

INHIBICION PRESINAPTICA: SU FUNCION EN EL CAMINO VISUAL

A. Quesada Arencibia

Instituto Universitario de Ciencias y Tecnologías Cibernéticas
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus de Tafira, Edf. de Informática y Matemáticas
35017 Las Palmas
alex@ciicc.ulpgc.es

ABSTRACT

Presynaptic Inhibition (PI) basically consists of the strong suppression of a neuron's response before the stimulus reaches the synaptic terminals mediated by a second, inhibitory, neuron. It has a long lasting effect, greatly potentiated by the action of anaesthetics, that has been observed in motoneurons and in several other places of nervous systems, mainly in sensory processing. In this paper we will focus on several different ways of modelling the effect of PI in the visual pathway as well as the different artificial counterparts derived from such modelling, mainly in two directions: the possibility of computing invariant representations against general changes in illumination of the input image impinging the retina (which is equivalent to a low-level non linear information processing filter) and the role of PI as selector of sets of stimulæ that have to be derived to higher brain areas, which, in turn, is equivalent to a "higher-level filter" of information, in the sense of "filtering" the possible semantic content of the information that is allowed to reach later stages of processing.

RESUMEN

El mecanismo de Inhibición Presináptica (IP) consiste básicamente en la anulación de la respuesta de una neurona antes de que esta alcance el terminal sináptico por medio de una segunda neurona inhibidora. Tiene un efecto duradero que aumenta considerablemente con el uso de anestésicos. Este mecanismo ha sido observado en neuronas motoras y en diversas partes del sistema nervioso, fundamentalmente en subsistemas relacionados con procesos sensoriales. En el presente artículo nos centraremos en el estudio y análisis de diferentes modelos que describen el efecto de la IP así como en las diferentes aplicaciones artificiales que se derivan de dichos modelos, fundamentalmente en dos direcciones: la posibilidad de obtener representaciones invariantes frente a cambios

globales de iluminación en la imagen que impacta sobre la retina (lo que equivale a un filtro de información no lineal de bajo nivel) y el papel de la IP como selector de aquel conjunto de estímulos que derivarán en áreas superiores del cerebro, lo que equivale a un filtro de información de alto nivel, en el sentido de filtrar aquel contenido semántico de la información que alcanzará estados avanzados de proceso.

Palabras Clave: Inhibición presináptica, computación invariante, mecanismo de atención visual, flujo de información.

1 INHIBICIÓN DIVISIVA DE LETTVIN. COMPUTACIÓN INVARIANTE

Uno de los primeros formalismos que describió el efecto de la IP se debe a Lettvin [1], que la llamó Inhibición Divisiva Lineal. Lettvin sugirió que la inhibición causa un cambio en la permeabilidad de la membrana equivalente a un cambio en la conductividad eléctrica, de forma que si E es la excitación de la fibra que recibe la inhibición divisiva I , la actividad resultante, A , es:

$$A = \frac{E}{1 + \frac{I}{I_0}}, \quad (1)$$

donde I_0 es una constante. Para $I \gg I_0$, $A = I_0 E / I$.

Este mecanismo fue utilizado por el profesor Roberto Moreno Díaz [2] como parte de las operaciones realizadas por las células ganglionares grupo 2 de la retina de la rana, donde se asumió la existencia de dos tipos de inhibición presináptica: divisiva lineal y no lineal.

En su forma más simple, este mecanismo podría ser utilizado para construir una red de neuronas que obtuvieran representaciones invariantes frente a cambios globales de la entrada. Esta característica es un objetivo deseable en la etapa de pre-proceso de una imagen en cualquier sistema artificial, de forma que sea esta imagen resultante (representación invariante) la que alcance niveles superiores de análisis. Entre los procesos que tienen lugar en la retina aunque se sabe que incluso a nivel de la retina tienen lugar procesos cuya finalidad es la extracción de determinadas características, sin embargo, no se ha descrito ningún mecanismo, amén del de adaptación, que permita obtener una representación que sea invariante frente a cambios globales de iluminación. En el modelo que vamos a presentar el paralelismo es una característica necesaria para que el sistema funcione adecuadamente. Asumiremos que los procesadores (células ganglionares) están dispuestos en capas, que algún tipo de computación es realizada por todas las células sobre sus campos receptivos y que la salida de una capa es una transformación de

los datos originales. Además existirá una capa plexiforme donde la inhibición entre células tendrá lugar (Fig. 1) [3].

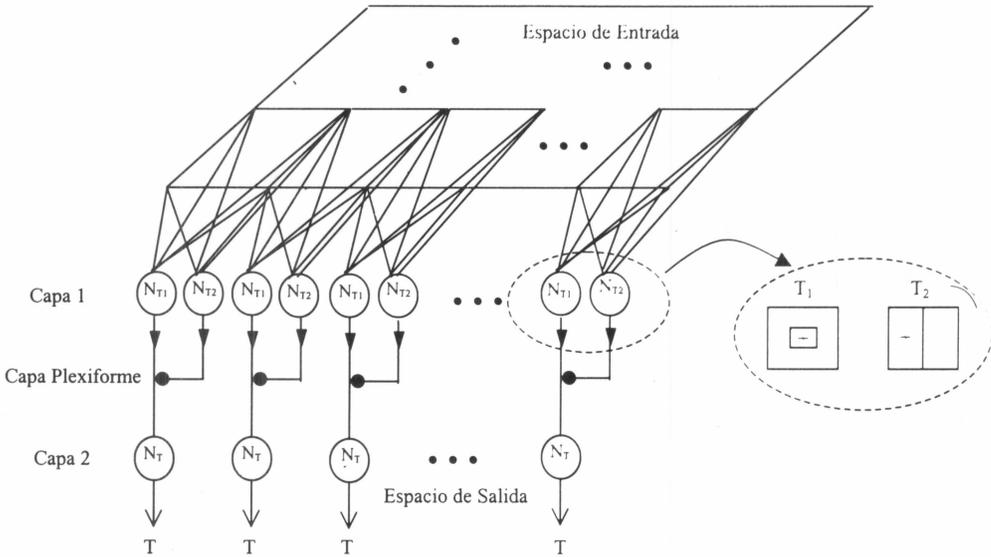


Figura 1: Estructura multicapa paralela con unidades que implementan un modelo de IP.

Sea $I(x',y',t)$ una representación de la imagen original que impacta en los fotorreceptores y sea T la salida de nuestro sistema medida en los axones de las células ganglionares. Sea a su vez $T_1(I(x',y',t))$ y $T_2(I(x',y',t))$ dos transformaciones lineales con núcleos $W_1(x,y,x',y',t)$ y $W_2(x,y,x',y',t)$ tal que:

$$\int_c W_i(x,y,x',y',t) dx' dy' = 0 \quad , \quad (2)$$

donde c es el dominio de cada campo receptivo. Este supuesto se hace sobre la base de que se sabe que la estructura de los campos receptivos de las células ganglionares tiene regiones que se cancelan mutuamente, por ejemplo, regiones excitadoras e inhibitoras que se cancelan entre ellas (regiones centro-periferia, regiones en forma de barra alternativamente excitadoras e inhibitoras, et...).

El efecto de las transformaciones T_1 y T_2 sobre la imagen de entrada se expresa de la siguiente forma:

$$T_i(I(x', y', t)) = \int_c I(x', y', t) W_i(x, y, x', y', t) dx' dy', \quad (3)$$

y el efecto de la inhibición presináptica como el cociente: $T = T_1/T_2$.

En estas condiciones es fácil demostrar que un cambio en la imagen que llega a los fotorreceptores $I(x, y, t)$ de la forma: $I(x, y, t) = K I(x, y, t) + R(t)$, donde K es una constante y $R(t)$ una función del tiempo (lo que equivale a un cambio global en la intensidad de la luz que llega a la retina) no afecta al cálculo de T . Veamos la demostración matemática de la afirmación anterior:

$$T' = \frac{T_1(I'(x', y', t))}{T_2(I'(x', y', t))} \quad \text{cuando } T_2 \gg T_1$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} T' &= \frac{T_1(I'(x', y', t))}{T_2(I'(x', y', t))} = \frac{\int_c kI(x', y', t)W_1(x, y, x', y', t)dx' dy' + \int_c R(t)W_1(x, y, x', y', t)dx' dy'}{\int_c kI(x', y', t)W_2(x, y, x', y', t)dx' dy' + \int_c R(t)W_2(x, y, x', y', t)dx' dy'} = \\ &= \frac{k \int_c I(x', y', t)W_1(x, y, x', y', t)dx' dy' + R(t) \int_c W_1(x, y, x', y', t)dx' dy'}{k \int_c I(x', y', t)W_2(x, y, x', y', t)dx' dy' + R(t) \int_c W_2(x, y, x', y', t)dx' dy'} = \frac{kT_1}{kT_2} = T, \quad (4) \end{aligned}$$

El lugar dentro del sistema nervioso donde podemos ubicar este tipo de computación invariante es el Cuerpo Geniculado Lateral (LGN). La información sale de la retina con destino a regiones cerebrales superiores a través del nervio óptico y siguiendo tres canales de comunicación, siendo el camino geniculo-cortical el más importante en número de fibras que proceden de la retina (el colículo superior y la región pretectal son los otros dos destinos). En el CGL encontramos una representación topográfica de la retina. En el CGL las células están dispuestas en seis capas perfectamente definidas y atendiendo al tamaño de las células, estas capas se dividen en dos grupos: las llamadas capas magnocelulares (nombre con el que se distingue también a las células que se encuentran en dichas capas: células magnocelulares) y las capas parvocelulares (donde se encuentran las llamadas de igual forma células

parvocelulares) [4]. Las capas magnocelulares están formadas por células de gran tamaño que se ocupan fundamentalmente de extraer características "generales" de la imagen de entrada (por ejemplo, procesos que tienen que ver con el nivel de iluminación, etc...). En cambio las capas parvocelulares incluyen neuronas de pequeño tamaño que se extraen características como el color, forma, y en general, del nivel de "detalle".

Por tanto, podemos asumir que el mecanismo de inhibición presináptica que estamos estudiando intervenga en las capas magnocelulares del CGL. Las transformaciones T_1 y T_2 serían efectuadas por las células ganglionares y el resultado alcanzaría el CGL a través del nervio óptico donde las células magnocelulares del CGL serían las unidades encargadas de obtener una representación invariante T usando la inhibición presináptica (ver Fig. 1). La simplicidad que podemos observar en la figura coincide con la encontrada en la fisiología del CGL, donde cada célula realiza contactos sinápticos con un número pequeño de axones procedentes de la retina. Por tanto, una de las posibles salidas del cuerpo geniculado lateral sería una representación invariante del patrón luminoso codificado por las células ganglionares.

2 ESTUDIO DE DIFERENTES MODELOS DEL MECANISMO DE INHIBICIÓN PRESINÁPTICA

Aunque el modelo anterior es bastante útil cuando existen determinadas condiciones de iluminación, existen algunas objeciones tanto desde un punto de vista formal como desde el punto de vista de su aplicación artificial. Por ello, vamos a comenzar tomando en cuenta el comportamiento ideal de este mecanismo inhibitorio (Fig. 2) [5].

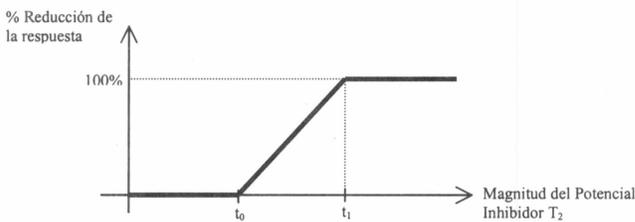


Figura 2

Como se puede observar en la figura anterior, cuando T_2 está por debajo de un cierto umbral t_0 el mecanismo de inhibición presináptica no reduce el potencial de acción en ninguna medida. Entre el umbral t_0 y t_1 presenta un comportamiento lineal y para valores por encima de t_1 actúa de tal forma que reduce el potencial de acción de la neurona inhibida a cero. Por tanto, este comportamiento se puede expresar de la siguiente forma:

$$T = f(T_1, T_2) = \begin{cases} T_1 & \text{if } T_2 < t_0 \\ f(T_1, T_2) & \text{if } t_0 < T_2 < t_1, \\ 0 & \text{if } T_2 > t_1 \end{cases} \quad (6)$$

En el modelo propuesto por Lettvin (1), se ha utilizado una función lineal en el denominador. Sin embargo, la función que mejor encaja con el comportamiento ideal se muestra a continuación:

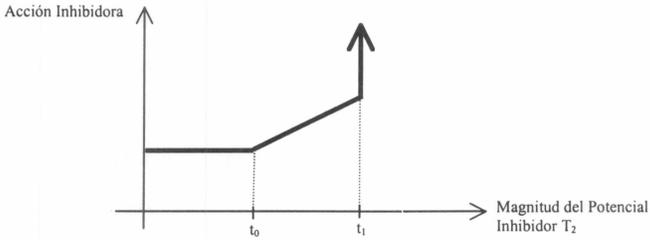


Figura 3

$$f(T_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } T_2 < t_0 \\ aT_2 + b & \text{if } t_0 < T_2 < t_1, \\ \infty & \text{if } T_2 > t_1 \end{cases} \quad (7)$$

En la Fig. 4 se establece una comparación entre los distintos modelos, pudiendo observarse las funciones mencionadas junto con la función ideal y al mismo tiempo presentamos otra función con la que pretendemos obtener un modelo de este mecanismo que se ajuste mejor al comportamiento ideal:

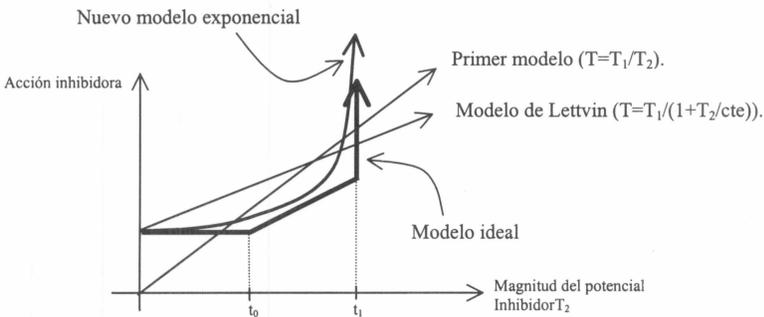


Figura 4

Este nuevo modelo se basa en el uso de una función exponencial de la forma:

$$f(T_2) = \frac{T_2}{a} * e^{\frac{T_2}{b} + 1}, \quad (8)$$

$$T = \frac{T_1}{\frac{T_2}{a} * e^{\frac{T_2}{b} + 1}}, \quad (9)$$

donde a y b son constantes que deben ser obtenidas en función de t_0 y t_1 a partir de datos experimentales. Este modelo es similar al propuesto por Schypperheyn, que la llamó Inhibición Divisiva no Lineal [6].

Para ilustrar en un caso práctico el uso de este mecanismo como medio que permite obtener representaciones invariantes frente a cambios globales de iluminación, hemos desarrollado un ejemplo para el cual hemos utilizado una imagen de 132x102 pixels con 256 niveles de grises (radiografía de un hombro) que se muestra a continuación:



Figura 5

En la siguiente imagen se muestra el resultado de aplicar el modelo propuesto de inhibición presináptica (9), donde para calcular tanto T_1 como T_2 se utilizaron Filtros de Newton [7] (los núcleos de estos filtros cumplen la condición (2), necesaria para que la invarianza tenga lugar; es decir, la suma de los pesos los filtros es cero):



Figura 6

Posteriormente transformamos la imagen original simulando un cambio uniforme en las condiciones de iluminación de la forma:

$$I(x', y', t) + R(t) = I(x', y', t) + 200, \text{ es decir, } R(t) = 200, \quad (10)$$



Figura 7

con lo que obtuvimos la siguiente imagen (se puede apreciar una imagen más clara que la original):



Figura 8

Finalmente efectuamos la misma operación que realizamos anteriormente sobre la imagen original y la imagen resultante obtenida coincide con la anterior, confirmando así la posible función de este mecanismo para obtener una representación invariante frente a cambios globales de iluminación.

La implementación de los ejemplos ha sido realizada por medio de un software específico desarrollado con el lenguaje Borland Delphi 3.0 para Windows 95.

3 LA INHIBICIÓN PRESINÁPTICA COMO POSIBLE MECANISMO PARA CONTROLAR LA ATENCIÓN VISUAL Y EL FLUJO DE INFORMACIÓN

El objetivo de cualquier Teoría de la Visión consiste básicamente es construir un marco teórico y práctico que permita explicar la función visual en los seres vivos y su posible aplicación artificial. El sentido de la visión es, en la mayoría de las especies, aquel que procesa la mayor cantidad de información procedente del exterior, siendo el más importante a la hora de dirigir su comportamiento. La habilidad para discriminar ciertos parámetros y localizar

aquella parte de la información que es significativa es crucial ya sea para un sistema complejo artificial o natural [8].

En un artículo previo [9] ya ha sido propuesto una construcción teórica llamada Transformación Foveal Dirigida, TFD, como un primer paso a la hora de modelar los mecanismos de atención que rigen los procesos visuales de los vertebrados. El núcleo de la TFD es una variación de la media de movimiento que presenta la mayor agudeza en una zona particular de la retina (llamada fovea). Originalmente esta área de mayor resolución se expande desde el centro de la imagen. En la TFD, el dominio donde se concentra la mayor resolución se puede localizar en torno a cualquier punto de la imagen y al mismo tiempo se puede especificar cualquier tamaño foveal. Por otro lado también es posible definir en la zona de la parafovea transformaciones donde la complitud no sea un factor crucial. De esta forma, podemos ver el objetivo de definir estas transformaciones en diferentes áreas de la imagen como una forma de fijar la atención en dichas áreas. En las zonas parafoveales también se extrae información pero existe una pérdida de resolución, de forma que una vez que el evento o característica ha sido discriminado, la fovea podría situarse sobre el mismo con el fin de realizar un análisis más detallado. La justificación a todo ello parte de una idea básica: economía de computación: no existe ningún sistema visual conocido que tenga una gran fovea (en ningún caso sobrepasa el 10% del total del sistema) ya que de otra forma sería imposible procesar y transmitir la cantidad de información adquirida, necesitándose tractos ópticos más complejos y de mayor magnitud, además de muchas más conexiones en los estados intermedios del camino visual.. Por tanto, el objetivo sería conseguir un cierto "balance económico" entre la complejidad estructural y la información específica a transmitir.

Una paso más en la simulación del flujo de información y los mecanismos de atención en el camino visual sería combinar el concepto mencionado anteriormente (TFD) con la acción de la Inhibición Presináptica. El objetivo sería resaltar alguna característica u objeto en la imagen en detrimento del resto (pérdida de resolución), asumiendo que no contiene nada relevante.

En la formulación original de la TFD el procedimiento seguido para localizar un evento visual en la imagen de entrada y concentrar la mayor cantidad de computación en el mismo se realiza en tres pasos:

Primero se localiza el centro de luminancia de la región/objeto. Las coordenadas del centro de luminancia actuarán como las coordenadas del centro de la fovea.

- Segundo, se localiza el punto más externo del objeto y se calcula la distancia desde el centro de la fovea al mismo.
- Tercero, usamos esta distancia con el fin de calcular el tamaño de la fovea.

El mecanismo estudiado de IP completaría el proceso, existiendo un camino de realimentación desde la corteza hasta el CGL que permitiría "filtrar" aquella información que alcanzará regiones superiores del cerebro (Fig. 9)[10]. Resumiendo, el proceso sería el siguiente:

- Primero, una descripción retinal en términos de contraste, bordes, color y parámetros relacionados con movimiento presente en los axones de las células ganglionares alcanza el CGL [10,11,12].
- Segundo, esta información se transforma en una representación de mayor contenido semántico (localización de centro de gravedad, áreas de color, etc...) y es enviada a las primeras capas de la corteza visual.
- La decisión de seleccionar la posición geográfica del objeto que es de interés se realiza en la corteza, que envía señales de realimentación hacia el CGL y por medio de la IP controla que información alcanzará efectivamente el CGL.

Por tanto, este mecanismo se podría proponer como un mecanismo de atención visual de "primer orden": se trataría de una respuesta automática en función de los estímulos externos.

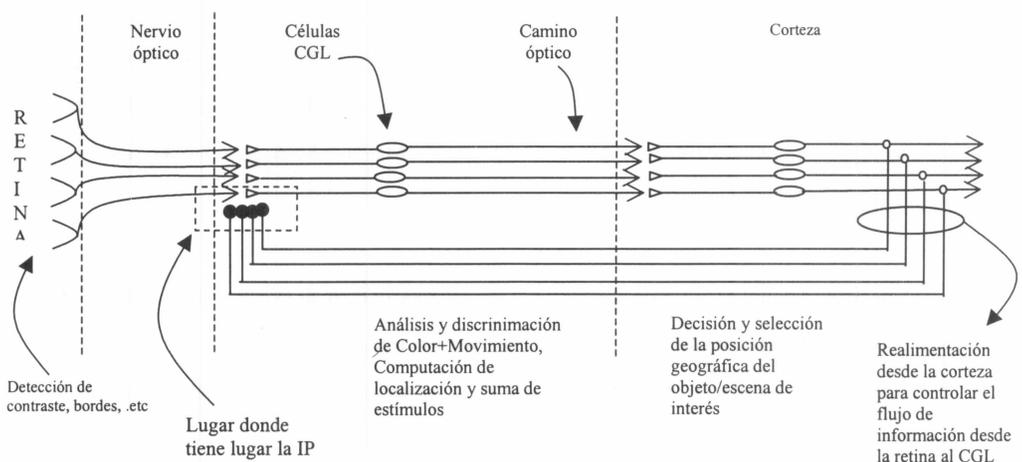


Figura 9

4 CONCLUSIONES

Aunque se necesita más información acerca de la conectividad de este mecanismo en el CGL, podemos pensar que interviene en dos operaciones: computación invariante y control del flujo de información. Mecanismos que obtengan representaciones invariantes de determinadas características en los primeros pasos de proceso de información son importantes en el sistema nervioso ya que proporcionan las bases para el reconocimiento fiable de patrones y movimiento. Esto nos lleva a pensar que la corteza visual trabaje, al menos en los primeros pasos, con una versión invariante de bajo nivel de la imagen de entrada. Por otro lado, existe una necesidad de controlar la cantidad de información que alcanza finalmente el cerebro, lo que puede llevarse a cabo, en función de la conectividad de los primeros estados del camino visual, por medio de dos estructuras: primero la existencia de la Fóvea en la retina, donde la resolución es máxima, y segundo, un control del flujo de información en el CGL (via IP). En ambos, computación invariante y control de información, el mecanismo de IP juega un papel crucial.

Desde un punto de vista artificial y en relación a la aplicabilidad práctica de las ideas presentadas, el mecanismo de IP, implementado de forma paralela, es susceptible de ser utilizado en sistemas de percepción artificial, fundamentalmente en proceso de imagen, con el fin de obtener representaciones invariantes frente a cambios generales en las condiciones de iluminación.

REFERENCIAS

- [1] Lettvin, J.Y. (1962), *Form-function relations in neurons*, Research Lab. of Electronics, MIT Quarterly Progress Report, pp. 333-335.
- [2] Moreno-Díaz, R. (1965), *An analytical model of the Group 2 ganglion cell in the frog's retina*, Instrumentation Lab., MIT Quarterly Progress Report, pp. 1-34.
- [3] Muñoz-Blanco, J. A. (1987), *Jerarquización de estructuras de nivel bajo y medio para reconocimiento visual*, PhD Dissertation, University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas.
- [4] Carpenter, M.B., Truex, R. C. (1969), *Human Neuroanatomy*, Williams and Wilkins, Baltimore, USA.
- [5] Graham B., Redman S. (1994), *A Simulation of Action Potentials in Synaptic Boutons During Presynaptic Inhibition*, Journal of Neurophysiology, Vol. 71, No 2.

- [6] Hagiwara S., Tasaki I. (1958), *A Study of the Mechanism of Impulse Transmission Across the Giant Synapse of the Squid*, Journal of Neurophysiology, Vol. 143.
- [7] Moreno-Díaz jr R. (1993), *Computación Paralela y Distribuida: relación estructura-función en retinas*, PhD Dissertation, University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas.
- [8] Kandel, E. R. (1990), *Processing of form and movement in the visual system*, Sensory Systems of the Brain: Sensation and Perception.
- [9] Bolívar-Toledo, O., Moreno-Díaz jr, R., Quevedo-Losada, J. C., (1998), *Image Transforms based on Retinal Concepts*, R. Trappl Ed. Cybernetics and Systems 98, University of Vienna, Austria, pp.312-316.
- [10] Moreno-Díaz jr, R. (1996), *On structure, function and time in retinae*, R. Moreno-Díaz and Mira-Mira Eds. Brain Processes, Theories and Models, The MIT Press, Cambridge, Mass, USA, pp. 430-435.
- [11] Alemán-Flores, M., Leibovic, K. N., Moreno-Díaz jr, R. (1997), *A computational model for visual size, location and movement*, R. Moreno-Díaz and F. Pichler Eds. Computer Aided Systems Theory, Springer Lecture Notes in Computer Science, V1333, pp.406-419.
- [12] Alemán-Flores, M., Moreno-Díaz, R., Moreno-Díaz jr, R. (1998), *A bio-inspired method for visual movement discrimination*, R. Trappl Ed. Cybernetics and Systems 98, University of Vienna, Austria, pp.307-311.