

مدل نرونی ایزایکوویچ

یک نرون معمولی را می‌توانیم در سه قسمت با عملکردی مجزا ببینیم، دندریته‌ها، سما و آکسون. دندریته‌ها در نقش ورودی در یک سیستم هستند که سیگنال‌ها را از نرون‌های دیگر جمع‌آوری می‌کنند و سپس آن سیگنال‌ها را به سما انتقال می‌دهند. و سما هم در نقش CPU عمل می‌کنند و پردازنده مرکزی است که عملیات‌های مهم غیرخطی را انجام می‌دهند. اگر تمام ورودی از یک آستانه (Threshold) تجاوز کند، یک سیگنال خروجی ساخته می‌شود. سیگنال خروجی توسط خروجی سایر سیستم‌ها گرفته شده‌است (به واسطه آکسون، که سیگنال را train spike به نرون دیگر منتقل می‌کند) از آنجایی که تمام اسپایک‌های نرون داده شده به طور یکسان به نظر می‌رسند، شکل Action Potential هیچ اطلاعاتی را به همراه ندارد و در عوض آن چیزی که مهم است، تعداد و زمان اسپایک‌هاست.

بیشتر نرون‌ها از این نظر excitable هستند که می‌توانند در هنگام stimulate شدن voltage spike داشته باشند.

در این روش، یک شبیه‌سازی رایانه‌ای از یک شبکه عصبی نیاز دارد که الگوهای تولید شده توسط سلول‌های بیولوژیکی را در نظر گرفته باشد و آن‌ها را برای ما توضیح دهد. برای این کار باید دو شرط را برآورده کنیم:

1. مدل باید از نظر محاسباتی ساده و فاقد پیچیدگی باشد.
2. این مدل باید قادر به نمایش دادن الگوهای غنی firing توسط نرون‌های بیولوژیکی واقعی باشد.

مدل هاچکین-هاکسلی که قبلاً توضیح در کلاس بررسی شده است از نظر محاسباتی برای ما بازدارندگی دارد و فقط می‌تواند چند نرون را در زمان واقعی شبیه‌سازی کند. هدف ما شبیه‌سازی رفتار جمعیت نرون‌ها در زمان واقعی نیست. ما مدل پیشنهادی ایزایکوویچ را بررسی خواهیم کرد. بر خلاف مدل هاچکین-هاکسلی، مدل ایزایکوویچ بیوفیزیک عصبی را به خود اختصاص نمی‌دهد. بلکه از محاسبات ریاضی برای محاسبه طیف گسترده‌ای از spiking patterns های cortical neurons استفاده می‌کند. خروجی بسیار واقع بینانه و از نظر زیست‌شناختی پذیرفتنی است. مقدار چهار پارامتر a ، b ، c و d که در مدل ایزایکوویچ استفاده می‌شود، spiking و bursting behavior انواع شناخته شده cortical neuron را تعیین می‌کند.

سیر زمانی پتانسیل غشای v توسط معادلات دیفرانسیل زیر شرح داده شده است:

$$1. \frac{dv}{dt} = c_1 v^2 + c_2 v + c_3 - c_4 u + c_5 I$$

$$2. \frac{du}{dt} = a (bv - u)$$

و برای رابطه after-spike:

1. If $v \geq +30\text{mV}$, then $v \rightarrow c$ and $u \rightarrow u + d$ where u is the membrane recovery variable.

و ابعاد و مقادیر پارامترهای مدل:

v	membrane potential [mV]
t	time [ms]
$\frac{dv}{dt}$	time rate of change in membrane potential [mV/ms]
u	recovery variable [mV]
I	external current input to cell (synaptic currents or injected DC-currents)

The constants are:

1. $c_1 = 0.04 \frac{\text{mV}}{\text{ms}}$
2. $c_2 = 0.05 \frac{1}{\text{ms}}$
3. $c_3 = 140 \frac{\text{mV}}{\text{ms}}$
4. $c_4 = 1 \frac{1}{\text{ms}}$
5. $c_5 = 1 \frac{\text{mV} \cdot \Omega}{\text{ms} \cdot \text{A} \cdot \text{ms}}$

متغیر بازیابی غشاء (membrane recovery) u فیدبک منفی را به پتانسیل غشاء v می‌دهد و فعال سازی جریان‌های K^+ و غیرفعال کردن جریان‌های Na^+ را بیان می‌دارد. عبارات $c_1 + c_2v + c_3$ با فیت کردن دینامیک‌های شروع اسپایک از یک cortical neuron به دست آمده‌اند، به طوری که پتانسیل غشای V دارای واحدهای mV و زمان t در ms است. این مدل آستانه ثابتی (fixed threshold) ندارد، درحالی‌که اکثر نورون‌های واقعی دارند. ولی در عوض، fir کردن در آن به سابقه membrane potential قبلی بستگی دارد. پتانسیل آستانه (threshold potential) ممکن است در محدوده -55 میلی ولت تا -40 میلی ولت باشد. پتانسیل استراحت در مدل بسته به مقدار پارامتر b بین -70 میلی ولت و -60 میلی ولت است.

(در مقاله دیگری به شکل زیر مدل را به کمک equationها ترسیم کرده است)

$$Cv = k(v - v_r)(v - v_t) - u + I \text{ if } v \geq v_{\text{peak}} \text{ then}$$

$$u = a \{ b(v - v_r) - u \} \text{ if } v < c, u \leftarrow u + d$$

مدل ایزاکوچ تنها ۴ پارامتر بدون بعد دارد و بسته به مقادیر a و b ، می‌تواند integrator و یا resonator باشد.

پارامترهای c و d تأثیری بر رفتارهای حالت ثابت (steady-state) و زیر آستانه (sub-threshold) ندارد. در عوض، آن‌ها عمل جریان ناشی از آستانه بالا که در طول اسپایک فعال شده را به حساب می‌آورند و تنها رفتار زودگذر پس از اسپایک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

متغیر v همان membrane potential است،

و متغیر u هم recovery current است،

همچنین C ظرفیت غشا

و v_r نیز resting membrane potential است،

و v_t هم instantaneous threshold potential می‌باشد.

پارامترهای k و b هم زمانی پیدا می‌شوند که کسی مقاومت نورو و ورودی را بداند

و نشان b تعیین می‌کند که آیا u یک متغیر تقویت کننده (amplifying) است ($b > 0$) یا یک تشدید شده (resonant) می‌باشد ($b < 0$).

و ثابت بازیابی زمانی a است.

متغیر v_{peak} هم نشان‌دهنده spike cutoff است.

و c ، voltage reset می‌باشد.

پارامتر d هم مقدار کلی جریان خروجی و ورودی که در حین اسپایک فعال شده است.

و رفتار after-spike را تحت تأثیر قرار می‌دهد توضیح می‌دهد.

مختلف انتخاب کردن پارامترها firing patternهای مختلفی را به صورتی ذاتی نتیجه می‌دهد به صورت

مثال Regular Spiking neurones بیشترین نوروهای معمول در cortex می‌باشند

و یا intrinsically bursting neurones که به صورت کلیشه‌ای و پترن‌وار پشت‌سر هم اسپایک‌های تکراری را fire می‌کنند.

و chattering neurons نیز می‌توانند کلیشه‌ای و با فاصله نزدیک اسپایک کنند

و یا fast spiking neurons که می‌توانند به صورت پریودیک قطاری از action potentialها را با فرکانس بسیار بالا و عملاً بدون هیچ کم شدن و آداپته شدنی fire کنند.

و در نهایت low-threshold spiking neurons که همانند مورد قبل می‌توانند قطاری از action

potentialها با فرکانس بسیار زیاد fire کنند، ولی با یک آداپته شدن قابل توجه در فرکانس

اسپایک‌هایش.

(مقالات منابع به همراه فایل ارسالی ضمیمه شده‌اند)