

**ACQUISITION AND PROCESSING OF SIGNALS FROM A TRIAXIAL MEMS  
ACCELEROMETER FOR MEASURING DISPLACEMENT OF A LOWER LIMB****ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑALES DE UN ACELERÓMETRO  
TRIAxIAL MEMS, PARA LA MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE UNA  
EXTREMIDAD INFERIOR**

**MSc(c). Andrés E. Gomez H., MSc. John F. Archila D.  
MSc. Jorge E. Meneses F.**

**Universidad Industrial de Santander.**

Grupo de Investigación en Robótica de servicio y Diseño Industrial, GIROD.  
Cr. 27 con Calle 9, Ciudad Universitaria Of. 321 DI, Bucaramanga, Santander, Colombia.  
Tel. +(57) (7) 634 4000, Ext.2880.  
E-mail: maefinfoaegh@gmail.com

**Abstract:** This work is part of a proposal, which seeks to design new tools to support the specialist for mitigating the problems of disability movement. The acquisition and processing of signals from a triaxial MEMS (*Micromachined Electro-Mechanical Systems*) accelerometer low cost are the basis for the development of this new proposal. This article proposes the integration of mathematical algorithms for processing signals acquired from an accelerometer, in order to obtain the displacement of a lower limb.

**Keywords:** MEMS, displacement, signal processing, data acquisition.

**Resumen:** Este trabajo es parte de una propuesta, que busca el diseño de nuevas herramientas de apoyo al especialista, para la mitigación de los problemas de discapacidad por movimiento. La adquisición y procesamiento, de las señales de un acelerómetro triaxial tipo MEMS (*Micromachined Electro-Mechanical Systems*) de bajo costo, son la base para el desarrollo de esta nueva propuesta. En este artículo se propone la integración de algoritmos matemáticos, para el procesamiento de señales adquiridas de un acelerómetro, con el propósito de obtener el desplazamiento una extremidad inferior.

**Palabras clave:** MEMS, desplazamiento, procesamiento de señales, adquisición de datos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE), dentro de todos los tipos de discapacidad, el 20% corresponde a discapacidad en el movimiento (cuerpo, manos, brazos y piernas), siendo el más representativo en la población (DANE 2010).

En el mundo se encuentran evidencias según las cuales se observa que ejercicios repetitivos e independientes pueden fortalecer directamente las

extremidades implicadas, lo cual puede ayudar al proceso de rehabilitación. Los tratamientos clásicos confían en primera instancia en el uso de la fisioterapia, la cual depende en gran medida tanto de la capacitación del terapeuta como de su experiencia (Huiyu et al, 2006).

Un complemento al ejercicio de la fisioterapia tradicional, sería la cuantificación de los métodos usados en el transcurso de la rehabilitación, por lo cual son necesarios instrumentos apropiados para adquirir mediciones de trayectorias de

movimientos, con los cuales se puedan especificar detalles de la tarea que acaba de ejecutar el paciente en el ejercicio físico propuesto por el terapeuta (Gómez et al, 2009).

El conocimiento de la posición y el movimiento de los cuerpos en un espacio determinado son de vital importancia para numerosas aplicaciones. En las últimas décadas, dispositivos robóticos se han valido de tecnologías sensoriales para realizar el control del movimiento de las partes móviles de los mismos. El auge en la utilización de sensores en la caracterización de la cinemática del cuerpo humano es reciente.

El interés que ha despertado este último campo, impulsado especialmente por el impacto directo que puede tener el estudio del movimiento, en la calidad de vida de las personas, ha fomentado el desarrollo y la utilización de soluciones tecnológicas más completas.

En este trabajo se propone un método directo para la medición del desplazamiento de una extremidad inferior, utilizando un acelerómetro triaxial. En la segunda parte de este documento, se hará un recuento de los elementos utilizados para llevar a cabo este trabajo. En la tercera parte se describirá el sistema de adquisición empleado, en la siguiente sección se describen los algoritmos empleados y por último se explicara el experimento realizado.

## 2. MATERIALES

### 2.1 Tarjeta de adquisición de datos

En este trabajo, se utiliza una tarjeta de adquisición de datos NI USB de bajo costo que ofrece una funcionalidad básica para aplicaciones como registro de datos, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio (ver fig. 1). Entre las características más importantes de la NI USB 6009 (National Instruments Corporation 2004-2008), se tienen:

- 8 entradas analógicas (13 bits, 6KS/s).
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s).
- 12 E/S digitales.
- Contador de 32 bits.
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada.



Fig. 1. NI USB 6009. National Instruments Corporation.

### 2.2 Acelerómetro triaxial

Para el desarrollo del trabajo propuesto se escogió el acelerómetro capacitivo tipo MEMS MMA7341L. Este acelerómetro cuenta una etapa de acondicionamiento de sus señales de salida mediante un filtro pasa bajo de un polo, temperatura de compensación, auto test y sensibilidad ajustable entre  $\pm 3g$  o  $\pm 1g$ . Fig. 2.

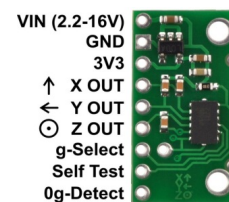


Fig. 2. Acelerómetro triaxial MMA7341L. Freescale Semiconductor.

### 2.3 Entorno de desarrollo

El software de adquisición de datos empleado en este trabajo, es *Matlab*. Entre sus prestaciones básicas, se hallan la creación de interfaces de usuario (*GUI*) y la comunicación con dispositivos hardware. La *Toolbox Data Acquisition* es la que proporciona las funciones especializadas, que permiten conectar esta plataforma con la tarjeta de adquisición de datos que se está utilizando.

### 2.4 Prototipo NI

El prototipo *NI* es una cubierta para el pie, que se encarga de alojar la tarjeta de adquisición y el acelerómetro, ver fig. 3.

El diseño de esta cubierta tiene como objetivo principal facilitar la adquisición de los datos del movimiento del miembro inferior, y resguardar la tarjeta de adquisición de datos.

El prototipo *NI* tiene tres correas de velcro, las cuales se encargan de fijar el cable que conecta la tarjeta de adquisición de datos al computador, con la pierna del usuario del sistema. Esto proporciona mayor libertad de movimiento.



Fig. 3. Prototipo NI.

### 3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Con la integración de todos los materiales en el prototipo NI, La conexión del acelerómetro con la tarjeta de adquisición se hace por medio de un bus de datos, lo más corto posible, ya que el fabricante del dispositivo así lo recomienda. El acelerómetro es alimentado también por la tarjeta, aprovechando la capacidad que tiene de proporcionar una salida de corriente continua de 5V (200mA) entre los conectores 31 y 32. El modo de trabajo de la tarjeta de adquisición de datos para esta aplicación es de canales de simple conexión, por lo cual se utilizaron solamente los tres primeros canales de la tarjeta de adquisición. Los otros 5, fueron aterrizados como medida propuesta por el fabricante de la tarjeta.

En Matlab se implementaron las funciones del *Data Acquisition Toolbox*<sup>TM</sup> (versión 2.18, de la versión 7.12 de Matlab) necesarias para configurar la tarjeta de adquisición de datos y para almacenar la información adquirida por el hardware para su posterior análisis. Es importante tener en cuenta que la adquisición de datos empleando Matlab, no se realiza en tiempo real.

### 4. ALGORITMOS

Matlab es una herramienta, que cuenta con un amplio menú de opciones para realizar diversas tareas requeridas en ingeniería. Entre todas las alternativas con las que cuenta Matlab, se encuentran las *toolbox*, que son un grupo de instrucciones con un objetivo común, de las cuales tres de ellas fueron utilizadas para el desarrollo del proyecto y estas son: la *data acquisition*, *Wavelet*, y la *curve fitting toolbox*. Por otra parte, también se utilizó el *GUI Builder*, para el desarrollo de una interfaz en donde poder apreciar la información adquirida.

#### 4.1 Algoritmo de posicionamiento

Actualmente hay una gran variedad de productos multifuncionales, como las consolas de video juegos y los Smartphone, que se benefician de la obtención de la posición. Los sensores inerciales son una opción para obtener esta información. Al no haber una conversión directa entre la aceleración y la posición, es necesario realizar un procesamiento de las señales adquiridas de estos dispositivos. (Seifert et al, 2007).

Si la aceleración de un objeto es conocida, se puede obtener la posición, aplicando una doble integración. Ecuación 1.

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \int (\vec{a}) dt \quad \wedge \quad \vec{s} = \int (\vec{v}) dt \\ &\therefore \int \left( \int (\vec{a}) dt \right) dt \end{aligned} \quad (1)$$

En la práctica, esto no es tan trivial, porque las señales proporcionadas por los acelerómetros, sufren de una desviación, y además están inmersas en una gran componente de ruido eléctrico. Si no se tienen presentes estas consideraciones, y se integran las señales adquiridas del acelerómetro, este procedimiento amplificaría el más mínimo error. (Ojeda et al ,2007).

#### 4.2 Algoritmo de filtrado

Para la eliminación del ruido adquirido con cada una de las señales de salida del MMA7341L, se utilizó la *Wavelet toolbox de Matlab*<sup>®</sup>. El procedimiento general del filtrado del ruido utilizando esta herramienta en las señales adquiridas involucra tres pasos (Mathworks ,2010):

*Descomponer*: Seleccionar una Wavelet y un nivel de descomposición N. Después, se calcula la descomposición Wavelet de la señal.

*Umbral de los coeficientes de detalle*: Para cada nivel desde 1 hasta N, se selecciona un umbral y se aplica una umbralización suave a los coeficientes de detalle.

*Reconstruir*: Calcular la reconstrucción Wavelet usando el coeficiente de la aproximación de nivel N y los coeficientes de detalle modificados de cada uno de los niveles desde 1 hasta el nivel N.

Aplicando esta metodología, se selecciona una *wavelet* madre y un nivel de descomposición. El resultado se puede apreciar en la aplicación de esta transformada en cada una de las señales. Fig. 4.

### 4.3 Algoritmo de Integración

Las señales de un acelerómetro son de tipo no estacionario, es decir, son señales en las que su frecuencia varía en el tiempo (Reyes, 2009). Para poder integrar este tipo de señales se debe conocer su función, lo cual es una tarea ardua.

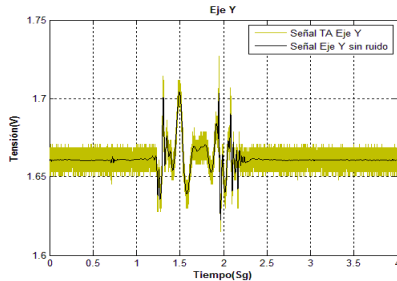


Fig. 4. Filtrado de Señales utilizando la transformada Wavelet.

La solución es construir una función de ajuste, que defina la señal del acelerómetro adquirida y procesada, en cada medición del movimiento de la extremidad inferior. Para lograr esto, se utiliza la interpolación mediante el uso de trazadores, específicamente los trazadores cúbicos, dado que estos son la versión más común y útil en la práctica de la ingeniería (Chapra, 2007)

La interpolación mediante trazadores cúbicos se implementó mediante la *curve fitting toolbox* de Matlab, ya que esta proporciona funciones en líneas de comandos para el ajuste de curvas de datos. El resultado de la doble integración, aplicada a la señal de aceleración del dispositivo, se puede apreciar en fig. 5 y 6.

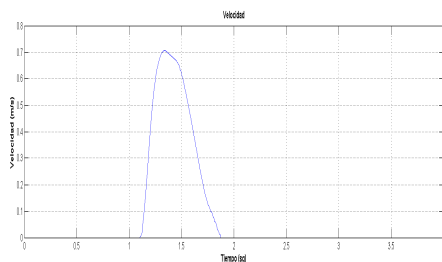


Fig. 5. Señal de Velocidad.

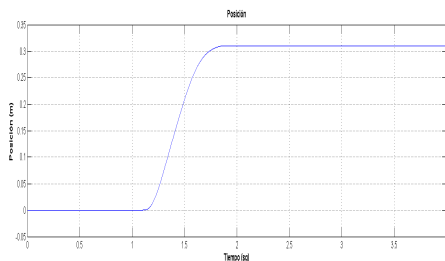


Fig. 6. Señal de Posición.

### 4.3 Algoritmo ZUPT

Los acelerómetros de bajo costo son susceptibles a errores de desviación. La estimación de las posiciones por medio de la realización de una doble integración, puede divergir en cortos periodos de tiempo. Las correcciones de la desviación son importantes para la búsqueda de una posición, (Xiaoping et al, 2007). En Fig. 7, se puede apreciar el efecto de la desviación en una señal, después de haber sido integrada una vez.

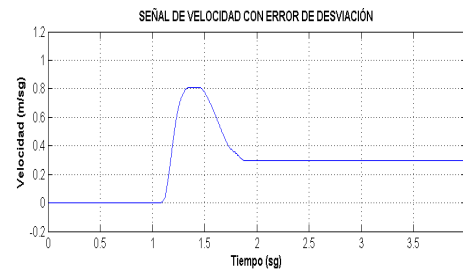


Fig. 7. Señal con error de desviación.

Es claro en la figura anterior, que después de aproximadamente 1.8 seg. la señal presenta una alteración, y si esta no es corregida, la determinación de la posición utilizando esta señal, será errada como se puede ver en la fig. 8.

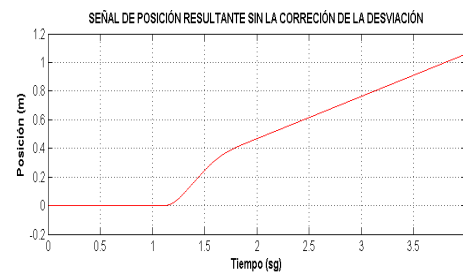


Fig. 8. Señal de posición resultante sin la corrección.

En la fig. 9, se puede ver el efecto de la corrección de la señal que aparece en la fig. 7. Al integrar la señal de la fig. 9, la señal resultante en la Fig. 10 es una señal totalmente diferente a la que está representada en la fig. 8.

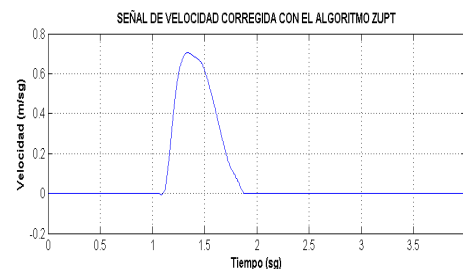


Fig. 9. Señal sin error de desviación.

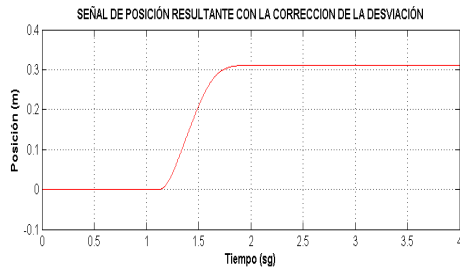


Fig. 10. Señal de posición después de corregir la desviación.

El algoritmo ZUPT, el cual fue implementado en este proyecto, es el más viable y versátil, independientemente del usuario y el movimiento realizado. La descripción del procedimiento se puede encontrar en (Feliz, 2007).

## 5. ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS

Para la toma de datos, se realizó un ejercicio específico que consistía en desplazar la extremidad inferior en el plano sagital hacia el frente, 4 distancias diferentes (en dirección del eje X positivo del acelerómetro), sin desplazar todo el cuerpo hasta la nueva posición. Se realizaron 20 mediciones por cada uno de las distancias.



Fig. 11. Ejercicio para la toma de datos.

Después de un análisis de varianzas y la aplicación de un diagnóstico por residuales para contrarrestar el error aleatorio de medición (Moyano, 2005). Los resultados se muestran en la Tabla 1.

## 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la VIE de la UIS, por el apoyo y financiación brindado al proyecto titulado “Estudio del movimiento de una extremidad inferior implementando un modelo computacional, por medio de cinemática robótica, procesamiento de señales y tecnología MEMS” código 5559, de donde surge el presente artículo de investigación.

Tabla 1: Resultado de las mediciones

REPLICAS	20 cm	30 cm	40 cm	45 cm
1	19,57	31,40	38,46	44,48
2	19,18	31,19	40,84	42,22
3	21,00	31,60	40,72	44,48
4	19,64	31,10	38,48	44,12
5	19,25	30,15	40,25	46,66
6	20,31	30,96	39,60	42,59
7	20,91	28,91	42,43	44,99
8	20,08	29,51	37,49	44,92
9	20,30	31,14	40,84	44,92
10	21,57	31,48	39,81	42,26
11	20,39	31,36	37,72	42,30
12	21,20	30,66	42,84	44,63
13	21,11	30,93	36,39	46,60
14	21,29	32,79	41,37	45,98
15	19,58	30,49	40,77	46,13
16	21,03	31,69	40,09	45,70
17	20,21	32,24	40,25	47,05
18	20,46	29,63	41,33	46,62
19	21,93	29,37	40,33	44,22
20	19,85	31,71	39,73	45,21

## 5. CONCLUSIONES

La información que se produce por un sensor inercial que se coloca en una persona, puede ser utilizada para calcular la posición sin la necesidad de un dispositivo de referencia.

La utilización de un sistema alámbrico no es la mejor opción para un estudio del movimiento del cuerpo humano, es importante cambiar el hardware a una tecnología inalámbrica, que no tenga un impacto psicológico en el usuario debido a la naturaleza del movimiento realizado y que está siendo analizado.

Sin el adecuado preprocesamiento de las señales adquiridas del acelerómetro, no se debe considerar la información obtenida por el mismo. La precisión de las lecturas del dispositivo dependerá de los algoritmos aplicados para el procesamiento de las señales y del sensor utilizado.

En el desarrollo de los desplazamientos de la extremidad inferior, se observó que las distancias del movimiento no pueden ser limitadas a un punto específico, si no se restringe el movimiento, ya que los movimientos de la extremidad inferior no siempre van a coincidir con una distancia propuesta. Por lo tanto, se tomó la decisión de realizar por cada movimiento de la pierna, una medición con la cinta métrica y empezar siempre el movimiento desde un punto físico exacto, lo cual garantiza una disminución en el error de cada medición.

## REFERENCIAS

- DANE, Marzo del 2010, *Discapacidad en Colombia*, Total nacional, Cuadro 33.
- Huiyu, Z., Huosheng, H. and Y. T. (2006), *Inertial measurements of upper limb motion*, Springer, p. 479487.
- Gómez H., A., Carrillo, M. and J. Archila (2009), *Estudio de ayudas técnicas tipo exoesqueleto para apoyo a pacientes con desordenes en el movimiento*, Revista Colombiana de tecnologías de Avanzada, vol. 1, pp. 52–59.
- National Instruments Corporation (2004-2008), *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI USB-6008/6009*.
- Seifert, K., Camacho, O. (2007), *Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor, Application Note, AN3397.
- Ojeda, L., Borenstein, J. (2007), *Non-GPS navigation for security personnel and first responders*, Journal of Navigation. Vol. 60 No. 3, pp. 391-407.
- Mathworks, Inc (2010), *Wavelet toolbox*.
- Reyes, R. D. (2009), *Aplicación de la transformada Wavelet en el análisis de calidad de energía*, Instituto politécnico nacional.
- Chapra, S. and Canale, R. (2007), *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill.
- Xiaoping, Y., Bachmann, E.R., Moore, H.; Calusdian, J. (2007), *Self-contained Position Tracking of Human Movement Using Small Inertial/Magnetic Sensor Modules*, Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, vol., no., pp.2526-2533, 10-14.
- Feliz, R., Zalama, E. and Garca, J. (2007), *Estimación de posición de viandantes mediante sensores inerciales*.
- Moyano D., J. M. (2005), *Introducción a los sistemas de Instrumentación*. Universidad de Cantabria, Dpto. de Electrónica y Computadores.