberg, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

$${}_{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

Para obtener la matriz de transformación que relaciona el tronco con el extremo de las piernas esta dado por:

$$T = {}^0 A_1 * {}^1 A_2 \dots {}^{n-1} A_n \quad (4.2.2)$$

La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referidas a la base en función de las n coordenadas articulares.

Para nuestro caso específico como se tiene tres eslabones se ve representado de la siguiente manera:

Articulación	θ	d	a	α
1	θ_1	l_1	0	0
2	θ_2	l_2	0	0
3	θ_3	l_3	0	0

Cuadro 4.1: Tabla de parámetros DH por articulaciones

Luego de obtener la tabla de parámetros de Denavit Hartenberg, se genera la matriz de transformación para hacer debidamente la implementación y relacionar los eslabones que en nuestro caso es el tronco con el extremo de las piernas.

4.3. Obtención de variables cinemáticas

Las variables cinemáticas describen el movimiento de cada articulación de tal modo que se implementaron los potenciómetros para capturar los datos y posteriormente obtener una función.

Análisis Biomecánico

Para desarrollar el proyecto es necesario describir de que forma se va adquirir los movimientos de los sensores y para esto es preciso definir en que plano se va a trabajar.

Para este trabajo el plano donde se desarrolla el movimiento es el plano axial como se muestra en la siguiente imagen, donde se describen los ejes x y y que corresponden a los ejes del acelerómetro.

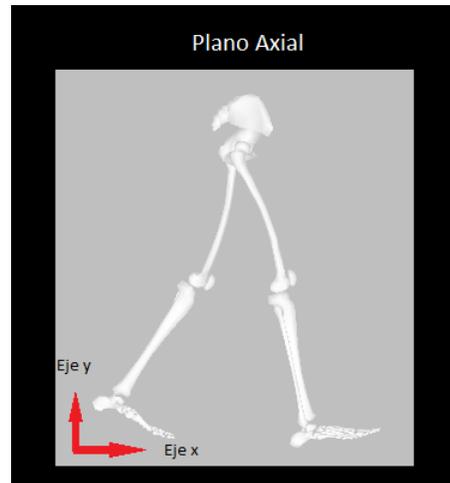


Figura 4.3.1: Plano Axial

Después de definir el plano que se va a trabajar, es preciso hacer un análisis de cada articulación para establecer un máximo y un mínimo de movilidad.

Cadera:

La cadera va a tener una flexión entre los rangos de -11° a 85° tomando como referencia 0° en posición vertical como se muestra en la figura siguiente.

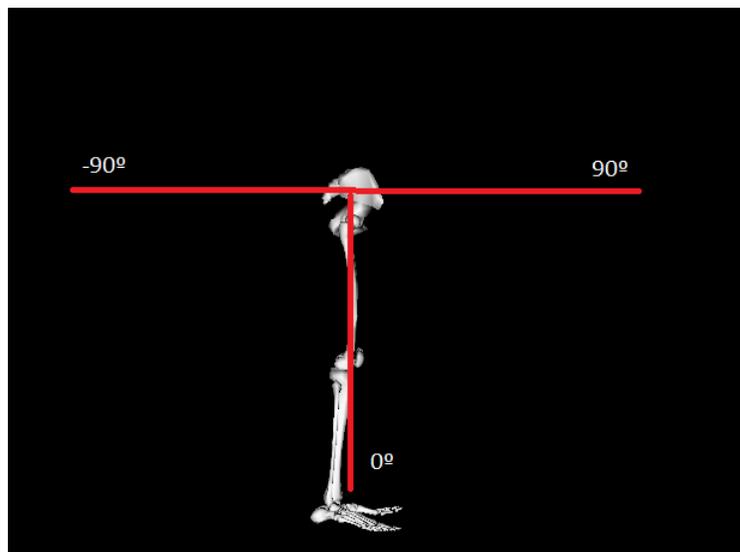


Figura 4.3.2: Flexión cadera

Luego de analizar la cadera, ahora se analiza el otro punto donde se hace

flexión que es en la rodilla.

Rodilla:

La rodilla va a tener una flexión entre los rangos de -100° a 0° tomando como referencia 0° en posición vertical como se muestra en la figura siguiente.

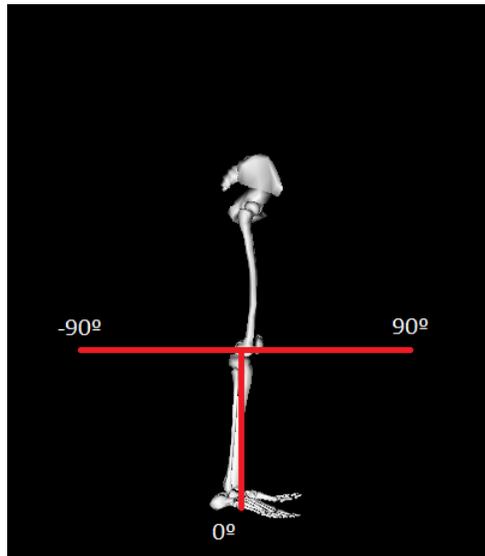


Figura 4.3.3: Flexión Rodilla

En la figura 4.3.4 se observa la ubicación de los potenciómetros que van a registrar la posición angular en función del tiempo.

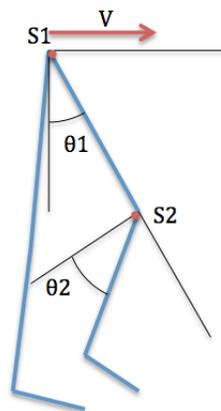


Figura 4.3.4: Cinemática de la marcha

El primer eslabón se puede asemejar a un péndulo y teniendo en cuenta que el potenciómetro S1 sensa la posición de la pierna durante la marcha, se puede asegurar que θ_1 está en función de tiempo, es decir que si se deriva esta posición angular se tendría la velocidad angular:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \dot{\theta}_1 = \omega \quad (4.3.1)$$

de tal manera que si sigue derivando se obtiene la aceleración angular:

$$\frac{d\dot{\theta}_1}{dt} = \ddot{\theta}_1 = \dot{\omega} \quad (4.3.2)$$

La velocidad angular y la aceleración angular son tenidas en cuenta para transformarlas en aceleración centrípeta y en aceleración tangencial aplicando las ecuaciones 4.1.10 y 4.1.11.

OpenSim es una herramienta de la cual se toma referencia para seguir con el trabajo, esta herramienta es un software del modelado del sistema biomecánico, la simulación y el análisis. OpenSim es utilizado en cientos de laboratorios de todo el mundo para estudiar el movimiento y tiene una comunidad de desarrolladores de software que aportan nuevas características. En este trabajo en específico se toma como referencia la simulación de las extremidades inferiores “BothLegsWalk”, en esta simulación se efectúa un ciclo de marcha en ambas piernas. La simulación del ambiente es como se muestra en la siguiente imagen 4.3.5.

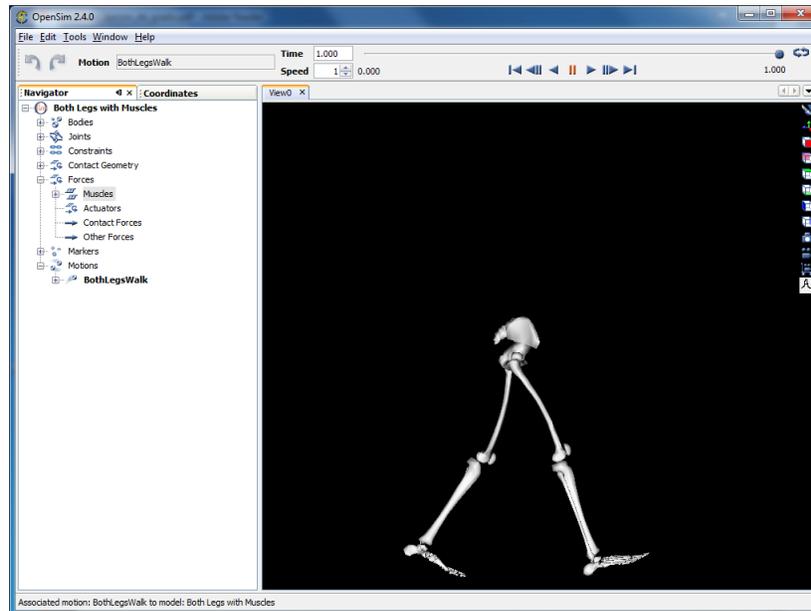


Figura 4.3.5: Imagen OpenSim Movimiento BothLegsWalk

Tomando como referencia a OpenSim se adquiere la gráfica del ángulo de la pierna con respecto al tiempo en un ciclo de marcha, la referencia con la cual se toma el ángulo es:

- 0° teniendo la pierna totalmente vertical.
- 90° teniendo la pierna horizontal hacia adelante
- 90° teniendo la pierna horizontal hacia atrás.

Las curvas que genera a lo largo del ciclo se muestra en la siguiente gráfica, figura 4.3.6.

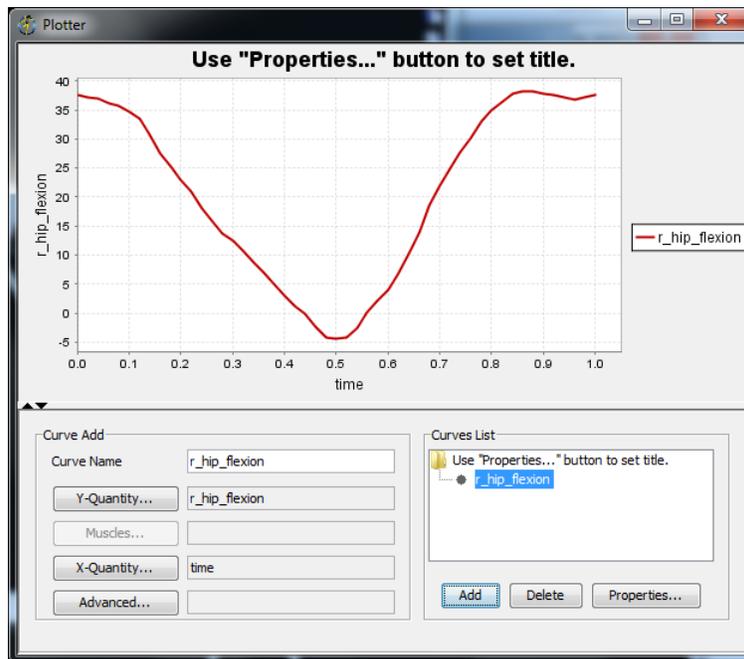


Figura 4.3.6: Gráfica Angulo vs Tiempo OpenSim

Luego de observar la imagen que muestra OpenSim y se procede a hacer la toma de datos del potenciómetro.

Se toma un ciclo de marcha de los datos que registra el sensor que son con los que se va a comparar con lo que registra OpenSim. Como resultado de la toma del sensor es la siguiente.

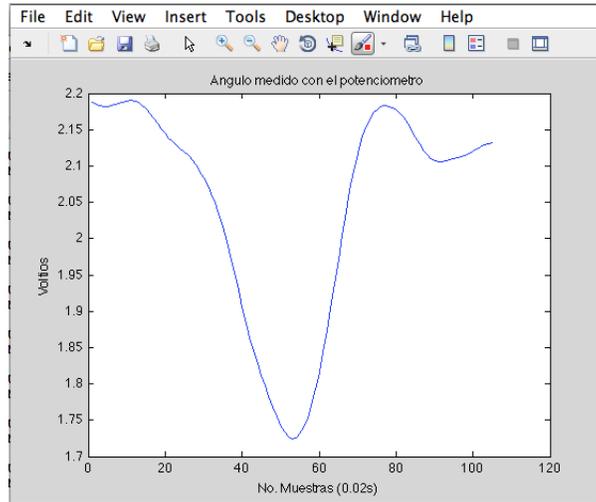


Figura 4.3.7: Registro de datos del sensor Voltaje vs No. de muestras

Comparado con la gráfica que muestra OpenSim las curvas que describen son muy parecidas, en el siguiente capítulo se describe como se acondiciona el sensor cambiar la magnitud eléctrica por magnitud en ángulos.

Luego de comparar la señal obtenida por los sensores con respecto a la de OpenSim, se procede a obtener una ecuación que describa la función. Usando la herramienta de matlab curvfitting obtendremos la ecuación como se ve en la figura 4.3.8.

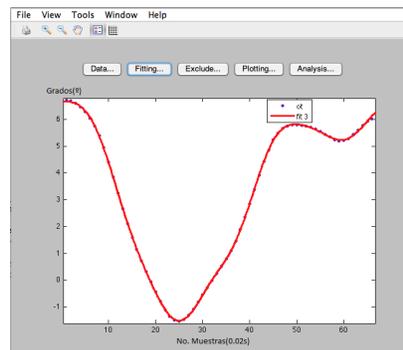


Figura 4.3.8: Caracterización de los datos

La ecuación describe la siguiente serie de Fourier.

$$\theta_1 = (3,45 + 2,411 * \cos(x * 4,439) - 2,735 * \sin(x * 4,439) + 0,6514 * \cos(2 * x * 4,439) + 1,304 * \sin(2 * x * 4,439) + 0,2799 * \cos(3 * x * 4,439) + 0,1314 * \sin(3 * x * 4,439) - 0,06782 * \cos(4 * x * 4,439) - 0,09101 * \sin(4 * x * 4,439) + 0,03087 * \cos(5 * x * 4,439) + 0,07292 * \sin(5 * x * 4,439) - 0,08528 * \cos(6 * x * 4,439) -$$

$$0,05101 * \sin(6 * x * 4,439)) * \pi/180$$

(4.3.3)

La ecuación representa una serie de Fourier que describe de manera adecuada debido a que tiene un RMSE bastante pequeño de 0.02783.

Derivando esta ecuación se tiene ω :

$$\begin{aligned} \omega = & (-10,702429 * \sin(4,439 * x) - 12,140665 * \cos(4,439 * x) - 5,7831292 * \\ & \sin(2 * 4,439 * x) + 11,576912 * \cos(2 * 4,439 * x) - 3,7274283 * \sin(3 * 4,439 * \\ & x) + 1,7498538 * \cos(3 * 4,439 * x) + 1,20421192 * \sin(4 * 4,439 * x) - 1,61597356 * \\ & \cos(4 * 4,439 * x) - 0,68515965 * \sin(5 * 4,439 * x) + 1,6184594 * \cos(5 * 4,439 * \\ & x) + 2,27134752 * \sin(6 * 4,439 * x) - 1,35860034 * \cos(6 * 4,439 * x)) * \pi/180 \end{aligned}$$

(4.3.4)

De la misma forma se obtiene $\dot{\omega}$:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} = & (-47,508082331 * \cos(x * 4,439) + 12,140665 * \sin(x * 4,439) - 51,3426210376 * \\ & \cos(2 * x * 4,439) - 102,779824736 * \sin(2 * x * 4,439) - 49,6381626711 * \cos(3 * \\ & x * 4,439) + 23,3028030546 * \sin(3 * x * 4,439) + 21,38198685152 * \cos(4 * x * \\ & 4,439) + 28,7373651064 * \sin(4 * x * 4,439) - 15,20711843175 * \cos(5 * x * 4,439) - \\ & 35,921706383 * \sin(5 * x * 4,439) + 60,49506984768 * \cos(6 * x * 4,439) + 36,184961455561 * \\ & \sin(6 * x * 4,439)) * \pi/180 \end{aligned}$$

(4.3.5)

Con la (ω) velocidad angular y la $(\dot{\omega})$ aceleración angular se obtiene la aceleración tangencial (parte posterior de la figura 4.3.3) y la aceleración centrípeta (parte inferior de la figura 4.3.3).

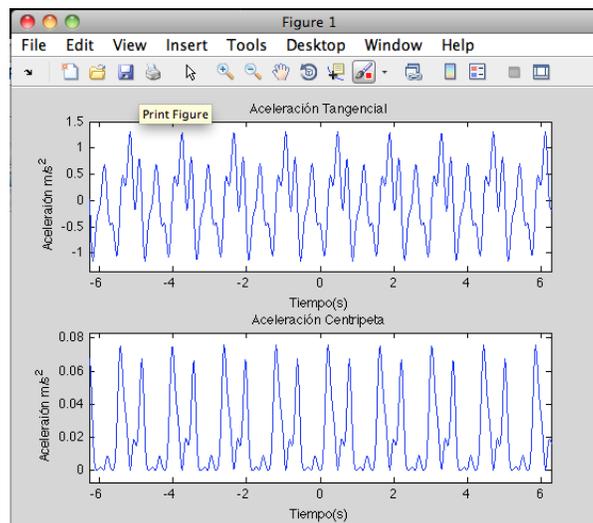


Figura 4.3.9: Aceleración tangencial y aceleración centrípeta

De tal forma que estas serían de forma teórica la aceleración tangencial y la aceleración centrípeta que están implícitas en la señal tomada de los sensores.

Capítulo 5

Implementación del sistema de registro

En este capítulo se hablará del desarrollo del proyecto donde se hace la implementación de toda la teoría con el sistema de registro, que es básicamente el objetivo principal del trabajo.

5.1. Introducción

El sistema de registro está contenido en tres subtemas, para poder explicar esto de forma gráfica se tiene el siguiente diagrama en bloques.



Figura 5.1.1: Diagrama en bloques del sistema de registro

En la figura 5.1.1 se muestra un diagrama en bloques del sistema de registro, que consta de tres partes. La primera ya descrita en el capítulo 2 como lo es el sistema de captura de movimiento a la cual no vamos a volver a entrar en detalle, la segunda parte es el acondicionamiento de la señal, que será descrita en detalle durante el capítulo y la tercera parte es la interfaz gráfica donde se mostrará los resultados obtenidos del sistema de registro.

5.2. Acondicionamiento de la señal

Después de lograr la obtención de datos por medio del sistema de captura de movimiento, se debe procesar esa señal de tal forma que se pueda interpretar de algún modo que describa el movimiento, para esto es preciso hacer un filtro a la señal de tal modo que reduzca lo más mínimo el ruido.

5.2.1. Disminución de ruido

El ruido es el elemento más común que aparece en cualquier sistema de captura de movimiento. El ruido puede ser inherente al propio circuito como consecuencia de proximidad entre pistas o capacidades internas, o también como consecuencia de ruido exterior como el propio medio ambiente.

Matlab_R2010b implementa el filtro FIR con una función denominada *fir1* que es un filtro digital que puede ser de diferentes tipos como pasa bajo, pasa banda, pasa alto, etc. En nuestro caso el filtro se utiliza pasa alto. Por defecto el filtro se normaliza de manera que la magnitud de respuesta del filtro en la frecuencia central de la banda de paso es de 0 dB, la función *fir1* se representa de la siguiente manera:

$$b = \text{fir1}(n, w_n)$$

donde n = El orden del filtro, w_n es la frecuencia de corte,

En el caso del proyecto se analizaron todas las señales para saber cual frecuencia de corte (w_n) usar. Lo que se hizo fue tomar todas las señales aplicarle la transformada rápida de Fourier (FFT) para saber cual era la frecuencia de corte apropiada para el filtro pasa bajo y disminuir el ruido que llegaba de las señales de los sensores.

Para aplicarle la transformada rápida de Fourier, Matlab_R2010b usa la función:

$$FT = \text{fft}(b);$$

donde b es la señal del filtro.

Se usaron 500 datos para aplicarle la FFT y mirar que frecuencia de corte usar, en la figura 5.2.1 se muestra la FFT imaginaria y la FFT real de cada dato.

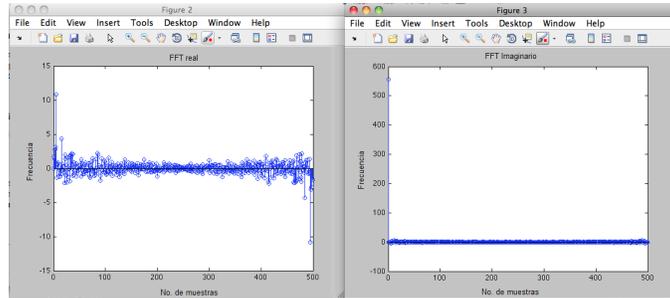


Figura 5.2.1: FFT imaginario y FFT real

Como se puede observar en la gráfica, hay puntos sobresalientes en el eje x hasta más o menos 80, este dato es importante porque permite hacer el cálculo de la frecuencia de corte. Como esta prueba en particular se hizo con 500 datos y el punto sobresaliente es 80, la frecuencia de corte se estima de la siguiente manera:

$$w_n = \frac{50 \cdot 100}{501/2} = 9,9Hz$$

La frecuencia de corte calculada es 9,9Hz, para facilitar los cálculos se aproxima a 10Hz.

Utilizando como herramienta Matlab_R2010b la sintaxis del filtro debe ser un valor entre 0 y 1, donde 1 es el 100% de la frecuencia de corte, entonces se estima que el valor en nuestro caso particular es 0,1.

Luego de encontrar la frecuencia de corte, se volvió a tomar valores, estos valores se hicieron con los acelerómetros estáticos para observar la disminución de ruido en la señal, como se muestra en la figura 5.2.2

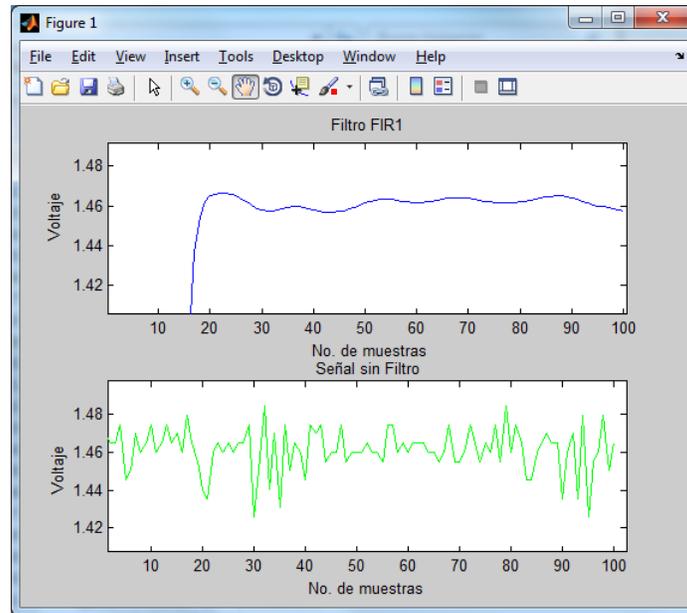


Figura 5.2.2: Disminución del ruido con los filtros FIR

En la figura 5.2.2 en la parte superior se encuentra la señal ya filtrada, y en la parte posterior la señal sin filtrar. Como se puede observar el filtro ayuda a disminuir el ruido y también presenta un retraso debido a la longitud del filtro, pero que no tiene incidencia ya que los primeros datos se eliminan para evitar errores.

5.2.2. Adaptación de los sensores

Una vez tenido el dato del sensor filtrado, se realiza la comparación del rango en el que está el acelerómetro con respecto al potenciómetro, es decir, encontrar la variable física similar entre los dos sensores para poderlas interpretar.

El Acelerómetro MMA7260Q está acondicionado para ser utilizado con un rango de sensibilidad de 1.5g. Según el manual del acelerómetro en este rango el sensor arroja un valor de 0.8V/g, esto quiere decir que por cada 1.5g, el sensor capta una magnitud eléctrica de 800 mV.

Los acelerómetro entregan una aceleración tangencial y aceleración radial, una forma para igualar esta magnitud, es colocando un potenciómetro. El potenciómetro mide una posición angular, esta posición se debe llevar a una magnitud de aceleración angular, y así des-componerla en aceleración radial y aceleración tangencial que luego son compradas con las que arroja el acelerómetro en los ejes x y y .

El potenciómetro entrega una magnitud física eléctrica y debe ser llevada a una magnitud que indique el ángulo. Como se asume que el potenciómetro es

lineal, para obtener la ecuación hay que hacer un análisis previo. En la figura 5.2.3 se muestra el ángulo del potenciómetro con respecto al voltaje.

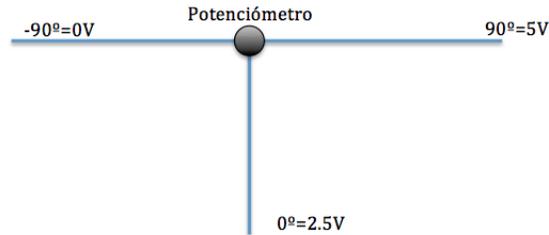


Figura 5.2.3: Ángulo con respecto al voltaje del potenciómetro

Asumiendo que el potenciómetro es lineal se calcula la variación del ángulo con respecto al voltaje con la ecuación de la recta, que calculada es:

$$y = 36x - 90$$

donde x es el voltaje medido del sensor y y es el ángulo que corresponde.

Lo que se compara en esta prueba es que la magnitud sea correspondiente tanto de los valores obtenidos del potenciómetro como de los acelerómetros.

La magnitud del potenciómetro es θ que al derivar, se obtendría la velocidad angular dada por:

$$\dot{\theta} = \left[\frac{rad}{s} \right]$$

y la aceleración angular dada por:

$$\ddot{\theta} = \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

Aplicando la ecuación 4.1.10 y 4.1.11 las magnitudes estarían dadas por:

$$a_t = \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$a_n = \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

que corresponderían a las magnitudes del acelerómetros ya que la magnitud entregada por el sensor se divide por la sensibilidad y se multiplica por la gravedad:

$$a_x = \left[\frac{x*[V]}{800[V]} * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \right]$$

$$a_y = \left[\frac{x*[V]}{800[V]} * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \right]$$

donde x corresponde al valor medido en voltios entregado por cada eje del acelerómetro.

Para realizar esta prueba se coloca el potenciómetro como centro de referencia y el acelerómetro en un extremo. Algo similar como se ve en la figura 5.2.4

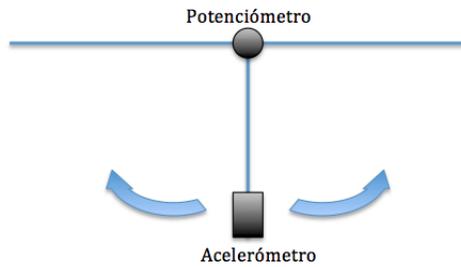


Figura 5.2.4: Prueba para calcular la magnitud del acelerómetro y el potenciómetro

Después de calcular los datos, se les aplicó las ecuaciones correspondientes, tanto al acelerómetro como al potenciómetro para comparar que el rango de las señales sea similar.

Para simplificar el proceso, se evalúa con los datos de la marcha como se observa en la figura 5.2.3. En esta figura se observa que los rangos de medida son muy similares, lo que indica que el acelerómetro realmente está bien acondicionado para una sensibilidad de $0.8V/g$ y que la magnitud calculada está en m/s^2 .

5.2.3. Aplicación filtro adaptativo

Como se había descrito en el capítulo anterior la señal que se quiere de los acelerómetros, es la señal que describe la aceleración tangencial y centrípeta a lo largo de la marcha, de tal manera que se procedió a hacer el filtro adaptativo.

Para aplicar el filtro adaptativo, se comparó la función que describía la ecuación 4.3.5, con la señal tangencial que arroja el acelerómetro en el eje x para determinar si se puede aplicar el filtro adaptativo, a la ecuación 4.3.5 fue necesario transformarla en aceleración tangencial aplicando la ecuación 4.1.10.

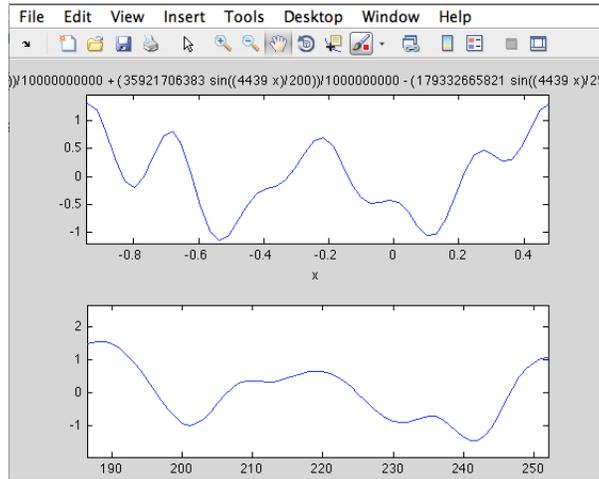


Figura 5.2.5: Aceleración Tangencial vs acelerómetro eje x

En la parte superior de la figura 5.2.3 se muestra la aceleración tangencial de la cual fue extraída por los potenciómetros y en la inferior se encuentra la aceleración en el eje x del acelerómetro estas dos señales presentan una similitud lo que indica que se puede aplicar el filtro adaptativo.

Para aplicar el filtro también se compara la función descrita por la ecuación 4.3.4 transformada en aceleración centrípeta aplicándole la ecuación 4.1.11 con la señal descrita por el eje y .

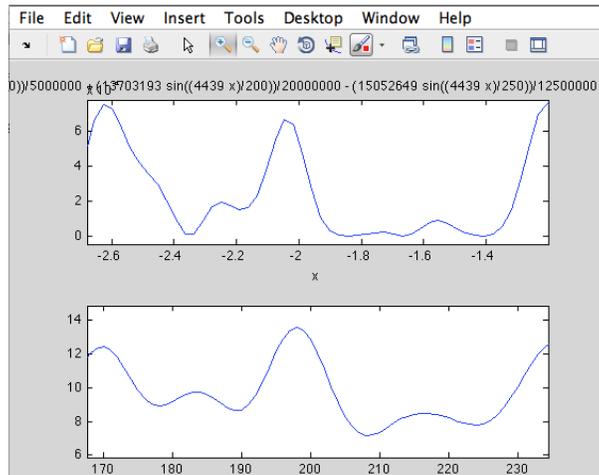


Figura 5.2.6: Aceleración Centrípeta vs acelerómetro eje y

En la parte superior de la figura 5.2.4 se muestra la aceleración centrípeta de la cual fue extraída por los potenciómetros y en la inferior se encuentra la

aceleración en el eje y del acelerómetro estas dos señales presentan una similitud.

Como se ve en las dos señales no son completamente iguales, esto se debe a que la señal del acelerómetro adquiere señales que fueron descritas en el capítulo anterior y que para el caso específico no fueron tenidas en cuenta.

Después de observar que estas señales se parecen, ahora se procede a la aplicación del filtro adaptativo. Matlab facilita el cálculo debido a que contiene funciones para aplicar los filtros, en el caso particular se usó la función `adapfilt.lms` donde se usa un algoritmo de mínimos cuadrados para encontrar los coeficientes del filtro que permiten obtener el valor esperado mínimo del cuadrado de la señal de error.

El algoritmo es el siguiente:

$adapfilt(n, step)$

donde n es la longitud del filtro y $step$ es el tamaño del paso que debe ser un escalar no negativo.

para este caso en específico el filtro tiene:

$$M = 501$$

$$\mu = 0,001$$

Al filtro le llega dos señales; la señal deseada que es la que se extrae de los potenciómetros y que describe la aceleración tangencial y la señal a la cual se le va a aplicar el filtro que es la que entrega el eje x del acelerómetro.

En la figura 5.2.5 se puede ver la similitud de la señal ya filtrada con la señal deseada.

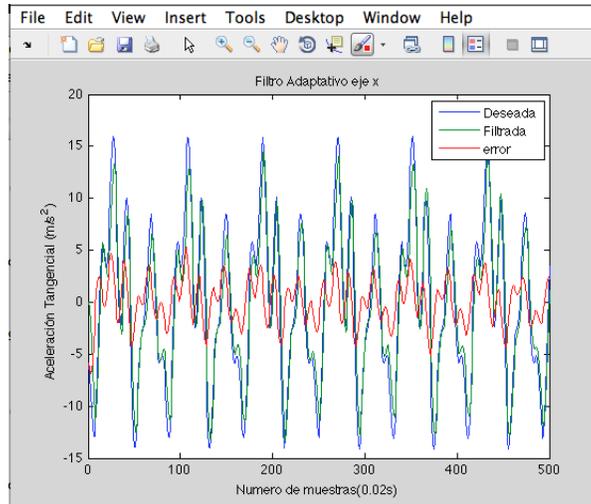


Figura 5.2.7: Señal deseada(aceleración tangencial) vs señal filtrada(eje x del acelerómetro)

Como es un filtro adaptativo con algoritmo LMS, este encuentra los coeficientes del filtro que permiten obtener el valor esperado mínimo del cuadrado

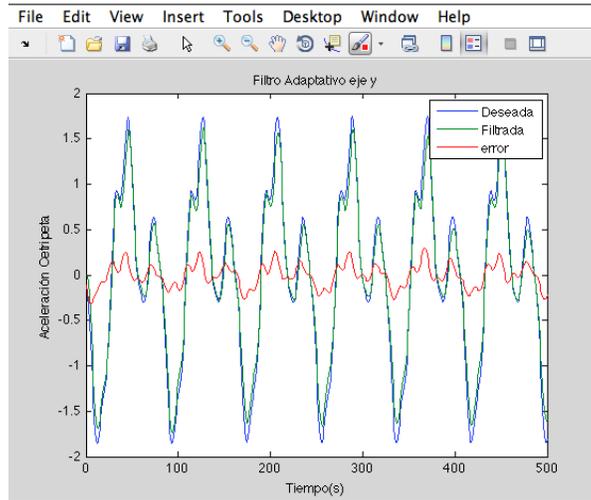


Figura 5.2.8: Señal deseada(acceleración centrípeta) vs señal filtrada(eje y del acelerómetro)

de la señal de error, definido como la diferencia entre la señal deseada y la señal producida a la salida del filtro, que en la figura se nota de color rojo.

Luego de filtrar la señal que describe la aceleración tangencial, se procede a hacer el filtro adaptativo para la función que describe la aceleración centrípeta de la marcha.

para este caso en específico el filtro tiene:

$$M = 501$$

$$\mu = 0,004$$

Para hacer el filtro adaptativo de la aceleración centrípeta se usa la señal teórica que se extrae de los potenciómetros y la señal a la cual se le va aplicar el filtro que es la que entrega el eje y del acelerómetro. Esto se puede ver en la figura 5.2.6 donde se ve la similitud a la que se llega con el filtro.

5.3. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica contiene un motor 3D llamado Truevision3D que esta creado de forma comercial y que esta en capas en la parte superior de la API Microsoft DirectX, para el caso específico se uso DirectX versión 9.0, este motor es accesible a C# que es con el lenguaje de programación que se crea la interfaz gráfica.

También tiene una serie de botones donde se puede observar en diferentes vistas la marcha que es simulada en el motor 3D además contiene un listbox donde se muestran los ángulos, que verifican el movimiento en el motor gráfico.

La interfaz contiene una serie de trakbar para manipular los eslabones, es decir pierna, muslo o pie de manera independiente esto con el fin de probar la

cinemática de orma manual.

En la figura 5.3.1 se muestra una imagen de la interfaz gráfica.

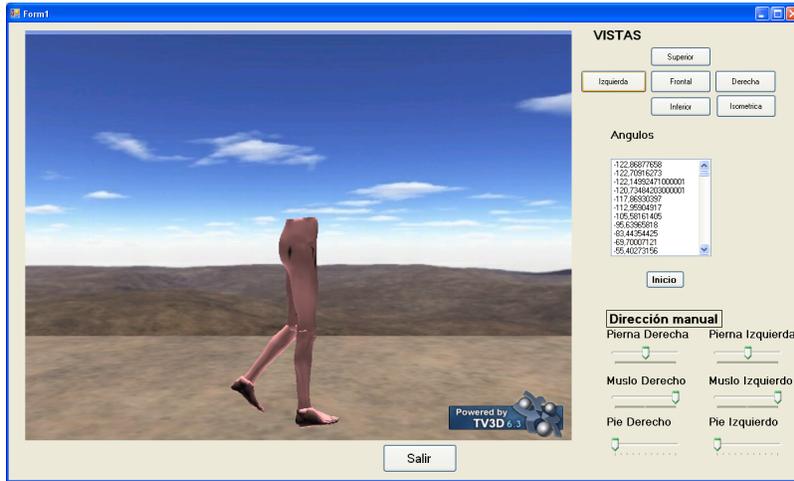


Figura 5.3.1: Interfaz gráfica

5.3.1. Descripción del código de la interfaz gráfica

En la interfaz gráfica se comienza con la creación de objetos en el Motor 3D de True Vision con funciones propias del motor como lo es:

- `texturefactory = new TVTextureFactory();`
- `atmosphere = new TVAtmosphere();`
- `h1 = new TVMathLibraryClass();`
- `f = new TVCamera();`
- `TV = new TVEngine();`
- `TVScene = new TVScene();`
- `objeto1 = new TVMesh();`
- `global = new TVGlobals();`
- `LUZ = new TVLightEngine();`
- `LUZ1 = new TVLightEngine();`

Las funciones están hechas para crear un ambiente que se pueda ver en el motor 3D

luego sigue el código con la creación de los objetos para este caso se usan las funciones:

- objeto1 = TVScene.CreateMeshBuilder("objeto1");
- objeto1.LoadXFile(@"modelado_x\pierna_der_10.x", true, true);

La función `TVScene.CreateMeshBuilder` crea un objeto dentro del motor y la función `LoadXfile` carga el objeto con la extensión `.x` que es una extensión de Panda DirectX.

Luego de crear los objetos se posicionan en el motor con la posición y el ángulo respectivo con las siguientes funciones:

- objeto1.SetPosition(0.0f, 0.0f, 0.0f);
- objeto1.SetRotation(0, 0, 0);

Ya creado los objetos y posicionados se pasa a la obtención de datos, estos datos son extraídos de Matlab_R2010b para esto se usa la siguiente función propia de C#:

- private const String Reader1 = "archivo.txt";

Esta función es para ubicar el archivo con la extensión `.txt` que contiene los datos que se extraen de Matlab_R2010b, luego se crea un objeto de la clase `System.IO.Streamreader` esto con el fin de poder leer los datos del archivo.

Estos datos se toman de con la función

- string prul = SR1.ReadLine();

donde cabe mencionar que están en forma string y que luego son pasados a `Double` para facilitar los cálculos.

Luego de obtener los datos en los vectores se envían al timer correspondiente donde se usa el modelo Denavit Heatenverg para calcular la cinemática que relaciona todos los eslabones, es decir, pierna rodilla y pie, que describe un movimiento y que por último será mostrado en la interfaz gráfica.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos futuros

- La señal de los acelerómetros comparada con la señal teórica extraída de los potenciómetros fue bastante similar, a pesar de que no se tuvo en cuenta la velocidad con la que se lleva la marcha, el efecto que se genera con el golpe de talón, los desplazamientos verticales que se hacen durante la marcha, el desplazamiento a lo largo de los ejes z de los acelerómetros, entre otros. Para los trabajos futuros se podrían tener en cuenta algunas de estas variables y disminuir el error.
- Los filtros adaptativos asemejan la señal deseada con la señal que se quiere filtrar, lo que indica que es una herramienta adecuada para ser utilizada, sin embargo se sobre entrenó el filtro debido a la longitud del mismo, e hizo que se perdiera información durante la marcha. Lo que indica que los filtros adaptativos podrían ser una solución para caracterizar los acelerómetros, si se toman en cuenta algunas variables que no fueron tomadas para igualar un poco la señal y así disminuir la longitud del filtro.
- Los potenciómetros fueron trascendentales para hacer la simulación de la marcha en el motor 3D, en la interfaz gráfica, además fueron punto de referencia para poder comparar las señales de los acelerómetros con las teóricas resultantes de estos.
- Las gráficas fueron herramientas importantes para la toma de decisiones durante el proyecto, fueron de apoyo para la caracterización de los acelerómetros y permitieron tomar una idea de los desplazamientos que se hacen durante la marcha.
- Los módulos de comunicación inalámbrica brindaron una gran ayuda debido a que es bastante práctico para la toma de datos y evitó que fuera cableado ya que esto afectaría la marcha.

Bibliografía

- [1] Angelica Maria Florez Caceres. *Sistema de Tracking para Generacion de Trayectorias de un Bipedo Robotico*. 2011.
- [2] Ivan Adrian Mendoza Diosaba. *Sistema de captura de movimiento de datos para un exoesqueleto pasivo de miembros inferiores*. 2011.
- [3] Max Suell Dutra Omar Lengerke Elkin Veslin, Jules Ghislain Slama. Análisis cinemático de un exoesqueleto de partes superiores de 7 gdl. page 7, 2005.
- [4] Jorge Avendano Ramirez Rafael Gonzalez Esau Torres Marroquin Fabian Hernandez Perez, Jose Luis Hernandez Perez. Filtro digital. 2011.
- [5] Simon Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, 2002.
- [6] R. C Hibbeler. *Ingenieria mecanica-estatica*. Pearson Prentice Hall, 2010.
- [7] <http://bips.bi.ehu.es/prj/ruido/>. Filtrado adaptativo.
- [8] <http://www.slideshare.net/kevinXD123/ss-cap7-diseno-filtros-fir>. Capitulo 7 diseño de filtro fir, 11 2010.
- [9] Julian B. Santiago Prowald. *Calibración de los acelerómetros para la medida de microaceleraciones aplicaciones espaciales*. PhD thesis, Universidad politecnica de Madrid, 2000.
- [10] Lawrence R. and Bernard Gold. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, 1975.
- [11] John W. Serway, Raymond A.; Jewett. *Physics for Scientists and Engineers*. 2004.
- [12] Indalecio Diaz Sotelo. Captura de movimientos, 01 2004.
- [13] Carmen Ramos Nava Victor Hugo Godoy Aguirre, Hernando Ortega Carrillo. Prototipo de un sistema de captura de movimiento.