

Reconocimiento de Patrones de Tensión-Deformación de los Ligamentos de una Articulación. Implementación en Virtex II

Raygoza J. J.¹., Ortega S.¹., Gómez E.²., Bonsfills N.²., Núñez A.²., González de Rivera Peces G.¹., López-Buedo S.¹., Garrido J.¹ y Boemo E.¹.

¹ Escuela Politécnica Superior UAM, Madrid, España

² Facultad de Medicina UAM, Madrid, España.

Email: juan_jose.raygoza_panduro@ii.uam.es

Resumen. En este trabajo se presenta la implementación de un sistema electrónico de clasificación de patrones de señales de deformación-tensión para el estudio de los ligamentos de la rodilla. En esta experimentación preliminar, se han utilizado gatos de laboratorio. El objetivo es obtener las señales necesarias para realizar el análisis del comportamiento dinámico de los ligamentos estabilizadores de la rodilla. El sistema fue descrito en VHDL e implementado en una FPGA Xilinx Virtex II.

1 Introducción

Las lesiones en el Ligamento Cruzado Anterior (LCA) son muy comunes en deportistas, que por su actividad, someten constantemente a esfuerzos físicos sus extremidades inferiores. Tal es caso de los jugadores de fútbol, esquiadores, patinadores, corredores de obstáculos, y otro tipo de atletas. Pero también este tipo de lesiones se presentan en personas de cualquier edad y con diferentes actividades físicas [4]. Esto a motivado a muchos investigadores a realizar estudios sobre este tipo de lesión y su reparación.

En la investigación en que se enmarca este artículo, el punto de partida es el estudio de los ligamentos estabilizadores de la rodilla de gatos. En ellos, se compara la actividad eléctrica, muscular, la deformación y la tensión superficial [1], [3],[13]. Se comparan los patrones obtenidos en rodillas de gatos domésticos que presentan un comportamiento normal y lesionado. Se tratan de definir los fenómenos fisiológicos que se presentan en la articulación con lesiones del ligamento cruzado anterior severas y no tan severas. Para ello, se ha implementado un circuito electrónico que capaz de clasificar los patrones característicos de comportamiento dinámico de los ligamentos de la rodilla.

Este trabajo se centra en el sistema electrónico que realiza una clasificación de patrones para movimientos básicos, de tensión-deformación de ligamentos de rodillas estables e inestables. El circuito recibe los patrones de entrada y los compara con una referencia, para determinar si la rodilla presenta movimientos con comportamiento estable, o por el contrario presenta alguna inestabilidad.

2 Deformación de ligamentos

Las propiedades mecánicas del sistema esquelético y muscular del ser humano han sido objeto de muchos estudios e investigaciones que tratan de comprender la naturaleza de su comportamiento [2]. Los ligamentos y tendones son estructuras de muchas fibras dobladas y torcidas que están agrupadas y se encuentran unidas a los huesos. Los tejidos suaves insertados en el hueso proveen una adherencia y fijación flexible pero fuerte. El ligamento LCA detecta las diferentes posturas de la articulación cuando es sometido a diferentes niveles de tensión-deformación. Esta información es interpretada de forma natural por el cuerpo humano que provee un gradual incremento de rigidez a través de la tonalidad muscular, regulando los niveles de desplazamientos de la articulación durante los movimientos [4], [2].

En primer lugar se midió la tensión-deformación de los ligamentos Rotuliano LR y ligamento lateral Intermedio LLI. Estos patrones (figura 1) aportaron los primeros patrones de comportamiento de ligamentos estabilizadores en función de la tensión-deformación y movimientos de la articulación. Los detalles del sistema electrónico de medición de tensión-deformación de los ligamentos de la rodilla se pueden consultar en [4].

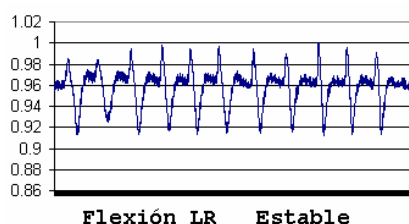


Fig. 1. Patrones de tensión deformación de los ligamentos Rotuliano LR en rodilla estable.

Los patrones de tensión-deformación de una rodilla de gato (figura 1) se obtienen de una serie repetitiva de movimiento de flexión. En particular, las señales muestran el comportamiento del ligamento rotuliano. Con el objeto de identificar el tipo de movimiento del ligamento durante las pruebas de flexión y extensión de la rodilla se desarrolló, mediante una FPGA, un circuito para realizar la clasificación de los distintos patrones. Este bloque formará parte de un sistema más complejo que proporcione un amplio reconocimiento de las señales de entrada en tiempo real. Su salida se utilizará para controlar mediante un lazo de control realimentado un estimulador muscular que permita corregir los movimientos de la rodilla lesionada.

3 Deformación de ligamentos..

La primera etapa del sistema consta de un circuito de tratamiento digital de señal, constituido por tres bloques principales: filtrado de señal, ajuste de nivel entrada y comparación de señal. En la primera etapa se elimina el ruido suavizando de la señal, eliminando pendientes

abruptas. El filtro se basa en la técnica de desplazamiento de promedios SMA (*simple moving average*) [4]:

$$SMA = (\hat{a} dn-m \dots dn+m)/2m+1$$

Donde n es el valor del punto de la serie.
 m es el valor medio del desplazamiento de promedios

En la figura 2 se muestra un patrón de la serie de movimientos de flexión al que se aplicó el filtro SMA con rangos en $m=3, 7$ y 10 . Los mejores resultados se obtienen con $m=10$, que proporciona una señal más nítida, sin perder sus rasgos característicos. Proceso de los datos obtenidos de los experimentos de LR en rodilla inestable se tiene las series temporales de datos que se muestran en la figura 3.

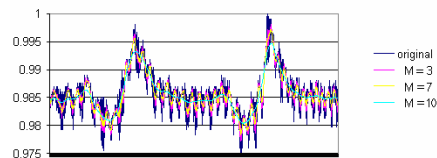


Fig. 2. Filtros de desplazamientos de promedios SMA aplicado un patrón de la serie de movimientos de flexión de LR.

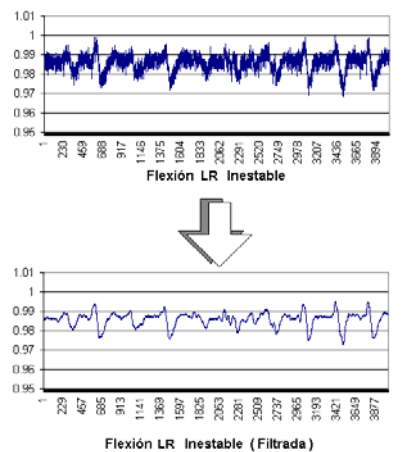


Fig. 3. Señal de salida suavizada por el filtro de una serie de movimientos de LR de una rodilla inestable.

4 Descripción del Circuito.

El circuito tiene tres entradas principales, dos *buses* de datos de 8 bits para las señales de entrada (Pin) y patrón objetivo (Pt) y una línea de sincronía (sync). La salida consta de dos buses de 10 bits para mostrar el conteo de la clasificación y dos líneas de control. En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques.

El circuito funciona de la siguiente manera: compara un dato del patrón de entrada con un dato del *target*; si estos son iguales se considera que es estable, y se incrementa un contador en uno. Si los datos son diferentes, se establece cual de ellos es mayor o menor, y se decide si éstos se suman o se restan, realizándose nuevamente la comparación. Este proceso se realiza dato a dato de la señal de entrada y se va contabilizando la diferencia de aciertos y errores a lo largo de todo el patrón.

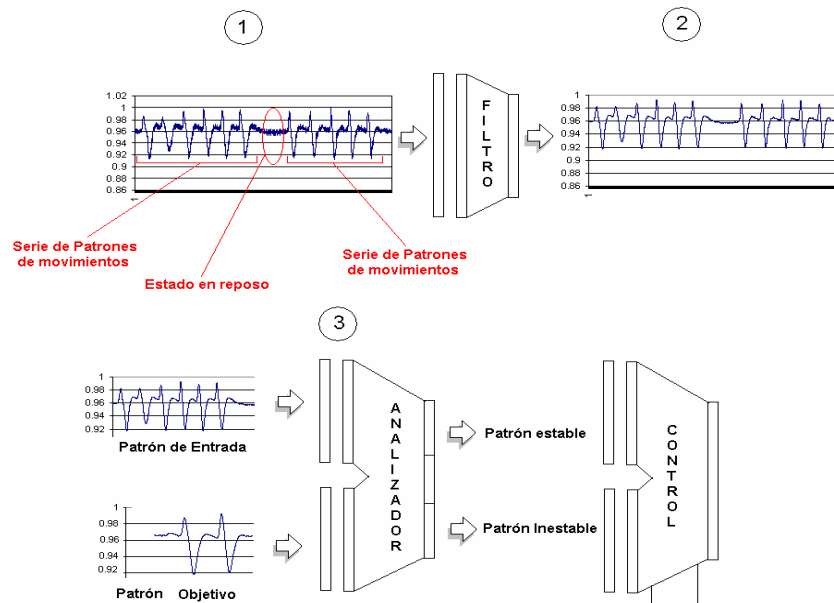


Fig.4. Bloque de tratamiento de señal.

Las señales de entrada pueden tener pequeños cambios en los niveles de inicio, causados por el ajuste del circuito que captura las señales procedentes de los sensores implantados en la rodilla. Para corregir este problema, el circuito incluye una etapa de verificación del nivel de entrada de la señal respecto al valor del patrón objetivo. Esta detección de niveles se realiza durante el tiempo de un pulso de sincronía que indica el inicio de un patrón de entrada.

5 Procesamiento de las señales.

El algoritmo está dividido en tres módulos básicos: filtro, ajuste de nivel, y comparación de patrones. El proceso de clasificación de las señales de entrada en patrones de movimiento se ejecuta mediante los siguientes pasos:

1. Se introduce el rango de precisión en el registro de tolerancia N1.
2. Se recibe la señal de entrada y se aplica a un filtro SMA.
3. Se verifica el nivel de la señal en estado en reposo y se compara contra el nivel del patrón objetivo (*target*). Si es de mayor o menor magnitud se corrige la diferencia.
4. Se actualiza el nivel de referencia del patrón de objetivo al mismo nivel de la señal de entrada.
5. Se aplica la señal de entrada al módulo de comparación.
6. Se verifica el porcentaje de semejanza del patrón de entrada contra el objetivo y se determina si es un movimiento Estable o Inestable.
7. Se repite el ciclo.

El diagrama de flujo de la figura 5 corresponde al ajuste de nivel de entrada y la figura 6 al módulo de comparación.

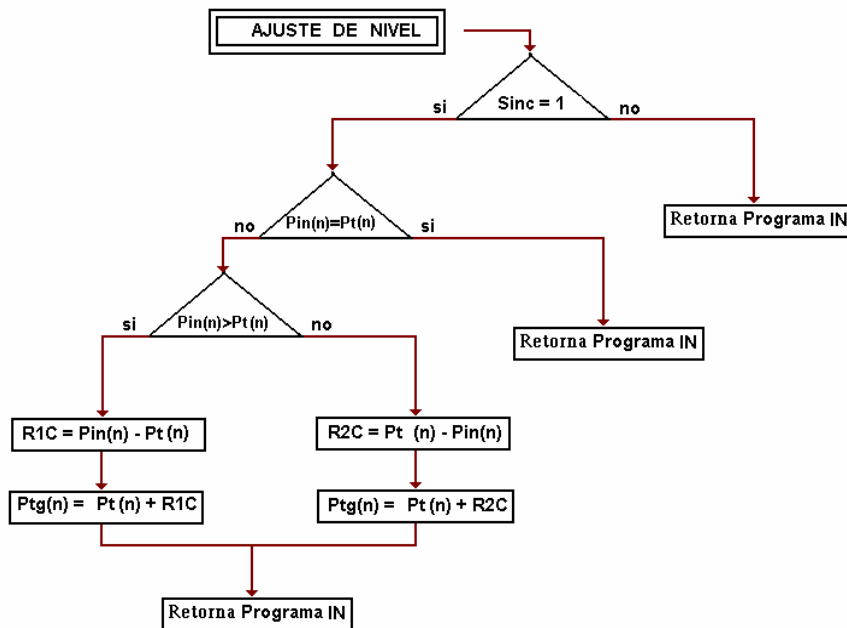


Fig. 5. Algoritmo de ajuste de nivel de entrada en estado inicial.

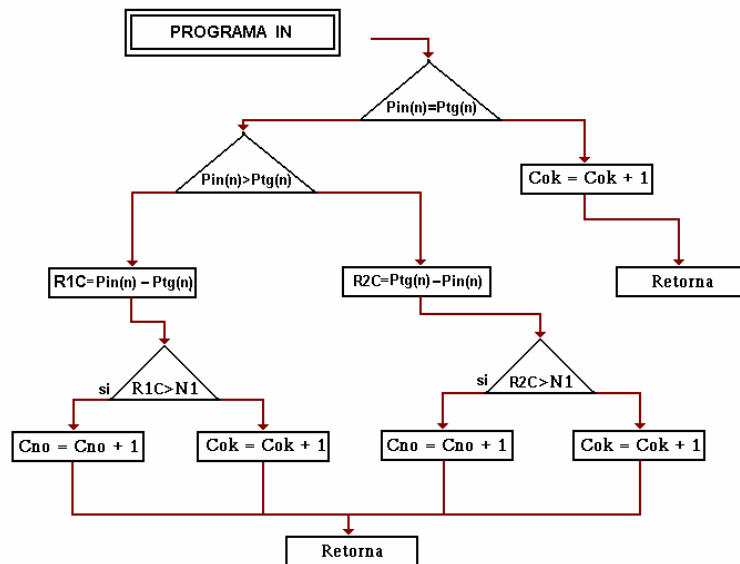


Fig. 6. Algoritmo del módulo de comparación de patrones de entrada con el patrón objetivo.

4 Implementación Física.

Los circuitos se implementaron en una FPGA Virtex XC2V1000. La arquitectura de la tarjeta de evaluación [12] se muestra en la figura 7. Dispone de 2 conectores de entrada salida de 50 pines, un *display* dual de 7 segmentos, una barra de *leds* conectados a patas de la FPGA, una interfase RS232 y un conector JTAG. Incluye además una memoria EEPROM de configuración y dos *buses* para conectar un analizador lógico.

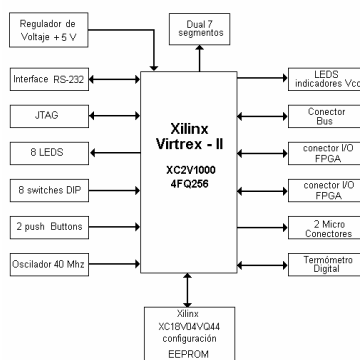


Fig. 7. Diagrama a bloques de la tarjeta de aplicación evaluación Virtex II [12].

La implementación del módulo de comparación de patrones se muestra en la figura 10. El *layout* final se puede observar en la figura 11.

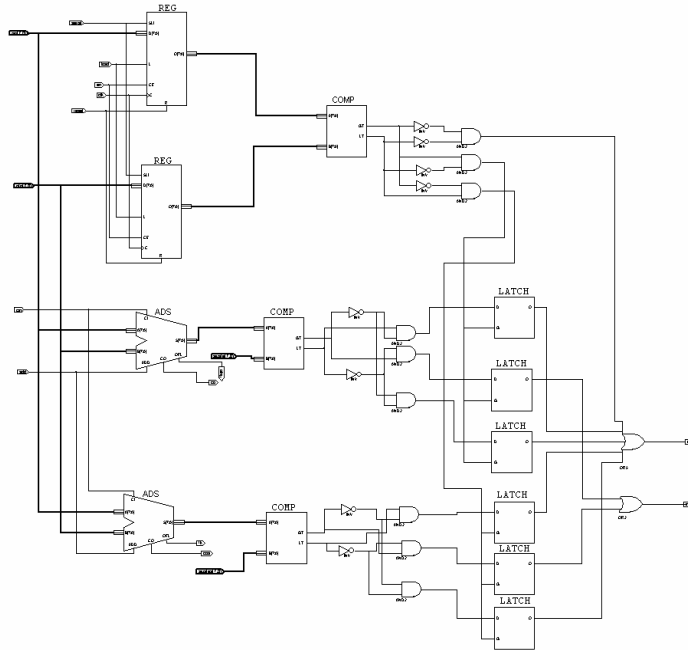


Fig. 8. Un módulo del circuito de comparación de datos de entrada con el vector de bits del patrón de referencia base.

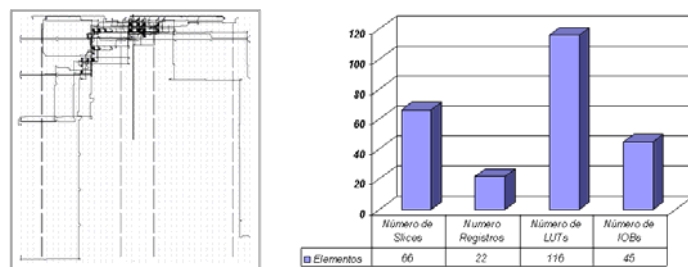


Fig. 9. Módulo de comparación de patrones de entrada: *Layout* (izquierda) y Ocupación de *Slices* y *IOBs* (derecha).

8 Conclusiones.

En este trabajo se han presentado los primeros resultados de un sistema para la caracterización de la tensión-deformación de los ligamentos de rodilla. Los datos obtenidos muestran que el circuito es capaz de realizar una clasificación de patrones de movimientos de flexión en el ligamento rotuliano con una buena certidumbre. Los trabajos futuros se extenderán al diseño de un sistema que sea capaces de realizar estas funciones en tiempo real, y determinar el grado de inestabilidad de éstos. El objetivo es construir un control de lazo cerrado que sea capaz de manejar un sistema de estimulación autónomo.

9 Agradecimientos

Este trabajo se financia con el proyecto de investigación de referencia 01/0371 del Fondo de Investigaciones Sociosanitarias. El diseño y construcción de los sistemas basados en FPGAs y microcontroladores ha sido parcialmente financiado por el proyecto TIC 001-2688-C03-03 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Bibliografía

1. Gomez Barrena, Nuñez Angel: *Anterior cruciate reconstruction affects proprioception in the cat's Knee.*, Acta Orthop Scand (1999); 70 (2); 185-193.
2. Yangming Xu, Hollerbach John M.: *A robust ensemble data method for identification of human joint mechanical properties during movement.*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, april, (1999). Vol. 46, N° 4, pp 409-419.
3. Gomez Barrena, Nuñez angel: *Neural and muscular electric activity in the cat's knee.*, Orthop Scand (1997); 68 (2); 149-155.
4. Raygoza Panduro: *Diseño Electrónico del Sistema de Rehabilitación de Rodillas Lesionadas del Ligamento Cruzado Anterior.*, Memoria de Investigación, para Grado de Suficiencia Investigadora, Junio (2002). EPS UAM.
5. Sidles Jhon A., Clark John M. and. Garbini Joseph L: *A geometric theory of the equilibrium mechanics of fibers in ligament and tendons.*, Biomechanics, (1991) .Vol. 24, N°10, pp 943, 949.
6. Johansson Hankan, Sjolander Per, Sojka Peter : *A sensory role for the cruciate ligaments.*, Clinical Orthopaedics and Related Research, july, (1991), number 268, pp 161-178,
7. Stranger K.D., Hoffer J.A.: *Gait phase information provided by sensory nerve activity during walking applicability as state controller feedback for FES.*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, july (1999), vol. 46. N° 7,
8. Willis J. Tompkins. John G.: *Interfacing sensors to the IBM PC.*, Webster editors.
9. Amis A. A., Dawkins G.P.C. : *Functional anatomy of the anterior cruciate ligament.*, The journal of bone and joint surgery, march (1991), vol. 73-B N° 2 pp 260-267.
10. Manual de FPGA Virtex II Xilinx, www.xilinx.com
11. Guía del usuario de Xilinx síntesis and simulation design guide., www.xilinx.com
12. Manual del Usuario Tarjeta de evaluación Virtex XC2V1000.
13. Gomez Barrena, Nuñez A., Bonsfills N., Raygoza Panduro J J.: *Limited muscular adaptation after experimental ACL section and reconstruction.*, European Orthopaedic Research Society (EORS), June, (2003), 49th Annual Meeting, Poster 1223.