

Prótesis de sustitución sensorial visual para pacientes ciegos

Dr. Luis Ortigoza-Ayala, Dr. Leopoldo Ruiz-Huerta, Dr. Alberto Caballero-Ruiz, Dr. Ernst Kussul

RESUMEN

Empleando la experiencia del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, GMM, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET, de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, que desde 1999 trabaja con el desarrollo de sistemas micromecánicos y sus aplicaciones, se presenta en este trabajo el diseño y construcción de un prototipo de prótesis de sustitución sensorial visual para pacientes ciegos a partir de un sistema de barras efectoras, activadas por electromagnetismo, que se desplazan de manera lineal ejerciendo presión sobre la epidermis del paciente, generando así una matriz de sensaciones puntuales (tres por tres), que serán la base para la reconstrucción de imágenes. Actualmente se trabaja con el desarrollo y la caracterización de las sensaciones generadas por diversas geometrías de las barras efectoras y el impacto de la separación de las mismas para que el sujeto alcance a percibir estímulos independientes; la importancia de lo anterior radica en establecer la mayor relación de número de puntos por unidad de área, dado que al aumentar el grado de resolución de la matriz es posible reconstruir escenas visuales de mayor complejidad. Con estos resultados se espera determinar las geometrías y separación de barras óptimas del sistema.

Palabras clave: Prótesis visual, sustitución sensorial.

SUMMARY

Purpose: Since 1960 many attempts have been made in order to develop visual prostheses for the blind. Most of the devices supported the production of phosphenes through electrical stimulation with microelectrodes at the retina, optic nerve, lateral geniculate or occipital lobe but are incapable to reconstruct a coherent retinotopic map (coordinate match between the image and the visual percept of the patient); furthermore they display important restrictions at the biomaterial level that hinder their final implant through surgical techniques that at the present time offers more risks than real benefits for the patient.

Methods: Considering the new theories about intermodal perception it's possible to acquire visual information through other senses; that's the reason, the Grupo de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, describes the experimental design and psychophysical data necessary for the construction of a visual sensory substitution prostheses with a vibrotactile system.

Results: The vibrotactile mechanism locates different bars over the epidermis in a predetermine way to reproduce a point by point matrix order in a logic sequence of rows and columns that allows the construction of an image with an external device that doesn't require invasive procedures.

Key words: Visual prostheses, sensorial substitution.

INTRODUCCIÓN

Durante la década de los 60 se realiza el primer congreso de visión artificial para personas ciegas en el Instituto Tecnológico de Massachussets de los Estados Unidos de Norteamérica, centrándose el contenido de las ponencias alrededor de un concepto crucial: considerar la producción de un fosfeno (percepción visual descrita como un punto de luz en un fondo negro) como el elemento neurofisiológico básico para la reconstrucción de imágenes en personas ciegas, como

se muestra en la figura 1a. La evidencia científica que da sustento a esta analogía fosfenos-píxeles surge a partir de la producción incidental de fosfenos al estimular eléctricamente la corteza cerebral de pacientes epilépticos mediante electrodos como se muestra en la figura 1b, terapia médica empleada para crisis convulsivas de difícil control.

Con base en el fundamento anterior, se instituye como metodología experimental en el área de visión artificial humana el empleo de electrodos ordenados numéricamente en filas y columnas sobre la superficie de la corteza occipital,

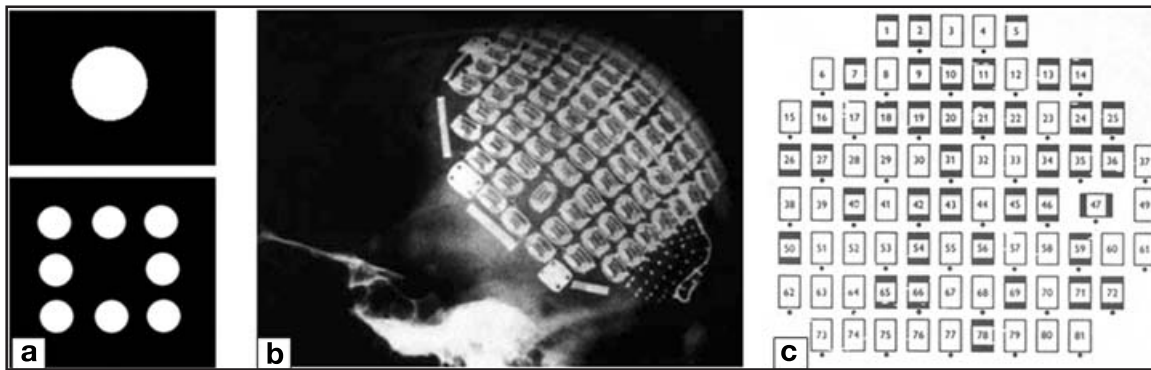


Fig. 1. a) Fosfenos, b) Electrodo colocado sobre corteza cerebral, c) Arreglo matricial de electrodos.

como se muestra en la figura 1c; esto con la finalidad de establecer una correspondencia espacial entre las coordenadas de los electrodos y la localización de los fosfenos reproducidos eléctricamente (1).

No obstante, y contrario a los resultados esperados, se encuentra que no se reproducen fosfenos de geometría circular sino más bien barras de luz con una orientación angular específica; lo que demuestra que a nivel de corteza occipital las neuronas visuales no responden a estructuras simples (fosfenos) sino a la suma de múltiples puntos de luz que conforman estructuras más complejas (barras de luz). Es por eso que, en la actualidad, diversos grupos científicos a nivel mundial han optado por la estimulación eléctrica de terminales nerviosas periféricas como retina y nervio óptico (2, 3). De esta manera se retoma el método experimental implementado en un inicio para la producción de visión artificial a nivel de la corteza occipital: el empleo de electrodos ordenados numéricamente en filas y columnas, pero ahora sobre la superficie de la retina.

A diferencia de lo ocurrido a nivel de la corteza occipital, la retina responde a la estimulación eléctrica con la producción de fosfenos de geometría circular en el sitio específico donde se sitúa el electrodo activado, con la peculiaridad de añadir de manera simultánea fosfenos extras (fenómeno de superposición) en el campo visual de la persona ciega, aun y cuando éstos se encuentran alejados una distancia considerable del área de estimulación de los electrodos activos (4). Debido a ello, se ha planteado en fechas recientes la estimulación eléctrica de los axones que conforman el nervio óptico (5); no obstante, a este nivel la información que llega a cada axón posee un alto grado de información comprimida; desconociéndose en su totalidad cuál es el código de procesamiento neuronal que permite la transformación de la información visual de un punto A (células ganglionares) a un punto B (axones del nervio óptico) (6).

MATERIAL Y MÉTODOS

Propuesta

Con base en los antecedentes antes expuestos se concluye que existen limitantes neurofisiológicas vitales: reconstrucción no controlada de fosfenos en el campo visual de la per-

sona ciega y desconocimiento del código neuronal de procesamiento visual, que impiden el desarrollo de visión artificial tanto a nivel central como periférico, mediante el uso de estimulación eléctrica producida con electrodos. Es por eso que se propone el empleo de una teoría de reciente aparición en el campo de las neurociencias: la substitución sensorial; dicha teoría establece que a partir del sentido táctil es posible la adquisición de información visual (7).

La evidencia científica que da validez al argumento anterior radica en la plasticidad del cerebro, la cual mediante sinapsis de asociación, permite la conexión directa entre el área visual (lóbulo occipital) y el área motora (lóbulo temporal).

A partir de este hecho, surge la alternativa de producir visión artificial mediante una sensación táctil; es decir, recrear punto por punto en la piel del individuo ciego imágenes mediante el concepto teórico: píxeles-fosfenos (ahora denominados “puntos de indentación”, percepción táctil descrita como la sensación de presión en un punto fijo de la piel), con la ventaja fundamental de poder reconstruir de manera controlada los píxeles-fosfenos en el campo visual de la persona ciega a diferencia de lo acontecido en la retina, así como la libertad de establecer un código de procesamiento visual propio sin necesidad de descifrarlo como sucede en el nervio óptico.

Principio de funcionamiento de la prótesis

Empleando la experiencia del GMM (8-10), se plantea el uso de un sistema de solenoides en un arreglo matricial de filas y columnas como se muestra en la figura 2a los cuales, al generar un campo electromagnético, desplazan un elemento magnético (imán) contenido en un pin (barra efectiva) como se muestra en la figura 2b. El mecanismo antes descrito permite situar de manera controlada coordenadas de puntos para la reconstrucción de imágenes.

Parámetros de diseño

Se ha comentado en este artículo, el empleo de la piel para la reconstrucción de los puntos de indentación; no obstante, la topografía de la misma difiere de manera tal que existen zonas en las que hay un número reducido de mecanorreceptores (receptores especializados en la percepción de diversas sensaciones táctiles: presión, vibración, temperatura, tacto grueso y fino) separados entre sí por grandes distancias como en

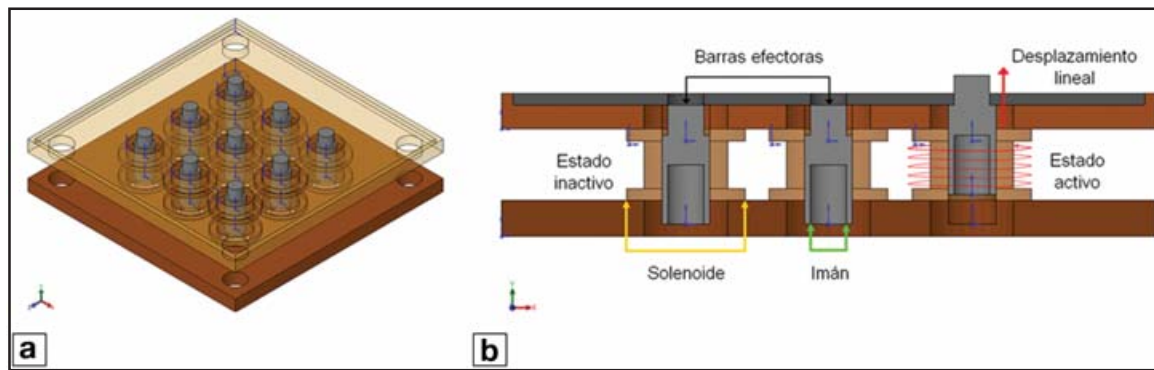


Fig. 2. a) Arreglo matricial de solenoides, b) Principio de funcionamiento de los solenoides.

la espalda; en contraposición, la palma de la mano posee la mayor densidad de mecanorreceptores en todo el cuerpo, lo que hace de ésta, la topografía ideal para establecer la mayor relación de puntos de indentación por unidad de área.

Una vez establecida la topografía blanco, con base en el criterio antes mencionado, es necesario definir las variables que determinan la capacidad para introducir el mayor número de solenoides por área palmar:

1. Distancia de separación mínima entre dos puntos de indentación.
2. Área menor de la cara superior de la barra efectora.

Las dos variables antes comentadas han sido estudiadas ya por otros equipos científicos, pero con la salvedad de que el grupo de estudio se encuentra conformado por sujetos sin minusvalía visual; hecho que impide retomar los resultados obtenidos por éstos para la manufactura de la prótesis de sustitución sensorial, ya que se debe considerar que las personas ciegas poseen un mayor grado de agudeza táctil; hecho que brinda en teoría la posibilidad de introducir un mayor número de solenoides por unidad de área que en individuos sanos. Es por eso que el GMM ha diseñado dos fases experimentales que permitan dilucidar hasta qué punto es factible disminuir tanto la distancia como el área de las barras efectoras en personas ciegas, esto con la finalidad de reducir al máximo posible las dimensiones del arreglo matricial de solenoides.

RESULTADOS

Fases experimentales

Distancia de separación mínima. La distancia de separación mínima desde el punto de vista neurofisiológico se describe como la capacidad del individuo para identificar y discriminar dos estímulos táctiles presentados de manera simultánea (figura 3a), lo que le permite percibir ambos puntos de contacto como dos elementos únicos e independientes entre sí, factor clave para la reconstrucción de imágenes punto por punto.

Para determinar experimentalmente la característica anterior, se ha diseñado mediante un software asistido por computadora arreglos matriciales de solenoides en filas y columnas de 3×3 , manteniendo constante tanto el área total de la

cara superior que contiene a los solenoides como el número de éstos: 9 (figura 3c). Esto modifica exclusivamente la distancia que separa cada solenoide (figura 3b), manufacturándose así un prototipo por cada diseño que disminuye de manera gradual la distancia entre los solenoides (figura 3d).

Cara superior de la barra efectora. Una vez fabricados los prototipos anteriores, se procede al diseño y manufactura de las barras efectoras que se encuentran contenidas en cada solenoide. Para ello se ha modificado tanto la geometría como la superficie de contacto (figura 4a) de las barras efectoras en grupos de 9, esto con la finalidad de producir una variedad geométrica por cada prototipo construido (arreglo matricial de 3×3 que presenta una distancia de separación entre solenoides específica) como se muestra en la figura 4b.

DISCUSIÓN

Estado actual del proyecto

Hasta el momento, se han diseñado y manufacturado tanto las partes mecánicas como eléctricas que conforman los pro-

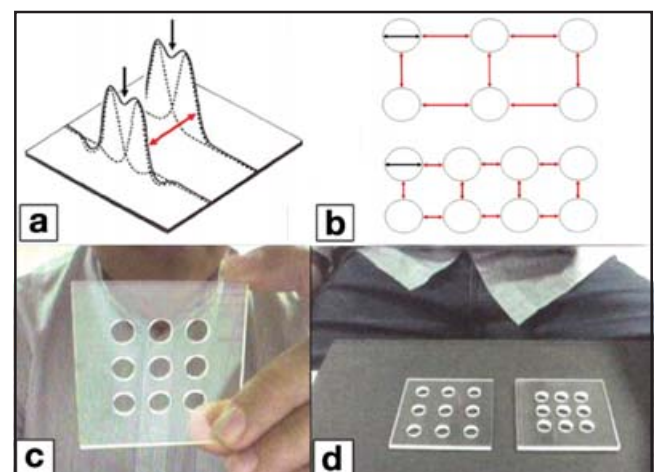


Fig. 3. a) Estímulos simultáneos, b) Disminución gradual de la distancia entre barras efectoras, c) Fotografía que muestra la base inferior de acrílico con 9 barrenos en un arreglo de 3×3 , d) Fotografía en la que puede apreciarse que la distancia entre barrenos en cada una de las bases es diferente.

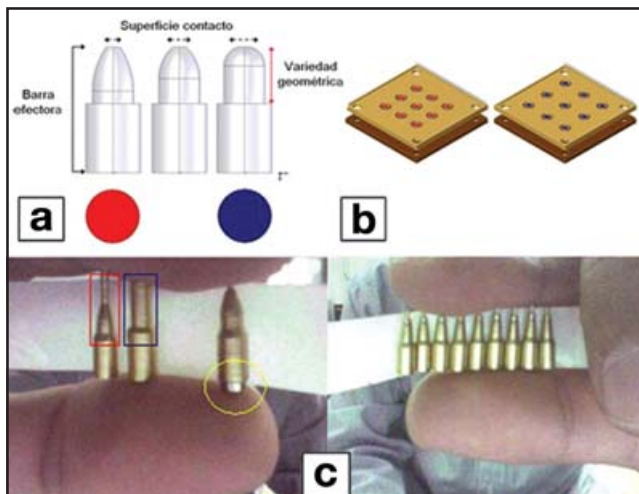


Fig. 4. a) Modelo que representa las geometrías de las barras efectoras, b) Arreglos matriciales con diferentes distancias de separación y geometrías de barras. (Nótese la correlación entre las barras efectoras con menor superficie de contacto [círculo rojo] en la figura a y el arreglo matricial con menor distancia de separación entre barras mostrada en la figura b, c) En la fotografía superior, pueden observarse dos barras manufacturadas acordes al modelo expuesto en la figura a, adviértase el electroimán señalado por el círculo amarillo; en la fotografía inferior se muestran 9 barras efectoras con una misma geometría.

totipos que serán empleados en las fases experimentales previamente descritas (figura 5a).

Actualmente se desarrolla la etapa de control y potencia (figura 5b) que permita caracterizar el desplazamiento simultáneo de (n) número de barras efectoras en el eje vertical como se muestra en la figura 5b; una vez que se obtengan los resultados de esta caracterización, se dará inicio a las fases experimentales en personas ciegas con el fin de determinar la distancia de separación mínima en la que el individuo es capaz de identificar y discriminar dos puntos de contacto con la menor superficie, como dos puntos únicos e independientes entre sí. Lo anterior tiene como propósito establecer hasta qué punto es posible disminuir las dimensiones tanto del solenoide como de la barra efectora para introducir en el arreglo matricial el mayor número de solenoides por unidad de área. Es conveniente mencionar el porqué adjudicar tanta relevancia a la premisa anterior. La razón es que al introducir el mayor número de solenoides por unidad de área, aumenta de manera proporcional el número de puntos de indentación; lo que permite reconstruir imágenes de mayor complejidad visual.

CONCLUSIÓN

Con base en la evidencia científica actual, se considera que diseñar y manufacturar una prótesis de sustitución sensorial visual mediante el sentido táctil es una alternativa viable sobre otros adelantos ya mencionados (estimulación eléctrica mediante electrodos situados sobre corteza occipital, retina o nervio óptico), al poseer ésta las siguientes ventaj

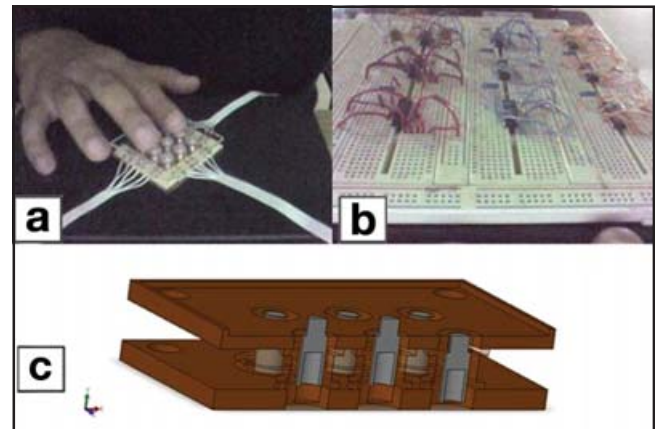


Fig. 5. a) Fotografía donde se observa el mecanismo efector vibrotáctil de la prótesis de sustitución sensorial visual, b) Fotografía del protoboard para la etapa de potencia, c) Modelo que simula el desplazamiento de dos barras efectoras.

jas: reconstrucción controlada de los píxeles – puntos de contacto en el campo visual de la persona ciega, libertad de establecer un código de procesamiento visual propio sin necesidad de descifrarlo y ser un dispositivo externo que no requiere de técnicas quirúrgicas para su implantación.

REFERENCIAS

1. Normann AR, Maynard ME, Rousche JP, Warren JD. A neural interface for a cortical vision prosthesis. *Vision Res* 1999; 39(15):2577-2587.
2. Zrenner E, Stett S, Weiss S, Aramant RB, Guenther E, Kohler K y cols. Can subretinal microphotodiodes successfully replace degenerated photoreceptors? *Vision Res* 1999; 39(15):2555-2567.
3. Humayun MS, De Juan E. Artificial vision. *Eye Sci J Royal College of Ophthalmol* 1998; 12(38):605-607.
4. Humayun MS, De Juan E, Weiland DJ, Dagnelie G, Katona S, Greenberg R y cols. Pattern electrical stimulation of the human retina. *Vision Res* 1999; 39(15):2569-2576.
5. Gorea A. Thoughts on the specific nerve energy. En: Gorea A (ed). *Representations of Vision*. Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press; 1991. p 219-230.
6. Falk G. The Transmission of Rod Signals to Horizontal and Bipolar Cells. En: Gallego A, Gouras P (eds). *Neurocircuitry of the retina a cajal memorial*. New York, USA: Elsevier Science Publishing Company; 1985. p 34-50.
7. Tyler CW. Some tacit assumptions in visual psychophysics. En: Gorea A (ed). *Representations of Vision*. Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press; 1991. p 251-278.
8. Kussul E, Baidyk T, Ruiz L, Caballero A, Velasco G. Scaling down of microequipment parameters. *J Prec Engin* 2006; 30(2):211-222.
9. Kussul E, Ruiz L, Caballero A, Baidyk T, Velasco G, Kasatkin O, Kasatkina L. CNC machine tools for low cost microdevices manufacturing. *J Appl Res Technol* 2004; 2(1):76-91.
10. Kussul E, Baidyk T, Ruiz L, Caballero A, Velasco G, Kasatkina O. Development of micromachine tool prototype for microfactories. *J Micromec Microeng* 2002;12(6):795-812.