

**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Ingeniería**  
**II Congreso Internacional**  
**de Ingeniería**

**Marzo 2006**

**MEMORIA**  
**creando con ciencia**

[www.uaq.mx/ciingenieria](http://www.uaq.mx/ciingenieria)  
[cong\\_ing@uaq.mx](mailto:cong_ing@uaq.mx)  
ISBN: 968-845-296-3  
Edición y Diseño



CONGRESO INTERNACIONAL  
DE **INGENIERIA**



# CODIFICACION Y DECODIFICACION NEURAL

## Neural Encoding and Decoding

David Oswaldo Pérez Martínez<sup>1,3</sup>      Dr. Roberto Salas Zuñiga<sup>2</sup>  
Dr. Hugo Merchant Nancy<sup>3</sup>

1. Universidad Autónoma de Querétaro, Licenciatura en Matemáticas
2. Metrología Integral y Desarrollo S.A.
3. Instituto de Neurobiología, UNAM, campus Juriquilla.

**RESUMEN.** Las señales eléctricas generadas por las neuronas, denominadas potenciales de acción, son el medio por el cual el cerebro recibe, analiza y transmite información.

Caracterizar estas señales en relación a los parámetros de estímulos sensoriales o del movimiento voluntario que los evocan es un problema fundamental en las neurociencias.

La codificación neuronal tiene el trabajo de establecer la relación paramétrica entre el estímulo y la respuesta neuronal, mientras que la decodificación neuronal tiene como objetivo caracterizar la relación entre la respuesta de poblaciones neuronales y el estímulo. El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta computacional que realice estos dos procesos (Codificación y Decodificación Neuronal) para señales neurofisiológicas relacionadas con estímulos o movimientos en una o varias dimensiones.

### 1. INTRODUCCIÓN

El cerebro humano y el de los primates es una de las máquinas más compleja conocidas en el universo, capaz de procesar información multidimensional con gran eficacia, incluyendo cinco modalidades sensoriales. Asimismo el cerebro es capaz de memorizar, categorizar y discriminar aspectos sensoriales y emotivos, y de generar una hipótesis del mundo con la cual el sistema motor puede generar movimientos extremadamente complejos. La unidad básica del cerebro es la neurona, y existen alrededor de  $10^{11}$  neuronas clasificadas en al menos mil tipos diferentes. A pesar de esto, todas ellas comparten una estructura básica. Una neurona contiene cuatro regiones definidas morfológicamente: el cuerpo celular, las dendritas, el axón y las terminales presinápticas. El cuerpo celular (soma) es el centro de la célula, contiene los genes, sintetiza las proteínas de la célula, también es el origen de dos clases de ramificaciones: un axón y varias dendritas. Las dendritas se ramifican en forma de árbol y son las encargadas de la recepción de señales procedentes de otras neuronas. El axón es único y es el encargado de conducir señales a otras neuronas. Un axón puede mandar señales eléctricas a distancias entre  $0.1mm$  hasta  $1m$ . Al final del axón este se divide en finas ramas que forman los lugares de comunicación con otras neuronas llamadas terminales presinápticas. El punto donde se comunican dos

neuronas se llama sinapsis, la neurona que manda la señal se llama célula presináptica y la que recibe la señal se llama célula postsináptica.

Las señales eléctricas que genera el axón se denominan potenciales de acción, tienen una intensidad de  $100mV$  (el potencial eléctrico normal de la neurona esta entre  $-70mV$ ) y una duración aproximada de  $1ms$ . Los potenciales de acción son el código primario con el cual el cerebro recibe, analiza y transmite información.

Las neuronas están especializadas para procesar diferentes tipos de información, unas procesan información sensorial, otras preparan y ejecutan movimientos y la gran mayoría establecen los procesos intermedios entre los estímulos y las respuestas motoras, conllevando a las transformaciones sensorio-motoras y los diversos aspectos cognitivos

Establecer la relación entre la variable del comportamiento (sensorial, motora o cognitiva) y la respuesta neuronal es una tarea complicada, debido a que la respuesta tiene cierto grado de variabilidad con respecto a la variable de interés. Sin embargo, diferentes algoritmos han sido desarrollados para establecer la relación estímulo-respuesta (codificación) y también la relación respuesta-estímulo (decodificación). Este trabajo describe diferentes herramientas computacionales para codificar y decodificar información neuronal. Adicionalmente, se evalúa la efectividad de estos métodos en un ejemplo específico: la

dirección de movimiento del brazo en el primate.

## 2. CODIFICACIÓN NEURONAL

La primera parte de este trabajo es encontrar la relación estímulo-respuesta, es decir encontrar una regla, la cual determine como responde una neurona a cierto rango del estímulo o parámetro conductual. Este proceso se llama codificación neuronal.

Los potenciales de acción son la unidad mínima de procesamiento de información, y esta información se codifica en la sucesión temporales de los potenciales y no en la forma de éstos. Así el potencial de acción se puede expresar como un número real (tiempo de aparición del potencial de acción), la duración del potencial de acción es insignificante (cerca de  $1ms$ ) y tampoco se toma en cuenta.

La respuesta neuronal se representa como una cadena de números reales, que van a representar los tiempos en que ocurrió un potencial de acción. Entonces, la respuesta neuronal es:

$$\{t_1, t_2, \dots, t_n\} \quad (1)$$

Estos tiempos fueron tomados de un experimento de duración  $T$  en el cual se presentó  $s$  ( $s$  representa un parámetro conductual: sensorial, motor o cognitivo). Entonces  $t_i \in [0, T]$ .

Una forma en la que se codifica información es midiendo el número de potenciales de acción durante la presentación del estímulo, es decir, la tasa de disparo, que se define como:

$$r = \frac{n}{T} \quad (2)$$

donde  $n$  es el número de potenciales de acción que ocurrieron en el intervalo  $[0, T]$ .

La tasa de disparo media es el promedio de las tasas de disparo  $r$  para varios ensayos en una condición  $s$ , se denota  $\langle r \rangle$ . Esta es la medida que se utiliza, debido a la variabilidad de la actividad neuronal en respuesta a los estímulos. Así, la relación estímulo respuesta se expresa como  $\langle r \rangle$  en función del estímulo  $s$ , como:

$$\langle r \rangle = f(s) \quad (3)$$

Esta función  $f$  es llamada función de sintonización. Algunas funciones comúnmente usadas en neurobiología son: Gaussiana, cosenoidal, sigmoideal, etc.

La tarea de la Codificación es estimar la función de sintonización, encontrar una función  $f : S \rightarrow R$ , donde  $S$  es el espacio de muestra de los estímulos y  $R$  es la respuesta neuronal. Un aspecto interesante al tener  $\langle r \rangle = f(s)$  es definir cual es la probabilidad

de que ocurra una taza de disparo  $r$  en un tiempo  $T$ , dado un estímulo  $s$ . Se ha descrito en la literatura que  $r$  normalmente tiene una distribución de Poisson con intensidad  $f(s)$ .

Sabemos que es difícil hacer ensayos para todos los posibles estímulos, así que se hacen unos cuantos ensayos y enseguida se estimara la función de sintonización ajustando los datos a cada función. Finalmente, se determina que función explica mejor la variabilidad total de la respuestas.

En este trabajo se tienen dos posibles funciones de sintonización, estas son:

Gaussiana:

$$f_G(s, s_p, h, k) = h \cdot e^{-\left(\frac{\|s, s_p\|}{k}\right)^2} \quad (4)$$

Cosenoidal:

$$f_C(s, s_p, h, k) = h \cdot \cos(k \cdot \|s, s_p\|) \quad (5)$$

donde  $s$  es la variable independiente,  $h$  es la altura máxima de la función,  $k$  es un parámetro de dispersión,  $s_p$  es el estímulo preferencial y  $\|s, s_p\|$  es la distancia euclidiana entre  $s$  y  $s_p$ .

Sea un conjunto discreto  $S$  de estímulos, y sea  $r_s$  la respuesta neuronal al tener la conducta  $s$ . Se requiere tener los parámetros  $P = \{s_p, h, k\}$  de las funciones de sintonización para ajustar estos datos con las funciones. Así definimos la función de error para las dos funciones que dependen de los parámetros  $P = \{s_p, h, k\}$  como:

$$Err_G(s_p, h, k) = \sum_{s \in S} r_s - f_G(s) \quad (6)$$

$$Err_C(s_p, h, k) = \sum_{s \in S} r_s - f_C(s)$$

Minimizar estos errores no es un problema trivial, pues las funciones son no lineales.

El método que se utiliza es un método de descenso rápido, que encuentra un mínimo local de las funciones  $Err_G(s_p, h, k)$ ,  $Err_C(s_p, h, k)$ . Este método a grandes rasgos se describe a continuación:

1. Evaluar  $Err(s_p, h, k)$  en una aproximación inicial  $P_0 = \{s_{p0}, h_0, k_0\}$ .
2. Determinar una dirección desde  $P_0$  que origine una disminución del valor de  $Err(s_p, h, k)$ .
3. Desplazar una cantidad apropiada hacia esta dirección y llame al nuevo vector  $P_1$ .
4. Repetir los pasos 1 a 3 reemplazando  $P_0$  por  $P_1$ .

Con la ayuda del cálculo se determinan la dirección en el paso 2, esta es:

$$\left( \frac{\partial Err}{\partial s_p}(s_p, h, k), \frac{\partial Err}{\partial h}(s_p, h, k), \frac{\partial Err}{\partial k}(s_p, h, k) \right) \quad (7)$$

que mide el cambio del valor de la función  $Err(s_p, h, k)$ .

Por último en la codificación la función de sintonización permite darse cuenta que una neurona sólo responde a un rango limitado de estímulos, por lo tanto se requiere de una población de neuronas que cubra todos los estímulos. Por ejemplo, cada neurona de la corteza visual responde sólo a ciertos colores, a ciertas orientaciones, o a ciertas texturas. Esto es muy importante en el proceso de decodificación que veremos enseguida.

### 3. DECODIFICACIÓN NEURONAL

La segunda parte del trabajo es describir la relación entre respuesta-estímulo, este proceso se llama decodificación neuronal.

Con la codificación nos damos cuenta que una neurona sólo responde a un rango limitado de estímulos. Así, para describir todo el rango de estímulos con la respuesta neuronal se requiere de una población de neuronas sintonizadas.

Supongamos que tenemos la respuesta de la población de neuronas, que la vamos a expresar con

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_N] \quad (8)$$

donde  $r_i$  es la tasa de disparo de la neurona  $i$  de la población. Además supongamos que  $f_1(s), f_2(s), \dots, f_N(s)$  son las funciones de sintonización de estas neuronas.

Existen tres métodos principales para hacer esta decodificación, estos son: Método Vectorial, Método de Bayes y Método de Máximo de Verosimilitud.

El primero es directo, ponderando la respuesta neuronal con los estímulos preferentes de las neuronas, es decir:

$$s_{pob} = \sum_{i=1}^N r_i s_i \quad (9)$$

donde  $r_i$  es la tasa de disparo media de la neurona  $i$ , y  $s_i$  es el estímulo preferencial de la neurona  $i$ . Los estímulos preferentes son obtenidos de la curva de sintonización  $f_i(s)$ , y es el estímulo  $s_i$  tal que  $f_i(s_i)$  es máximo. Este método es sencillo, sin embargo no es óptimo, ya que requiere un número mínimo de neuronas y una distribución uniforme de estímulos preferenciales.

El segundo y tercer método, están basados en inferencia estadística, y son óptimos a comparación del método vectorial. En ambos métodos se requiere calcular la probabilidad condicional  $p[r|s]$  (probabilidad de que ocurra  $r$  dado que ocurrió  $s$ ).

Para la probabilidad condicional, se hace la suposición de que la respuesta neuronal de cada neurona es estadísticamente independiente de la respuesta de las demás neuronas de la población, aunque esto no es necesariamente cierto. Esta suposición permite el cálculo de  $p[r|s]$  más sencillo.

$$p[r|s] = \prod_{i=1}^N p[r_i|s] \quad (10)$$

Las probabilidades condicionales individuales  $p[r_i|s]$  tienen un modelo de Poisson con intensidad  $f_i(s)T$ .

Para el caso de Máximo de Verosimilitud la estimación es:

$$s_{mv} = \arg \max_{s \in S} P[r|s] \quad (11)$$

Para el caso de Bayes se encuentra la probabilidad condicional  $p[s|r]$  con la ley de Bayes

$$p[s|r] = \frac{p[r|s]p[s]}{p[r]} \quad (12)$$

Y la estimación es

$$s_{bayes} = \int_{s \in S} P[s|r] s \, ds \quad (13)$$

Las estimaciones  $s_{pob}, s_{mv}, s_{bayes}$ , dependen de  $r = [r_1, r_2, \dots, r_N]$  y  $f_1(s), f_2(s), \dots, f_N(s)$ , es decir del número de neuronas que se utiliza para decodificar y los parámetros de las funciones de sintonización.

### 4. CDN

CDN (Codificación y Decodificación Neuronal) es una rutina realizada con ayuda del software MATLAB 7.1, y principalmente se tendrán tres subrutinas.

1) Extracción. La extracción es descargar información de la base de datos, que me es necesaria para efectuar la codificación y decodificación neuronal. Información como: tasa de disparo de la neurona de cada ensayo y de cada estímulo, tiempos en donde se presentó el estímulo, etc.

2) Codificación. Estimar las funciones de sintonización de cada neurona.

3) Decodificación. Estimar el estímulo que provoca la respuesta  $r = [r_1, r_2, \dots, r_N]$  de una población de neuronas.

La respuesta neuronal esta medida directamente de las neuronas por medio de electrodos, que son insertados en la corteza cerebral del sujeto, (que en las aplicaciones de este trabajo, el sujeto es un mono), Esta respuesta estará representada por los tiempos en donde hay un potencial de acción, y son guardados en una base de datos, de la cual se harán los procesos de codificación y decodificación neuronal.

## 5. RESULTADOS Y APLICACIONES

Las subrutinas del CDN fueron probadas en una base de datos neurofisiológicos amablemente prestada por el laboratorio del Dr. Apostolos P Georgopoulos del Depto. de Neurociencias Universidad de Minnesota, EU. Estos datos provienen de un experimento neurofisiológico en el que dos monos fueron entrenados para realizar movimientos de alcance en tres dimensiones. Los posibles estímulos son las direcciones de movimiento de su brazo (Fig 1a), en términos matemáticos el espacio de estímulos es una esfera unitaria. La actividad de las neuronas de la corteza motora primaria fueron registradas durante la ejecución de la tarea. En la Figura 1(b) se muestra la respuesta de una neurona en este paradigma.

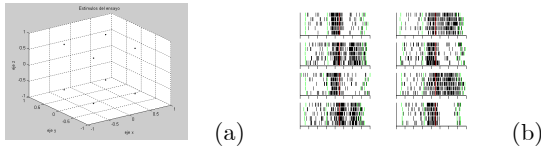


Figura 1. (a) Los puntos representan las direcciones que están localizadas en las aristas de un cubo con centro en el origen. (b) Respuesta de una neurona, en la figura se presenta la respuesta en cada uno de las ocho direcciones y cada uno de los cinco renglones son los cinco ensayos, las líneas verticales son los potenciales de acción.

En la Codificación se utilizaron dos funciones, Gaussiana y Cosenoidal, en la Figura 2 se muestran los ajustes de estas a los datos de la neurona en la Figura 1.

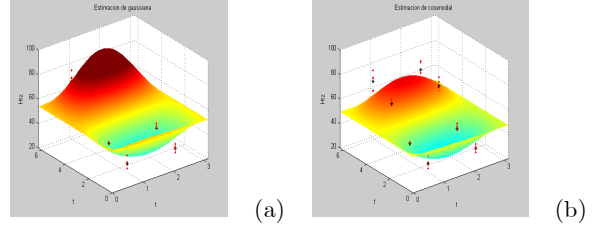


Figura 2. (a) Tazas de disparo de la neurona de la Figura 1 ajustada con la función Gaussiana (b) Ajuste con la función Cosenoidal. La esfera se represento en coordenadas polares es decir con  $\theta$  y  $\phi$  y el radio no se toma en cuenta ya que siempre es 1. Los puntos rojos son las tazas de disparo y la superficie graficada es la función de sintonización respectiva.

Para el caso de la decodificación se realizó una simulación de experimento anterior. La decodificación se aplicó a una población de 8 neuronas con función de sintonización Gaussiana y los estímulos preferenciales de las neuronas están distribuidos uniformemente sobre la esfera. Se tomó un estímulo arbitrario, que en este caso es la dirección  $[-1.1111 \ 0.0654 \ 1.6617]$  de color negro en la figura. La respuesta es simulada con los valores de la función de sintonización en el estímulo dado con los parámetros de cada neurona. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 3.

Los vectores mostrados son:

M. Vectorial	$[-1.0057 \ 0.0843 \ 1.7267]$
M. Bayes	$[-1.1385 \ 0.0781 \ 1.6425]$
M. Verosimilitud	$[-1.1329 \ 0.0772 \ 1.6464]$

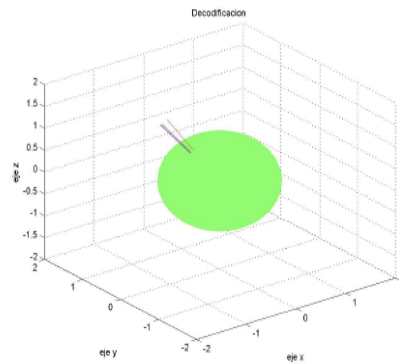


Figura 3. Decodificación de un estímulo. El vector negro es el estímulo original, el rojo es el vector estimado por el método vectorial, el azul con el método de bayes y el magenta es con el método de máximo de verosimilitud.

## 6. POSIBLES APLICACIONES

La rutina CDN (Codificación y Decodificación Neuronal) es una herramienta útil para estudios de problemas neurofisiológicos, donde intervenga la relación entre la conducta y la respuesta neuronal.

## 7. CONCLUSIÓN

La Codificación y Decodificación Neuronal son de importancia en las Neurociencias, porque explican como esta se relaciona la conducta con las respuesta del cerebro. Por ejemplo, con la Codificación se puede obtener el estímulo preferencial y la amplitud con que responde una neurona en relación a un estímulo. Esta información no solo permite identificar las estructuras corticales y subcorticales que procesan un tipo de parámetro conductual, sino también como lo hacen La Decodificación sirve para predecir un estímulo que fue utilizado para modular la actividad de una población de neuronas. Esta herramienta de análisis permite evaluar cuanta información existe en la población de neuronas, de tal forma que se puede determinar si la actividad de estas neuronas es capaz de reconstruir el estímulo apropiadamente.

Resultados preliminares utilizando la Codificación indican que la función gaussiana es un función robusta para explicar la respuestas neuronales en la corteza motora en la tarea de alcance en 3D. Esto concuerda con estudios previos donde se indica que la función gaussiana es un buen modelo.

La decodificación depende de varios aspectos, como es el número de neuronas de la población, la amplitud de la respuesta, entre otras. Al hacer la simulación de la decodificación, se muestra que entre mas neuronas haya en la población, menor es el error de estimación. También el error disminuye en poblaciones en que las neuronas son muy específicas, es decir, con una curva de sintonización muy aguda, con tasas de disparo muy altas a ciertos estímulos o muy bajas para otros. Este fenómeno no es desconocido para los neurofisiólogos, pues se sabe que en la corteza visual, las neuronas responden específicamente a parámetros del estímulo visual.

Así este trabajo es una herramienta útil para estudiar problemas neurofisiológicos.

## 8. REFERENCIAS

1. P. Dayan, L. F. Abbot, Theoretical Neuroscience: computational and mathematical modeling of neural system, Massachusetts Institute of Technology 2001.
2. J. H. Zar, Biostatistical Analysis, Prentice Hall 1996.

3. N. R. Draper, H. Smith, Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, Inc. 1966.
4. R. Sibson, J. E. Cohen, Mathematics in Biology, Academic Press Inc, 1981.
5. L. Ljung, System Identification, Theory for the user, Prentice Hall 1999.
6. C. R. Rao, Linear Statistical Inference and Its Applications, John Wiley & Sons, Inc. 1965.
7. N. S. Bakhvalov, Numerical Methods, Mir Publishers, 1977.
8. P. E. Caines, Linear Stochastic System, John Wiley & Sons, 1988.
9. Richard L. Burden, Análisis Numérico, Thompson 1998.