

Od oka do svijesti - kako radi naš vizualni sustav?

S. Marčelja¹

Institut "Ruđer Bošković", Zagreb, Bijenička 54

Da bismo razumjeli osnove rada našeg vizualnog sustava, potrebno je bar elementarno poznavanje svih prirodnih znanosti – od fizike do neurofiziologije. Problem je, stoga, zanimljiv, i uči nas potrebi za interdisciplinarnim znanjem koje se u našem obrazovnom sustavu uglavnom zanemaruje. Dodatna motivacija za studenta takvih problema jest što će ujedno naučiti osnove obrade signala ili reprezentacije slika. To se onda, na primjer, može iskoristiti u biomedicinskim (dijagnostičkim) primjenama ili u strojnom prepoznavanju oblika.

Za fizičare su zanimljivi mnogi koraci u putovanju informacije od časa kad ulazne zrake padnu na rožnicu oka pa sve do diskretnih akcijskih potencijala kojima neuroni prenose informaciju između oko 10^{10} stanica koje čine mozak. Svaki od neurona u mozgu stvara oko 10^4 veza, te se iz toga vidi ogromna kompleksnost problema. Valja još reći i da je daleko najveći dio obrade podataka u mozgu nelinearan i stoga specifičan za određeni zadatak i teško razumljiv.

Nekoliko općenitih principa ipak nam pomaže pri razumijevanju algoritama i logike obrade u vizualnom korteksu. Korteks je sistem koji se sam organizira prema principima razrađenim u milijunima godina evolucije. Količina informacija u DNK lancima embrionalne stanice manja je od 1GB, dakle ni približno dovoljna da bi se specificirale veze u mozgu. Veze se uspostavljaju prema određenim principima, na osnovi aktivnosti u ranoj dobi razvoja i u skladu s principom optimizacije svakog od stupnjeva obrade za specifičan zadatak.

Mozak ostaje plastičan i u odrasloj dobi i naši neuroni mogu, prema potrebi, dobiti nove zadatke. Mogućnost geneze novih neurona tema je sadašnjih istraživanja². Naravno, moguć je i obratni proces, uništavanje neurona neaktivnošću ili drogom. Svi događaji u životu ostavljaju trag u plastičnim (promjenjivim) sinaptičkim vezama između individualnih neurona.

Vratimo li se sad na vizualni sustav, prva zanimljiva pitanja su ona iz optike oka, aberacija i potrebnih optičkih korekcija tako da oštra slika svijeta padne na retinu.³

¹ ravnatelj@irb.hr

² Na primjer P. Rakić (2004) *Nature* 427, 685-686.

³ Optička svojstva:

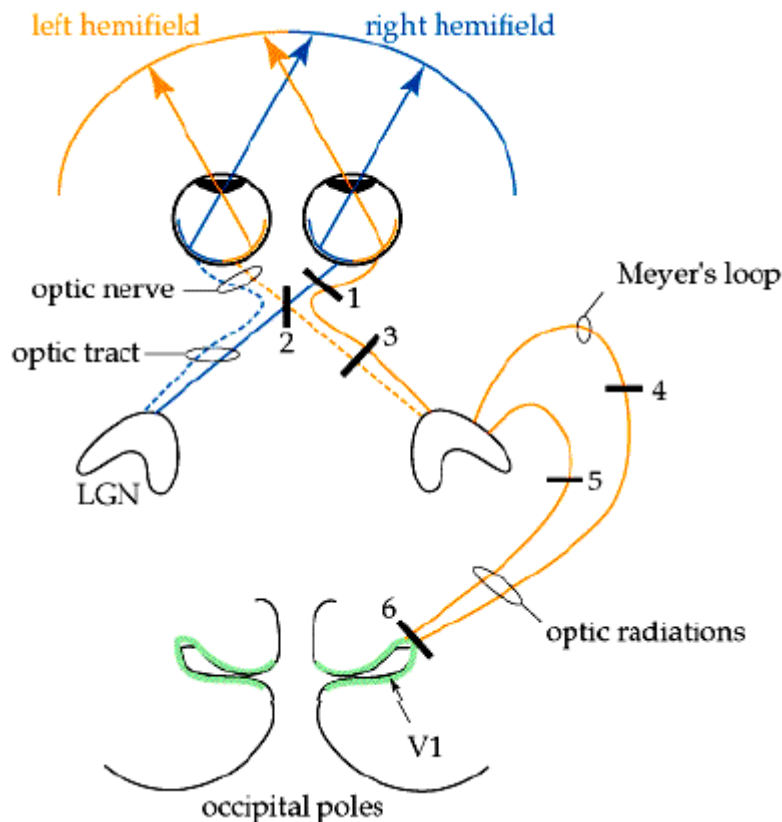
<http://www.neuro.uu.se/fysiologi/gu/nbb/lectures/EyeOptics.html>

ili

<http://thierry.baudart.waika9.com/unifocal/doc/>

U receptorima retine,⁴ fotoni pobuđuju molekule rhodopsina i pokreću biokemijsku kaskadu koja pojačava signal. Osjetljivost i pojačanje izvanredno su efikasni pa tako, na primjer, neki insekti mogu detektirati dolazak samo jednog fotona (kod ljudi je osjetljivost nekoliko puta manja). Biokemijska kaskada primjer je niza sličnih procesa u organizmu gdje se slabi inicijalni signal jako pojačava, a intermedijarni spoj je cGMP.

Depolarizacija fotoreceptora nakon pojačanja pobuđuje aktivnost stanica u sljedećih nekoliko slojeva retine. Nakon što je slika vizualnog svijeta zabilježena, na retini oka počinju prvi od mnogih stupnjeva obrade informacija. U tim prvim stupnjevima obrade kroz nekoliko živčanih slojeva retine informacije se komprimiraju. Otprilike 10^8 fotoreceptora u svakom oku šalje vizualnu informaciju kroz samo 10^6 linija u optičkom živcu preko relejnih stanica (lateral geniculate nuclei, LGN na slici) u primarni vizualni korteks⁵ koji se nalazi na stražnjoj strani glave.



Slika 1 Put kojim vizualna informacija prolazi od oka do mozga.

Lijeva strana vizualnog polja reprezentirana je u desnoj strani korteksa, i obratno.

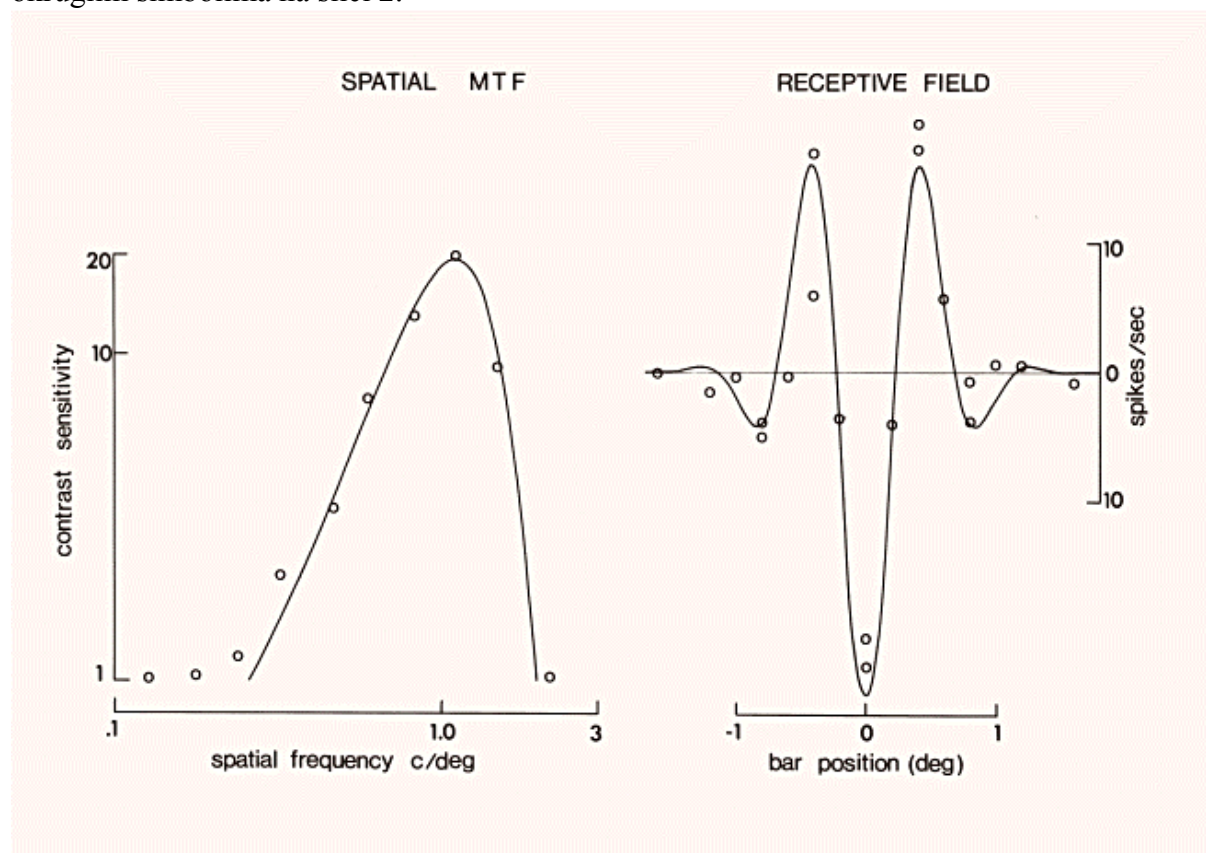
⁴ The Washington University School of Medicine
Neuroscience Tutorial
<http://thalamus.wustl.edu/course/>

⁵ Primarni vizuelni korteks
<http://webvision.med.utah.edu/VisualCortex.html>

Organizacija vizualne informacije u tom inicijalnom sloju korteksa (područje V1 na slici) slijedi vrlo zanimljivu logiku koja se može povezati s određenim koracima u razvoju fizike iz doba Heisenberga, Von Neumanna i Gabora. (To je područje u kojem sam radio prije više od dvadeset godina, na samom početku njegova razvoja.)

Pokusi na mačkama i majmunima vrše se tako da se mikroelektrodom mjeri odgovor stanice na svjetlosni signal koji pada negdje na zastor u koji gleda pokusna životinja. Rezultati pokazuju da najjednostavnije stanice u vizualnom korteksu odgovaraju na svjetlo u određenom ograničenom dijelu vizualnog polja, i to se područje zove receptivno polje.

Ako je stimulus svijetla linija, odgovor jednostavnih stanica izgleda kao što je prikazano okruglim simbolima na slici 2.



Slika 2 Mjerenja⁶ (kružni simboli) i teorija⁷ za odgovor jednostavnih stanica u vizualnom korteksu.

Kad je Heisenberg 1927. godine pronašao princip neodređenosti,

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar,$$

⁶ R. L. De Valois, D. G. Albrecht and L. G. Thorell, Cortical cells: Bar and edge detectors or spatial frequency filters, in *Frontiers in Visual Science*, Springer, New York 1978.

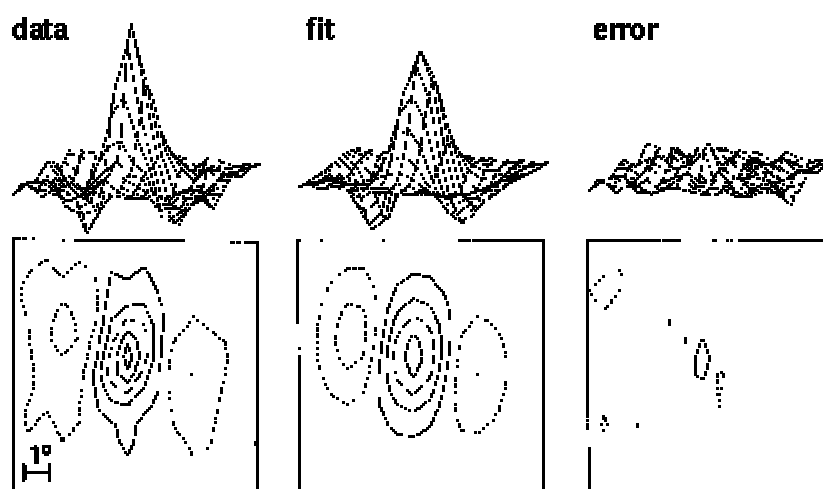
⁷ S. Marčelja (1980) Mathematical description of the responses of simple cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, vol.70, no.11, pp.1297-1300.

odredio je i funkcije koje je taj princip zadovoljavao sa znakom jednakosti. Funkcije su produkt Gaussove funkcije i trigonometrijskih funkcija, kao

$$\psi(x) = a \exp(-bx^2) \cos(x)$$

Prikazana funkcija je simetrična, dok će za antisimetrične funkcije $\cos(x)$ biti zamijenjen sa $\sin(x)$. Funkcije su pokazane kao pune linije na slici 2. Od njih se može sastaviti kompletna reprezentacija bilo kakve funkcije, kao što je to otkrio Von Neumann. Upravo je ta reprezentacija ona koju vizualni korteks koristi u inicijalnim stupnjevima obrade informacija.

U dvije dimenzije, što je realna situacija, slika izgleda kao na slici 3.



Slika 3 Mjerenja⁸ receptivnog polja jednostavne stanice upoređena s dvodimenzionalnim Gaborovim signalom.

Reprezentacija je zanimljiva i zato što je to jedan od primjera u kojima se slike stvaraju od lokaliziranih valića,⁹ a algoritam se može iskoristiti kao efikasna metoda u biomedicinskoj dijagnostici¹⁰ ili drugim zadacima obrade signala. Kasniji radovi¹¹ pokazali su da je, u skladu s našim očekivanjima, ta reprezentacija najefikasnija u kompaktnom prikazu prirodnih vizualnih scena.

⁸ J.P. Jones and L.A. Palmer (1987) An evaluation of the two-dimensional gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *J. Neurophysiol.*, 58(6):1233-1258.

⁹ Gabor Wavelet Transformation:

<http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/VDM/research/computerVision/imageProcessing/wavelets/gabor/contents.html>

¹⁰ M. Unser (1996) A Review of Wavelets in Biomedical Applications, *Proceedings of the IEEE* **84**, 626-638.

¹¹ D. J. Field (1999) Wavelets, vision and the statistics of natural scenes. *Philosophical transactions of the Royal Society London A* **357**, 2527-2542.