

K strukturi možganov

2. del (nadaljevanje in konec)

DUŠAN RUTAR

V nadaljevanju našega prikaza nekaterih novejših dosežkov na področju raziskovanja delovanja možgan si bomo ogledali problem samoorganiziranja živčnega sistema.

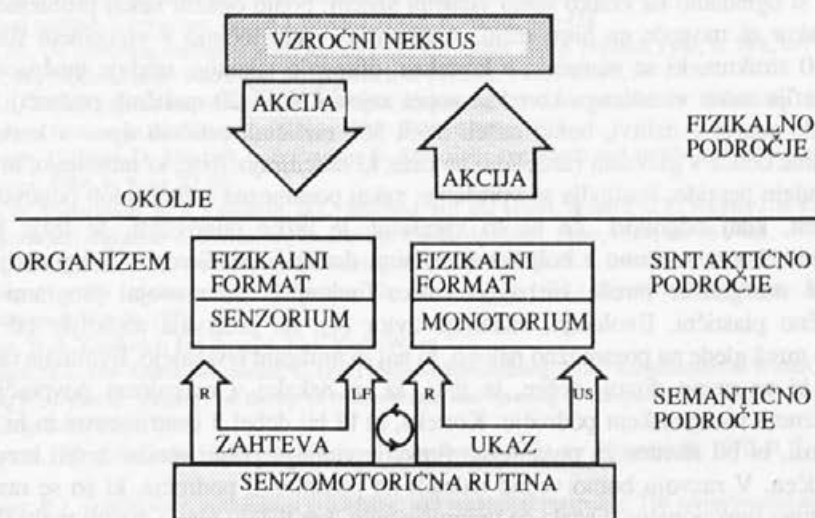
R. Eckmiller (1) omenja koncept o nevronih, ki uravnavajo kortikalno topologijo. Gre za "*concept of command neurons*" (2), v katerem avtorji zagovarjajo predpostavko, da nekateri signali, ki pridejo v korteks, ne nosijo nobenih informacij, pač pa vplivajo na mrežasto strukturo korteksa tako, da jo nenehno modificirajo in specifikirajo. Obstajajo torej centralni nadzorni neuroni, ki nenehno spreminjajo topologijo možganov, vse to pa zaradi optimiziranja različnih možganskih funkcij in njihovih povezav.

Če si ogledamo na kratko samo vizuelni sistem, bomo opazili nekaj problemov, ki jih nikakor ni mogoče na hitro rešiti. Anatomsko vzeto ločimo v vizuelnem sistemu okoli 40 struktur, ki se raztezajo v korteksu, obsegajo talamus, srednje možgane itd. Topografija samo vizuelnega korteksa zopet zajema okoli 20 različnih področij in če gremo še naprej v delitvi, bomo našli okoli 500 različnih celičnih tipov v korteksu. Kortikalne celice v glavnem razdelimo na tiste, ki ekscitirajo, tiste, ki inhibirajo, in tiste, ki vsebujejo peptide. Postavlja se vprašanje, zakaj posamezna celica sploh odgovori, in predvsem, kdaj odgovori. Že na to vprašanje je težko odgovoriti, še težje pa je odgovoriti, ko se soočimo z bolj kompleksnimi dražljaji. M. Sereno (3) ugotavlja, da biološke možganske mreže vsebujejo veliko funkcij in da razvojni programi niso neskončno plastični. Evolucija, nadaljuje avtor (4), ne proizvaja najboljših od vseh možnih mrež glede na posamezno nalogo, ki naj jo možgani izvršujejo. Evolucija razvije mreže, ki so ravno dovolj dobre, in tiste, ki so nekako v razvojnem povprečju na posameznem možganskem področju. Korteks, ki bi bil debel 5 centimetrov in bi imel 150 plasti, bi bil idealen za posamezne funkcije vidnega polja, vendar bi bil razvojno nepraktičen. V razvoju bomo vedno naleteli na posamezna področja, ki so se razvila, čeprav niso funkcionalna. Ostala so preprosto zato, ker delajo ravno dovolj malo škode. Iz tega sledi, da ne smemo pripisati že kar vsaki strukturi v organizmu svoje funkcije. Dejstvo je, da nekatere strukture nimajo nobene funkcije, čeprav so tam. Po drugi strani pa vsekakor drži, da nekatere funkcije zahtevajo svojo strukturo. Funkcija, ki jo zasledimo na področju A, lahko sodeluje tudi na polju B, vendar to ni nujno.

Da bi razumeli tako zapleteno delovanje možganov, potrebujemo dobre teorije in koncepte, pravi J.J. Koenderink (5), ki nam bodo omogočili vpogled na več ravneh

hkrati. Načine delovanja možganov lahko vedno opišemo z večimi jeziki, kar smo že omenili čisto na začetku našega razpravljanja. Če gremo po vrsti in damo prednost fiziki in kemiji, bomo govorili o izmenjavi energije med posameznimi delci in molekulami, ne bomo pa govorili o signalih, v trenutku, ko bomo spregovorili o "signalih", bomo na področju neke konvencije, ki nam bo povedala, kaj signali so in kako se izmenjujejo. Vedno je možnih več konvencij, čeprav je mogoče pokazati, da je ena boljša od druge. Ko govorimo o signalih, že govorimo tudi o procesiranju signalov, govorimo torej o strukturi. Sam signal pa še nima nobenega pomena, ali drugače rečeno, dogovoriti se moramo o njem. Sama sintaksa namreč odpre neskončno polje pomenov, ki so vsakokrat odvisni od načina dogovarjanja. Vsak nov način postavi tudi nov pomen. Sama sintaksa zato ni transparentna, do pomena se moramo šele potruditi. Predvsem vidimo, da ves čas govorimo o arbitrarnosti in konvencijah. Vedno gre za "an act of choice" (6). Takšna arbitrarnost je odločilna, saj nam pove, če jo poznamo, kaj moramo brati in kje moramo brati (ibid.).

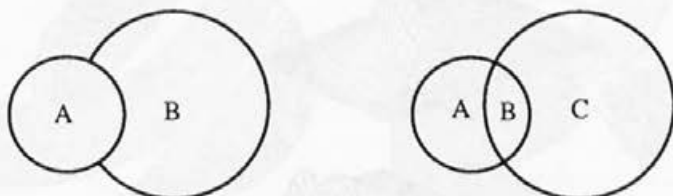
Gre seveda za vprašanje o razmerju med percepcijo in interpretacijo, sintakso in semantiko itd. Organizem sodeluje z okoljem preko receptorjev (=senzorium). Preko motoriuma deluje na okolje in ga spreminja. Sedaj pa se zaplete. Koenderink zagovarja svojo tezo nekako takole: senzorium še ne procesira podatkov, je še brez pomena, je predkategorialen. Zaradi tega je senzorium objektivni in se nikdar ne more zmotiti. Motiti se na tem nivoju je logično nemogoče, pravi Koenderink.



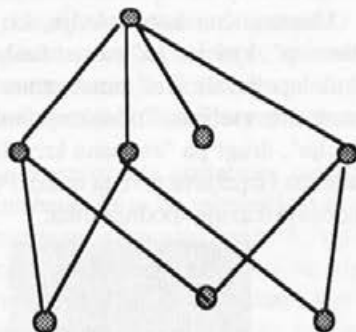
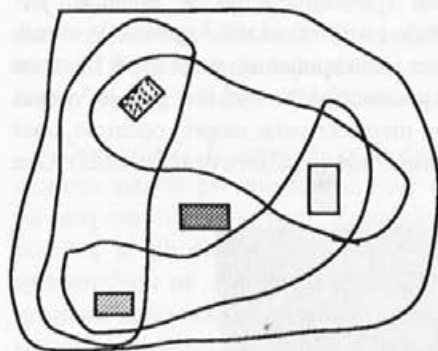
Na sliki vidimo splošno shemo senzomotorične zanke, kjer pomeni LF = logični format in US = ukazni signal. Senzomotorični proces je informacijsko zaprta zanka, nadaljuje Koenderink. Organizem se preko te zanke prilagaja okolju, se takorekoč sinhronizira. Kakorkoli zveni njegovo zagovarjanje prepričljivo, se le ne moremo izogniti nekaterim epistemološkim problemom. Vprašamo se, na kakšni osnovi poteka selekcija signalov in distribucija signalov. Tega se avtor vsekakor zaveda, zato opozori

na nekatere zanimive ugotovitve. Vzemimo sistem in recimo, da nikakor ne more vedeti, katere probleme bo treba v prihodnosti reševati. Ker tega ne ve, mora biti kar se da abstrakten. V primeru vizualnega sistema bi bila zadovoljljiva rešitev reprezentacija v smislu geometrijskih struktur. Vprašanje, ki si ga lahko postavimo, bi se glasilo: kako možgani vedo, da je vidno polje dvodimenzionalno, če imajo na razpolago samo nekaj milijonov signalov, ki istočasno prihajajo po vlaknih optičnega živca. Potrebujemo topologijo, pravi Koenderink, ki bo seveda brez homunkulusa.

Geometrijski jezik bi šel nekako takole:

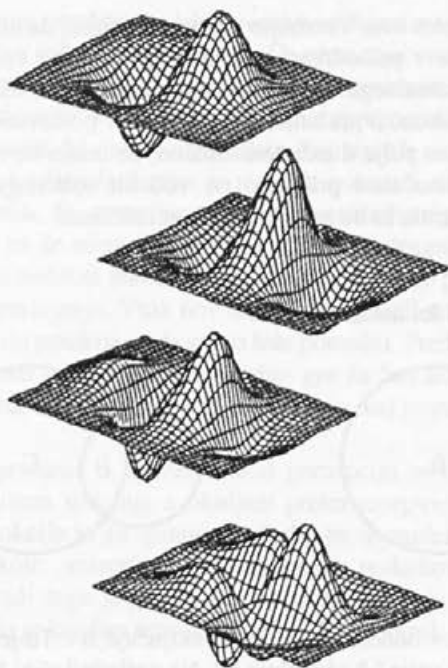


Slika prikazuje "A je v odnosu do B" in "C vključuje B". To je povsem elementarno in jasno. Jasno je tudi, da velja "A vključuje B". Na naslednji sliki bomo videli malo bolj zapleten proces: če lahko najdemo trikotnik, ki vsebuje enoto, ki je ne vsebuje katera od njegovih strani, lahko zaključimo, da je prostor vsaj dvodimenzionalen.



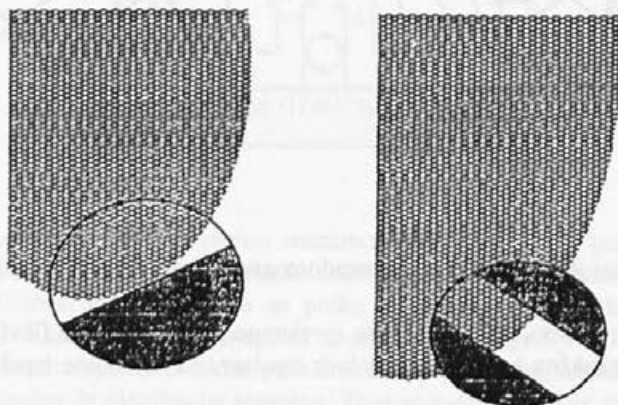
Prva slika prikazuje geometrično razporeditev enot, druga pa odgovarjajoči Hasse diagram.

Sedaj lahko pogledamo, kako se obnaša sprejemno polje (receptive field). Struktura takšnega polja je nekakšna kombinacija delnih izpeljav. Kaj so delne izpeljave, bomo videli takoj.



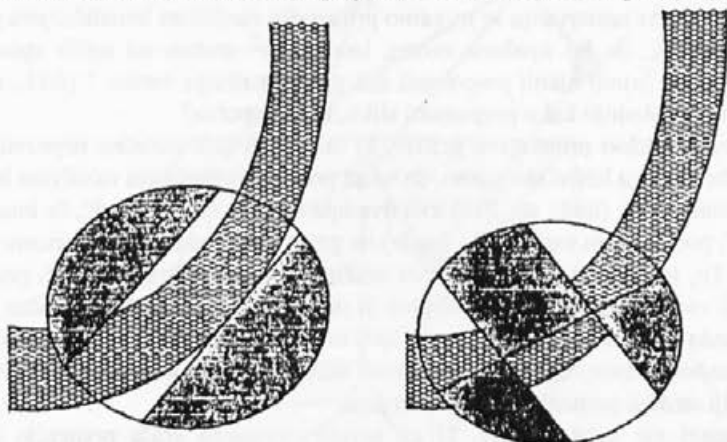
Prva, druga in tretja izpeljava glede na eno dimenzijo, čisto spodaj vidimo mešano izpeljavo.

Matematična konstrukcija, ki globalno opiše sprejemna polja, se imenuje "jet-extension", kjer je "jet" razred funkcij, ki se ujemajo na določeni točki aplikacije v vseh delnih izpeljavah. "Jet" nima geometrijske strukture, zato sprejemno polje nima fiksirane semantične vsebine. To lahko prikažemo iz dveh geometrijskih objektov: prvi je "mejna krivulja", drugi pa "začrtana krivulja". V primeru mejne krivulje najprej opazimo smer gradienta (izpeljava prvega reda). Potem pogledamo izhod (izpeljava drugega reda). Oba procesa prikazuje spodnja slika:



Prva izpeljava najde orientacijo meje, druga izpeljava pa v pravokotni smeri proizvede signal, proporcionalen meji krivulje.

V drugem primeru, ko gre za začrtano krivuljo, najprej zaznamo orientacijo črte, nato pa vidimo izhod (mešana tretja izpeljava). Primer vidimo na spodnji sliki:



Izpeljava druge stopnje (zaznava linije) najde orientacijo linije, nato pa izpeljava tretje stopnje proizvede signal, ki je proporcionalen liniji krivulje.

Posamezne delne izpeljave tvorijo mrežo, ki jih povezuje prek sinaptičnih zvez. Tako dobimo sprejemno polje, ki se "prižge" glede na različne oblike in se tudi "nauči" različnih oblik, kar pomeni, da lahko zazna različne oblike ali vzorce.

Sistem, ki ga je razvil Koenderink, je zelo zanimiv, dodati pa mu velja nekaj kratkih opomb. Ne smemo ločevati motoriuma od sensoriuma, razen zaradi lažje predstavljenosti, prav tako ne smemo ločevati sintakse od semantike, kot da je eno pred drugim.

Model je dober, ker govori o predstavnikih empiričnega sveta v semantiki in sintaksi, tudi topološkost sistema je dobra rešitev, saj nam omogoči detekcijo spacialnih struktur. Težava pa je redundanca¹ sistema, ki ga avtor imenuje "jet-representation", čeprav po njegovih besedah naš vizuelni sistem ne more bistveno zmanjšati redundance.

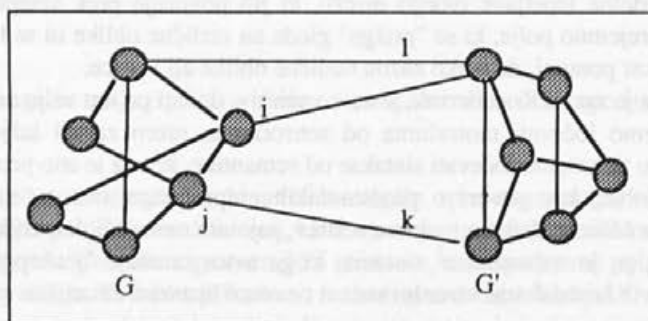
Če ostanemo še naprej na področju zaznavanja in strukturiranja zaznanega, potem se moramo ustaviti pri *invariantah*, tistih elementih zaznavanja, ki se ne spreminjajo in so po vsej verjetnosti vrojeni. Zaznavanje namreč invariante preprosto zahteva, saj se podobe, ki jih človek sprejema, nenehno spreminjajo. Posamezni elementi se kljub spremembam ne spreminjajo, ampak ostajajo vedno enaki. To so invariante. Ker je invariant samo nekaj, vidimo, da je že sama percepcija inteligentno obnašanje, kot se je izrazil E. Bienenstock (7). Ena sama funkcija pri gledanju vključuje delovanje na več nivojih hkrati. Nek objekt ostane invarianta, če se ne spremeni tudi potem, ko se objekti, ki jih zaznavamo, spremenijo. Invariante so relacijske, kar pomeni, da nam povedo, kakšen je odnos posameznih elementov objekta med seboj. Takšni invariantni elementi omogočajo primerjavo, ki poteka takole. Iz opažene slike izluščimo določen *graf*, ki ga nato primerjamo s prototipi grafov v našem spominu. Ti prototipi so del znanja, ki ga imamo vskladiščenega v možganih. Za opaženi graf možgani poiščejo najboljšo

¹ Redundanca pomeni preobilje.

primerjavo. Primerjava omogoči identifikacijo objekta. Vzemimo dva grafa G in G' . Primerjava obeh grafov pomeni oblikovanje nekakšne karte (map), ki poveže elemente obeh grafov na tak način, da ohrani strukturo grafa. Primerjava, o kateri tukaj govorimo, pa ni isto kot prepoznavanje vzorcev, kajti to nam takoj pride na misel. E. Bienestock pravi o tem tole: "Pri zaznavanju se moramo prilagoditi različnim izmaličenjem podobe. Če bomo zahtevali, da bo opaženi vzorec izomorfen² enemu od naših spominskih grafov, verjetno ne bomo nikoli prepoznali niti enega realnega vzorca" (ibid., str.216). Problem je torej naslednji: kako prepoznati sliko, ki ni popolna?

Potrebujemo takšno primerjavo grafov, ki bo vštela tudi različne nepravilnosti in napake podobe. Iz tega lahko sklepamo, da mora primerjava zadostiti različnim lokalnim zahtevam. Bienestock (ibid., str. 216) loči dva tipa takšnih zahtev. Prvič, če imamo dva grafa G in G' , potem mora vsak zaplet (node) na grafu G odgovarjati ustreznemu zapletu na grafu G' . To, pravi avtor, oblikuje prvo družino lokalnih zahtev. Drugič, primerjava mora ohraniti vse povezave. Zahtevi, ki smo ju pravkar našteali, sta dokaj močni, kajti na sliki mimogrede pride do popačenj in te je tudi treba prenesti. Zahteve se tako kršijo, to pa prinese majhno kazen. Če damo vse kazni skupaj, pravi Bienestock, dobimo vsoto stroškov. Nižji strošek pomeni boljšo primerjavo.

Imamo torej niz subprimerjav, ki na nivoju celotnega grafa pomenijo določen utrošek in s tem boljšo ali slabšo primerjavo. Povezave med dvema grafoma so vedno fiksne, spreminjajo se lahko le povezave znotraj grafa. Vzemimo primer:



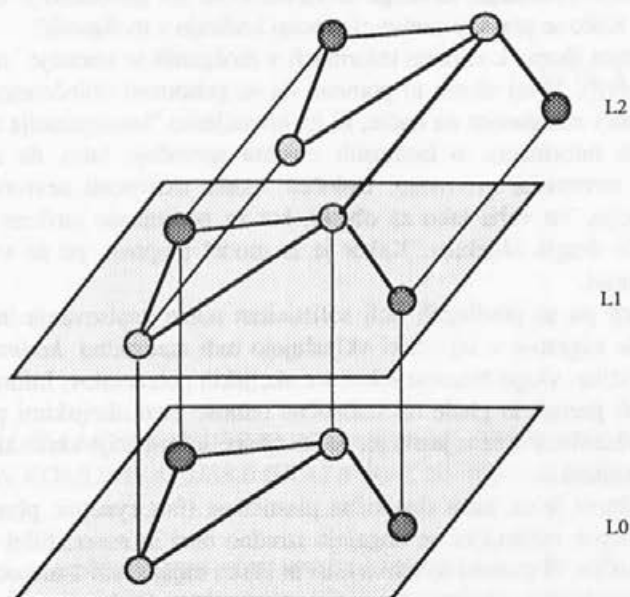
Na grafu G imamo povezavo $i-j$, ki je binarno ovrednotena, kar pomeni, da je lahko 0 ali 1. Omenjena delna povezava je lahko on ali off, kar definira stanje povezanosti. Primerjava dveh grafov sestoji iz vsote izomorfizmov med več subgrafi.

Primerjava dveh subgrafov ali dveh grafov temelji na informacijah, ki jih je treba prenesti. Ob vsaki informaciji pa se seveda pojavi tudi hrup, i.e. moteči signal, ki ima svojo strukturo, ki jo je težko ločiti od strukture drugih signalov. Ločevanje med hrupom in signalom zato zahteva visoko strukturirano vedenje (higher - level knowledge), ki ga npr. samo ločevanje podobe od ozadja ne zahteva (low-level task). Oba procesa sta zato med seboj povezana.

Ko človek gleda podobe, se najprej odvija proces primerjave, i.e., identifikacije značilnosti podobe, potem pa ta proces vodi proces segmentiranja ali ločevanja podobe od ozadja. Gre za t.i. "top-down approach" (pristop od zgoraj navzdol). Najprej se odvija

² Izomorfizem pomeni enako obliko dveh ali več podob.

proces, ki zahteva višjo stopnjo znanja, nato pa sledi tisti, katerega naloga je na nižji stopnji zahtevnosti. V zvezi s tem Bienenstock navaja tri ravni dogajanja (ibid., str. 223).



Raven Lo pomeni, da je podoba opažena na t.i. sivi ravni. Raven L1 predstavlja segmentiranje, podoba je oddvojena od prejšnje ravni. Raven L2 pa že predstavlja označbo grafa, ki je pripravljen za primerjavo s segmentirano podobo. Ravni L1 in L2 igrata v procesu, ki smo ga že omenili (stroški, ki nastanejo pri primerjavi), vlogo grafa G in G' . Strošek usmerja iskanje najboljše možne primerjave med prototipom in segmentirano podobo. V tem procesu tudi opazujemo različne invariante. Drugi del procesa pa zadeva interakcijo med opaženo podobo na ravni Lo in segmentirano podobo na ravni L1. Ko se odvija primerjava med podobo in ozadjem, nastopata vrednosti +1, če pripada podobi in -1, če pripada ozadju.

Zgornji model naj pove, da imamo pri opazovanju sveta vedno vključena dva procesa. Prvi zajema segmentiranje, drugi pa primerjavo ali interpretacijo. Primerjava zasleduje optimum. Takoj, ko nekaj opazimo, postavimo hipotezo o tem, kaj naj bi to bilo. Prototipov je več (A, B, C itd.) in končna odločitev je odvisna od najboljšega rezultata, ki ga da primerjanje.

Naj povzamemo:

(i) pri opazovanju nastopajo določene invariante, ki stojijo na predpostavki, da so ustrezne informacije vedno relacijske.

(j) E. Bienenstock predlaga pristop za prepoznavanje invariantnih vzorcev. Prepoznavanje je bistveno primerjava.

(k) Primerjava med opaženo podobo in prototipom je povezana s segmentiranjem podobe od njenega ozadja.

(l) Pri primerjanju, ki bistveno poteka na subnivojih, vedno pride do določenih odstopanj in končna izbira bo odvisna od optimalnih stroškov.

(m) Optimalni utrošek je seveda najmanjši utrošek, ki se ga da zajeti z algoritmom.

(n) Prikazali smo model, ki zajema istočasno potekanje dveh procesov-segmentiranje in identifikacija podobe.

Ostane še zadnje vprašanje, ki se ga moramo lotiti, ko govorimo o človekovem opazovanju sveta. Kako se pravkar sumirani procesi kodirajo v možganih?

Najbolj preprosta shema kodiranja informacij v možganih se imenuje "rate-coding" (zapisovanje razmerij). V tej shemi to pomeni, da se prisotnost določenega objekta v vidnem polju sporoči možganom na način, ki ga imenujemo "konfiguracija aktivnosti". To pomeni, da se informacije o lastnostih objekta sporočajo tako, da se oblikuje specifičen vzorec nevronske aktivnosti. Določen vzorec aktivnosti nevronov pomeni določeno informacijo. To velja tako za objekt, kot za posamezne attribute objekta in njegove odnose do drugih objektov. Kakor je ta model preprost, pe še vedno uživa spoštovanje v literaturi.

Nekateri avtorji pa so predlagali bolj sofisticiran način zapisovanja informacij v možganih. Novejše sugestije v tej smeri vključujejo tudi *statistično kodiranje*. V tem modelu igrajo odločilno vlogo časovne sekvence akcijskih potencialov. Informacije se v nekaj milisekundah prenašajo glede na statistične odnose med akcijskimi potenciali v različnih živčnih vlaknih. Povsem jasno je, da so takšne informacije skrite tistim, ki so opremljeni z elektrodami.

Naslednja možnost je t.i. hitra sinaptična plastičnost (fast synaptic plasticity). V tem modelu so sinapse mesto, kjer se dogajajo izredno hitri in reverzibilni procesi, ki vplivajo na transmisijo. Ti procesi so lahko hitri in lahko trajajo tudi 1 mesec. Sinapse v tako kratkem času prehajajo iz stanja on v stanje off. Posamezni odnosi se v tem primeru zapisujejo bodisi na način časovinih odnosov med aktivnostjo v nevronu i in aktivnostjo v nevronu j, bodisi tako, da se ojačajo sinapse med nevronom i in nevronom j. V prvem primeru govorimo o *koaktivnosti*, v drugem primeru pa govorimo o *povezovanju*. Pozitivna povratna informacija pomeni, da se bo povečala stabilnost povezav in vzorcev, pri tem pa se ni bati, da bi se takšni vzorci porušili, vsaj ne tako zlahka, kajti povprečna stopnja vzburjenosti v korteksu je nadzorovana, kar pomeni, da kritična vrednost ne more biti prekoračena. Ko se vzorci stabilizirajo, nastane dolgoročni spomin, ki je ireverzibilen.

Vprašanje, ki pa ostane, se glasi: koliko se možgani naučijo in koliko informacij je že vpisanih vanje.

LITERATURA

- 1) Rolf Eckmiller raziskuje na Institutu za fizikalno biologijo, oddelek za biokibernetiko Univerze v Düsseldorfu, ZRN.
- 2) Concepts for Changing Neural Network Topology, comments by Rolf Eckmiller, v W. von Seelen, G. Shaw, U.M. Leinhos (eds.), Organization of Neural Networks, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1988, str. 163-6.
- 3) Martin I. Sereno raziskuje na Kalifornijskem institutu za tehnologijo, oddelek za biologijo, Pasadena, ZDA.
- 4) Sereno M.I., The Visual System, ibid. str. 167-84.
- 5) Jan J. Koenderink raziskuje v Fizikalnem laboratoriju Univerze Utrecht, Nizozemska.
- 6) Koenderink J.J., Design for a Sensorium, ibid, str. 185-207.
- 7) Elie Bienenstock raziskuje v Laboratoriju za nevrologijo Univerze v Parizu (Universite de Paris-Sud), Francija.
- 8) Bienenstock E., Neural - Like Graph-Matching Techniques for Image Processing, ibid., str. 211-35.