

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍAS

Título: DISEÑO DE UN ELECTROGONIÓMETRO BASADO EN ACELERÓMETROS PARA LA
EVALUACIÓN DEL GESTO DEPORTIVO EN LEVANTAMIENTO DE PESAS

Autor: GISELL ISABEL DE LA HAYE CHAMORRO

Jurado

Cartagena, Enero de 2016

DISEÑO DE UN ELECTROGONIÓMETRO BASADO EN
ACELERÓMETROS PARA LA EVALUACIÓN DEL GESTO
DEPORTIVO EN LEVANTAMIENTO DE PESAS

GISSELL ISABEL DE LA HAYE CHAMORRO

Directora: Sonia Helena Contreras Ortiz, PhD

Universidad Tecnológica Bolívar

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Electrónica

Cartagena

Enero 15 de 2016

DISEÑO DE UN ELECTROGONIÓMETRO BASADO EN
ACELERÓMETROS PARA LA EVALUACIÓN DEL GESTO
DEPORTIVO EN LEVANTAMIENTO DE PESAS

GISELL ISABEL DE LA HAYE CHAMORRO

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniera Electrónica

Directora: Sonia Helena Contreras Ortiz, PhD.

Universidad Tecnológica Bolívar
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Electrónica
Cartagena

Enero 15 de 2016

Resumen

En el siguiente reporte se describe el diseño y la implementación de un electrogoniómetro para usarlo en la medición de ángulos de las articulaciones de los deportistas durante la ejecución de sus respectivos ejercicios en el levantamiento de pesas. El electrogoniómetro consta de cuatro acelerómetros conectados a un microcontrolador, en este caso Arduino UNO, el cual a su vez está conectado a un computador a través del puerto USB. Este diseño proporciona una alta precisión y exactitud en la medición de los ángulos, además tiene la ventaja de ser un sistema simple y económico; comprobado por las mediciones hechas a deportistas, datos satisfactorios que se muestran tabulados para hacer sus respectivos análisis.

Agradecimientos

- Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias por financiar este proyecto a través de la convocatoria de semilleros de investigación del año 2013.
- A la profesora Sonia Contreras por su apoyo y paciencia.
- A mis compañeros de investigación por compartir la experiencias que se vivieron durante la realización del proyecto, en especial a Isabela Mercado por su colaboración a lo largo de éste.

Índice general

1. Introducción	9
2. Materiales y métodos	13
3. Resultados y Discusión	21
4. Conclusiones y Recomendaciones	24

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Movimiento calibrado en el eje X.	17
<i>Figura 2.</i> Movimiento calibrado en el eje Y.	18
<i>Figura 3.</i> Movimiento calibrado en el eje Z.	18
<i>Figura 4.</i> Esquema del electrogoniómetro implementado con cuatro acelerómetros. Prototipo inicial.	20
<i>Figura 5.</i> Angulo del codo durante ejercicios de flexión y extensión libres. Prueba con el prototipo inicial.	22
<i>Figura 6.</i> Prototipo final del electrogoniómetro.	23

Lista de Tablas

Tabla 1. Ángulos medidos, con el sistema inicialmente diseñado, comparados con los valores medidos por el goniómetro digital. Los valores se expresan en grados. 21

Capítulo 1.

Introducción

Es muy importante para los deportistas realizar sus ejercicios de la forma adecuada para evitar errores que causen su descalificación y/o lesiones que comprometan su integridad física. Hoy en día existen muchos métodos y herramientas para hacer seguimientos a sus movimientos para que los expertos realicen el respectivo análisis sobre éstos con el objetivo de que ayuden a prevenir y tratar lesiones y para mejorar el rendimiento en el deportista.

Entre los métodos utilizados para el análisis del movimiento de las articulaciones se encuentran los goniómetros basados en sensores magnéticos, potenciómetros, sistemas optoelectrónicos y unidades inerciales que incluyen acelerómetros y giroscopios microelectromecánicos (MEMS) [2]. Los dispositivos MEMS ofrecen gran relación costo-beneficio, no requieren acoplamiento preciso, por lo cual permiten una operación flexible y confiable. Una desventaja de estos sistemas que emplean la aceleración de la gravedad como referencia para la realización de las mediciones, por lo cual no permiten medir ángulos en planos horizontales [3].

Los goniómetros son instrumentos de medición de ángulos, gracias a esa característica permite la medición del movimiento de las articulaciones de forma continua y en tiempo real. El electrogoniómetro propuesto cuenta con cuatro acelerómetros (dos por segmento) conectados a

un microcontrolador. El cálculo del ángulo se realiza con el método distributed common mode rejection (DCMR) que emplea los dos pares de acelerómetros en cada segmento para crear dos “acelerómetros virtuales” en el vértice de la articulación [4]. El ángulo de la articulación se estima a partir del ángulo del vector aceleración en el vértice de la articulación. Mediante el análisis de la variación del ángulo con respecto al tiempo en cada articulación, un entrenador deportivo puede determinar si existe un error en la realización de la práctica o si ésta se está ejecutando correctamente, y llevar un registro de la evolución de la técnica del deportista a medida que avanza su entrenamiento [5].

El electrogoniometro es un dispositivo electrónico que utiliza sensores para medición de ángulos, implementado con potenciómetros, medidores de tensión o acelerómetros para registrar medidas. Entre sus usos principales se encuentra la medición de rangos de movimiento de pacientes con limitación de movimientos y el registro de los movimientos en el espacio de deportistas de diferentes disciplinas.

El estudio y uso de acelerómetros para electrogoniometros viene desde 1991, Willemsen et. al. [4] usaron acelerómetros uniaxiales para la medición de ángulos en las extremidades inferiores. Este sistema asumía las extremidades como cuerpos rígidos, pero el método empleado para asegurar los acelerómetros no cumplía esta condición, lo que ocasionaba errores acumulativos en la medición [6]. En 2001 y 2005, Williamson y Andrews, y Dejnabadi et. al. Desarrollaron electrogoniómetros basados en acelerómetros y giroscopios que se emplearon para medir los ángulos de la rodilla.[7], [8]. En el 2003 la universidad Autónoma Metropolitana, se propuso diseñar un sistema de adquisición por acelerometría, con las siguientes características: Debe ser

ligero, no debe afectar la marcha natural de la persona, los errores de las medidas deben ser como mínimo de ± 0.1 grado, bajo consumo, la medida debe ser triaxial. De esta manera, el equipo se constituye por dos acelerómetros de 2 ejes (X-Y) con salida de voltaje, acoplados de tal forma que realicen medidas en los 3 ejes corporales. En el 2008 en la Universidad pública de Navarra Pamplona, Centro de estudios, Investigación y Medicina del Deporte y junto con el Hospital de Navarra, realizaron un estudio en la población de adultos mayores, con la finalidad de desarrollar un test que sea capaz de predecir la fragilidad y discapacidad motora por medio de acelerometría [9]. En el 2011, se desarrolló e implementó un dispositivo inalámbrico que registra los movimientos de traslación humana, el uso de acelerómetros para realizar las actividades anteriores se ha difundido bastante en la última década debido al desarrollo de la microelectrónica y a su implementación como dispositivos MEMs (Micro-Electro-Mecánicos) de tamaño pequeño y bajo costo mediante un acelerómetro triaxial integrado en el mismo [10].

Actualmente, empresas como Biometrics, XSens Technologies e Innalabs proveen electrogoniómetros fáciles de usar y relativamente económicos. Sin embargo, hay aspectos aún por mejorar que requieren mayor investigación, como el registro, almacenamiento y procesamiento de los datos en tiempo real, los métodos de fijación de los goniómetros para permitir un ajuste seguro y cómodo que no limite el movimiento de la persona [11].

El electrogoniometro elaborado posee cuatro acelerómetros, dos por segmento, que están conectados a un microcontrolador. Para la medición del ángulo, su cálculo está basado en el método *Distributed Common Mode Rejection* (DCMR), que usa dos pares de acelerómetros en cada segmento, creando dos “acelerómetros virtuales” en el vértice de la articulación. El ángulo de

la articulación se estima a partir del ángulo del vector aceleración en el vértice de la articulación. Mediante el análisis de la variación del ángulo con respecto al tiempo en cada articulación, un entrenador deportivo puede determinar si existe un error en la realización de la práctica o si ésta se está ejecutando correctamente, y llevar un registro de la evolución de la técnica del deportista a medida que avanza su entrenamiento [12].

Capítulo 2.

Materiales y Métodos.

El electrogoniómetro es un dispositivo electrónico que utiliza sensores para medición de ángulos, implementado con potenciómetros, medidores de tensión o acelerómetros para registrar medidas. Entre sus usos principales se encuentran la medición de rangos de movimiento de pacientes con limitación de movimientos y el registro de los movimientos en el espacio de deportistas de diferentes disciplinas.

Entre las tecnologías más utilizadas para el desarrollo de electrogoniómetros se encuentran:

- Potenciómetros: Utilizan la resistencia eléctrica para determinar el ángulo entre las articulaciones. Este tipo de electrogoniómetros no suelen ser muy precisos debido a su incapacidad para seguir los cambios en la rotación de la articulación, por lo que su principal uso es en el ámbito de la medicina.
- Medidores de deformación: También conocidos como electrogoniómetros flexibles; consisten en un resorte flexible que unen dos bloques plásticos. Utiliza el mismo mecanismo de los potenciómetros, con la diferencia de que este medidor es más flexible y liviano y se adapta mejor al paciente. De igual manera, su uso es de tipo médico.
- Sistema opto electrónico: Está basado en un sistema de video que rastrea marcadores colocados en el cuerpo del usuario. Ofrece gran precisión, pero tiene el inconveniente de que

es costosa su implementación ya que cuenta con muchos elementos especializados para este tipo de uso.

- **Acelerómetros:** El uso de acelerómetros para el desarrollo de electrogoniómetros es reciente, y cuenta con la ventaja de su bajo precio y de no contar con elementos muy especializados. Además, se puede utilizar tanto en medicina como en deporte debido a su gran precisión en la medición de ángulos y en adición a esto observa también la rotación de la articulación gracias a la medición de la aceleración en los tres ejes.

Al escoger la tecnología de acelerómetros, para la implementación del diseño primeramente se escogieron cuatro acelerómetros (MMA7361L, Freescale Semiconductor, Austin, TX) que toma las lecturas en los tres ejes (X,Y,Z), conectados al microcontrolador Arduino (Leonardo, SmartProjects, Scarmagno, Italia), para hacer el procesamiento de datos y observar los resultados en un computador inicialmente con ayuda del software de MATLAB. Los acelerómetros permiten seleccionar rangos de operación: 1.5g y 6g, donde g es la aceleración de la gravedad estándar que equivale a 9.806m/s^2 y su sensibilidad típica es de 800mV/g.

Se hizo la adquisición de datos en Matlab tomando muestras de lo que realmente sucede con el dispositivo convirtiéndolo en medición de la aceleración de la gravedad. Las mediciones dadas por el acelerómetro son tomadas y controladas por un código en Matlab.

Se comenzó haciendo la calibración de dicho dispositivo para obtener datos precisos al momento de hacer las mediciones. Luego se toman los datos que Matlab adquiere del acelerómetro, dados en voltios, y se convierten a aceleración de la gravedad

A. Calibración de los acelerómetros

Es lo primero que se hace y muy importante, ya que de la calibración depende la precisión y la exactitud de las muestras. El voltaje de salida del acelerómetro en cada eje puede expresarse con la siguiente ecuación lineal:

$$V_{eje} = V_{off} + S \cdot A_{eje} \quad (1)$$

Donde V_{off} es el voltaje offset, que es el voltaje producido para que la aceleración sea igual a cero; S es la sensibilidad del sensor y A_{eje} es la aceleración en el eje que se está midiendo. El microcontrolador tiene conversor A/D de 10 bits que provee 1024 niveles. El valor digital leído por el micro controlador V_d se relaciona con el voltaje analógico proporcionado por el acelerómetro con la siguiente ecuación:

$$V_d = \frac{V_{eje} \cdot 1023}{V_{ref}} \quad (2)$$

V_{ref} es el voltaje de referencia de la conversión A/D, igual a 3,3V. Donde V_d es el voltaje que envía el acelerómetro, que debe traducirse a aceleración.

Estas fórmulas fueron calculadas mediante la toma de dos puntos colocando el acelerómetro en dos posiciones diferentes (dependiendo esto del eje cuya ecuación se quería calcular), sabiendo de antemano que, al apuntar cada eje hacia arriba, debía marcar la aceleración de la gravedad, es decir, 1g. De esta manera, se halló la posición de cada punto en una gráfica a sobre V_d y se calculó la ecuación de la recta que pasaba por ambos puntos. Esto daba como resultado el dato obtenido por el acelerómetro traducido a aceleración. Con este procedimiento se obtiene la fórmula para hallar las aceleraciones en los ejes X, Y, y Z. Se promedian valores de lectura de cada eje y se emplearon para hallar la ecuación de la línea recta. Con este valor, se obtiene la aceleración que mide cada eje:

$$A_{eje} = \frac{V_d + b}{c} \quad (3)$$

Donde b y c son parámetros de la ecuación lineal calculados como se describe arriba. Para cada eje se requiere una conversión diferente por lo que quedaría con valores aproximados de la siguiente forma:

$$X = \frac{vd - 551.54}{243.08}$$

$$Y = \frac{vd - 551.66}{251.78}$$

$$Z = \frac{vd - 400.18}{263.65}$$

Matlab desarrolla la gráfica donde muestra el movimiento detectado por el acelerómetro en cada eje [Ver figura 1,2 y 3].

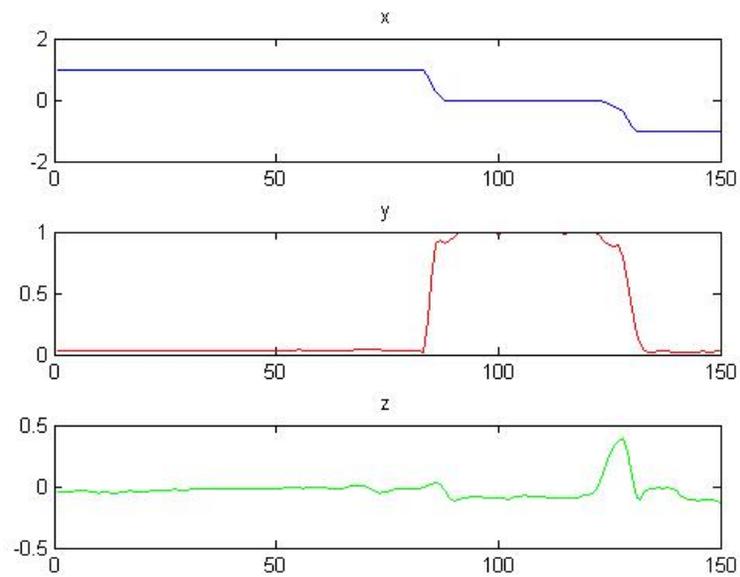


Figura 1. Movimiento calibrado en el eje X.

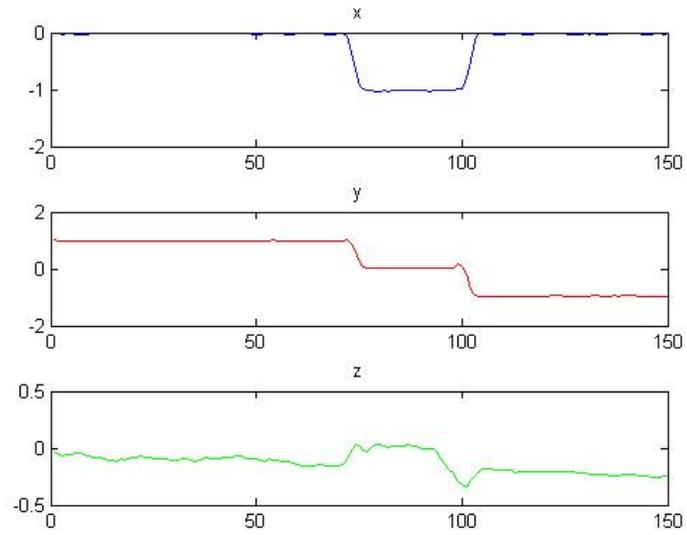


Figura 2. Movimiento calibrado en el eje Y.

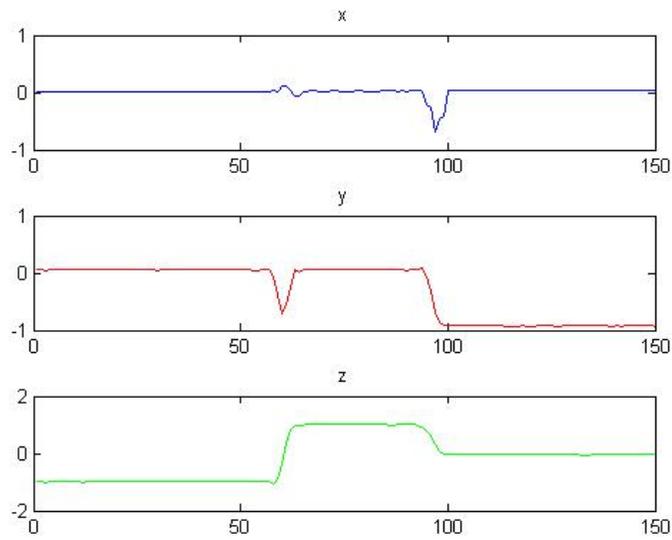


Figura 3. Movimiento calibrado en el eje Z.

B. Medición del ángulo

Se utilizó el método DCMR (*Distributed Common Mode Rejection*) para calcular el ángulo de la articulación. Éste método utiliza cuatro acelerómetros, dos en cada eje, que emulan dos acelerómetros virtuales en el vértice con los cuales se realiza el procedimiento antes descrito.

Para obtener los valores de los acelerómetros virtuales se parte de las lecturas de los cuatro acelerómetros y la distancia de cada uno de ellos al vértice. Si los valores de aceleración medidos por los acelerómetros en el primer segmento se denominan A_1 y A_2 , y las aceleraciones medidas en el segundo segmento se denominan A_3 y A_4 , los valores de aceleración en las coordenadas X y Y de los acelerómetros virtuales A'_{1x} y A'_{2x} , se estiman con las siguientes ecuaciones:

$$A'_{1x} = \frac{(r_2 \cdot A_{1x}) - (r_1 \cdot A_{2x})}{r_2 - r_1}$$

$$A'_{1y} = \frac{(r_2 \cdot A_{1y}) - (r_1 \cdot A_{2y})}{r_2 - r_1}$$

$$A'_{2x} = \frac{(r_4 \cdot A_{3x}) - (r_3 \cdot A_{4x})}{r_4 - r_3}$$

$$A'_{2y} = \frac{(r_4 \cdot A_{3y}) - (r_3 \cdot A_{4y})}{r_4 - r_3}$$

Donde A_1, A_2, A_3 y A_4 son las aceleraciones medidas por cada acelerómetro; r_1, r_2, r_3 y r_4 la distancia del centro de los acelerómetros al vértice de la articulación.

El ángulo φ de la articulación está dado por la diferencia entre los ángulos de los vectores de aceleración A'_1 y A'_2 [8].

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A'_{1y}}{A'_{1x}}\right) - \arctan\left(\frac{A'_{2y}}{A'_{2x}}\right)$$

Por cómo están dispuestos los acelerómetros, éste ángulo se obtiene como $180^\circ - \varphi$.

C. Adquisición de Datos

Los acelerómetros se aseguraron a dos barras de madera de balsa unidas por un extremo como se observa en la figura 4. Los valores de aceleración se adquirieron con la tarjeta Arduino y se enviaron al computador a través del puerto USB. El procesamiento de los datos para la medición de ángulos se realizó con MATLAB (MathWorks, Natick, MA). Para evaluar la exactitud del sistema se empleó un goniómetro digital (35-310-G, Igaging, San Clemente, CA).

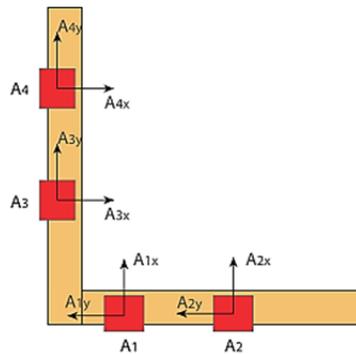


Figura 4. Esquema del electrogoniómetro implementado con cuatro acelerómetros. Prototipo inicial.

Capítulo 3.

Resultados y Discusión

Se ajustó el prototipo diseñado a un goniómetro digital comercial Igaging para tomar sus datos como valores de referencia y comprobar la exactitud del sistema. Se realizaron 50 lecturas posteriormente promediadas, y se compararon con el valor del ángulo mostrado por el goniómetro. Se observa que el sistema ofrece valores menores a 0,3% [Ver *tabla 1*]. Lo que indica que el diseño es bastante exacto ya que se acerca mucho al valor de referencia y preciso por el número de cifras significativas que arroja el sistema.

Referencia	Valor medido	% Error
0	0.1317	-
45	44.6538	0.2673
90	89.4525	0.0344
135	134.8704	0.1177
180	179.5670	0.2850
225	225.3112	0.1381
270	270.2237	0.0828
315	314.9101	0.0285
360	359.8720	0.0356

Tabla 1. Ángulos medidos, con el sistema inicialmente diseñado, comparados con los valores medidos por el goniómetro digital. Los valores se expresan en grados.

El sistema está configurado para obtener una resolución en la medición de la aceleración de 0,004g. Lo que equivale a una resolución del sistema. El electrogoniómetro permite realizar

mediciones en tiempo real con alta exactitud y precisión a un bajo costo. El valor de los elementos del sistema no supera los 100USD.

El electrogoniómetro diseñado se empleó para medir el ángulo de la articulación del codo. El sistema se aseguró al brazo y antebrazo de una estudiante voluntaria con bandas elásticas. Se le pidió a la estudiante que realizara ejercicios de flexión y extensión del brazo, y se realizó la adquisición y procesamiento de datos con MATLAB. Se adquirieron 200 muestras durante un intervalo de tiempo de 75 segundos. La grafica del ángulo obtenida en este experimento se muestra en la figura 5. Aunque el sistema ofrece mediciones exactas, su uso durante actividades físicas no es cómodo debido a los cables de conexión de los acelerómetros al microcontrolador, y del microcontrolador al computador. Es por ello que se trabajó en la parte de la conexión inalámbrica, del microcontrolador al computador con un módulo Xbee, para una apropiada adecuación al cuerpo y ejecución del movimiento.

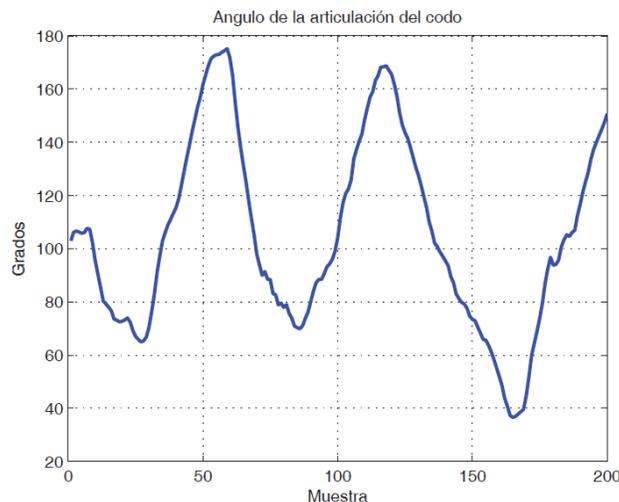


Figura 5. Angulo del codo durante ejercicios de flexión y extensión libres. Prueba con el prototipo inicial.

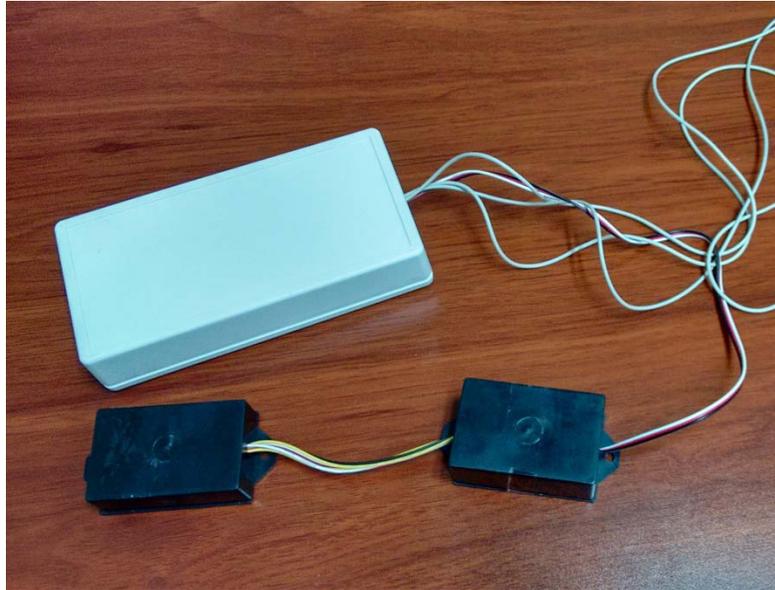


Figura 6. Prototipo final del electrogoniómetro.

Capítulo 4.

Conclusiones y Recomendaciones

La ubicación exacta de los acelerómetros es muy importante para obtener datos correctos, deben estar cuidadosamente alineados y la distancia al vértice debe medirse con precisión. Es importante verificar la calibración del instrumento para que al momento de ver los resultados, éstos sean confiables, la calibración es la base de la exactitud del electro goniómetro.

La comparación de los dos goniómetros da seguridad y confianza a nuestro modelo. No se necesitó un sofisticado, especializado y costoso equipo para llevar a cabo el diseño y construcción del goniómetro y no influyó en la precisión. Este instrumento tiene la capacidad de ser portable, de bajo costo y lo más importante altamente preciso.

El método usado en el algoritmo para calcular los ángulos da flexibilidad y soporte para usarlo. El sistema puede sin duda desempeñarse correctamente en el análisis del gesto deportivo en el levantamiento de pesas.

Bibliografía

- [1] L. Mertz, "Technology comes to the playing field: new world of sports promises fewer injuries, better performance." IEEE pulse, vol. 4, no. 5, pp. 12–17, 2013.
- [2] L. Mangiapelo, "Implementing an electrogoniometer using freescale's low g accelerometers," It's making the world a smarter place., p. 57.
- [3] P. Cheng and B. Oelmann, "Joint-angle measurement using accelerometers and gyroscopes. a survey," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 59, no. 2, pp. 404–414, 2010.
- [4] F. Ghassemi, S. Tafazoli, P. D. Lawrence, and K. Hashtrudi-Zaad, "An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators," in Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1771–1776.
- [5] S. Gwirc, D. Brengi, D. Lupi, C. Huy. "Dispositivo no invasivo para el monitoreo continuo y remoto de personas con movilidad disminuída". Iberdiscap 2011, VI Congreso Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad". Fecha y Lugar: 16-17 de junio de 2011, [online]. Available: http://www.lacie-unlam.org/publicaciones/2011/iberdiscap2011_Dispositivo_para_monitoreo.pdf.
- [6] A. T. M. Willemsen, C. Frigo, and H. B. Boom, "Lower extremity angle measurement with accelerometers-error and sensitivity analysis," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 12, pp. 1186–1193, 1991. 6D. T.-P. Fong and Y.-Y. Chan, "The use of wearable

- inertial motion sensors in human lower limb biomechanics studies: A systematic review,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11 556–11 565, 2010.
- [7] R. Williamson and B. Andrews, “Detecting absolute human knee angle and angular velocity using accelerometers and rate gyroscopes,” *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 39, no. 3, pp. 294–302, 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02345283>
- [8] F. Ghassemi, S. Tafazoli, P. D. Lawrence, and K. Hashtrudi-Zaad, “An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators,” in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA’02. IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1771–1776.
- [9] D. Cubillos, E. Arlex. “Electrogoniometro inalámbrico con interfaz a un PC”. *Electronic Engineering*. [Online]. Available: http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/jspui/bitstream/10819/2143/1/Electrogoniometro_Inalambrico_Pc_Cubillos_2013.pdf
- [10] S. Gwirc, D.Brengi, D. Lupi, C. Huy. "Dispositivo no invasivo para el monitoreo continuo y remoto de personas con movilidad disminuída". *Iberdiscap 2011, VI Congreso Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad*". Fecha y Lugar: 16-17 de junio de 2011, [online]. Available: http://www.lacie-unlam.org/publicaciones/2011/iberdiscap2011_Dispositivo_para_monitoreo.pdf
- [11] W. Dong, I. Chen, K. Lim, Y. Goh et al., “Measuring uniaxial joint angles with a minimal accelerometer configuration,” in *Proceedings of the 1st international convention on Rehabilitation engineering & assistive technology: in conjunction with 1st Tan Tock Seng Hospital Neurorehabilitation Meeting*. ACM, 2007, pp. 88–91.
- [12] S. Gwirc, D.Brengi, D. Lupi, C. Huy. "Dispositivo no invasivo para el monitoreo continuo y remoto de personas con movilidad disminuída". *Iberdiscap 2011, VI Congreso Tecnologías de*

Apoyo a la Discapacidad". Fecha y Lugar: 16-17 de junio de 2011, [online]. Available:
http://www.lacie-unlam.org/publicaciones/2011/iberdiscap2011_Dispositivo_para_monitoreo.pdf.

- [13] W. Dong, I. Chen, K. Lim, Y. Goh et al., "Measuring uniaxial joint angles with a minimal accelerometer configuration," in Proceedings of the 1st international convention on Rehabilitation engineering & assistive technology: in conjunction with 1st Tan Tock Seng Hospital Neurorehabilitation Meeting. ACM, 2007, pp. 88–91.

