



Co-funded by
the European Union

Neuronai: biologinis ir fizinis elektrinio signalo perdavimo modelis

DiFC – Palermo universitetas



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Turinys

1. Neuromokslas	3
Neuronai: biologiniai ir fiziniai elektrinio signalo perdavimo modeliai	3
2. TYRINĖJIMAS	4
„ĮTRAUKIMO“ etapas	4
Minčių generavimo veikla klasėje	4
Pagrindinis lygis	5
Neuronai	5
Nervinio stimulo genezė	6
Signalų sklaidimo neurone fizinis modelis	9
Pažengęs lygis	12
Modelio analizė matematiniu požiūriu	12
Apverstas mokymasis:	15
3. Taikymas	17
Pagrindinis lygis	17
Pasitikrinkite savo žinias	17
PhEt simuliacija: neuronas	18
PhEt modeliavimas: Grandinių konstravimo rinkinys – virtuali laboratorija	18
Pažengęs lygis	19
Išbandykite patys:	19
4. Ypač išsamūs medžiaga	19
<i>Jiawei Zhang : Pagrindiniai smegenų neuroniniai vienetai: neuronai, sinapsės ir veikimo potencialas</i>	19
<i>Neuromokslas: smegenų tyrinėjimas</i>	19
5. Literatūra	20





Bendra mokymosi kelio tema	Neuromokslas
Konkretus mokymosi vieneto pavadinimas	Neuronai: biologinis ir fizinis elektrinio signalo perdavimo modelis
Tikslinių vartotojų amžius	17–19 metų
Reikalavimai besimokančiajam	Pagrindinės matematikos, fizikos, chemijos, biologijos žinios.
Mokymosi vieneto aprašymas	Didaktinis vieneto aprašymas. Jis padės mokytojams ir mokiniams pereiti daugiadisciplininį mokymo/mokymosi kelią, kad atrastų neurologijos pagrindus ir indėlį. STEM disciplinų ir dabartinių tyrimų derinys, AR įrankis pagerina vizualizaciją ir įsitraukimą
Tema: Dalyvaujančios šalys	Biologija, chemija, fizika, matematika, inžinerija
Raktiniai žodžiai	Neuronai, sinapsinis perdavimas, elektrinis signalas, neuroninė komunikacija, papildytoji realybė, „Assemblr“ švietimo sistema, scenomis pagrįstas mokymasis, interaktyvi vizualizacija
Pagrindinės kvalifikacijos, įgūdžiai ir žinios, kurias galima įgyti	• Problemų sprendimas, dizaino mąstymas, samprotavimas • Konceptualios ir praktinės fizikos, chemijos, matematikos, biologijos žinios • AR įgūdžiai: 3D erdvinė vizualizacija, scena pagrįsta navigacija, skaitmeninis mokslinis modeliavimas • Interaktyvus mokymasis integruojant technologijas





Naudoti ištekliai ir didaktinės priemonės	Internetiniai ištekliai, virtualios laboratorijos, moksliniai straipsniai, mokslinės duomenų bazės, „Assemblr EDU“ platforma su prieiga prie PRO bibliotekos (anatominiai 3D modeliai, molekulių reprezentacijos, „Thunder Particle“ efektai), pasirinktiniai PNG naršymo mygtukai
Vertinimo kriterijai ir vertinimas	Įvairūs sąvokų ir įgūdžių žinių lygiai, įskaitant papildytosios realybės (AR) pagrindu atliekamą vertinimą atliekant scenos navigaciją, bendradarbiaujant interpretuojant sinapsinius procesus ir demonstruojant neuroninės komunikacijos principų supratimą interaktyvaus 3D modelio tyrinėjimo būdu.





1. Neuromokslas

Neuronai: biologiniai ir fiziniai elektrinio signalo perdavimo modeliai



Neuromokslas – tai labai skirtingų disciplinų grupė, tirianti nervų sistemą, t. y. smegenis, nugaros smegenis ir visame kūne esančius neuronų tinklus. Bėgant metams, jos įgijo matematikos, fizikos, informatikos ir inžinerijos metodologijas bei tyrimo metodus. Dėl šių disciplinų, taip pat biologijos, chemijos ir fiziologijos esminio indėlio galima sukurti funkcionavimo modelius, galinčius paaiškinti tokių biologinių sistemų kaip smegenys elgesį.

Nobelio premijos laureatas Ericas Kandelis rašo: „Neuromokslo užduotis – paaiškinti elgesį smegenų veiklos terminais. Kaip smegenys gali nukreipti milijonus atskirų nervinių ląstelių, kad jos sukeltų elgesį, ir kaip aplinka gali paveikti šias ląsteles? Paskutinė proto mokslo riba, didžiausias jo iššūkis – suprasti biologinį sąmonės pagrindą ir psichinius procesus, per kuriuos mes suvokiame, veikiame, mokomės ir prisimename.“

Žmogaus smegenys yra nuostabi, bet labai sudėtinga sistema. Funkciniai nervų sistemos vienetai, neuronai, bendrauja tarpusavyje elektriniais signalais, kurie sklinda net dideliais atstumais ir išskiria chemines medžiagas, vadinamas neurotransmiteriais.

Tyrimo tikslas – sužadinti susidomėjimą tema, kuri gerai tinka daugiadiscipliniam požiūriui STEM srityje, atrandant neurologijos pagrindus, ir padidinti smalsumą tema, kurios tyrimai yra priešakiniai ir turi svarbios įtakos gerovei ir sveikatai.





Sinapsinio perdavimo ir neuronų komunikacijos tyrinėjimą galima gerokai patobulinti naudojant papildytosios realybės (AR) įrankius ir išteklius. AR technologijos diegimas neurologijos švietime padeda giliau suprasti sudėtingus neurobiologinius procesus.

Papildyta sinapsė: kelionės smegenų viduje – „Assemblr EDU“ įgyvendinimas

Ši papildytosios realybės (AR) patirtis veda mokinius per nuoseklias scenas, kuriose demonstruojami visi sinapsinio perdavimo procesai. Pradedant nuo anatominės žmogaus nervų sistemos apžvalgos, mokiniai pereina prie išsamaus atskirų neuronų ir sinapsinio ryšio tyrimo. Naudodami „Assemblr EDU“ PRO biblioteką, patirtis naudoja anatomiškai tikslius motorinių ir sensorinių neuronų modelius, neurotransmiterių molekulinis vaizdus ir „Thunder Particle“ efektus, kad vizualizuotų elektrinius impulsus. Mokiniai naršo specialias scenas, kuriose rodoma impulso inicijavimas, neurotransmiterių išsiskyrimas ir signalo priėmimas, kartu su moksliniais duomenimis, įskaitant įtampos matavimus ir perdavimo greitį.

AR edukacinė nauda neuromoksle

Papildytoji realybė (AR) perkelia virtualius elementus į realų pasaulį, sukurdamą interaktyvią mokymosi aplinką. Neuromokslų ugdyme AR gerina nematomų biologinių procesų supratimą, teikdama trimačius vaizdus ir nuoseklų tyrinėjimą. Scenos pagrindu veikiantis navigacijos metodas leidžia mokiniams stebėti abstrakčias sąvokas, tokias kaip elektrinių impulsų sklaidimas ir cheminių signalų perdavimas, konkrečiais, vaizdiniais terminais. Ši metodologija sujungia teorines žinias su stebimais reiškiniais, palaikydama tarpdisciplininius ryšius tarp biologijos, fizikos ir technologijų, kartu išlaikant mokslinį tikslumą vaizduojant sinapsinius procesus.

2. TYRINĖJIMAS

„ĮTRAUKIMO“ etapas

1) Kelionė mūsų smegenų gelmėse – „YouTube“

<http://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=IrXuyxDt5jo>

Minčių generavimo veikla klasėje

Pagrindinė frazė: Visa mūsų atliekama veikla ir visos mūsų jaučiamos emocijos priklauso nuo nervinio signalo perdavimo tarp neuronų. Kaip organinė medžiaga gali rinkti, analizuoti ir perduoti informaciją labai tiksliai ir greitai? Mūsų gerovė pagrįsta tinkamu kiekvieno neuronų tinklo elemento veikimu. Kokias technologijas galima panaudoti, kad įsikištume, jei kažkas nevyksta taip?

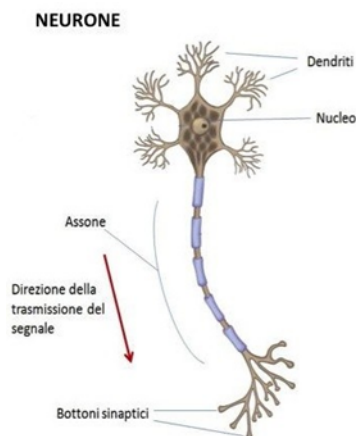


Pagrindinis lygis

Neuronai

Kokia yra neurono struktūra?

Žmogaus smegenyse yra apie 100 milijardų ląstelių, neuronų, kurie specializuojasi nervinių signalų, daugiausia elektrinio pobūdžio, perdavime. Neuroną sudaro kelios dalys, atliekančios specifines funkcijas: ląstelės kūnas (arba soma), kuriame yra branduolys, dendritai ir aksonas. Nervinis signalas, ateinantis iš kitų neuronų arba iš receptorių organų, surenkamas ir perduodamas į branduolį per dendritus – trumpus ir išsišakojusius branduolio tęsinius. Ląstelės kūne signalas apdorojamas ir perduodamas į aksoną – labai ilgą tęsinį, kurio užduotis – perduoti elektrinį signalą kitoms ląstelėms. Neurono vidų nuo išorinio intersticinio skysčio skiria citoplazminė membrana. Aksonus didžiąją jų ilgio dalį kartais gaubia stora izoliacinė medžiaga – mielino dangalas. Galutinėje dalyje aksonas šakojasi į kintamą skaičių galūnių – sinapsinius mygtukus, kur elektrinis signalas per neurotransmiterį paverčiamas cheminiu signalu.

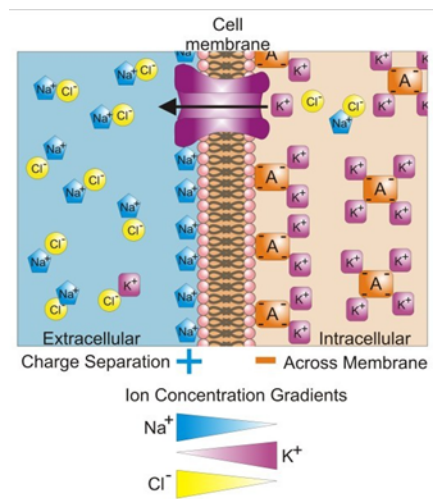


Šaltinio paveikslėlis: Internetinė medicina

Kas nutinka, kai neuronas nėra stimuliuojamas? Kokios fizikocheminės savybės leidžia apibūdinti neurono elgesį?

Neuronų elektrinis potencialas citoplazminės membranos viduje ir išorėje skiriasi, daugiausia dėl skirtingos natrio Na^+ ir kalio K^+ jonų koncentracijos abiejose membranos pusėse. Kai neuronas yra ramybės būsenoje, t. y. neperduoda signalų, šis potencialų skirtumas, vadinamas ramybės potencialu, yra nuo -60 mV iki -80 mV. Citoplazminėje membranoje yra jonų kanalai ir siurbliai, kurie atsidaro ir užsidaro reaguodami į tam tikrus dirgiklius, reguliuodami jonų praeimą ir atitinkamai keisdami elektrinį potencialą.





Ląstelės viduje gausu K^+ jonų ir prie organinių makromolekulių prisijungusių neigiamų jonų, o ląstelės išorėje – Na^+ ir Cl^- jonų. Na^+ ir K^+ jonų koncentraciją reguliuoja trys membraniniai baltymai, vadinami jonų kanalais arba siurbliais:

- natrio kanalai;
- kalio kanalai
- natrio-kalio siurblys.

Neurono membranoje yra daug kalio kanalų: šie kanalai stumia K^+ jonus iš membranos vidaus į išorę, nors tokiu būdu jie padidina neigiamą krūvį ląstelės viduje. Kita vertus, neigiami jonai ląstelės viduje negali difunduoti į išorę, nes yra per dideli, kad prasiskverbtų pro membraną.

Natrio kanalų yra nedaug, ir jie linkę difuziškai nukreipti natrio jonus į vidų.

Natrio-kalio siurblys veikia prieš natūralią jonų srauto kryptį, išstumdamas Na^+ ir K^+ ląstelės viduje. Ramybės būsenoje membrana praktiškai nepraleidžia Na^+ jonų.

Pagalvokime apie tai kartu: neuronai yra seniausios kūno ląstelės: jie negali savęs daugintis, o pažeidimų, dėl kurių jie žūsta, atveju aplinkinės negali jų pakeisti. Metams bėgant, nervų sistemos funkcionalumas mažėja: todėl tyrimai yra suinteresuoti rasti naujų metodų, kaip pagerinti smegenų gebėjimą gaminti naujus neuronus (neurogenezę), kad pagerėtų mokymasis ir atmintis. Ką galite padaryti, kad jūsų neuronai būtų sveiki? Kaip galite lavinti savo protą?

Nervinio stimulo genėzė

Kaip neuronai bendrauja?

Visus iš išorės gaunamus signalus užfiksuoja dendritai ir perduoda į branduolį. Jei į neurono branduolį patenka dirgiklis, galintis pakeisti ramybės potencialą iki slenkstinės vertės (apie -50 mV), susidaro veikimo potencialas arba nervinis impulsas, kuris sklinda aksonu.

Veikimo potencialo atsiradimas susijęs su jonų mainais per įtampos reguliuojamus natrio Na^+ ir kalio K^+ kanalus. Pirmiausia, kai potencialas pasiekia ribinę vertę, atsiveria natrio kanalai, kurie į ląstelės vidų įstumia neigiamo krūvio jonus ir greitai depoliarizuoja membraną. Natrio jonų srautas membranos viduje



sukelia poliškumo pasikeitimą: membranos viduje yra teigiamo krūvio perteklius, o išorėje – teigiamo krūvio trūkumas. Tokiu būdu membrana depoliarizuojasi, kol pasiekia +50 mV potencialą – maksimalią veikimo potencialo vertę.



Tačiau depoliarizacijos būseną trunka nuo 1 iki 2 milisekundžių. Po to laikui bėgant įtampos reguliuojami natrio kanalai užsidaro, o įtampos reguliuojami kalio kanalai atsидaro. Pastarieji atsидaro lėčiau ir išlieka atviri ilgiau: K⁺ jonai teka į membranos išorę, kuri pradeda repoliarizuotis, todėl potencialas vėl tampa neigiamas. K⁺ srautas tęsiasi, sukurdamas hiperpolarizacijos fazę, ir potencialas tampa neigiamesnis už ramybės potencialą. Galiausiai visi įtampos reguliuojami kanalai užsidaro ir atsinaujina natrio-kalio siurblio aktyvumas, kuris atkuria plazminės membranos ramybės potencialą. Veikimo potencialo amplitudė (apie +50 mV) ir trukmė (apie 2 milisekundės) yra fiksuotos, t. y. jos nepriklauso nuo sužadavimo stiprumo.

Kaip veikimo potencialas sklinda aksonu?

Elektrinis signalas, kuris sklinda per neuroną ir vėliau perduodamas į kitus neuronus, atlieka tokią itin greitų veiksmų seką:

- branduolio apdorotas elektrinis stimulus sukelia įtampos reguliuojamų natrio kanalų atsидarymą segmente šalia branduolio; Kai pasiekama slenkstinė vertė, susidaro pirmasis veikimo potencialas.

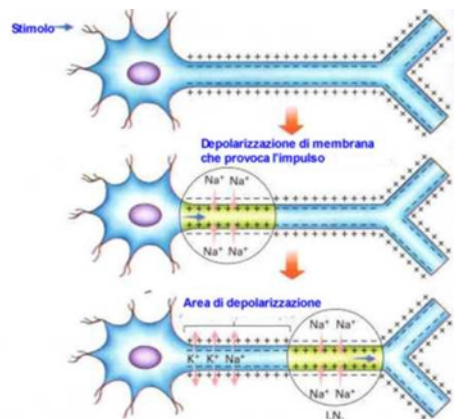
Depoliarizacija plinta aksonu, atverdama kanalus.

Įtampos reguliuojamas natris randamas gretimose membranos zonose; dėl to susidaro antras veikimo potencialas, kuris savo ruožtu sukurs trečią ir taip toliau.

- Tuo pačiu metu, srityje, kuri pirmiausia depoliarizavosi, atsидarė įtampos reguliuojami kalio kanalai, grąžindami membraną į ramybės potencialą.

- potencialai sklinda tik viena kryptimi, nes užsidarę įtampos reguliuojami natrio kanalai patiria refrakterinį periodą, kurio metu jie ne vėl galima atidaryti.

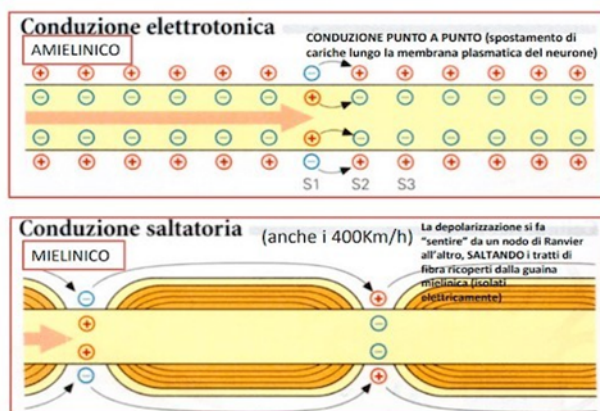




Veiksmo potencialo sklaidimas nemielinizuotame aksone: vaizdo įrašas: Veiksmo potencialo sklaidimas nemielinizuotame aksone - Animuota medicininė fiziologija - „YouTube“
<https://www.youtube.com/watch?v=RNdvkoiWOM&t=7s>

Kokį vaidmenį atlieka mielino apvalkalas?

Mielino dangalų padengtos nervinės skaidulos yra atsparesnės vandeniui, nes dangalas veikia kaip elektrinis izoliatorius: dėl to veikimo potencialo depoliarizacija ir sklaidimas vyksta tik tose srityse, kur jo nėra, vadinamose Ranvier mazgais. Nervinis signalas „šokinėja“ iš vieno mazgo į kitą didesniu greičiu nei nemielinizuotų skaidulų.



Pagalvokime apie tai kartu: elektrinio signalo perdavimas pirmiausia neurone, o vėliau kitiems neuronams yra greitas ir tikslus. Perdavimo greitis ir informacijos tikslumas yra lemiami veiksniai, lemiantys teisingą visų žmogaus veiklų atlikimą. Kai kažkas šiame nuostabiame mechanizme užstringa arba sustoja, sukeldamas neurologinę ligą, poveikis paveiktų asmenų gyvenimo kokybei yra pražūtingas. Signalų perdavimo veikimo principų tyrimai.

Neuronų stimuliacija yra pažangiausių neurotechnologijų, kurios naudoja elektrinę stimuliaciją kaip terapiją, pagrindas. Ar kada nors girdėjote apie elektrodus, kurie būtų dedami ant paralyžiuotųjų pacientų, kurie vėl vaikščioja?



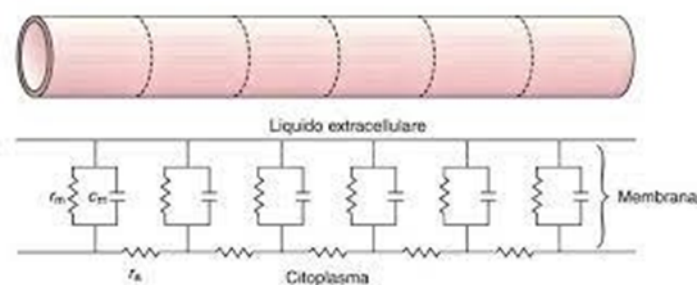
Signalų sklaidimo neurone fizinis modelis

Koks fizikinis modelis gali paaiškinti neurono veikimo principą?

Trumpas informacijos apie talpą ir kondensatorius atnaujinimas: Kondensatoriai ir kondensatoriaus talpa (youmath.it)

Trumpas varžos ir rezistorių atnaujinimas: Rezistoriai, elektrinė varža ir elektrinė varža (youmath.it)

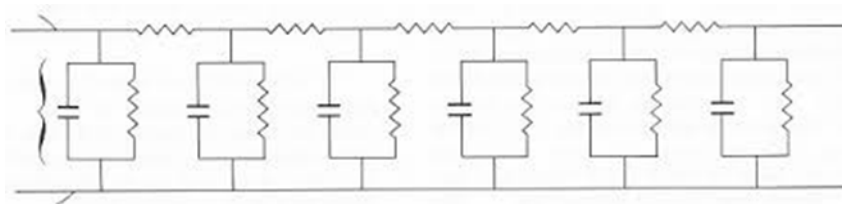
Aksonas yra panašus į bendraašį kabelį. Vidinė aksono dalis yra centrinė laidų kabelio šerdis.



Jo stipris yra didelis, daugiausia dėl mažo skerspjūvio. Citoplazmos elektrinėms savybėms apibūdinti įvedamas varžos vienetinis ilgis r_a .

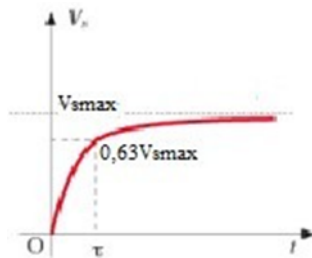
Išorinė aksono dalis taip pat yra laidininkas, tačiau išorinė dalis yra daug didesnė nei vidinė, todėl tarpląstelinio skysčio varža, palyginti su vidine, yra nereikšminga. Izoliacinė membrana sudaro kondensatorių, nes aksono vidinė ir išorinė dalys elgiasi kaip dvi laidžios plokštės, kaupiančios priešingų ženklų krūvius. Lygiagrečiai su kondensatoriumi reikia atsižvelgti į varžą, kuri atsižvelgia į jonų srautą per pačią membraną. Norint schematiškai pavaizduoti membranos elektrinį elgesį, įvedami du dydžiai: membranos talpa ilgio vienetui, C_m , ir laidumas ilgio vienetui, σ_m (iš kurių išvesime membranos varžą metrui, r_m).

Tada aksoną galima schematiškai pavaizduoti grandine, sudaryta iš eilės tinklėlių su rezistoriais ir kondensatoriais.



Dirglis potencialas priklausys nuo laiko ir vietos išilgai aksono. Iš tiesų, jį apibūdina du parametrai: laiko konstanta τ ir erdvės konstanta λ . Matematinis grandinės modelis leidžia mums išvesti potencialo tendenciją tiek kaip laiko, tiek kaip padėties funkciją. Pirmuoju atveju turėsime:





$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

kur V_{smax} yra didžiausia potencialo pasiekta vertė, o $\tau = r_m C_m$.

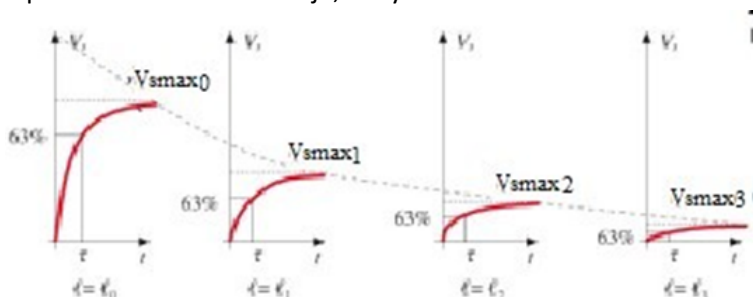
Laiko konstanta τ (ms eilės tvarka) yra laiko intervalas, per kurį stimulo potencialas pasiekia 63 % savo maksimalios vertės: tai yra neurono reakcijos greičio matas.

Tolstant nuo taško, kuriame jis sukuriamas, stimulo potencialas mažėja kartu su atstumu dėl bendro r_m ir C_m varžų poveikio.

Stimulo potencialas linkęs mažėti pagal dėsnį:

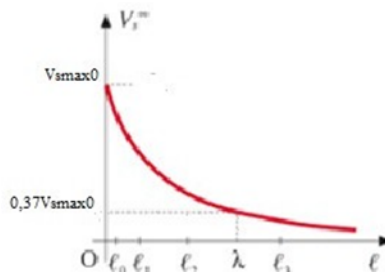
$$V_{smax}(x) = V_{smax0} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

kur V_{smax0} yra stimulo potencialas kilmės vietoje, o λ yra erdvės konstanta.



Erdvės konstanta λ (mm eilės) yra atstumas, kuriame pradinis potencialų skirtumas sumažėja iki 37 % savo maksimalios vertės.





Tai matas, parodantis, kiek srovė gali tekėti aksonu, kol išsisklaido dėl nuotėkio srovių.

λ atstumą, signalas sumažėja iki maždaug 1/3, o po 2λ jis yra maždaug 1/7 pradinio signalo ir nebegali sukelti veikimo potencialo. Iš tikrųjų dirgikliai nukeliauja žymiai ilgesnius atstumus, maždaug porą metrų, dėl kitų mechanizmų, kurių mes nenagrinėjame. Matematiškai erdvės konstanta aprašoma taip:

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

Pagrindinis veiksnys, darantis įtaką vidinei varžai r_i , yra aksono spindulys: didelio skersmens aksonai turi mažesnę pasipriešinimą išilginėms srovėms ir todėl mažesnę ašinę pasipriešinimą; dėl to jų erdvės konstanta bus didesnė. Iš tiesų, λ didėja kartu su aksono spindulio r_a kvadratine šaknimi.

$$\lambda \propto \sqrt{r_a}$$

Nuo ko priklauso nervinio impulso sklaidimo greitis?

Žinodami šias dvi konstantas, galime rasti elektrinio signalo sklaidimo greitį aksonu:

$$v = \frac{\lambda}{\tau}$$

ir todėl daryti išvadą, kad

$$v \propto \sqrt{r_a}$$

ryšys, kuris sutampa su eksperimentiniais rezultatais.

Apmąstykite kartu : terminas „modelis“ kartais yra reiškinio supaprastinimas, galintis paaiškinti jo veikimą. Fizinio modelio naudojimas biologiniam reiškiniui interpretuoti ir suprasti atitinka kelių neurologijos mokslininkų pabrėžtą poreikį pašalinti kliūtis tarp skirtingų disciplinų, visapusiškai išnaudojant skirtingų disciplinų sričių išteklius ir metodus. Ar pagalvojote apie savo žinių panaudojimą kitose srityse?



Pažengęs lygtį

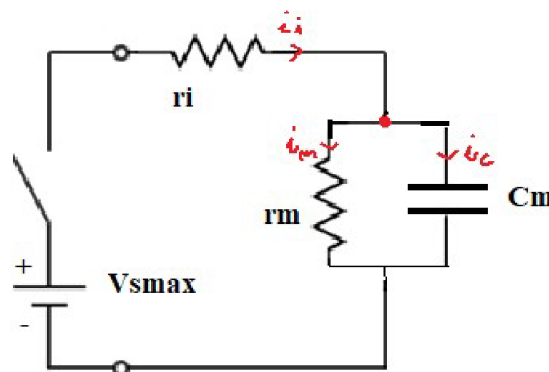
Modelio analizė matematiniu požiūriu

Panagrinėkime pirmąją elementariąją grandinę, kuria galime schematiškai pavaizduoti aksoną. Potencialo ir srovių tendencijai nustatyti naudojame Kirchooffo dėsnius:

$$V_{smax} = V_{r_i} + V_c$$

ir

$$i_i = i_c + i_m$$



kur V_{smax} yra potencialas RC grandinėje, kurį įsivaizduojame kaip generatoriaus ddp, V_{r_i} yra ddp aksono vidinėje varžoje, o V_c yra kondensatoriaus C galų ddp. Im taip pat žymime srovę per membraną. Išvedame i_c ir viską išreiškiame kaip potencialų funkciją:

$$i_m = \frac{V_c}{r_m}, \quad i_i = \frac{V_{smax} - V_c}{r_i}, \quad i_c = i_i - i_m$$

na ir kas

$$i_c = \frac{V_{smax} - V_c}{r_i} - \frac{V_c}{r_m}$$

Kadangi kondensatoriui galioja toks sąryšis:

$$V_c = \frac{q}{c_m}$$

turėsime

$$i_c = \frac{V_{smax}}{r_i} - \frac{q}{r_i c_m} - \frac{q}{r_m c_m}$$





Išvedę ankstesnę išraišką laiko atžvilgiu, gauname:

$$\frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{i_c}{c_m}$$

kuri yra tiesinė diferencialinė lygtis su separuojamais kintamaisiais, kurios sprendinys gaunamas integruojant:

$$\int \frac{di_c}{i_c} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{1}{c_m} \int dt$$

$$i_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

Laiko konstanta τ yra

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m}$$

Konstanta A nustatoma pagal pradines grandinės sąlygas.

Už

$$t=0 \quad i_c(0) = A = i_i(0) = \frac{V_{smax}}{r_i}$$

ir tada

$$i_c(t) = \frac{V_{smax}}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Paprastai $r_m \sim 10^4 \Omega / m$ ir $r_i \sim 10^{10} \Omega / m$ ir r_m galima nepaisyti, palyginti su r_i , o tai leidžia supaprastinti τ :

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m} \sim r_m c_m$$

Tada randame kitas srovės kaip laiko funkciją:

$$i_m(t) = \frac{V_c}{r_m} = \int \frac{i_c(t)}{r_m c_m} dt$$

Sprendimas yra toks:

$$i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Galiausiai



$$i_i(t) = i_c(t) + i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 + \frac{r_m}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Esant $t=0$, visa srovė praeina per rezistorių r_i ir įkrauna kondensatorių C_m . Per r_m srovė neteka, $i_m(0) = 0$, nes jis yra lygiagrečiai sujungtas su C_m ir neturi ddp galuose.

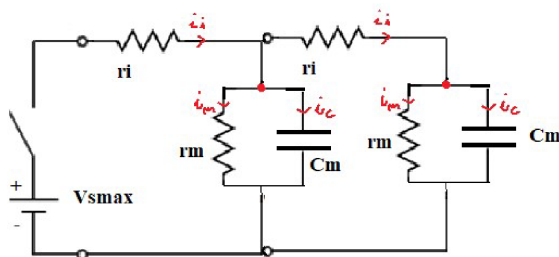
Ilgą laiką ($t \rightarrow \infty$) kondensatorius yra įkrautas ir nebeperduoda srovės per šaką, t. y. $i_c(\infty) = 0$, o visa srovė teka per vidinę ir membraninę varžas:

$$i_i(\infty) = i_m(\infty) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m}$$

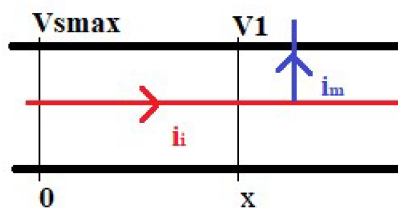
Analitiškai rastos srovės skirtos išraiškos pagrindžia anksčiau mūsų pateiktą rezultatą, būtent stimulo potencialą:

$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Norėdami imituoti aksoną, nagrinėjame kitas panašias grandines, prijungtas prie pirmosios. Šios antrosios grandinės potencialas arba fem nebėra V_{smax} , o potencialas, esantis lygiagrečių laidininkų galvose.



$$V_c = i_m r_m = \frac{V_{smax} r_m}{r_i + r_m} \sim \frac{r_m}{r_i} V_{smax}$$



Stimulo potencialas mažėja išilgai aksono.

Panagrinėkime stimulo potencialą V_{smax} taške $x=0$. Jo sklaidimas priklauso nuo srovės, tekančios II aksonu, kuri savo ruožtu (pagal pirmąjį Omo dėsnį) priklauso nuo potencialo kitimo išilgai aksono:

$$i_i(x) = -\frac{1}{r_i} \frac{dV_s}{dx}$$





Minuso ženklas priklauso nuo to, kad srovė teka iš taškų į aukštesnius potencialus. taškuose su mažesniais potencialais, tada priešinga kryptimi V_s gradientui. Vidinė srovė mažėja, nes krūviai išeina iš membranos srove im:

$$\frac{di_i}{dx} = -i_m = -\frac{V_s}{r_m}$$

Istatę gauname tokią antros eilės diferencialinę lygtį:

$$V_s = -r_m \frac{di_i}{dx} = \frac{r_m}{r_i} \frac{d^2 V_s}{dx^2}$$

Sprendimas yra toks:

$$V_s(x) = V_{smax} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

su

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

kaip anksčiau buvome pristatę.

Apverstas mokymasis:

Perskaitykite siūlomą straipsnį. Ypatingą dėmesį skirkite straipsnyje aprašytiems nervinių signalų ir elektrofiziologijos metodų tyrimams. Tada jis užbaigia tyrimą analizuodamas, kurios tyrimų sritys, remiantis straipsniu, yra efektyviausios neuronų grandinių tyrimui.





Perspective

<https://www.alliedacademies.org/neurophysiology-research/>

Electrophysiology: from ion channels to excitable cells.

Juddey Lisa*

Department of Medicine, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA

Abstract

The electrophysiology of cell membranes is a fascinating field of study that focuses on the electrical properties of cells, particularly the role of ion channels in generating electrical signals and the function of excitable cells. From ion channels to excitable cells, the electrophysiology of cell membranes plays a crucial role in many physiological processes, including nerve conduction, muscle contraction, and sensory perception.

Keywords: Electrophysiology, Cell membranes, Membrane potential, Ion channels, Neurons, Muscle cells.

Introduction

At the heart of the electrophysiology of cell membranes are ion channels, which are specialized proteins that span the cell membrane and allow the passage of specific ions, such as sodium (Na⁺), potassium (K⁺), and calcium (Ca²⁺), in response to various stimuli. Ion channels are essential for maintaining the resting membrane potential, which is the electrical charge difference across the cell membrane when the cell is at rest. The resting membrane potential is critical for

and calcium channels, as well as other regulatory proteins. The timing and amplitude of action potentials are tightly regulated and can be modulated by various factors, such as neurotransmitters, hormones, and second messengers. Additionally, the properties of ion channels can be altered by mutations or drugs, which can have significant physiological and pathological implications. For example, mutations in ion channels have been linked to various neurological disorders, such as epilepsy and channelopathies [4].

Komentuojame straipsnyje siūlomą nervinių signalų tyrimą:

Dažniausiai pasitaikantys elektrofiziologijos metodai:

- „Patch Clamp“ technika
- Technika „iš vidaus į išorę“ ir „iš išorės į išorę“
- ekstraląstelinis įrašymas

Ypač veiksmingos sąjungos su elektrofiziologija:

farmakologija

genetinė inžinerija, optogenetika





3. Taikymas

Pagrindinis lygis

Pasitikrinkite savo žinias

Veikla:

Žinių testas

Klausimų su keliais atsakymų variantais testai

1) Neuronas susideda iš:

- Dendritai, branduolys, aksonas, sinapsiniai mygtukai
- Dendritai ir aksonas
- branduolys ir aksonas
- Dendritai, branduolys, aksonas, mielino dangalas

2) Kuris iš šių teiginių apie veikimo potencialą yra neteisingas?

- atitinka hiperpolarizaciją
- suveikia tik reaguojant į stimulą
- prasideda tik tada, kai viršijama tam tikra riba
- sukelia poliškumo pasikeitimą

3) Dauginimo procesą sukelia:

- įtampos reguliuojamų Na^+ kanalų buvimas
- tam tikro refrakterinio periodo egzistavimas
- pakartotinis sužadinimo stimulo pasikartojimas
- potencialo egzistavimas net ir ramybės būsenoje esančiose atkarpose

4) Ramybės potencialas atsiranda dėl:

- Na^+ jonai ląstelės išorėje ir K^+ ląstelės viduje
- Na^+ jonai ląstelės viduje ir K^+ už ląstelės ribų
- Na^+ jonai ląstelės viduje ir Cl^- jonai už ląstelės ribų
- K^+ jonai ląstelės išorėje ir Cl^- jonai ląstelės viduje

5) Kuris iš šių teiginių apie kabelio modelį yra neteisingas?

- Aksoną galima schematiškai pavaizduoti grandine, kurioje yra du rezistoriai ir nuosekliai sujungta talpa
- Aksoną galima schematiškai pavaizduoti kaip tinklelių su rezistoriais ir kondensatoriais seką
- Vidinė aksono dalis pasižymi labai dideliu pasipriešinimu
- Pati membrana sudaro kondensatorių, sujungtą lygiagrečiai su rezistoriumi





- 6) Trumpas atsakymas: kokią vertę turi ramybės potencialas?
- 7) Atviras atsakymas: Kaip veikimo potencialas sklinda aksonu?
- 8) Atviras atsakymas: Kaip stimulo potencialas kinta tam tikru momentu priklausomai nuo laiko?
Pateikite kokybinį aprašymą.
- 9) Sujunkite kiekvieną klausimą su teisingu atsakymu:
- Kas matuoja erdvės konstantą?
 - Ką matuoja laiko konstanta?
 - Nuo ko priklauso erdvės konstanta?
 - Nuo ko priklauso laiko konstanta?
- 10) Trumpas atsakymas: nuo ko priklauso nervinio impulso sklidimo greitis nemielinizuotuose neuronuose pagal kabelio modelį?

PhEt simuliacija: neuronas

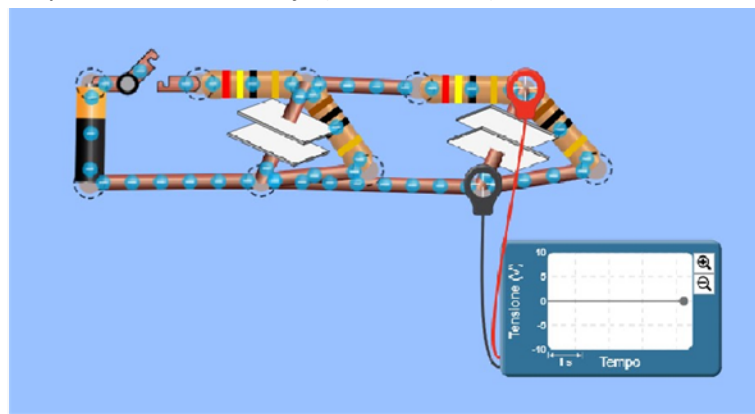
https://phet.colorado.edu/sims/html/neuron/latest/neuron_it.html

Veikla:

- nuoroda į darbalapį anglų kalba: Neuronas – biologija | Neuronai | Ląstelės – interaktyvios PhET simuliacijos (colorado.edu)
- Jis tyrinėja neurono elgesį esant veikimo potencialui.

PhEt modeliavimas: Grandinių konstravimo rinkinys – virtuali laboratorija

Grandinės kūrimo rinkinys: virtuali laboratorija (colorado.edu)





Veikla :

- nuoroda į operacinį lapą anglų kalba: Grandinių konstravimo rinkinys: virtuali laboratorija – RLC grandinė | kintamosios srovės grandinės | Kirchofo dėsnis – interaktyvios PhET simuliacijos (colorado.edu)
- Sukurkite grandinę, kuri imituotų neurono kabelio modelio elgseną. Pažymėkite potencialią tendenciją kondensatoriuose ir patikrinkite, ar ji atitinka tai, ką tyrėte.

Pažengęs lygis

Išbandykite patys:

Orientaciškai ir su tam tikra apytiksle paklaida, atsižvelgiant į skirtingų tipų aksonų ir įvairių gyvūnų struktūrų kintamumą, aksono spindulys yra maždaug μm , vidinė varža ilgio vienetui $r_i \sim 10^{10} \Omega/\text{m}$, o transmembrininė varža ilgio vienetui $r_m \sim 10^4 \Omega/\text{m}$. Membranos storis yra apie 5–10 nanometrų, o santykinė dielektrinė konstanta ϵ_r – apie 2–4.

1. Pasirinkite kondensatoriaus modelį ir jo talpą ir, remdamiesi šiais duomenimis, įvertinkite talpos dydžio eilę aksono ilgio vienetui; (viena talpa metrui $C_m \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ F/m}$)
2. Patikrina, ar tiriamojoje dalyje naudoti aproksimacijos yra teisėtos, ir apskaičiuoja laiko ir erdvės konstantą;
3. Tada įvertinamas elektrinio signalo sklidimo greitis ir gauti rezultatai palyginami su eksperimentiniais duomenimis;
4. Kodėl sklidimo greitis skiriasi nuo eksperimentinių rezultatų? Kaip galėtume patobulinti modelį, kad gautume sklidimo greičius, artimesnius tikriesiems?

4. Ypač išsami medžiaga

Žiniatinklio ištekliai:

Jiawei Zhang : Pagrindiniai smegenų neuroniniai vienetai: neuronai, sinapsės ir veikimo potencialas

<https://arxiv.org/abs/1906.01703>

RC grandinė

https://neurotext.library.stonybrook.edu/C3/C3_3/C3_3.html

Neuromokslas: smegenų tyrinėjimas

https://books.google.it/books/about/Neuroscience_Exploring_the_Brain.html?id=4WhzEQAAQB_AJ&redir_esc=y





5. Literatūra

D. Sadava ir kt.: Biologia.blu PLUS. Žmogaus kūnas, Zanichelli

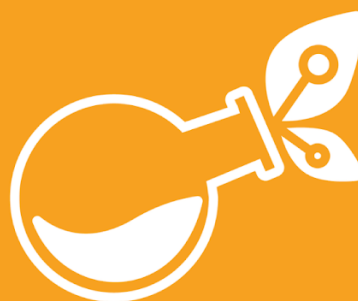
G. Bellini ir kt.: Fizika medicinai, Piccin

Walker J: FIZIKA: Teoriniai modeliai ir problemų sprendimas, 3 Linx





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.