

Señales EOG: Una revisión sobre procesamiento y aplicaciones

EOG Signals: A Review of Signal Processing and Applications

^a.David Escobar-Valencia, ^b.Fernando Jesús Regino-Ubarnes, ^c.Diana Yamileth Velásquez-Maldonado

 Magister en automática daescobarv@sena.edu.co Facilitador Tecnoacademia Regional Valle del Cauca ,
Sena, Cali, Colombia

 Magister en Ingeniería-Automatización Industrial fregino@sena.edu.co Facilitador Tecnoacademia Regional Valle del Cauca ,
Sena, Cali, Colombia

 Dinamizadora Tecnoacademia Regional Valle del Cauca, Sena divelasquezm@sena.edu.co
Cali, Colombia

Recibido: Julio 1 de 2021 Aceptado: Noviembre 8 de 2021

Forma de citar: D.E Valencia, F.J Regino-Ubares, D.Y Velásquez Maldonado. "Kaira, la revolución digital en la industria textil. Una propuesta empresarial.", *Mundo Fesc*, vol. 12, no. S2, pp. 8-24, 2022

Resumen

En este trabajo se presenta una revisión sobre procesamiento y aplicaciones de señales de electrooculografía. En primer lugar, se da a conocer el marco general sobre el uso de las señales mencionadas. Posteriormente se describen investigaciones de vanguardia sobre sistemas basados en señales electrooculografía. El objetivo de esta revisión es detectar los avances de los sistemas basados en dichas señales para futuros desarrollos tecnológicos.

Palabras clave: Adquisición de datos, discapacidad, electrooculografía, electrodos, tratamiento de señales.

Abstract:

This paper presents a review on electrooculography signal processing and applications. First, the general framework on the use of the aforementioned signals is disclosed. State-of-the-art research on systems based on electrooculography signals is described later. The objective of this review is to detect the advances of systems based on these signals for future technological developments.

Keywords: Data acquisition, disability, electrodes, electrooculography, signal processing

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: daescobarv@sena.edu.co



© 2022. Fundación de Estudios Superiores Comfanorte.

Introducción

Diversos dispositivos electrónicos son desarrollados en el campo de la ingeniería biomédica con el objetivo de suplir las necesidades de las personas en diagnósticos médicos, tratamientos y/o supliendo alguna funcionalidad motora que el cuerpo haya perdido total o parcialmente. Entre las diversas bioseñales que se pueden monitorear en el cuerpo humano, las señales electrooculográficas (EOG) son una de las más utilizadas para diagnóstico de patologías, control de dispositivos especiales, entre otras [1].

Las señales EOG se pueden capturar gracias a la diferencia de potencial que se genera entre la retina y la córnea, producida por movimientos oculares. Dado que la diferencia de potencial generada es demasiado pequeña, se deben utilizar circuitos amplificadores para obtener una señal medible por un microcontrolador. Asimismo, el empleo de filtros analógicos o digitales es primordial, dada la alta “suciedad” de la señal debido a factores como movimientos musculares involuntarios, ruido de línea base, dispositivos electrónicos cercanos, entre otros.

La mayoría de los sistemas y/o prototipos basados en señales EOG tienen en común 4 etapas: adquisición de las señales, filtrado, extracción de características y clasificación. En varios trabajos expuestos en posteriores secciones del actual manuscrito, se evidencia la amplia gama de algoritmos de inteligencia artificial usados para la clasificación de las señales EOG, supeditados a los objetivos generales de las investigaciones.

El desarrollo del presente artículo se fundamenta en la revisión del estado actual del conocimiento sobre señales EOG, en especial, su procesamiento y aplicación en temas como robótica, interfaces humano-máquina y diagnóstico de enfermedades. El artículo está constituido por las siguientes secciones: La sección 1 muestra un panorama general sobre el uso de las señales EOG; la sección 2 detalla algunos trabajos sobre procesamiento de las mismas; la sección 3 expone diversas aplicaciones en donde se involucra el uso de señales EOG, y finalmente la sección 4 describe las conclusiones apoyadas en la revisión realizada.

Tratamiento de señales EOG:

Las señales producidas por los músculos del cuerpo humano se encuentran en el orden de los milivoltios (mV), por lo cual es esencial el uso de amplificadores y filtros electrónicos para obtener una señal medible por un microcontrolador o tarjeta electrónica especializada en el procesamiento de señales. Sin embargo, el proceso de amplificación en este tipo de señales conlleva a la aparición de efectos indeseados como la deriva presente en el momento de adquisición de la señal EOG, provocando que la misma presente interpretaciones erróneas como un lento movimiento ocular. Para ello, se ponen a prueba distintos métodos para mitigar este efecto, como son: reseteo de la referencia DC, filtro pasa altas, diferenciación de señales, ajuste de la señal a modelos polinomiales y transformada wavelet. De los métodos listados líneas atrás, la diferenciación de señales y el reseteo de la referencia DC son estadísticamente mejores en contraste con los otros métodos. A su vez, el filtro pasa altas y la transformada

wavelet mostraron igual desempeño en términos estadísticos. Por último, el desempeño del ajuste a modelos polinomiales, en ningún punto fue mejor a los métodos restantes. No obstante, los métodos estadísticamente mejores no son idóneos para su implementación en sistemas reales [2].

Por otra parte, Ryu et al. en [3], presentan un novedoso método para deshacerse de la señal de deriva y el ruido de base por medio de una señal EOG diferencial establecida en una curva de fijación (DOSbFC) para la detección de los movimientos oculares. En suma, los autores proponen el uso de electrodos dispuestos en un marco para anteojos, con el fin de lograr mayor confort en los usuarios; y el desarrollo de aplicaciones software, para dispositivos móviles y de escritorio, para el control del dispositivo y visualizar las señales capturadas. Los resultados experimentales, utilizando el método propuesto por los autores,

muestran una precisión del 94% en la detección del movimiento ocular en contraste con técnicas como filtro pasa banda y transformada wavelet, las cuales obtuvieron un 61% y 64% respectivamente.

En [4] se estudia la obtención de la posición espacial del ojo a través de señales EOG provocadas por movimientos sacádicos. Los autores proponen un filtro óptimo basado en análisis de componentes independientes (ACI) relacionados a los movimientos rápidos de los ojos, extrayendo características para las señales generadas cuando el sujeto dirige el ojo hacia arriba, abajo, derecha o izquierda. Asimismo, se desarrolló un algoritmo que detecta automáticamente los componentes independientes relacionados a dichos movimientos, clasificándolos con máquinas de soporte vectorial (SVM). En la figura 1 se puede apreciar el diagrama de flujos del sistema propuesto.

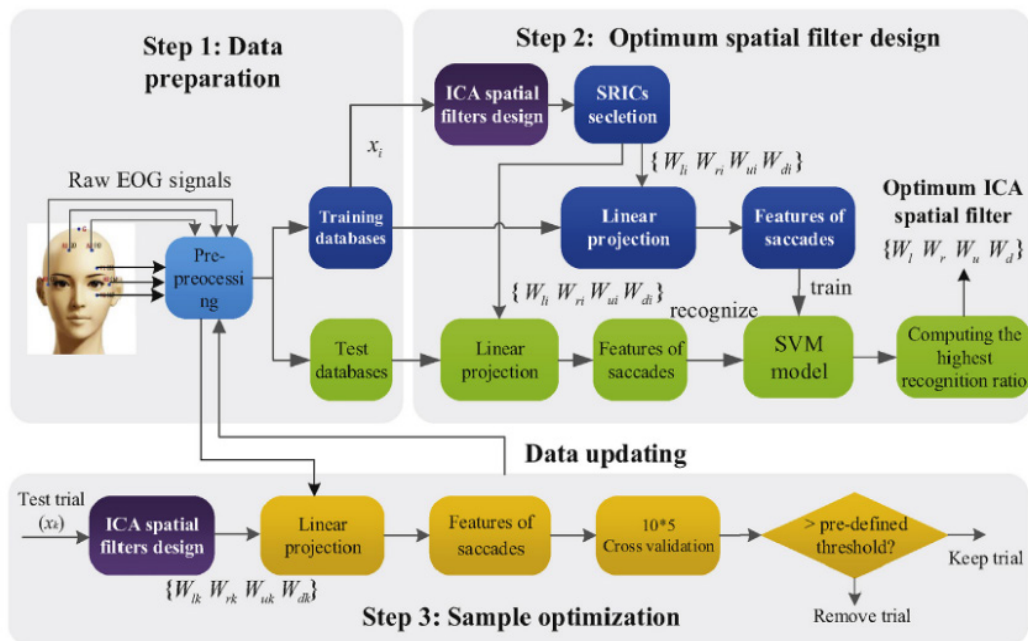


Figura 1. Diagrama de flujo posición espacial de los ojos.

Fuente: Tomado de [4]

En pruebas llevadas a nivel de laboratorio, el conjunto algoritmo-clasificador obtuvo un 99% de precisión reconociendo el movimiento de los ojos. En el mismo sentido, utilizando ACI, se plantea obtener una señal sacádica limpia de la cual extraer características. Para dicha señal, los investigadores emplean técnicas, tanto en el dominio del tiempo (ventana deslizante) como en el dominio de la frecuencia (transformada rápida de Fourier), y aplican el algoritmo de diagonalización conjunta aproximada de eigen-matriz (JADE por sus siglas en inglés) con el objetivo de aislar las señales mixtas. A nivel experimental, se contó con la participación de 13 individuos, lo cuales realizaron movimientos oculares sacádicos (arriba, abajo, izquierda, derecha), dando como resultado en la precisión de clasificación 95.6% para la evaluación entre individuos y 97.3% en la evaluación intra individuos [5]. En [6] se estudia el acondicionamiento de las señales EOG con el algoritmo Mínimo Cuadrado Medio (LMS por sus siglas en inglés) para su posterior extracción de características. El objetivo de la investigación radica en la identificación de ataques epilépticos a partir de movimientos oculares con ayuda de una red neuronal convolucional de base genética. Los resultados muestran que el sistema propuesto garantiza la detección de dichos ataques frente a otras metodologías.

Por otra parte, en [7] se plantea eliminar la dependencia que existe entre las señales generadas por los movimientos oculares verticales y horizontales. Los investigadores identificaron que las señales EOG verticales están altamente influenciadas por las señales EOG horizontales, mientras que estas últimas, rara vez se ven influenciadas por su

contraparte. Se propone introducir un valor constante en cada componente para eliminar la dependencia anteriormente dicha. Por otro lado, Stoean et al. presenta un novedoso preprocesamiento de las señales EOG al emplear mapas autoorganizados para la extracción de patrones por similitud de forma y, en consecuencia, etiquetarlos para entrenar una red de aprendizaje profundo. El objetivo de la investigación radica en clasificar 3 clases de ataxia espino-cerebral tipo 2. Los resultados muestran un 78% de precisión en la discriminación, otorgando una mejora respecto a utilizar sólo la red neuronal. No obstante, también se desarrollan trabajos con métodos asequibles para el diagnóstico de la ataxia utilizando dispositivos comerciales para la adquisición de las señales y software desarrollado a medida [8], [9].

Algunos investigadores se han preocupado por el confort de las personas que trabajan en el marco de las bio-señales como EOG, dado que se deben utilizar electrodos especiales adheridos a la piel para la captura de las mismas. Sin embargo, estos electrodos son voluminosos y generan molestias a los usuarios. Por ello se presenta el desarrollo de electrodos de grafeno para la captura de señales EOG, que tienen como característica principal la no restricción de las expresiones faciales y parpadeos. Este tipo de electrodos se combinaron con una interfaz hombre-máquina para el control de un drone en tiempo real [10]. A su vez, Golparvar y Yapici en [11] y [12], exponen la construcción, uso y descripción de características de electrodos textiles recubiertos de grafeno. Dichos electrodos son comparados con electrodos tradicionales de plata o cloruro de plata desde el punto de vista

de las señales adquiridas, obteniendo un 87% de correlación entre las mismas. De igual forma, en [13] se expone la construcción de electrodos a partir de grafeno inducido por láser (LGI por sus siglas en inglés) y la comparación contra electrodos de cloruro de plata y carbón. Los resultados de la investigación muestran que las señales adquiridas, tanto por los electrodos creados por LGI como por los electrodos de cloruro de plata y carbón, son bastante similares. Es importante resaltar que existe una guía de introducción a los procedimientos de electro-diagnósticos como electrorretinograma, electrooculograma, entre otros; donde se ilustran las pruebas básicas sobre los procedimientos anteriormente mencionados y las sugerencias sobre estrategias de investigación en este campo [14].

Aplicaciones basadas en EOG:

Las aplicaciones basadas en señales biológicas como EMG, ECG y especial EOG han tenido un desarrollo vertiginoso dado el avance de los sistemas hardware y software, además de los esfuerzos invertidos en investigación y desarrollo sobre este tema.

Jia y Tyler en [15] registran los movimientos oculares a través de señales EOG y EEG por medio de una red de electrodos ubicados en la cabeza de los participantes. Los resultados muestran que se puede lograr un excelente análisis de la amplitud y dirección de la mirada, y los movimientos sacádicos. El sistema propuesto muestra resultados comparables con sistemas más robustos y especializados. Pal et al. en [16] realizan una revisión sobre señales biológicas, entre ellas, señales EOG, destacando que estas se pueden utilizar como un medio de identificación biométrica,

puesto que las características de dichas señales varían de un individuo a otro. En el mismo sentido, en [17] se desarrolla el estudio de varias señales bio-físicas, entre ellas, las señales EOG, con el objetivo de implementar sistemas de generación de números aleatorios para autenticación o generación de códigos, dado que, se comprobó la personalización de los números generados a partir de las bio-señales capturadas en cada individuo.

A su vez, Wangmo et al., propone un prototipo para la adquisición de señales ECG y EOG a través de dos electrodos. Los investigadores definen el prototipo como estable, rentable y portátil [18]. Por otra parte, en el estudio realizado en [19] se desarrolla un prototipo para capturar señales EOG y procesarlas con el objetivo de controlar un juego serio desarrollado para computadores. El estudio afirma que, a través de estos juegos, las personas con discapacidades motoras pueden entrenar el sistema oculomotor. En ese sentido, también se desarrolla un prototipo para la clasificación de 8 movimientos de los ojos con los cuales seleccionar distintas secciones de un tablero desarrollado a manera de un juego [20], [21]. En la figura 2 se puede apreciar el tablero desarrollado.

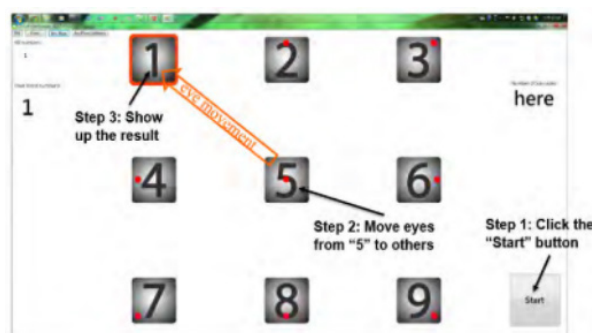


Figura 2. Tablero para clasificación según movimiento de los ojos.

Fuente: [20]

Por su parte, también se encuentran estudios sobre desarrollos de dispositivos electrónicos como interfaz humano-máquina para la adquisición de señales EOG. Asimismo, utilizan técnicas de inteligencia artificial para clasificar las señales y controlar objetos a partir de dicha clasificación. El ánimo de estas investigaciones radica en la asistencia comunicativa y motora que necesitan personas con enfermedades neurodegenerativas como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) [22], [23], [24]. En [25], los autores exponen la combinación de realidad virtual y electrooculografía como interfaz para seleccionar o reproducir canciones supeditado al parpadeo del ojo. Asimismo, el sistema provee una serie de luces intermitentes que el individuo debe imitar parpadeando los ojos para activar o desactivar comando preestablecidos en el prototipo. En el mismo sentido Molina-Cantero et al., estudian cuatro sistemas diferentes que tienen como función principal, servir de intermediario entre individuos con incapacidades motoras y objetos especiales diseñados para ellos. Los sistemas bajo estudio son: infrarrojos, EOG, EEG y vídeo. El sistema con mayor precisión en la identificación del parpadeo voluntario a nivel experimental fue para la oculografía infrarroja con un 99.3% [26]. A su vez, los individuos que padecen ELA pueden sufrir un deterioro motor completo, perdiendo incluso, la capacidad de movimiento ocular. En [27] se da a conocer el desarrollo de un sistema de comunicación para pacientes con dicho deterioro, el cual captura señales EOG en el rango de $\pm 200\mu\text{V}$ y $\pm 40\mu\text{V}$. Las señales capturadas son interpretadas según un sistema ortográfico auditivo. La etapa experimental se extendió por un año y muestra que el sistema es un firme candidato como medio de comunicación

para pacientes con movimiento ocular bajo.

Por otro lado, las señales EOG juegan un papel importante en el estudio de los trastornos del sueño junto con otras señales, ya que estas se pueden analizar bajo herramientas matemáticas para extraer información como la correlación entre las matrices de covarianza y las etapas del sueño, lo anterior, sumado a un clasificador de distancia mínima que tiene como entrada el mapeo de las covarianzas en variedades de Riemann. En el mismo sentido, se propone una clasificación jerárquica de tres capas con el objetivo de otorgar puntuación al sueño. Es de resaltar que el sueño se clasifica en 5 etapas, a saber: despierto, S1, S2, sueño de onda lenta y etapa REM. La arquitectura del clasificador está articulada por SVM en la primera capa y, en la segunda y tercera capa una combinación de SVM y agrupación basada en proporciones. A nivel experimental, la técnica obtiene 91.4% de precisión [28], [29]. También se realizan estudios con el objetivo de optimizar los protocolos diagnósticos partiendo de señales EOG, como el trabajo realizado en [30], donde se presenta un sistema de detección de insomnio de corta duración (aproximadamente 30 minutos) en contraposición con otros sistemas. Los autores utilizan un clasificador SVM y análisis refinado de entropía compuesta multi-escala para las señales adquiridas, evaluando la información de 32 personas, entre sanas y con insomnio, obteniendo una precisión del 89.31%. En la misma línea de investigación, se estudia la apnea del sueño por medio de señales EEG y EOG, otorgando puntajes supeditados a la gravedad del trastorno, obteniendo resultados a nivel estadístico de 83.8%, aplicando aprendizaje profundo

y combinando los canales de dichas señales. No obstante, las conclusiones muestran que la combinación de las señales no mejora en gran medida la precisión y esta se degrada a medida que aumenta la gravedad del trastorno [31]. Además de los trastornos del sueño, el análisis de señales EOG ayuda en el diagnóstico no invasivo de otras patologías como la miastenia grave, ya que el movimiento de los ojos de personas

motor en pacientes con dicha enfermedad, que padecen dicha enfermedad, muestra características especiales frente a personas sanas. Los investigadores usaron un clasificador basado en análisis discriminante lineal (LDA), obteniendo una tasa de precisión entre el 82% y 84% aproximadamente, cuantificando las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia [32]. En la figura 3 se presenta la metodología propuesta para el análisis de los trastornos del sueño.

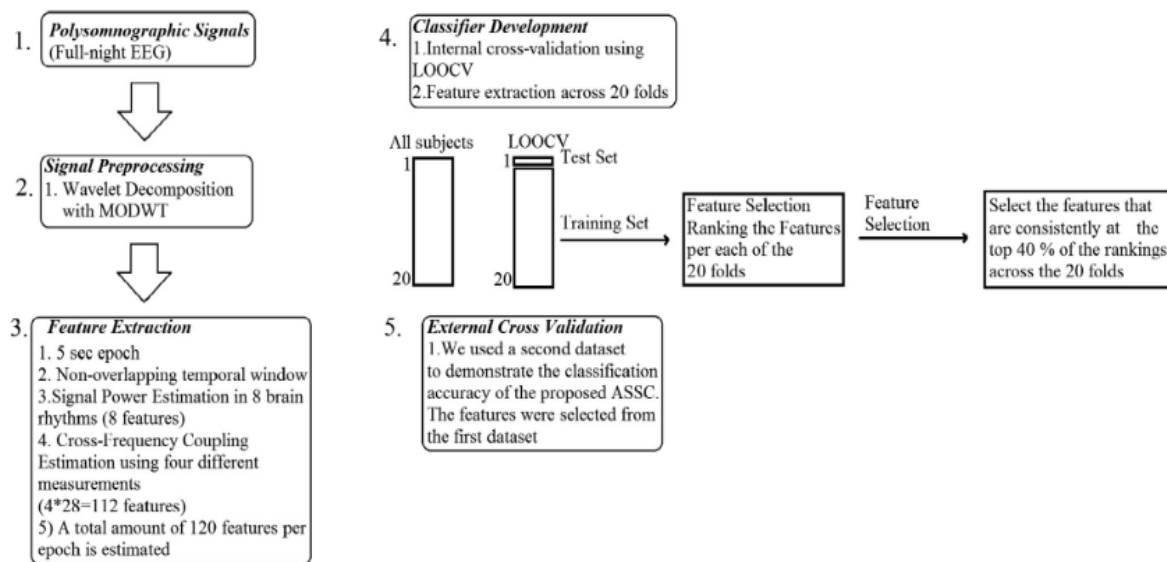


Figura 3. Diagrama de flujo trastorno del sueño.
Fuente: Tomado de [32]

A su vez, también se estudia sobre el diagnóstico de pérdida de atención por hiperactividad a través de movimientos oculares. En el experimento participaron personas sanas y pacientes con el trastorno los cuales seguían imágenes de estimulación en una pantalla. La prueba t-student muestra que no hay significancia estadística entre los individuos sanos y las imágenes de estimulación, mientras que en los pacientes con trastorno si es clara la significancia estadística [33]. Otra patología estudiada por medio de la electrooculografía es la enfermedad de Parkinson. Iwaki et al. en [34], exponen un método de verificación del estado

el cual consiste en medir la tasa de parpadeo espontáneo (TPB) a través de gafas portátiles especiales que capturan señales EOG; y los niveles de dopamina, dado que varios estudios apuntan a que la TPB y los niveles de dopamina están fuertemente correlacionados. El experimento consistió en medir la TPB y los niveles de dopamina por un lapso de 7 horas y 30 minutos en pacientes enfermos con Parkinson, dando como resultado la alta correlación entre ambos niveles y, por consiguiente, un método de monitoreo poco invasivo para la revisión del estado motor de los pacientes. Por otra parte, también se evalúa el

estado de salud de los astronautas que participan en viajes a la estación espacial internacional por medio de señales EOG. En la investigación participaron 31 astronautas, los cuales fueron puestos a prueba antes y después del viaje. El experimento consistió en mover la cabeza y los ojos lo más rápido posible hacia objetivos previamente determinados. Los resultados muestran que los individuos demoraron entre un 7% y 10% más tiempo en fijar el objetivo después del vuelo; no obstante, volvían a obtener los mismos tiempos de la prueba inicial (antes del vuelo) pasadas 48 horas [35].

La electrooculografía también tiene aplicaciones en el campo de la robótica. En [36] y de forma similar en [37] y [38], los investigadores combinan varias señales biológicas, entre ellas las señales EOG, para controlar un brazo robótico de 6 grados de libertad (DOF por sus siglas en inglés), con ayuda de una diadema de venta comercial en donde se disponen los diferentes sensores y electrodos. Es de resaltar que la combinación de varias señales, desemboca en un amplio abanico de comandos y ordenes, otorgando mayor control sobre el brazo [39], [40].

A su vez, en [41] se expone el control

de un rover por medio de una diadema NeuroSky, la cual captura señales EEG y EOG, para su posterior procesamiento en el software MATLAB. Las señales procesadas son enviadas al rover a través de módulos Zigbee. Asimismo, el rover dispone de sensores infrarrojos para detectar la presencia de objetos o personas los cuales son gobernados por un microcontrolador Arduino. Por otra parte, Pandilla et al., dan a conocer una estructura de aprendizaje automático dual para el seguimiento del movimiento ocular. La estructura emplea señales EOG y EMG que se extraen por medio de dos electrodos ubicados en la sienes izquierda y derecha, y son pre-procesadas por algoritmos PLA [42].

Por otra parte, la electrooculografía se aplica a sistemas de entrenamiento ortográfico, a fin que los usuarios mejoren su ortografía deletreando palabras a través de un sistema que selecciona las letras de acuerdo a la posición del ojo. Cabe resaltar que además de señales EOG, los investigadores también utilizan señales EEG [43], [44], [45], [46]. En la figura 4 se puede observar la arquitectura del sistema ortográfico.

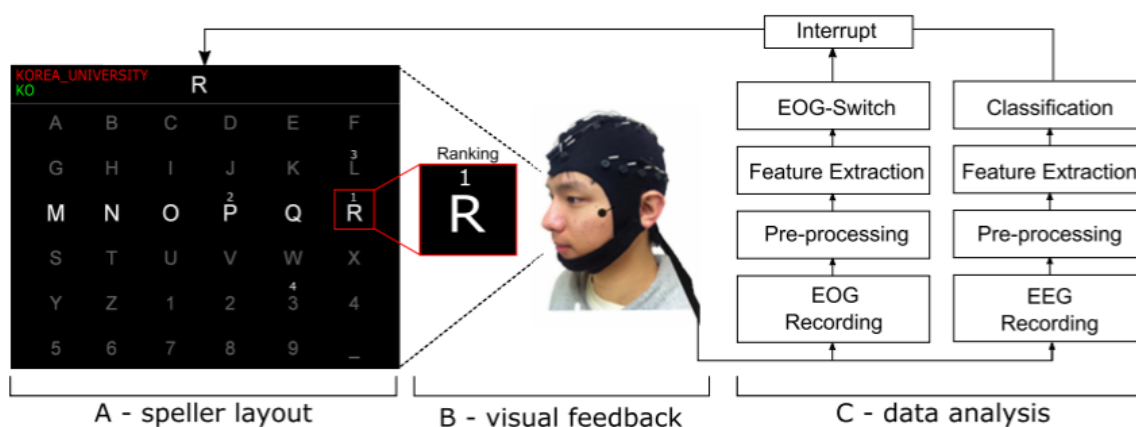


Figura 4. Sistema de entrenamiento ortográfico.

Fuente: [43].

Por su parte, Zhang et al. desarrollan un sistema de control domótico con interfaz gráfica basado en señales EOG asíncronas para pacientes con lesiones en la médula espinal. El sistema indica a los individuos una serie de destellos únicos para cada botón. El usuario imita la serie con el fin de activar o desactivar un determinado objeto que se encuentre gobernado por el sistema. Experimentalmente se obtuvo una tasa promedio de falsas órdenes del 4.1%. En el mismo sentido, Huang et al. proponen el control, por medio de 13 botones intermitentes, de una silla de ruedas a través de EOG. Los resultados experimentales muestran una precisión media del 96.7% y 91.7% para pacientes sanos y con lesiones en la médula espinal respectivamente. De la misma forma, se realizan esfuerzos por utilizar plataformas hardware y software de acceso libre, como Raspberry Pi, Python, entre otras, para crear dispositivos encaminados a clasificar señales EOG para propósitos generales. En un trabajo similar, se llevan a cabo 4 experimentos y 300 pruebas para el manejo de una silla de ruedas a partir de señales EOG, obteniendo una precisión promedio entre el 95% y 99%, en suma, se expone el control de motores eléctricos a través de la clasificación de señales EOG previamente filtradas por un algoritmo de media móvil [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54].

En el trabajo de Jalilifard et al. en [55], se extraen la señal EOG a partir de señales EEG con el objetivo de identificar parpadeos involuntarios como método de autenticación personal. En el experimento participaron 46 individuos observando una serie de imágenes. Las señales obtenidas fueron pre-procesadas para luego extraer 25 características de cada una de ellas. Los análisis muestran

que los parpadeos involuntarios no siguen una distribución de probabilidad gaussiana en contraste con los parpadeos voluntarios. Los investigadores utilizan una red neuronal recurrente para clasificar a los individuos, teniendo como entrada las características extraídas de cada señal, logrando un 98.7% de precisión. En el mismo sentido, se utiliza una red neuronal de reconocimiento de patrones junto con la transformada de Hilbert Huang y la banda de potencia para identificar características relevantes en la señal EOG y entrenar la red. En las pruebas realizadas se obtuvo una tasa de clasificación del 92% y 91% utilizando como extractores de características la banda de potencia y la transformada de Hilbert Huang respectivamente. También se evaluó el rendimiento de la red en una población de hombres y mujeres, dando como resultado una mayor tasa de acierto en el género masculino. El estudio concluye que este tipo de redes y técnicas de procesamiento pueden utilizarse en interfaces humano-computador [56]. Por otra parte, las señales EOG funcionan como indicador del nivel de vigía al conducir un vehículo bajo diferentes entornos meteorológicos a nivel simulado y real. A su vez, dichas señales son utilizadas para generar estimulación a individuos sanos y con autismo, por medio de acupuntura al visualizar imágenes de paisajes [57], [58].

Investigaciones como la desarrollada en [59] y [60], argumenta que las personas que padecen discapacidad auditiva pueden mejorar su nivel de escucha supeditando la dirección del audio a la dirección ocular. Con electrodos especiales introducidos en el oído de los pacientes, se puede estimar la dirección de la mirada. Además, se

utilizan sensores de movimiento que calculan la posición de la cabeza, lo cual ayuda a determinar dicha dirección. Los resultados generales de la investigación, muestran gran potencial estimando la dirección de la mirada utilizando los

electrodos descritos líneas atrás. En la figura 5 se puede observar el diagrama esquemático del prototipo propuesto, el prototipo en fase experimental y los electrodos que se introducen en el oído.

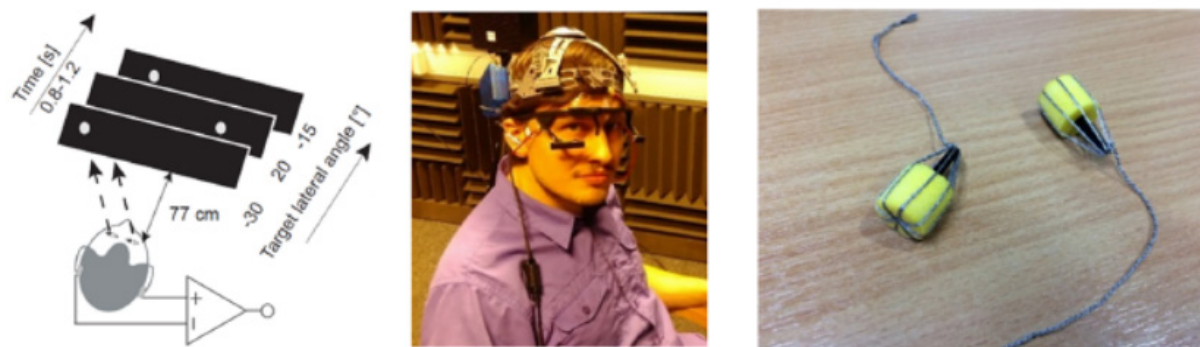


Figura 5. Prototipo para mejora de la capacidad auditiva.
Fuente: Tomado de [59]

Del amplio abanico de aplicaciones con señales EOG, también se encuentra el estudio de la fase MOR (Movimientos Oculares Rápidos), en especial, la densidad MOR en perros y como esta se relaciona con variables como peso, edad, sexo, duración del sueño, entre otras. En el estudio participaron 50 perros de variadas razas, con una edad entre los 6

meses y 15 años. Los MOR se capturaron a través de señales EOG y, a partir de estos, se calculó la densidad MOR. Como resultados de la investigación se tiene que en perros machos con duración MOR corta, la densidad MOR aumenta con la edad. Asimismo, la masa corporal y la duración del sueño MOR, tuvo alta incidencia en la densidad MOR [61].

Conclusiones

En la presente revisión sobre señales EOG, se evidencia la amplia gama de aplicaciones construidas en campos como la medicina, la robótica y la identificación biométrica. En las aplicaciones médicas, se evidencia el uso de dispositivos electrónicos para la adquisición de señales EOG con el objetivo de apoyar el diagnóstico de enfermedades, controlar equipos como brazos robotizados o asistentes de escritura. También se resalta la gran incidencia de algoritmos de inteligencia artificial, los cuales son utilizados para clasificar las señales, según la intención de las personas,

llegando a tener dominio sobre sistemas domóticos y reproductores de audio.

Por otro lado, se exponen avances interesantes en identificación biométrica basada en señales EOG, dado que se ha demostrado que cada individuo posee señales inequívocas, las cuales, al procesarlas de forma adecuada, sirven como identificación personal.

En los métodos de preprocesamiento de señales EOG, es palpable el uso de métodos computacionales como el análisis de componentes independientes y algoritmos de inteligencia artificial no supervisados. Lo anterior va de la mano

con filtros digitales como, por ejemplo, promedios móviles, todo ello encaminado a la extracción de características de la señal EOG. Las características extraídas alimentarían el entrenamiento de los algoritmos de inteligencia artificial.

Finalmente es apreciable el gran desarrollo y evolución de prototipos y sistemas que basan su funcionamiento en bioseñales EOG, en especial, aquellos que elevan la calidad de vida de personas con limitaciones motoras. No obstante, aun se deben refinar varios aspectos como los equipos para la adquisición de las señales y la portabilidad de los mismos, ya que la gran mayoría de las investigaciones aquí citadas, ponen a prueba sus sistemas en entornos de laboratorio.

Referencias:

- [1] A. Bertomeu-Motos et al., "User activity recognition system to improve the performance of environmental control interfaces: A pilot study with patients," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [2] N. Barbara, T. A. Camilleri, and K. P. Camilleri, "A comparison of EOG baseline drift mitigation techniques," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 57, p. 101738, 2020.
- [3] J. Ryu, M. Lee, and D. H. Kim, "EOG-based eye tracking protocol using baseline drift removal algorithm for long-term eye movement detection," *Expert Syst. Appl.*, vol. 131, pp. 275–287, 2019.
- [4] Z. Lv, Y. Wang, C. Zhang, X. Gao, and X. Wu, "An ICA-based spatial filtering approach to saccadic EOG signal recognition," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 43, pp. 9–17, 2018.
- [5] B. Zhang, N. Bi, C. Zhang, X. Gao, and Z. Lv, "Robust EOG-based saccade recognition using multi-channel blind source deconvolution," *Biomed. Eng. (NY)*, vol. 64, no. 3, pp. 309–324, 2019.
- [6] V. P. Brahmaiah, Y. P. Sai, and M. N. Giriprasad, "A new framework for recognizing normal and epileptic seizure from eye movement signals using genetic based convolutional neural network," *Trait. du Signal*, vol. 37, no. 3, pp. 493–501, 2020.
- [7] W. Du Chang, H. S. Cha, and C. H. Im, "Removing the interdependency between horizontal and vertical eye-movement components in electrooculograms," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, 2016.
- [8] R. Stoean et al., "A hybrid unsupervised-Deep learning tandem for electrooculography time series analysis," *PLoS One*, vol. 15, no. 7, 2020.
- [9] A. López, F. Ferrero, and O. Postolache, "An affordable method for evaluation of ataxic disorders based on electrooculography," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 17, pp. 1–16, 2019.
- [10] S. K. Ameri et al., "Imperceptible electrooculography graphene sensor system for human–robot interface," *npj 2D Mater. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2018.
- [11] A. J. Golparvar and M. K. Yapici, "Electrooculography by Wearable

- Graphene Textiles,” *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8971–8978, 2018.
- [12] A. J. Golparvar and M. K. Yapici, “Graphene Smart Textile-Based Wearable Eye Movement Sensor for Electro-Ocular Control and Interaction with Objects,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 166, no. 9, 2019.
- [13] V. Toral et al., “Cost-Effective Printed Electrodes Based on Emerging Materials Applied to Biosignal Acquisition,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127789–127800, 2020.
- [14] A. G. Robson et al., “ISCEV guide to visual electrodiagnostic procedures,” *Doc. Ophthalmol.*, vol. 136, no. 1, pp. 1–26, 2018.
- [15] Y. Jia and C. W. Tyler, “Measurement of saccadic eye movements by electrooculography for simultaneous EEG recording,” *Behav. Res. Methods*, vol. 51, no. 5, pp. 2139–2151, 2019.
- [16] A. Pal, A. K. Gautam, and Y. N. Singh, “Evaluation of bioelectric signals for human recognition,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 48, no. C, pp. 746–752, 2015.
- [17] S. Arslan Tuncer and T. Kaya, “True Random Number Generation from Bioelectrical and Physical Signals,” *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2018, pp. 1–11, 2018.
- [18] P. Wangmo, G. Ramyavani, K. S. Iyer, and V. Karthik Raj, “Two electrode ECG and EOG system for monitoring applications,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 11, pp. 262–265, 2019.
- [19] A. López, M. Fernández, H. Rodríguez, F. Ferrero, and O. Postolache, “Development of an EOG-based system to control a serious game,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 127, pp. 481–488, 2018.
- [20] C. T. Lin et al., “EOG-Based Eye Movement Classification and Application on HCI Baseball Game,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96166–96176, 2019.
- [21] X. Ding, Z. Lv, C. Zhang, X. Gao, and B. Zhou, “A Robust Online Saccadic Eye Movement Recognition Method Combining Electrooculography and Video,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17997–18003, 2017.
- [22] W. Tang, A. Wang, S. Ramkumar, and R. K. R. Nair, “Signal identification system for developing rehabilitative device using deep learning algorithms,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 102, p. 101755, 2020.
- [23] S. Fang, A. F. Hussein, S. Ramkumar, K. S. Dhanalakshmi, and G. Emayavaramban, “Prospects of electrooculography in human-computer interface based neural rehabilitation for neural repair patients,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 25506–25515, 2019.
- [24] D. Y. Kim, C. H. Han, and C. H. Im, “Development of an electrooculogram-based human-computer interface using involuntary eye movement by spatially rotating sound for communication of locked-in patients,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [25] J. Xiao, J. Qu, and Y. Li, “An Electrooculogram-Based Interaction

- Method and Its Music-on-Demand Application in a Virtual Reality Environment,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 22059–22070, 2019.
- [26] A. J. Molina-Cantero, C. Lebrato-Vazquez, M. Merino-Monge, R. Quesada-Tabares, J. A. Castro-Garcia, and I. M. Gomez-Gonzalez, “Communication technologies based on voluntary blinks: Assessment and design,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70770–70798, 2019.
- [27] A. Tonin, A. Jaramillo-Gonzalez, A. Rana, M. Khalili-Ardali, N. Birbaumer, and U. Chaudhary, “Auditory Electrooculogram-based Communication System for ALS Patients in Transition from Locked-in to Complete Locked-in State,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [28] P. Tian et al., “A hierarchical classification method for automatic sleep scoring using multiscale entropy features and proportion information of sleep architecture,” *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 263–271, 2017.
- [29] D. JIANG, Y. MA, and Y. WANG, “Sleep stage classification using covariance features of multi-channel physiological signals on Riemannian manifolds,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 178, pp. 19–30, 2019.
- [30] C. E. Kuo and G. T. Chen, “A Short-Time Insomnia Detection System Based on Sleep EOG with RCMSE Analysis,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69763–69773, 2020.
- [31] H. Korkalainen et al., “Accurate Deep Learning-Based Sleep Staging in a Clinical Population with Suspected Obstructive Sleep Apnea,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 24, no. 7, pp. 2073–2081, 2020.
- [32] S. I. Dimitriadis, C. Salis, and D. Linden, “A novel, fast and efficient single-sensor automatic sleep-stage classification based on complementary cross-frequency coupling estimates,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 129, no. 4, pp. 815–828, 2018.
- [33] F. Latifo lu, M. Y. Esas, and E. Demirci, “Diagnosis of attention-deficit hyperactivity disorder using EOG signals: A new approach,” *Biomed. Tech.*, vol. 65, no. 2, pp. 149–164, 2020.
- [34] H. Iwaki et al., “Using spontaneous eye-blink rates to predict the motor status of patients with parkinson’s disease,” *Intern. Med.*, vol. 58, no. 10, pp. 1417–1421, 2019.
- [35] M. F. Reschke, O. I. Kolev, and G. Clément, “Eye-Head Coordination in 31 Space Shuttle Astronauts during Visual Target Acquisition,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 4–11, 2017.
- [36] L. Minati, N. Yoshimura, and Y. Koike, “Hybrid Control of a Vision-Guided Robot Arm by EOG, EMG, EEG Biosignals and Head Movement Acquired via a Consumer-Grade Wearable Device,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 9528–9541, 2016.
- [37] K. Sharma, N. Jain, and P. K. Pal, “Detection of eye closing/opening from EOG and its application in robotic arm control,” *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 1, pp. 173–186, 2020.

- [38] M. I. Rusydi, T. Okamoto, S. Ito, and M. Sasaki, "Controlling 3-D movement of robot manipulator using electrooculography," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 170–185, 2018.
- [39] J. Zhang, B. Wang, C. Zhang, Y. Xiao, and M. Y. Wang, "An EEG/EMG/EOG-based multimodal human-machine interface to real-time control of a soft robot hand," *Front. Neurobot.*, vol. 13, 2019.
- [40] S. Crea et al., "Feasibility and safety of shared EEG/EOG and vision-guided autonomous whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2018.
- [41] C. Santhanakrishnan, T. Peermeer Labbai, S. S. Dudala, and Y. Sai Santhosh Nag, "A salutary biotechnical approach for explosive identification and border patrol using electrophysiological signals," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 106–109, 2018.
- [42] G. W. Gang, C. H. Min, and T. S. Kim, "Development of eye-tracking system using dual machine learning structure," *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 66, no. 7, pp. 1111–1116, 2017.
- [43] M. H. Lee, J. Williamson, D. O. Won, S. Fazli, and S. W. Lee, "A High Performance Spelling System based on EEG-EOG Signals with Visual Feedback," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 1443–1459, 2018.
- [44] A. López, F. Ferrero, D. Yangüela, C. Álvarez, and O. Postolache, "Development of a computer writing system based on EOG," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 7, pp. 1–20, 2017.
- [45] M. Yildiz and H. Ö. Ülkütaş, "A New PC-Based Text Entry System Based on EOG Coding," *Adv. Human-Computer Interact.*, vol. 2018, pp. 1–8, 2018.
- [46] R. Ouyang, Z. Lv, X. Wu, C. Zhang, and X. Gao, "Design and Implementation of a Reading Auxiliary Apparatus Based on Electrooculography," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3841–3847, 2017.
- [47] R. Zhang et al., "An EOG-Based Human-Machine Interface to Control a Smart Home Environment for Patients with Severe Spinal Cord Injuries," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 66, no. 1, pp. 89–100, 2019.
- [48] Q. Huang et al., "An EOG-based human-machine interface for wheelchair control," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 65, no. 9, pp. 2023–2032, 2018.
- [49] J. Mart et al., "Open Software/Hardware Platform for Human-Computer Interface Based on Electrooculography (EOG) Signal Classificatio," *sensors*, vol. 20, 2020.
- [50] A. M. Choudhari and V. Jonnalagedda, "Bio-potentials for smart control applications," *Health Technol. (Berl.)*, vol. 9, no. 5, pp. 765–789, 2019.
- [51] Y. Li, S. He, Q. Huang, Z. Gu, and Z. L. Yu, "A EOG-based switch and its

- application for ‘start/stop’ control of a wheelchair,” *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 1350–1357, 2018.
- [52] N. R. Anandan, “Electrooculogram (EOG) signal classification using moving average technique and its application to drive direct current motors,” *Recent Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 153–159, 2017.
- [53] J. Heo, H. Yoon, and K. S. Park, “A novel wearable forehead EOG measurement system for human computer interfaces,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 7, 2017.
- [54] J. I. Al-Nabulsi, “A Novel Approach to Wheelchair Design and Operation Using Multi-Function Controller,” *J. Comput. Sci.*, vol. 16, no. 7, pp. 1029–1041, 2020.
- [55] A. Jalilifard et al., “Use of spontaneous blinking for application in human authentication,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 903–910, 2020.
- [56] G. Teng, Y. He, H. Zhao, D. Liu, J. Xiao, and S. Ramkumar, “Design and Development of Human Computer Interface Using Electrooculogram With Deep Learning,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 102, pp. 1–10, 2020.
- [57] W.-L. Zheng et al., “Vigilance Estimation Using a Wearable EOG Device in Real Driving Environment,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 170–184, 2020.
- [58] D. Yuan et al., “A closed-loop electrical stimulation system triggered by EOG for acupuncture therapy,” *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 128–140, 2020.
- [59] L. V. Hladek, B. Porr, and W. O. Brimijoin, “Real-time estimation of horizontal gaze angle by saccade integration using in-ear electrooculography,” *PLoS One*, vol. 13, no. 1, pp. 1–24, 2018.
- [60] A. Favre-Félix et al., “Absolute Eye Gaze Estimation With Biosensors in Hearing Aids,” *Front. Neurosci.*, vol. 13, pp. 1–10, 2019.
- [61] E. Kovács, A. Kosztolányi, and A. Kis, “Rapid eye movement density during REM sleep in dogs (*Canis familiaris*),” *Learn. Behav.*, vol. 46, no. 4, pp. 554–560, 2018.