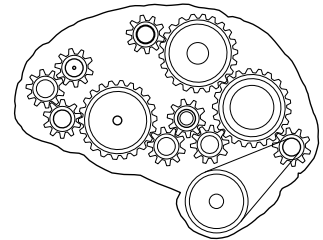


# Nevronske mreže in umetni možgani



Resnični možgani so zdrizasti. Njihove živčne celice, žile in prekat, napolnjeni s tekočino, so zgrajeni iz lipidnih membran, proteinov in veliko vode. Možgane lahko pretipaš, jih režeš na rezine, vstaviš elektrode v njihove živčne celice in opazuješ kri, ki utripajoče teče skozi njih. Študij možganov se zdi trdno zasidran v biologiji in medicini. Obstajajo pa tudi drugi načini razmišljanja o njih, ki so pritegnili pozornost matematikov, fizikov, inženirjev in računalniških znanstvenikov. O možganih razmišljajo s pomočjo enačb, izdelave računskih modelov in celo naprav, ki oponašajo delovanje pravih nevronov v naših glavah.

Resnični možgani so izredno prilagodljivi. Sposobni so brati rokopis, ki ga niso videli nikoli pred tem, razumeti govor popolnih tujcev. Dobro se spoprimejo tudi s situacijami, ko gredo stvari narobe. Kljub stalnemu odmiranju celic, delujejo razmeroma dobro skozi celotno življenje in so se še v starosti sposobni učiti novih trikov. V primerjavi z njimi so današnji roboti zelo dobri pri opravljanju ozkega razpona nalog, za katere so bili načrtovani, na primer izdelati majhen del avtomobila, a se zelo težko spoprijemajo z nepredvidljivimi situacijami in napakami.

Prave možgane sestavljajo tesno povezane **nevronske mreže**. Nevroni potrebujejo energijo, mreže prostor. Naši možgani obsegajo približno 100 milijard živčnih celic, 3,2 milijonov kilometrov „žic“, milijon milijard povezav, vse zapakirano v prostornino 1,5 litra, pri tem tehtajo zgolj 1,5 kg in trošijo borih 10 vatov energije. Če bi poskušali zgraditi takšne možgane s pomočjo silikonskega vezja, bi za njihovo delovanje potrebovali 10 megavatov, dovolj moči, da bi z njo napajali celotno mesto. Toplota, ki bi jo sproščali takšni silikonski možgani, bi bila tako velika, da bi jih stopilo! Izziv, s katerim se srečujemo, je odkriti, kako možgani delujejo tako učinkovito in ekonomično, ter uporabiti sorodne principe pri ustvarjanju možganom podobnih strojev.

Vaše možgane sestavlja  
100.000.000.000 celic in  
3.200.000 kilometrov živčnih kablov z  
1.000.000.000.000.000 sinaptičnimi  
povezavami, vse zapakirano v 1,5 litra in  
težko 1,5 kg. Pri tem porabljajo približno  
toliko energije kot nočna lučka.



## Gradnja možganskih vezij v silikonu

**Energijski stroški** prenosa signalov od ene živčne celice do druge so verjetno predstavljali ključni dejavnik pri evoluciji možganov. Približno 50-80 % celotne energijske porabe možganov se potroši pri prenosu akcijskih potencialov vzdolž živčnih vlaken ter pri sinaptičnem prenosu. Preostanek se potroši za proizvodnjo in vzdrževanje. To velja tako za možgane čebele, kot za naše možgane. Kljub temu je v primerjavi s hitrostjo digitalnih računalnikov hitrost živčnih impulzov zelo nizka, le nekaj metrov na sekundo. Za serijski procesor, kot so digitalni računalniki, bi bila to nevzdržna omejitev. Biološki možgani pa so grajeni kot vzporedna omrežja. Večina živčnih celic se povezuje neposredno z nekaj tisoči drugih živčnih celic. Da jim to lahko uspe, možgani izkoriščajo svojo tridimenzionalno obliko - plasti celic zgbajajo v gube in povezave tesno spletejo v snope. V primerjavi z njimi so povezave med skromnim številom silikonskih nevronov omejene z dvodimenzionalno naravo čipov in vezij. V nasprotju z možgani je neposredna komunikacija med silikonskimi nevroni hudo omejena. Slednje je v določeni meri možno premestiti z izkoriščanjem visoke hitrosti konvencionalne elektronike - impulze iz številnih silikonskih nevronov je možno s pomočjo tehnike multipleksiranja združiti in jih prenašati preko iste žice. Na ta način skušajo inženirji v silikonu posnemati povezanost bioloških omrežij.

Da bi zmanjšali moč in hkrati povečali hitrost, so inženirji, navdihnjeni z nevroni, sprejeli biološko strategijo uporabe **analognega** namesto **digitalnega kodiranja**. Carver Mead, eden od gurujev Silicijeve doline v Kaliforniji, je prenos nevrobiologije v tehnologijo opisal z izrazom nevromorfno inženirstvo. Namesto digitalnega kodiranja z 0 in 1 beležijo analogna vezja informacijo s pomočjo kontinuiranih sprememb v napetosti, prav tako kot živčne celice v svojem podpraznem stanju (več v 3. poglavju, o celičnih obveščevalcih). Izračune je tako možno opraviti v manj korakih, s pomočjo izkoriščanja osnovne fizike silikonskih naprav. Analogno računanje enostavno podaja osnovne elemente aritmetike: seštevanje, odštevanje, eksponente in integracije, operacije, ki so za digitalne stroje bolj zahtevne. Kadar nevroni - naj bodo biološki ali silikonski - računajo in sprejemajo odločitve, pošiljajo impulze vzdolž aksonov ter komunicirajo s ciljnimi nevroni. Ker je kodiranje z akcijskimi potenciali energijsko drago, učinkovito kodiranje povečuje količino informacij, zabeleženih v vzorcu potencialov, z zmanjšanjem **podvajanja podatkov**. Energijsko učinkovitost se hkrati povečuje tudi z uporabo čim manjšega števila aktivnih nevronov. Slednje imenujemo **poredko kodiranje** in predstavlja še enega od pomembnih načel pri grajenju umetnih nevronske mreže.

## Silikonska mrežnica

Enostavno umetno verzijo biološke mreže predstavlja silikonska mrežnica, ki beleži svetlobo ter avtomatsko prilagaja svoj izhod spremembam v splošnih razmerah osvetljenosti. Povezuje se z dvema silikonskima nevronoma, ki podobno kot resnični nevroni v vidni skorji, izločata informacijo o kotu med črtami ter kontrastnimi mejami na mrežnični sliki.

Nevrone v tem prototipu imenujemo „**nevroni seštej-in-sproži**“. Nevromorfni inženirji jih pogosto uporabljajo. Svoje ime so dobili, ker seštejejo utežen vnos, kodiran v obliki napetosti, ki prihaja na njihove sinapse, ter se odzovejo s sproženjem akcijskega potenciala, zgolj kadar napetost preseže postavljeni prag. Silikonski nevroni so zgrajeni iz tranzistorjev, vendar namesto, da bi jih uporabljali kot stikala s pomočjo povečevanja napetosti do saturacije – enako kot v konvencionalnem digitalnem sistemu – so tranzistorji uporabljeni v podpraznem razponu. V tem območju se obnašajo podobno kot celične membrane dejanskih nevronov. Dodatni tranzistorji priskrbijo aktivne prevodne lastnosti za posnemanje od napetosti in časa odvisnih ionskih kanalčkov. Ta majhen vidni sistem je prototip za mnogo kompleksnejše umetne vidne sisteme, ki so v razvoju. Že njemu uspe prikazati, kako je možno v realnih razmerah izredno hitro procesirati vhod z veliko šuma in oblikovati enostavne odločitve. Uspeva mu opravljati tisto, za kar je bil oblikovan – sporočati orientacijo črte v prizoru – in nevroznanstveniki že uporabljajo ta enostavni silikonski vidni sistem za preizkušanje opreme in trening študentov. Najpomembnejše lastnosti umetnih mrež so, da delujejo v resničnem svetu, v dejanskem času in porabljajo zelo malo energije.

## Umetne nevronske mreže

Za preučevanje učenja in spomina se pogosto uporablja umetne nevronske mreže (UNM). Najpogosteje so udeležene kot programska oprema na konvencionalnih digitalnih računalnikih. Sestavlja jih večje število enostavnih procesnih enot, ki so gosto povezane v omrežje. Najenostavnejša oblika UNM so **enostavni asociatorji**, ki jih sestavljajo sloji medsebojno enosmerno povezani vhodnih in izhodnih enot. Asociativni spomin je zabeležen s pomočjo spremembe moči povezav med sloji, tako da mreža ob vnosu vhodnega vzorca na izhodnih enotah poustvari z njim povezan shranjeni vzorec (glej **matematično uganko** na naslednji strani). Bolj kompleksne UNM so **povratne nevronske mreže**. Te so sestavljene iz enega samega sloja, v katerem je vsaka enota povezana z ostalimi ter vse enote delujejo kot vhodne in izhodne. Sliši se nekoliko nenavadno, a takšna zasnova omogoča mreži, da hrani vzorce in ne le pare elementov. Takšno **avtoasociacijsko mrežo** je možno dekodirati z rekurzivnim iskanjem shranjenega vzorca. Preizkusi so pokazali, da je možno v mreži s 1000 elementi shraniti približno 150 vzorcev brez prevelikih napak v priklicanih vzorcih.

UNM so možganom podobne v načinu, kako hranijo in obdelujejo informacije. „Znanje“, ki ga obdelujejo, je shranjeno v mreži sami. Spomin ni shranjen posebej, kot to velja za digitalne računalnike, kjer je aritmetični procesor ločen od spominskih naslovov. Spomini se shranjujejo na način, ki omogoča njihovo **vsebinsko naslavljanje**. V UNM so informacije shranjene v utežeh posamičnih povezav, podobno kot sinapse med učenjem spreminjajo svojo moč. UNM poleg tega niso programirane za izvajanje določenih procedur. Posamičen nevron v mreži je neumen ter se zgolj odziva v skladu z vsoto uteženega vnosa. Kljub temu pa jih je možno naučiti opravljanja pametnih zadev. Mrežo je možno naučiti s pomočjo **učnih pravil**, ki spreminjajo moči povezav med posameznimi nevroni. Pogosto pravilo temelji na primerjanju dejanskega izhodnega vzorca mreže, ki je posledica podanega vhodnega vzorca, z želenim vzorcem. „Napake“, ki jih razkrije primerjava, so nato podlaga prilagajanja uteži povezav, tako da je dobljeni iznos vedno bližje želenemu. Mreža na ta način postopoma zmanjšuje napako do minimuma. Postopek je učinkovit, a počasen.

Napake v mreži so pomembne - brez njih učenje namreč ni možno. Ta lastnost učenja je pogosto spregledana. Pretirano trenirane mreže, ki ne delajo napak, bi se odzivale le na eno vrsto vnosa. Takšne mreže metaforično poimenujemo „babičine mreže“ - s čimer namigujemo na analogijo s teoretično predpostavljenimi, a verjetno bolj mitskimi „babičnimi celicami“, ki naj bi se odzivale le takrat, ko vidimo babico, in naj bi pri tem nikoli ne zagrešile napake. V resničnem svetu to ni posebej uporabno, saj bi za vsako stvar, ki bi se jo naučili, potrebovali svojo mrežo. Prav nasprotno je prednost UNM v njihovi sposobnosti **posploševanja** odzivanja na vhodne vzorce, tudi na tiste, ki jim v postopku učenja nikoli niso bile izpostavljene. Sposobne so videti odnose, zajeti asociacije in odkriti zakonitosti v vzorcih. Ob tem pa so odporne na napake – prav tako kot pravi možgani. Shranjeni vzorec so sposobne obnoviti, tudi kadar je vhodni vzorec nepopoln ali mu je prištet šum. To so zelo pomembne lastnosti bioloških možganov, ki jih izkazujejo tudi UNM.



Objektiv kamere se nahaja pred silikonsko mrežnico.

## Paradoks moderne računske tehnologije

Paradoks današnjih UNM je, da so simulirane matematično na digitalnih računalnikih. Slednje omejuje njihovo uporabo v vsakodnevni situacijah, saj so simulacije časovno zahtevne in UNM tako ne morejo delovati v realnem času. UNM se zdijo pravšnje za vožnjo avtomobila ali upravljanje aviona, saj delujejo robustno tudi ob prisotnosti šuma in v primerih, ko katera od enot v mreži odpove. Kljub temu pogosto uporabljani ekspertni sistemi, kot na primer avtomatični piloti, temeljijo na digitalnih računalnikih, programiranih s konvencionalno deterministično programsko opremo, ki za zagotavljanje varnosti potrebuje sistem z več varnostnimi podsistemi. Če gre slučajno z letalom kaj resno narobe, se ekspertni sistemi s tovrstnimi situacijami ne zmorejo spoprijeti in pilot mora prevzeti nadzor. Današnji algoritmi za učenje UNM so prepočasni v tovrstnih nujnih in izrednih primerih. Če bi bili silikonski nevroni sposobni učenja, česar trenutno ne zmorejo, bi bili razrešeni številni od naštetih problemov. Ko bomo spoznali več o delovanju možganov, bomo sposobni zgraditi tudi bolj kompleksne nevronske mreže, ki bodo omogočale sposobnosti pravih možganov.



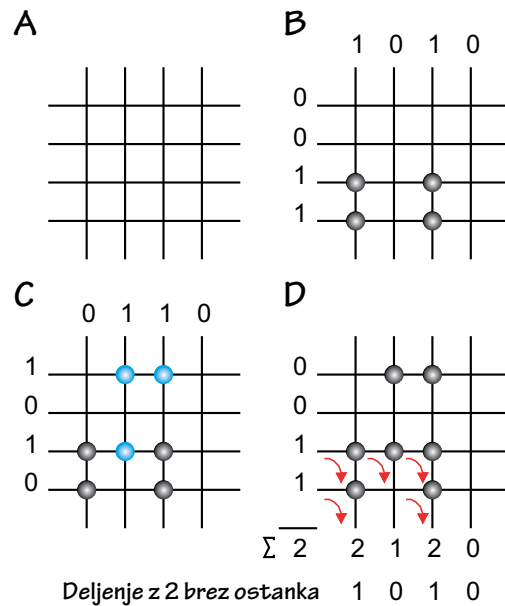
NOMAD je nekoliko „nemiren“, vendar misleč predhodnik mislečih strojev prihodnosti. Visok je 60 centimetrov, na cilindrično oblikovanem telesu ima „oči“, „ušesa“, prijemalne „roke“ in druge senzorje, ki mu omogočajo navigacijo. Kar ga razlikuje od večine drugih robotov je, da deluje brez vkodiranih navodil ali pravil. Namesto tega ga vodijo računsko simulirani možgani z 10.000 simuliranimi nevroni in več kot milijonom povezav med njimi, ki omogočajo zaznavanje okolja in odzivanje nanj. Znajde se v novih situacijah in uči se iz napak, medtem ko se giblje po ogradi, v kateri so raztresene raznobarvne kocke. Nekatere izmed kock so črtaste in električno prevodne, kar jih dela „okusne“. Druge so posejane s pikami in slabše prevajajo elektriko, zaradi česar so manj okusne. Preko iskanja in okušanja kock z električnim senzorjem v prijemalnih rokah se NOMAD nauči ignorirati pikaste kocke in poiskati okusne, črtaste.



## Matematična uganka

Vsebinsko naslovljiv distribuiran spomin

Zamislite si niz žic, ki tečejo vodoravno, in se srečajo s štirimi, ki tečejo navpično, na mestih, kjer se srečajo, pa so stikala (slika A). Ta matrika predstavlja spomin. Informacije so zabeležene v obliki binarnih števil, kot so 0011 in 1010. Stikala uredimo tako, da se prižgejo vsakič, ko 1 sreča 1 (B). Ta stikala hranijo paritev teh dveh števil. Matrika lahko hrani tudi druga števila poleg omenjenih dveh, kot na primer 1010 in 0110. Končna matrika bi morala imeti prižganih sedem stikal, kot prikazuje C. Če sedaj ponovno prikažemo prvo število - 0011 - končnemu stanju matrike in uredimo, da je tok prisoten v navpičnih žicah vsakič, ko je prižgano stikalo (D), bo tok, ki prihaja na dnu navpičnih črt sorazmeren številu 2120. To ni število, s katerim je bilo 0011 prvotno parjeno. Vendar, če delite 2120 s skupnim številom enic v številu, ki smo ga uporabili za priklic ( $0+0+1+1$  je enako 2), z uporabo deljenja celih števil (kjer zanemarimo ostanek), končamo z 1010. Matrika si je torej „zapomnila“, da sodi 0011 skupaj z 1010, čeprav je na njej shranjeno dodatno sporočilo. Da resnično deluje, lahko preverite tudi z drugim parom števil.



To je vrsta spomina, ki ga pripisujemo možganom. Informacij ne hranijo na določenih lokacijah - kot to velja za osebni računalnik, ampak so razpršene preko mreže, shranjene kot spremembe v sinaptičnih povezavah. Priklicati jih je možno z naslavljanjem njihove vsebine. Težava je, da se tovrstni spomin zelo hitro nasiči, še posebej, če so na razpolago le štiri žice. S 1000 pari žic, pa lahko matrika hrani veliko prekrivajočih se parov sporočil brez večjih motenj med njimi.

