

Desarrollo de un Marcapasos Ocular con Fines Ortoptísticos Basado en Electro-Estimulación Biorretroalimentada

Development of an Ocular Pacemaker with Orthoptics Purpose Based on Biofeedback Electro-Stimulation

Ernesto Suaste Gómez y Jaime Leybón Ibarra

Sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN

Av. IPN No. 2508, Col. Zacatenco CP. 07000, México, D.F.

E-mails: {esuaste, jleybon}@mail.cinvestav.mx

Artículo recibido en Octubre 01, 2001; aceptado en Febrero 19, 2002

Resumen

Se presenta un nuevo método ortoptístico con propósitos de rehabilitación para corregir el nistagmo congénito (NC) en la alteración de los movimientos horizontales; su intención es aplicar las ventajas de los métodos existentes (prismas, fármacos, retroalimentación auditiva, cirugía correctiva) reduciendo las desventajas y riesgos para el paciente. Se basa en la utilización de microelectrodos implantados en los músculos rectos interno y externo de ambos ojos para detectar la actividad ocular motriz y corregir los movimientos involuntarios provocados por el NC mediante electro-estimulación, todo esto en tiempo real para conformar un dispositivo portátil que pueda utilizarse en niños y adultos en forma ambulatoria.

Palabras clave: Ortoptístico, electroestimulación, rehabilitación, nistagmo congénito.

Abstract

A new orthoptistic method is being developed with the purpose of correcting congenital nystagmus involuntary horizontal eye movements. The main idea is to take advantages from the methods applied in clinic environment now a day (prisms, drugs, auditive feedback, corrective surgery) reducing risks for patients.

The way it works is by means of micro electrodes implanted directly in the medial and lateral rectus muscles. Such electrodes include two tasks, firstable to detect the electromiograph signals, and by the other hand to stimulate electrically according to an artificial intelligence controlled protocol in real-time, hoping the survey of an ambulatory instrument for children and adults.

Keywords: Orthoptistic Method, Electro Stimulation, Rehabilitation, Congenital Nystagmus.

1 Introducción

La importancia del sistema oculomotor, como lo marca la literatura (Patton et al., 1989) reside en que permite la fijación de imágenes en la retina mediante el uso de sus posibles movimientos en condiciones normales de salud (sacádicos, vestibulares, de convergencia y de persecución), bajo la acción de los músculos extrínsecos de cada ojo (recto superior, recto inferior, recto externo, recto interno, oblicuo mayor y oblicuo inferior); estos a su vez, son controlados por el sistema neural mediante los pares craneales III, IV y VI (figura 1 y 2).

Los movimientos de fijación están controlados por dos mecanismos neuronales diferentes. El primero permite buscar el objeto sobre el cual se desea fijar la visión (fijación voluntaria). El segundo mantiene firmemente los ojos sobre el objeto (fijación involuntaria).

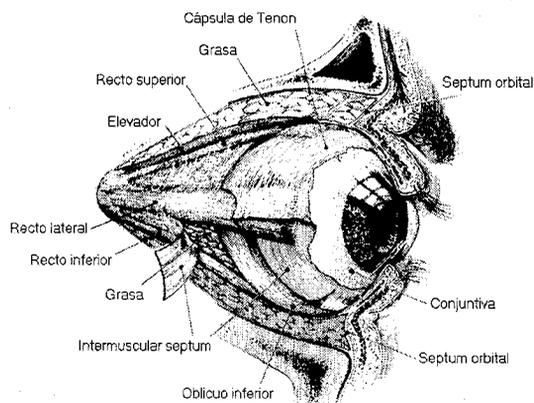


Figura 1. Músculos extrínsecos del ojo humano

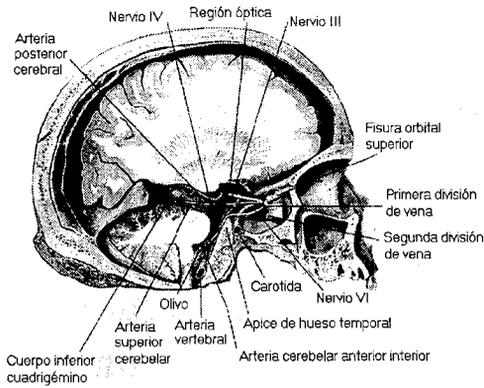


Figura 2. .Inervación de los músculos extraoculares

Los movimientos de fijación voluntarios están controlados por un pequeño campo cortical localizado en ambos lados en las regiones corticales premotoras de los lóbulos frontales (figura 3). Por otra parte, el mecanismo de fijación, que hace que los ojos “se fijen” sobre un objeto, está controlado por los campos visuales de la Corteza occipital, en particular el área 19 que también se indica en la figura 3. Cuando estas áreas están destruidas en ambos lados, la persona se halla completamente incapacitada para dirigir sus ojos en un sentido determinado.

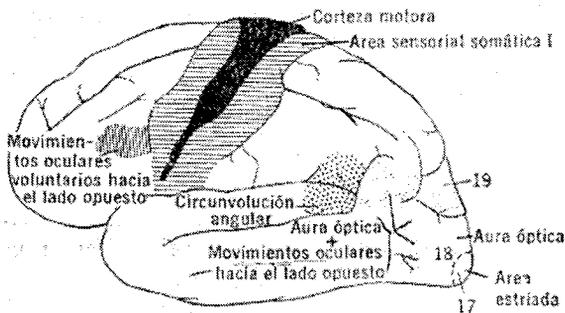


Figura 3. Campos de asociación visual y zonas corticales para control de los movimientos oculares

En la exploración funcional del ojo, la **neurología** divide en tres grandes grupos a los movimientos oculares:

- Ducciones.
- Versiones.
- Vergencias.

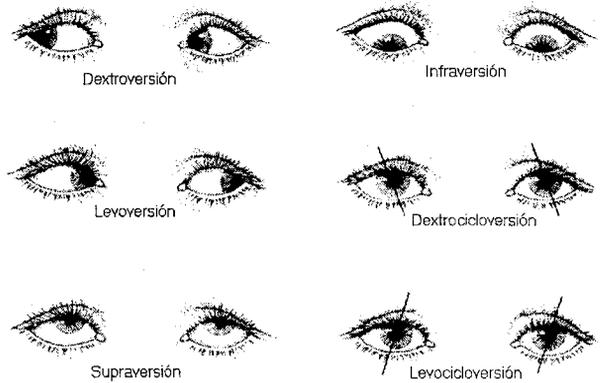


Figura 4. Movimientos oculares normales

Dentro de la **neurología** se incluyen los siguientes tipos de alteraciones oculo-motoras (figura 5):

- Alteraciones en las versiones y vergencias (estravismo).
- Alteraciones en la neurona motora inferior, pueden ser la primera manifestación de diabetes o hipertensión arterial.
- Alteraciones supranucleares. La más frecuente es la miastenia que se manifiesta por alteraciones en los movimientos conjugados como el nistagmo congénito.

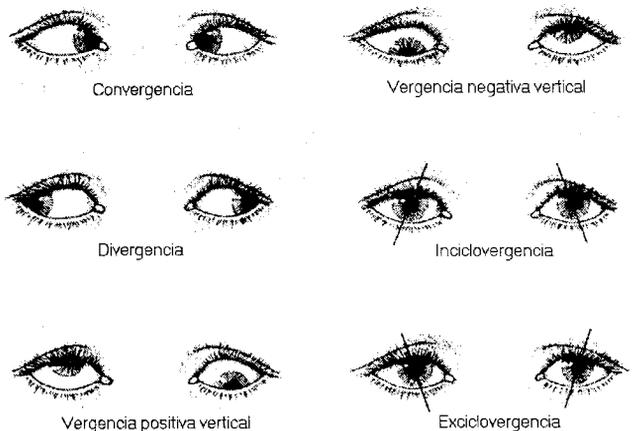


Figura 5. Patologías oculares

No es novedoso el hecho de detectar actividad oculomotora mediante electromiografía, ya que ésta técnica aplicada en los músculos extraoculares fue introducida por Björk en 1952; consecutivamente fue desarrollada y extendida por numerosos investigadores involucrados con aspectos clínicos y de investigación de movilidad ocular. Puede decirse en general, que su utilidad es comparable con la técnica de electromiografía del músculo esquelético periférico. El músculo extraocular, sin embargo, exhibe características anatómicas, farmacológicas y fisiológicas



peculiares que hacen la interpretación de sus electromiogramas más arriesgado que aquéllos de músculos esquelético periférico como lo describe Breinin (1962).

Siendo la parte de interés de este trabajo, y recordando la definición de nistagmo como una oscilación ocular bifásica, rítmica e involuntaria con por lo menos una fase lenta la cual es patológica y es responsable para la iniciación y la generación del nistagmo (la fase rápida conocida como sacádico es meramente correctiva, figura 6); clínicamente, el nistagmo puede ser dividido ampliamente en pendular y en forma de tirón, y los problemas principales que se le pueden asociar es la pérdida de agudeza visual de hasta 20/400 con la degradación permanente de la retina, posición compensatoria de la cabeza, estrabismo, vértigo.

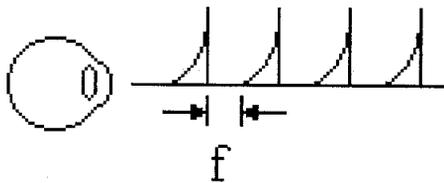


Figura 6. Señal característica de nistagmo

Entendiéndose como método ortoptístico (del Griego *orthos*, "correcto" y *ops*, "ojo") a la facultad para corregir la acción atípica tanto de la posición del globo ocular, como de la movilidad ocular; es decir, siendo la ciencia que investiga las adaptaciones motoras y sensoriales de los ojos corrigiéndolas mediante entrenamiento en visión monocular y/o binocular, se pretende generar un método ortoptístico que mediante electroestimulación biorretroalimentada entrene los músculos encargados del movimiento horizontal buscando la corrección del nistagmo, de la posición compensadora de la cabeza y del estrabismo aprovechando las ventajas de los métodos existentes mencionado sen la literatura (Frederick, 1985): el que utiliza prismas ópticos, el de procedimientos quirúrgicos, el de retroalimentación sonora, el de agentes farmacológicos y el de radioterapia.

2 Metodología

Para comprender las características funcionales de los músculos extraoculares, se compara su rapidez de contracción con diferentes tipos de músculos, para lo cual suelen emplearse registros isométricos (figura 4), porque la duración de un registro isotónico depende de la inercia del sistema de registro, casi tanto como de la contracción misma, y ello hace difícil comparar las relaciones cronológicas de contracciones entre un músculo y otros.

La figura 7 ilustra la contracción isométrica de tres diferentes tipos de músculo esquelético: el ocular con duración de contracción de 1/100 seg; el gastrocnemio con duración de contracción de 1/30 seg, y el sóleo que tiene una duración de contracción de 1/10 seg.

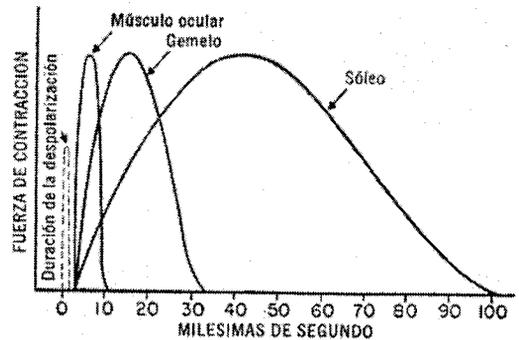


Figura 7. Comparación de duración de contracciones isométricas

Esta gráfica resume lo marcado en la literatura acerca de la especialización de los músculos extraoculares para realizar movimientos cortos pero rápidos y precisos (Graham, 1930; Fuchs et al., 1983). Basados en esto, se analiza su resistencia a la fatiga recordando que éste término se define como la reducción de la capacidad de un músculo para ejercer su máxima fuerza, inducida por el ejercicio en forma dependiente del tiempo. Su manifestación se refleja en factores periféricos que incluyen la reducción de la fuerza máxima, potencia y lentitud para la relajación. Sin embargo, el sistema nervioso central no solo controla la motoneuronas, también el temblor creciente de las extremidades en ejercitación, el reclutamiento de músculos inicialmente no ocupados en una actividad y en el incremento subjetivo de un esfuerzo (Gandevia, 1998).

Con referencia a los músculos extraoculares, varios autores han intentado provocar fatiga como parte del estudio de la respuesta motriz. En sus resultados, concluyen que no logran considerar una fatiga real cuando a una persona se le somete a una serie de movimientos oculares no comunes debido a que los músculos extraoculares siempre trabajan con una carga ligera y están adaptados a ello; por otro lado, en resultados de oculografía, Frueh et al. (1994) encontró que el parpadeo podría estar compensando de alguna manera la posición incorrecta del globo ocular debido a la fatiga de los músculos extraoculares; esto sería como una especie de "reset" de un temblor ocular, permitiendo un periodo de descanso para mejorar la transmisión en la unión neuromuscular, o en el comienzo de un sacádico correctivo. Por otro lado, utilizando la electroestimulación, Westerblad et al., (1998) y Björk (1952) marcan que el músculo esquelético se puede forzar a que trabaje nuevamente a su 100% aún cuando se encuentre fatigado; o en caso contrario, provocar una fatiga rápida con una declinación de fuerza de hasta un 40%.

Como parte de la experiencia en clínica colaborando para efectuar estudios de detección de movimientos oculares y analizando las señales nistágmicas en base a sus variables de amplitud, frecuencia, velocidad y tipo, se cuenta tanto con información almacenada en PC de pacientes tratados desde hace ocho años en pruebas pre y post operatorias, como con el aparato diseñado para capturar los movimientos oculares de pacientes con nistagmo (opto-

oculógrafo) mostrado en la figura 8, y con un aparato que detecta las 24 posibles posiciones compensatorias de la cabeza (figura 9) tal como se marca en la literatura generada (Suaste et al., 1995; Suaste et al., 1997; Suaste et al., 1998; Cruz et al., 1997).

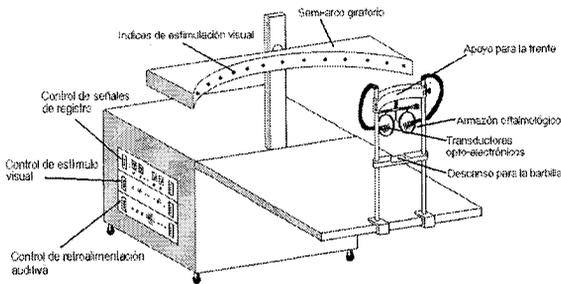


Figura 8. Opto-oculógrafo

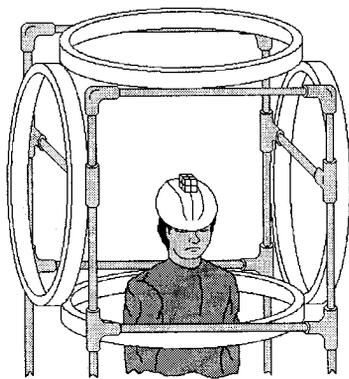


Figura 9. Instrumento detector de la posición de la cabeza

En la parte experimental que contempla la adquisición de señales oculares y la electroestimulación para el control de la actividad atípica de los movimientos horizontales, se está trabajando con conejos de laboratorio adultos jóvenes en varias etapas de acuerdo al diagrama de bloques general de la figura 10; de estas etapas, se tiene en proceso actual la experimentación de los siguientes incisos:

- Prueba de investigación para encontrar la zona donde se puedan colocar cables y un microcircuito.
- Prueba de biocompatibilidad de materiales con monitoreo en el lapso de un año para su aplicación en microelectrodos colocados en los músculos extraoculares y para el encapsulado de un microcircuito electrónico.
- Prueba de control de posición del globo ocular mediante electroestimulación "in vitro" e "in vivo" en animales sanos y con patología provocada.

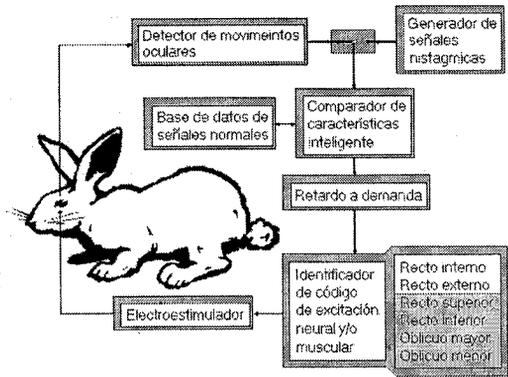


Figura 10. Diagrama general del sistema ortopéutico propuesto

3 Resultados

Como respaldo para el proyecto, en el campo clínico se tiene establecido el proceso de detectar movimientos oculares en pacientes con nistagmo congénito empleando la técnica de reflexión de un haz de luz infrarrojo sobre la frontera esclerocorneal mediante el opto-oculógrafo, del cual se obtienen registros como el de la figura 11.

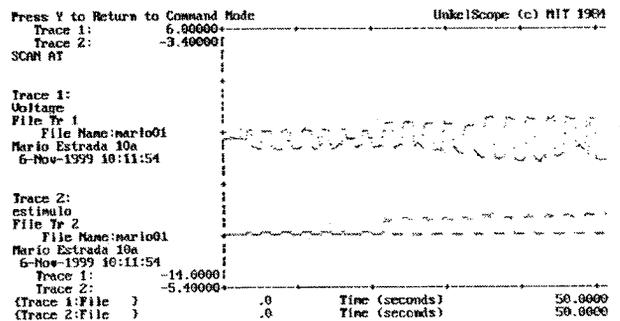


Figura 11. Señal característica de nistagmo congénito

Actualmente, al médico cirujano se le presentan las gráficas de los opto-oculogramas y el resultado estadístico de su análisis en el formato representado en la figura 12. En estas figuras se incluyen las características de velocidad de respuesta, frecuencia del nistagmo, y tiempo de latencia en forma separada para cada ojo. Si es necesario de acuerdo a su criterio, el paciente es sometido a la prueba de detección de la posición compensadora de la cabeza con el propósito de tener toda la información en señales digitalizadas y almacenadas.

Se cuenta con el sistema de electroestimulación que provee una amplitud máxima de espiga de hasta 50V; se cuenta con el sistema de adquisición de señales mioeléctricas y con un programa de computo para el análisis de las señales capturadas.

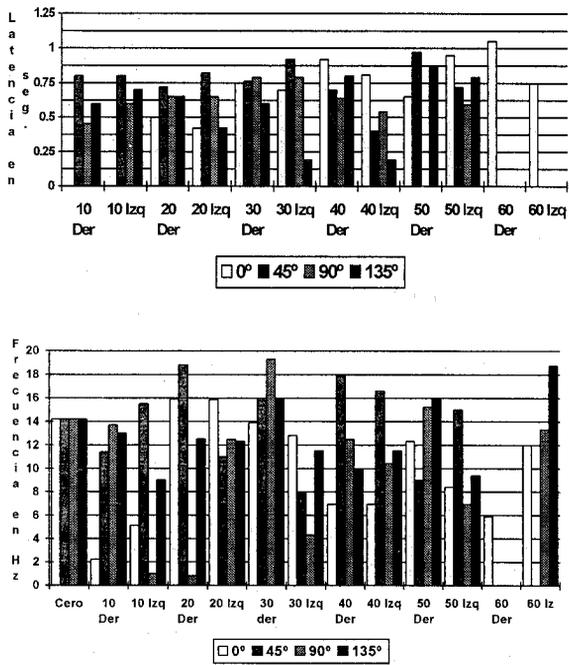


Figura 12. Análisis estadístico en frecuencia y latencia de las señales nistágmicas

Dentro del análisis de las señales que se plantean de acuerdo a la figura 10, se anexa un método capaz de analizar en forma rápida y gráfica las señales nistágmicas tomando como base una clasificación planteada de acuerdo al tipo del nistagmo (Dell'Osso, 1995):

- Pendular puro **P**.
- Pendular asimétrico **AP**.
- Pendular con fijaciones sacádicas **PFS**.
- Tirón unidireccional puro con fijaciones sacádicas **JR** derecha, **JL** izquierda.
- Tirón unidireccional puro con fijaciones extendidas **JREF** derecha, **JLEF** izquierda.
- Tirón con movimientos lentos del ojo pseudo-cicloides **RPC** derecha, **LPC** izquierda.
- Tirón con movimientos lentos del ojo pseudo-tirón **PJR** derecha, **PJL** izquierda.
- Tirón unidireccional puro **PP**.
- Tirón unidireccional puro con tirones sacádicos **PPFS**.
- Triangular **T**.
- Tirón bidireccional **BDJR** derecha, **BDJL** izquierda.
- Doble tirón **DJR** derecha, **DJL** izquierda.

El método se basa en agrupar valores comunes de un mismo atributo o variable, además de considerar la semejanza entre los elementos que pertenecen a un mismo conjunto o clase; tales variables o atributos son:
 Amplitud de ascenso y descenso (0-11.79 grados).
 Tiempo de ascenso y descenso (0-0.6 segundos).
 Frecuencia (0-20 Hz).
 De acuerdo a las zonas donde se enfatiza su presencia, se incluyen los planos anatómicos de referencia (zona

superior, inferior, nasal, temporal, nasal-superior, nasal-inferior, temporal-superior, temporal-inferior), por lo que habrá 12 posibles alternativas representadas con solo un símbolo (figura 13).

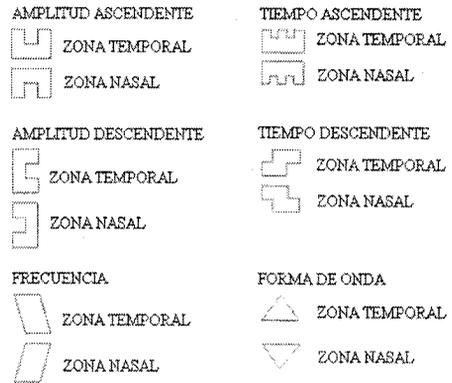


Figura 13. Asignación de símbolos a las variables

Para determinar la semejanza, se particionan en 16 rangos de valores cada atributo, formando así un patrón de referencia denotado como MAPA, representado por una cuadrícula cuyas casillas corresponden a 15 clases de semejanza, y una última reservada para los valores que no tengan semejanza con ninguna clase o que estén fuera de rango. Con respecto a la forma de onda, existen 18 patrones diferentes, por lo que se ha establecido un mapa con 20 casillas (tabla 1).

Mapa de amplitudes	Mapa de tiempos	Mapa de frecuencias	Mapa de tipo de ondas
1: 0 - 0.778	1: 0 - 0.040	1: 0 - 1.33	1: P
2: 0.790 - 1.557	2: 0.041 - 0.080	2: 1.34 - 2.66	2: AP
3: 1.569 - 2.336	3: 0.081 - 0.120	3: 2.67 - 3.99	3: PFS
4: 2.348 - 3.115	4: 0.121 - 0.160	4: 4.00 - 5.32	4: JR
5: 3.126 - 3.893	5: 0.161 - 0.200	5: 5.33 - 6.65	5: JL
6: 3.905 - 4.672	6: 0.201 - 0.240	6: 6.66 - 7.98	6: JREF
7: 4.684 - 5.451	7: 0.241 - 0.280	7: 7.99 - 9.31	7: JLEF
8: 5.463 - 6.230	8: 0.281 - 0.320	8: 9.32 - 10.64	8: RPC
9: 6.241 - 7.008	9: 0.321 - 0.360	9: 10.65 - 11.97	9: LPC
10: 7.202 - 7.787	10: 0.361 - 0.400	10: 11.98 - 13.30	10: PJL
11: 7.799 - 8.566	11: 0.401 - 0.440	11: 13.31 - 14.63	11: PJR
12: 8.578 - 9.345	12: 0.441 - 0.480	12: 14.64 - 15.96	12: PP
13: 9.356 - 10.12	13: 0.481 - 0.520	13: 15.97 - 17.29	13: PPFS
14: 10.13 - 10.90	14: 0.521 - 0.560	14: 17.30 - 18.62	14: T
15: 10.91 - 11.79	15: 0.561 - 0.600	15: 18.62 - 20.00	15: BDJR
16: Out of rank	16: Out of rank	16: Out of rank	16: BDJL
			17: DJR
			18: DJL
			19: Fuera de rango

Tabla 1. Mapas de valores asignados por casilla

La representación gráfica de los rangos de valores de la tabla 1 se muestra en la figura 14:

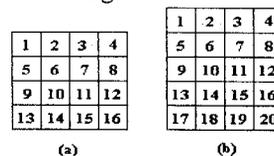


Figura 14. Mapas de referencia para los parámetros característicos del nistagmo. a) mapa representativo de los rangos de valores de amplitud, duración y frecuencia, b) mapa de formas de onda

Una vez representados los rangos de valores de los atributos sobre los mapas de referencia, se colocan los símbolos en las casillas de acuerdo a su valor, generando así un patrón imagen que despliega la información más relevante del caso, indicando las características que predominan. Finalmente se presenta en la siguiente figura un mapa con la distribución respectiva de sus datos:

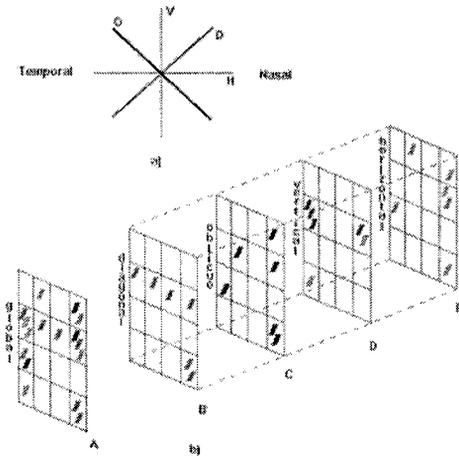


Figura 15. Presentación del análisis gráfico de nistagmo

La figura 15 es el resultado de un análisis real de un paciente; aquí se muestra como hay variaciones en cuanto a la repetitividad del valor de frecuencia para los diferentes grados de estimulación, lo que indica que no es un movimiento periódico.

Considerando el tipo de representación simbólica, también se desarrolla un análisis basado en lógica difusa, el cual permite hacer combinaciones de estudios previos en cuanto a la semejanza de respuesta de un mismo paciente con nistagmo congénito.

El concepto clave para trabajar con lógica difusa es la asignación de valores de pertenencia de la función característica en el rango [0,1]; con lo anterior se plantea otra forma de interpretar los resultados obtenidos de los mapas por medio de una representación tipo matricial difusa, la cual considera valores ponderados o grado de pertenencia en el rango [0,1]; por lo que al máximo número de símbolos permitidos en una casilla (24) le corresponderá el 1, mientras que con la ausencia de símbolo se asignará un 0, los valores intermedios corresponden al grado de frecuencia de símbolos en una misma casilla. Los valores de la función de relación se calcularon de la siguiente manera:

- 24 símbolos en una misma casilla equivalen a $24/24=1$.
- 20 símbolos en una misma casilla equivalen a $20/24=0.833$
- 10 símbolos en una misma casilla equivalen a $10/24=0.416$

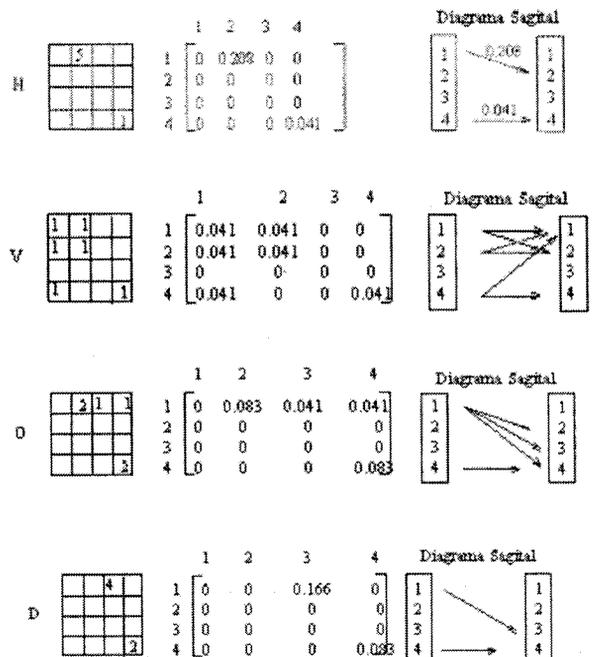
Los cuales representan el grado de pertenencia a una misma casilla; es decir, según el número de atributos que tengan un valor muy semejante, pertenecerán o no a una misma casilla. Los valores de relación para los símbolos pertenecientes a una misma casilla se muestran en la tabla II.

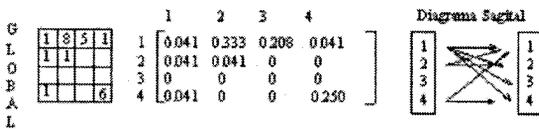
Número de símbolos en una misma casilla	Valor de relación	Número de símbolos en una misma casilla	Valor de relación
0	0	13	0.541
1	0.041	14	0.583
2	0.083	15	0.625
3	0.125	16	0.666
4	0.166	17	0.708
5	0.208	18	0.750
6	0.250	19	0.791
7	0.291	20	0.833
8	0.333	21	0.875
9	0.375	22	0.916
10	0.416	23	0.958
11	0.458	24	1
12	0.500		

Tabla II. Valores de relación tabulados por numero de símbolos en una misma casilla

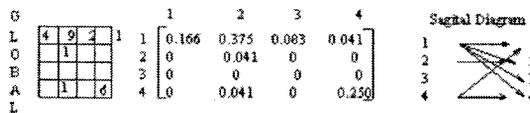
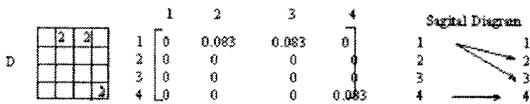
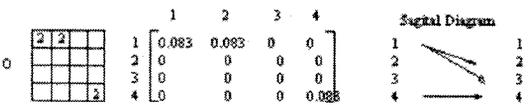
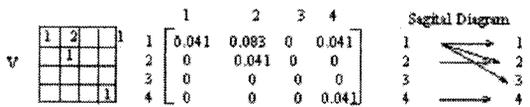
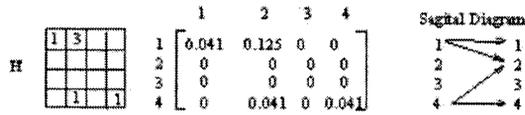
Considerando los mapas resultantes del método de representación ergonómica del nistagmo se pueden ver las siguientes matrices, donde cada número dentro del mapa corresponde a la frecuencia con la que ocurre un valor dentro de una clase.

Por ejemplo, para la posición horizontal se tiene una cuadrícula que representa el mapa. En cada casilla se registra el número de símbolos por casilla o la frecuencia de semejanza de las clases. En este registro en la casilla 2 hay 5 símbolos, mientras que para la 16 solo hay uno. En la matriz se asignan 4 renglones y 4 columnas debido a que el mapa representa una cuadrícula de 4x4. Sus elementos son los valores de relación del conjunto difuso. Otra forma de representarlo es por medio del diagrama sagital. Las flechas indican el valor de relación que existe entre ambas columnas. Este método se aplicó a todos los mapas.





Ahora realizando el mismo procedimiento para cuando el paciente mira hacia las áreas N, I, T-I, N-I:



Para poder decir que semejanza tiene la patología cuando el paciente observa hacia el área nasal y hacia la temporal se realiza el siguiente análisis aplicando una relación basada en la ecuación de la distancia métrica de Mikowski:

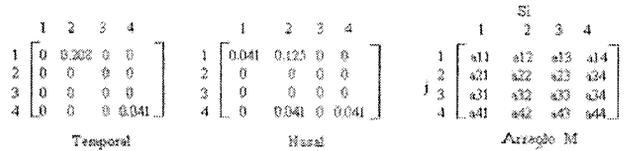
$$D_p(X_{(j)}, X_n) = \left[|X(J, K) \sum_{k=1}^m X_n(K)|^p \right]^{1/p}$$

La cual adecuada al ejemplo queda:

$$D_2(N, T) = D_2 [T_{\mu w}(Si, j), N_{\mu w}(Si, j)] = [\sum_{j=1}^m |T_{\mu w}(Si, j) - N_{\mu w}(Si, j)|^2]^{1/2}$$

donde: para esta aplicación damos el valor de 2 para el parámetro P de la distancia euclidiana por medir, $T_{\mu w}(Si, j)$ son los grados de pertenencia, [0,1] $N_{\mu w}(Si, j)$ son los grados de pertenencia, [0,1]

Aplicando esta ecuación a las matrices del área nasal y temporal de las 4 posiciones de estimulación tenemos: Para la posición horizontal:



$$D_2(N, T)_H = [(T_{11}-N_{11})^2 + (T_{12}-N_{12})^2 + (T_{42}-N_{42})^2 + (T_{44}-N_{44})^2]^{1/2}$$

$$D_2(N, T)_H = [(0-.041)^2 + (.208-.125)^2 + (0-.041)^2 + (.041-.041)^2]^{1/2} = 0.101$$

Para las demás posiciones se tiene:

$$D_2(N, T)_V = 0.083$$

$$D_2(N, T)_O = 0.101$$

$$D_2(N, T)_D = 0.117$$

Aquí se aprecia que la posición vertical tiene un valor mínimo comparado con los demás, por lo tanto tiene una distancia menor, indicando una semejanza mayor; es decir, entre más pequeño sea el resultado mayor será la semejanza entre los parámetros bajo análisis.

4 Conclusiones

De acuerdo a la opinión de un médico cirujano oftalmólogo que se ofreció a tomar parte en el proceso de manejar las estructuras motrices oculares, el proyecto esta sustentado en forma suficiente para creer que el método propuesto funcionará como tal, ya que se cuenta con bastante instrumental desarrollado (opto-oculografo, detector de posiciones craneanas, electromiografo, electroestimulador, tarjeta de adquisición de señales con su programa de captura y análisis) listo para aplicarse en humanos una vez que los resultados obtenidos en su debido tiempo con animales de experimentación así lo demuestren.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por su apoyo a este proyecto 28080-A.

Referencias

Björk A. "Electrical activity of human extrinsic eye muscles". V. 8. 1952. pp. 226-227.

Breinin G.M. *Electrophysiology of the Extraocular Muscle*. University of Toronto Press, Toronto. 1962.

Cruz F. and E. Suaste. "A Method of Measuring Head Movements for the Head Postures Determination in Congenital Nystagmus". 19th International Conference of

the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago IL, USA, 1997. pp. 1474-1477.

Dell'Osso L. F. and R. B. Daroff. "Congenital Nystagmus Waveforms and Foveation Strategy". *Documenta Ophthalmologica*. 39, 1. 1995. pp. 155-182.

Frederick T. and R. Hampton. "Current ocular therapy 2". W. B. Saunders Company. 1985.

Frueh B.R., A. Hayes, G. S. Lynch and D. A. Williams. "Contractile properties and temperature sensitivities of the extraocular muscles, the levator and the superior rectus of the rabbit". *J Physiol*. 475-2. 1994. pp. 327-36.

Fuchs A.F. and M. D. Binder. "Fatigue resistance of extraocular muscles". *Journal of Neurophysiology*. 49, 1. 1983.

Westerblad H., D. G. Allen, J. D. Bruton, F. H. Andrade and J. Lannergren. "Mechanisms underlying the reduction of isometric force in skeletal muscle fatigue". *Acta Physiol Scand*, 162, 1998. pp. 253-260.

Gandevia S.C. "Neural control in human muscle fatigue: changes in muscle afferents, motoneurons and motocortical drive". *Acta physiol Scand*, 162, 1998. pp. 275-283.

Graham H. *Muscles and their neural control*. Wiley-Interscience Publication. 1930.

Patton H.D. A. F. Fuchs, H. Bertil, A. M. Scher and R. Steiner. "Textbook of physiology". Vol. 1, 21st edition. W. B. Saunders Company. 1989.

Suaste E., D. Rodríguez, J. Leybón, L. Leija and H. Sossa, "Congenital Nystagmus Waveforms Generator and Symbolic Representation". *19th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Chicago IL, USA, 1997. pp. 1478-1481.

Suaste E., L. Leija and H. Sossa. "Measurement with Fiber Optics of Nystagmus eye Movements". *Biomedical Optoelectronic Instrumentation*, Editors: James A. Harrington, David M. Harris, Abraham Katzir, SPIE Vol. 2396, 1995. pp. 130-135.

Suaste E., J. Leybón and D. Rodríguez. "Visual exploration of images". *Electronic Imaging: Science and technology*, SPIE Vol. 3299, 1998. pp. 615-624.



Ernesto Suaste Gómez, doctorado en Ingeniería Eléctrica, con especialidad de Bioelectrónica, del Cinvestav IPN. Areas de investigación visión humana, movilidad ocular y pupilar. Asociadas a metodologías instrumentales del sistema visual. Miembro del SNI y de la Academia Mexicana de Ciencias. Ex-presidente de la Sociedad Mexicana Ingeniería Biomédica.



Jaime Leybón Ibarra, Maestro en Ciencias en 1996 en Ingeniería Eléctrica, con especialidad de Bioelectrónica, del Cinvestav IPN. Estudiante de doctorado en la institución mencionada desde 1998. Tema de investigación en movilidad ocular en nistagmo.

