

Neuronske mreže za vidnu percepciju i pažnju

Rimac, Sara

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Filozofski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:142:738177>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



FILOZOFSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

Repository / Repozitorij:

[FFOS-repository - Repository of the Faculty of Humanities and Social Sciences Osijek](#)



Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Filozofski fakultet Osijek
Sveučilišni prijediplomski studij psihologije

Sara Rimac

Neuronske mreže za vidnu percepciju i pažnju

Završni rad

Mentor: prof. dr. sc. Gorka Vuletić

Sumentor: dr. sc. Mateja Marić, poslijedoktorandica

Osijek, 2023

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Filozofski fakultet Osijek
Odsjek za psihologiju
Sveučilišni prijediplomski studij psihologije

Sara Rimac

Neuronske mreže za vidnu percepciju i pažnju

Završni rad

Društvene znanosti, polje psihologija, grana kognitivna psihologija

Mentor: prof. dr. sc. Gorka Vuletić

Sumentor: dr. sc. Mateja Marić, poslijedoktorandica

Osijek, 2023

IZJAVA

Izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam ovaj rad samostalno napravio te da u njemu nema kopiranih ili prepisanih dijelova teksta tuđih radova, a da nisu označeni kao citati s napisanim izvorom odakle su preneseni.

Svojim vlastoručnim potpisom potvrđujem da sam suglasan da Filozofski fakultet Osijek trajno pohrani i javno objavi ovaj moj rad u internetskoj bazi završnih i diplomskih radova knjižnice Filozofskog fakulteta Osijek, knjižnice Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu.

U Osijeku, 10. srpnja, 2023.



Sadržaj

Vidna pažnja	1
Obilježja i vrste pažnje.....	1
Pažnja kao preduvjet percepcije.....	3
<i>Sljepoća za promjene</i>	3
<i>Treptaj pažnje</i>	3
Utjecaj pažnje na procesiranje informacija i doživljavanje cjelovitog svijeta	4
Istraživanje mehanizama vidne pažnje pomoću računalne neuroznanosti.....	5
<i>Konekcionizam</i>	6
Usmjerena ili selektivna vidna pažnja	6
Prostorna pažnja.....	6
<i>Metafora reflektora</i>	7
<i>Metafora zumirajućih leća</i>	7
Pažnja usmjerena na objekte	7
<i>Teorija inkrementalnog grupiranja</i>	8
<i>Balintov sindrom</i>	9
Pažnja usmjerena na obilježja	9
<i>Stroop efekt</i>	10
Neuronske mreže kao način modeliranja mozgovnih funkcija.....	11
Razumijevanje složenosti ljudskog mozga	11
<i>Biološke neuronske mreže</i>	12
<i>Umjetne neuronske mreže</i>	13
Simulacijsko modeliranje.....	13
Marrova teorija.....	14
Neuronske mreže za vidnu selektivnu pažnju.....	15
<i>Lateralna inhibicija</i>	15
<i>WTA</i>	16
Primjeri WTA neuronskih modela za pojedine vrste pažnje	17
<i>F-WTA</i>	17
<i>Neuronski model za mentalno praćenje konture</i>	18
Kritike neuronskih mreža.....	19
Zaključak.....	20
Literatura.....	22

Sažetak

Vidna pažnja može se fleksibilno usmjeriti na ograničeno područje prostora, cijeli objekt ili dimenzije obilježja kao što su boja i orijentacija. Pri tome se nužno govori o selektivnoj vidnoj pažnji. Naime, prizor okoline obično sadrži golemu količinu informacija koje ne možemo obraditi istovremeno zbog ograničenog kapaciteta obrade vidnog sustava. S obzirom na ovo ograničenje, možda nije iznenađujuće da su čimbenici koji utječu na vidnu pažnju, kao i mehanizmi koji su u osnovi jedinice njenog odabira, među temama koje se najviše proučavaju u modernoj psihologiji. Međutim, pažnju, kao izrazito složen psihološki fenomen, nije moguće razumjeti koristeći samo jedan znanstveni pristup. Stoga je u potrazi za razumijevanjem vidnog sustava postalo sve jasnije da je integracija neurobiologije, psihologije i računalnog pristupa ključna. Računalni pristupi igraju izrazito bitnu ulogu u spoznavanju funkcioniranja vidne pažnje, s obzirom da mogu otkriti kako će vidni sustav vjerojatno riješiti njemu svojstvene probleme, čime se poboljšava naše razumijevanje neurobiologije u osnovi takvog psihološkog procesa. Konekcionistički računalni modeli predstavljaju neuronski računalni pristup ili pristup neuronskih mreža koji se može jednostavno definirati kao interdisciplinarno područje nastalo spajanjem istraživačkih napora iz psihologije i neurobiologije sa znanjima iz matematike i informatike. Razvijanje računalnih modela koji opisuju kako se pažnja raspoređuje unutar dane vizualne scene bio je važan izazov za računalnu neuroznanost. Cilj ovog rada jest opisati pažnju kao složen psihološki fenomen te pružiti primjere računalnih modela koji bi upotrijebili njeno razumijevanje.

Ključne riječi: vidna percepcija, vidna pažnja, neuronski računalni modeli, simulacijsko modeliranje

Vidna pažnja

U okviru neuroznanosti vid je najistraženiji osjetni modalitet (Marić i Domijan, 2018b). Proces vida počinje ulaskom svjetlosti u oko. Rožnica i leća fokusiraju svjetlost na mrežnicu (retinu). Ista zatim pretvara svjetlosnu energiju u elektrokemijski signal koji se prenosi niz optički živac do mozga u primarni vidni korteks u okcipitalnom režnju mozga (Tan, 2017). Međutim, vid nije samo jednostavan proces preslikavanja intenziteta svjetla kojega registra retina u unutarnju reprezentaciju u mozgu. U pitanju je cijeli niz kompleksnih neuronskih mreža specijaliziranih za analizu različitih aspekata vidnih podražaja (Bulter, 2001; Lennie, 1998). Iz primarnog vidnog korteksa signal se prosljeđuje drugim dijelovima mozga radi tumačenja signala (Tan, 2017). Takav skup složenih izračuna koji pretvaraju nepotpunu sliku mrežnice u bogatu i točnu reprezentaciju vanjskog okruženja omogućuje vidnu percepciju (Palmer, 1999). Određivanje načina na koji mozak postiže ovaj podvig značajan je izazov za psihologiju (Marić, 2022).

U svakodnevnoj percepciji okoline ljudi se suočavaju s vizualnim prizorima koji sadrže mnogo različitih objekata i još više mogućih odnosa među njima (Kravitz i Behrman, 2011). U isto vrijeme odlučuju što bi bilo zanimljivo pogledati, a što ne. Međutim, pri tome ljudi čine mnogo više od pukog gledanja – usmjeravaju pažnju na obilježja u okolini što dovodi do dubljeg procesiranja tih obilježja za razliku od onih na koje pažnja nije usmjerena (Goldstein, 2011). Za razumijevanje vidne percepcije stoga je potrebno razumjeti principe djelovanja vidne pažnje. Ovaj rad posvetit će se upravo tome kroz povezivanje mehanizama vidne pažnje s neuronskim računalnim modelima. U uvodnom dijelu rada definirat će se pažnja kao složen psihološki fenomen. Ukratko će biti opisano i računalno modeliranje vidne pažnje koje može doprinijeti razumijevanju ovog kompleksnog područja. Nakon toga uslijedit će prikaz različitih vrsta selektivne pažnje utvrđenih kroz brojna istraživanja koja pružaju teorijsku podlogu za detaljnije razumijevanje neuronskih mreža. Treći dio rada bit će posvećen opisu neuronskih mreža kao načina modeliranja mozgovnih funkcija. U četvrtom poglavlju bit će opisano simulacijsko modeliranje u percepciji. U kontekstu toga bit će prikazane specifične računalne mreže za pojedine vrste selektivne pažnje. Rad će završiti zaključkom o tome koliko neuronske mreže uopće mogu doprinijeti razumijevanju područja vidne percepcije i pažnje.

Obilježja i vrste pažnje

Pri definiranju vidne pažnje treba istaknuti povezanost tog konstrukta s pokretima očiju. Naime, pokretima očiju usmjerenima na mjesto u prostoru prethodi pomak vidne pažnje na isto

mjesto. Stoga je ova dva pojma nužno promatrati zajedno (Hoffman, 1998). Pokreti očiju u ovom kontekstu nazivaju se sakadama. Sakade su povremeno prekinute pauzama, u kojima oči zaustave kretanje u svrhu dobivanja podataka o specifičnom segmentu scene. Ove stanke nazivaju se fiksacije i daju nam na znanje na što je osoba usmjerila svoju pažnju. Međutim, iako su pokreti očiju bitni, također je važno napomenuti da se usmjeravanje pažnje na predmet, objekt, osobu ili pojavu ne sastoji samo od pokretanja očiju. Pažnja se može obratiti na stvari koje nisu direktno u vidnom putu i ljudi mogu gledati izravno u nešto, a da na to nisu obratili pažnju. Odnosno, bitno je napomenuti da imamo mentalni aspekt pažnje koji je nadopuna pokretima očiju (Goldstein, 2011). Mentalna orijentacija na informacije dane u vizualnom modalitetu ima najvažniju ulogu u koordinaciji vida i motoričke aktivnosti (Borojević i Gvozdenović, 2013). Taj se proces odvija kontinuirano (nismo ga ni svjesni) i ostvaruje se na temelju dviju karakteristika pažnje – kapaciteta i selektivnosti. Naime, za dani fiksni kapacitet, količina pažnje može se fleksibilno usmjeriti na pojedine aspekte okoline (Gvozdenović, 2011; prema Borojević i Gvozdenović, 2013). Također, vizualna pažnja odabire informacije prema njihovoj trenutnoj važnosti za organizam, pa se neke informacije prihvaćaju, a neke odbacuju.

Pažnja, jednostavno rečeno, može biti podijeljena ili selektivna. U svakodnevnom životu uglavnom se usmjeravamo na više stvari odjednom (primjerice tijekom vožnje potrebno je paziti na druge automobile i prometne znakove, pogledavati u retrovizor, slušati suputnika itd.), a takva se situacija naziva podijeljenom pažnjom (Goldstein, 2011). S druge strane, postoji selektivna pažnja koja se može definirati kao mehanizam koji ograničava mentalnu obradu na važne događaje u našem okruženju (Vatterott i Vecera, 2015). Ljudi se konstantno susreću s ogromnom količinom informacija, no, unatoč tome, doživljavaju naizgled jednostavno razumijevanje vizualnog svijeta. Ključ tog procesa je upravo selektivna vidna pažnja – to je mehanizam koji gledanje pretvara u viđenje (Carrasco, 2011). Tako definirana, pažnja je iskonska karakteristika spoznaje (Nobre, 2018). Selektivna pažnja jest sposobnost davanja prioriteta jednim stvarima, a ne drugima. Međutim, što određuje taj prioritet? Na primjer, optimalna strategija u mnogim situacijama jest obratiti pažnju na podražaje koji su bitni za trenutno ponašanje. To je pažnja vođena ciljem, tzv. silazna pažnja ili pažnja *odozgo prema dolje* (engl. *top-down control*), koja je potaknuta trenutnim ciljevima pojedinca i oblikovana naučenim prioritetima temeljenima na osobnom iskustvu i evolucijskim prilagodbama (Gazzaniga, Ivry i Mangun, 2019). S druge strane, postoji i automatski sustav specijaliziran za otkrivanje bihevioralno relevantnih podražaja, osobito kada su istaknuti ili neočekivani. Primjerice, kada čujemo glasnu buku, naša pažnja bit će zaokupljena upravo njome, čak i bez voljne kontrole. Vidnu pažnju mogu prije privući ljudska lica, emocionalni izrazi i tijela, nego neutralni podražaji. Intenzivni ili neočekivani događaji generiraju veće reakcije mozga od

onih podražaja koje kontroliramo svojim ciljevima, tj. kada voljno usmjeravamo pažnju (Gage i Baars, 2019). Tada govorimo o pažnji vođenoj podražajima, tzv. uzlaznoj pažnji ili pažnji *odozdo prema gore* (engl. *bottom-up control*) (Gazzaniga i sur., 2019).

Pažnja kao preduvjet percepcije

Kako bi se pokazalo zašto je pažnja bitna za percepciju, tj. kako bi se prikazao efekt ignoriranja podražaja na koji nije usmjerena pažnja, koristila su se ograničenja perceptivnog sustava. Većinu vremena perceptivni sustav ljudi radi sasvim u redu te se njegova ograničenja ne iskazuju. Međutim, psiholozi su razvili dosta lukave zadatke kako bi otkrili i istražili začuđujuća ograničenja u našoj percepciji, a time i doprinijeli razumijevanju uloge pažnje u istoj (Nobre, 2018). Sposobnost da se uoči bit scene vrlo je bitna, a postoje dokazi o tome da je za opažanje nekih detalja potrebno usmjeriti pažnju (Goldstein, 2011). Jedan način na koji je to ilustrirano jest pomoću paradigmi *sljepoća za promjene te treptaj pažnje*.

Sljepoća za promjene

Zapanjujući nalazi o pažnji dolaze iz eksperimentalne paradigme poznate kao *sljepoća za promjene* (engl. *change blindness*) (Nobre, 2018). Ovaj izraz odnosi se na iznenađujuće poteškoće koje promatrači imaju u uočavanju velikih promjena u vizualnim scenama (Simons i Rensink, 2005). Iako je otkrivanje promjena prilično dobro kada je znak promjene jasno vidljiv (tj. kada je prijelaz s izvorne na izmijenjenu verziju trenutačan i vidljiv dok se događa) i kada nikakva druga smetnja ne odvlači pažnju, ljudi su iznenađujuće nevjeshi pri otkrivanju promjene kada god je znak promjene skriven od pogleda (Simons i Ambinder, 2005). Sljepoća za promjene je interesantna ne samo jer prikazuje ulogu pažnje u percepciji nego i jer je podatak suprotan intuiciji. Naime, iako ispitanici vjeruju da bi uočili evidentne izmjene u sceni, oni to ipak ne mogu. Stoga je bitan termin u kontekstu opažanja promjene *sljepoća za sljepoću za promjene* – ispitanici su „slijepi“ na spoznaju da je *sljepoća za promjene* neizbježna (Goldstein, 2011).

Treptaj pažnje

Još jedna specifičnost perceptivnog sustava zasigurno je *treptaj pažnje* (engl. *attentional blink*) koji se definira kao ozbiljno oštećenje za detekciju druge od dvije maskirane vizualne mete, a koje se događa kada su mete prikazane unutar manje od 500 ms (Nieuwenstein i sur., 2009).

Drugim riječima, u zadacima brzog serijalnog pretraživanja vidnih podražaja sposobnost opažaća da detektira drugi podražaj prezentiran unutar 500 ms je ozbiljno narušena. Ranije se pretpostavljalo kako su, jednom kada je podražaj percipiran, mehanizmi pažnje slobodni za analizu sljedećeg podražaja. Ali, specifičnost treptaja pažnje ukazala nam je da po uspješnoj identifikaciji prvog podražaja slijede poteškoće u procesiranju idućih (Vranić, 2009).

Što ovakva ograničenja otkrivaju o prirodi ljudske percepcije? Moguće je da otkrivaju nešto o njezinoj evolucijskoj svrsi. Percepcija se može promatrati s fenomenološkog gledišta koje naglašava kvalitativne osjećaje povezane s prizorima, zvukovima i mirisima u okruženju. Međutim, pogrešna bi bila pretpostavka da percepcija postoji kako bi odražavala vanjski svijet ili barem konstruirala dobar unutarnji model za uživanje i razmišljanje. Umjesto toga, percepcija je vjerojatno evoluirala kako bi vodila adaptivno ponašanje (Nobre, 2018). Stoga je korisno razdvojiti dva aspekta percepcije – njen kvalitativni osjećaj i njenu adaptivnu svrhu (Block, 1995; prema Nobre, 2018).

Utjecaj pažnje na procesiranje informacija i doživljavanje cjelovitog svijeta

Nakon zaključka da pažnja utječe na percepciju, sljedeće pitanje koje se nameće jest: Kako pažnja može djelovati na procesiranje informacija usvojenih tom percepcijom? Posner i suradnici (1980; prema Goldstein, 2011) pokušali su odgovoriti na to pitanje. Osmislili su postupak „prethodno označavanje“ kako bi provjerili može li pažnja fokusirana na pojedino mjesto poboljšati procesiranje podražaja na tom mjestu. Pažnju su usmjeravali putem znaka koji se pojavljivao na jednoj od dvije periferne lokacije na ekranu. Pokazalo se da su sudionici brže orijentirali svoju pažnju ka mjestu na koje je upućivao znak. Posner i suradnici (1980; prema Goldstein, 2011) ove rezultate nisu interpretirali u okvirima percepcije, nego procesiranja informacija. Prema njima, rezultati postupka prethodnog označavanja pokazali su da ljudi učinkovitije procesiraju informacije tamo gdje usmjere pažnju (Goldstein, 2011).

Važna funkcija pažnje je i u stvaranju povezivanja, procesa kojim se svojstva poput boje, oblika, lokacije povezuju stvarajući percepciju potpunog predmeta (Goldstein, 2011). Fiziološki dokazi upućuju na to da vizualnu scenu u ranoj fazi analiziraju specijalizirane skupine receptora koji selektivno reagiraju na svojstva kao što su orijentacija, boja, prostorna frekvencija ili kretanje, i mapiraju ta svojstva u različitim područjima mozga (Zeki, 1976; prema Treisman i Gelade, 1980). Dakle, naš vizualni sustav ima moćne mehanizme za grupiranje svih elemenata objekta zajedno i za njihovo odvajanje od drugih objekata i pozadine. Ovaj proces opažajnog grupiranja važan je za prepoznavanje predmeta i za interakciju s objektima koji nas okružuju. To zasigurno

nije malo postignuće, pogotovo zato što možemo uočiti čak nove objekte koji se sastoje od konstelacija značajki koje nikada prije nismo vidjeli (Roelfsema i Houtkamp, 2011).

Prema teoriji integracije obilježja koju su predložili Treisman i Gelade (1980) pažnja ima glavnu ulogu u tom procesu. Značajke objekta registriraju se rano, automatski i paralelno kroz vidno polje, dok se objekti identificiraju odvojeno i tek u kasnijoj fazi, što zahtijeva usmjerenu pažnju. Autori pretpostavljaju da je vizualna scena inicijalno kodirana duž niza odvojivih dimenzija, kao što su boja, orijentacija, svjetlina itd. Kako bi se rekombinirali ti odvojeni prikazi i kako bi se osigurala ispravna sinteza obilježja za svaki objekt u složenom prikazu, lokacije podražaja obrađuju se serijski s usmjerenom pažnjom. Sve značajke koje su prisutne u istoj središnjoj „fiksaciji“ pažnje kombiniraju se tako da tvore jedan objekt. Stoga usmjerena pažnja osigurava „ljepilo“ koje integrira inicijalno odvojive značajke u jedinstvene objekte. Nakon što su ispravno registrirani, složeni objekti nastavljaju se percipirati i pohranjivati kao takvi.

Istraživanje mehanizama vidne pažnje pomoću računalne neuroznanosti

Vidna pažnja uglavnom je bila područje interesa za psihofizičare i kognitivne psihologe koji su pokušavali razumjeti principe rada i ograničenja vidne percepcije. Zadaci vidnog pretraživanja naširoko su korišteni kao alat za istraživanje funkcionalne uloge i principa djelovanja pažnje u vidnoj percepciji. Klasično gledište o pažnji koje je proizašlo iz ovakvih istraživanja odnosi se na dva funkcionalno različita stupnja vizualne obrade, a koji su prethodno navedeni: podijeljena i selektivna pažnja. Naknadno spajanje neurobiologije i psihologije u proučavanju vidne percepcije definiralo je kognitivnu neuroznanost vidne pažnje. Na taj način došlo je do izravnijeg istraživanja neuronskih mehanizama koji leže u podlozi vidne pažnje kod ljudi (Rolls i Deco, 2001). Još jedna grana koja omogućuje bolje razumijevanje jest računalna neuroznanost. Stvaranje računalnih modela za simulaciju pretpostavljenih moždanih procesa istraživačka je metoda koja je potrebna kako bi se dodatno pojasnio fenomen vidne pažnje, a uvelike može olakšati razumijevanje njezinog funkcioniranja. Simulacija je imitacija, reprodukcija ponašanja u alternativnom mediju. Simulirani kognitivni procesi obično se nazivaju umjetnom inteligencijom (*engl. artificial intelligence – AI*). Umjetni su u smislu da su artefakti ili ljudske kreacije, a inteligentni u smislu da računala izvode složene funkcije (Gazzaniga i sur., 2019).

Konekcionizam

Pokret u kognitivnoj znanosti kojim se pokušavaju objasniti intelektualne sposobnosti upravo korištenjem računalnih programa jest konekcionizam. Konekcionistički računalni modeli gotovo su uvijek računalni programi, ali programi različite vrste od onih koji se koriste u, na primjer, obradi teksta ili simboličkoj umjetnoj inteligenciji. Konekcionistički modeli specificirani su kao mreže jednostavnih računalnih jedinica, koje su apstraktni modeli neurona. Tipično, jedinica modela izračunava ponderirani zbroj svojih ulaza iz uzlaznih jedinica i šalje svojim silaznim susjedima izlazni signal koji je nelinearna funkcija njegovih ulaza. Učenje u takvim sustavima modelirano je iskustveno utemeljenim promjenama u težinama veza između jedinica (Feldman i Shastri, 2006). Slijedi prikaz pojedinih vrsta usmjerene, odnosno selektivne vidne pažnje, a čija će teorijska podloga omogućiti detaljnije razumijevanje neuronskih računalnih modela.

Usmjerena ili selektivna vidna pažnja

Vidna pažnja može se usmjeriti na ograničeno područje u prostoru, na objekt, bez obzira na njegov oblik, ili pak na obilježje poput boje, orijentacije ili smjera kretanja (Nobre i Kastner, 2014).

Prostorna pažnja

Bihevioralne studije vidne pažnje sugerirale su dva različita i komplementarna načina vizualnog odabira: jedan koji uključuje prostor, a drugi predmete (Mozer i Vecera, 2005). U modelu vizualnog odabira temeljenom na prostoru podražaji se odabiru prema lokaciji u vidnom polju (Posner, 1980). Dokazi za ovaj način odabira dolaze iz različitih izvora, uključujući prostorne zadatke prethodnog označavanja (*engl. spatial pre-cuing tasks*), u kojima nagla promjena svjetline (znak, signal) privlači pažnju na područje u prostoru. Naime, pokazalo se da opažači reagiraju brže kada se svjetlo pojavi na mjestu označenom signalom, nego kada se pojavljuje na nekom drugom mjestu. Ovakav nalaz doveo je do formiranja *metafore reflektora*, odnosno metafore prema kojoj pažnja djeluje kao zraka koja osvjetljava susjednu regiju vidnog polja, a koju su predložili Posner i sur. (1980; prema Cave i Bichot, 1999). Prostorna kontrola pažnje također je snažno sugerirana neurološkim stanjem hemispacijalnog zanemarivanja, koje

može biti posljedica lezije mozga. Ovakvi pojedinci pate od dramatičnog gubitka svijesti i/ili nezainteresiranosti za djelovanje prema događajima na suprotnoj strani od lezije mozga (Brain, 1941; prema Nobre, 2018).

Metafora reflektora

Usporedba pažnje i reflektora opisana je s dovoljno strukturalne dosljednosti i sustavnosti te je dovoljno detaljna da vodi do nekih specifičnih eksperimentalnih predviđanja o vidnoj pažnji, a koja su bila temelj za niz informativnih eksperimenata (Cave i Bishot, 1999). Prema metafori reflektora, pažnja djeluje poput zrake svjetla koja obasjava dio scene; odabire vizualne informacije koje spadaju unutar jednog, kružnog područja prostora i filtrira sve ostalo što pada izvan (Posner, 1980). Žarište pažnje ima fiksni radijus koji se može pomicati po vizualnom prostoru kako bi se istaknule njegove različite komponente. Tri različita procesa kontroliraju kretanje pažnje kroz prostor: 1) odvajanje pažnje od lokacije na koju je trenutno usmjerena, 2) premještanje pažnje na novu lokaciju i 3) angažiranje pažnje na novoj lokaciji. Svaki od ovih procesa zahtijeva vrijeme za izvođenje tako da ostavljaju jasne posljedice (troškove i koristi) u obrascu izvedbe tijekom zadatka, ovisno o tome kako je pažnja usmjerena prije prezentacije podražaja (Marić, 2022).

Metafora zumirajućih leća

Unatoč korisnim smjernicama koje je metafora reflektora dala istraživanju pažnje, modeli pažnje poprilično su uznapredovali (Cave i Bichot, 1999). Kao nadopuna metafori reflektora, predložena je *metafora zumirajućih leća* (Eriksen i Yeh, 1985) u skladu s nalazom da područje prostora odabrano pažnjom može varirati u veličini. Metafora zumirajućih leća svojevrsno dovodi do povećanja opsega metafore reflektora, i to sugerirajući da se radijus samoga reflektora može fleksibilno prilagoditi (Mozer i Vecera, 2005). Prilagodba se odnosi na zumiranje ili smanjenje objektiva kamere ovisno o rezoluciji koju promatrač treba postići. Kada je potrebna veća razlučivost, reflektor se smanjuje kako bi uhvatio više detalja u manjem radijusu. Suprotno tome, kada je dovoljna niska razlučivost, svjetlo reflektora se širi poput procesa smanjivanja kako bi se pokupile manje detaljne informacije u većem prostoru (Eriksen i St. James, 1986).

Pažnja usmjerena na objekte

Rani radovi naglašavali su lokaciju u retinotopskoj karti kao reprezentacijski format nad kojim djeluje pažnja (npr. Posner, 1980). Međutim, do ranih 1980-ih postalo je jasno da prostor

nije jedini referentni okvir unutar kojeg pažnja djeluje (Chen, 2012). Studije ukazuju i na objekt kao jedinicu odabira. Duncan (1984; prema Marić i Domijan, 2018a) je pokazao da je lakše uočiti dva atributa ako se pojavljuju na istom objektu u odnosu na situaciju u kojoj se svaki atribut pojavljuje na drugom objektu. Ovaj nalaz implicira da je objekt odabran kao cjelina, a repliciran je mnogo puta (Scholl, 2001; prema Marić i Domijan, 2018a). Taj se učinak ne može objasniti prostornom pažnjom jer su objekti bili prostorno superponirani (dijelili su iste lokacije) (Marić i Domijan, 2018a).

Dakle, istraživanja su pokazala da usmjeravanje pažnje na jedan dio objekta dovodi do prednosti obrade za druge dijelove tog istog objekta (Chen, 2012). Postoji nekoliko suprotnih objašnjenja kako pažnja usmjerena na objekte uopće stvara ovaj učinak. Za početak, pažnja usmjerena na objekt može djelovati na prostorno nepromjenjivom prikazu pri čemu su sva svojstva objekta povezana zajedno (Vecera i Farah, 1994; prema Domijan i Marić, 2022). Druga je mogućnost ta da je učinak pažnje usmjerene na objekt posljedica prioritizacije pažnje. To znači da prostorna pažnja slijedi sekvencijalni put. Prvo se usmjerava na označenu lokaciju, zatim se pomiče na nenadzirani dio praćenog objekta i konačno „skoči“ na distraktorski objekt što rezultira prednošću obrade nenadziranog dijela označenog objekta u odnosu na distraktor (Shomstein i Yantis, 2002, 2004). Naposljetku, postoje dokazi da se pažnja usmjerena na objekt širi duž svih mjesta koja zauzima označeni objekt (Richard i sur., 2008; prema Domijan i Marić, 2022). Na taj način pažnja usmjerena na objekte odabire grupirani niz lokacija na retinotopskoj mapi (Hollingworth i sur., 2012; O’Grady i Müller, 2000).

Teorija inkrementalnog grupiranja

Roelfsema i Houtkamp (2011) razvili su teoriju inkrementalnog grupiranja (IGT) kako bi objasnili kako se reprezentacija grupiranog niza lokacija formira u vidnom korteksu. Teorija inkrementalnog grupiranja (IGT) bavi se ulogom objektne pažnje u perceptivnom grupiranju na psihološkoj razini i, u isto vrijeme, ocrta mehanizme za grupiranje na neurofiziološkoj razini. IGT predlaže da postoje dva procesa za perceptivno grupiranje: osnovno i inkrementalno grupiranje. Osnovno grupiranje oslanja se na uzlazne veze kako bi se postigla brza vizualna segmentacija scene prema znakovima geštalt grupiranja poput blizine, sličnosti, zatvaranja i drugih (Brooks, 2014; prema Marić, 2022). Nasuprot tome, inkrementalno grupiranje oslanja se na horizontalne i silazne veze (Roelfsema, 2006; prema Marić, 2022). Inkrementalno grupiranje je dugotrajan i kapacitetom ograničen proces koji zahtijeva postupno širenje pojačane neuronske aktivnosti preko prikaza objekta u vidnom korteksu. To je spor, serijski proces koji zahtijeva više

vremena za pokrivanje većih udaljenosti na vidnoj karti. Inkrementalno grupiranje je vizualna rutina koja čini eksplicitnim one prostorne odnose koji nisu lako dostupni u osnovnom grupiranju. Primjeri takvih odnosa su leže li dvije točke na istoj konturi ili ne, ili leže li točke unutar ili izvan zatvorenog područja (Ullman, 1984, 1996).

Balintov sindrom

Dodatni dokaz za postojanje objektno usmjerene pažnje dolazi iz istraživanja na bolesnicima koji imaju Balintov sindrom. Balintov sindrom rijedak je neurološki poremećaj povezan s bilateralnim parijeto-okcipitalnim oštećenjem. Sindrom se tipično sastoji od okularne apraksije, optičke ataksije, poremećaja prostorne orijentacije i lokalizacije te smanjene sposobnosti detekcije i identifikacije više od jednog objekta ili jednog od njegovih lokalnih značajki u isto vrijeme – simultanagnozija (Balint, 1909; prema Mevorach i sur., 2014). Izraz simultanagnozija ovdje se odnosi na ozbiljne poteškoće u tumačenju složenih scena s više objekata i slabu sposobnost opažanja dva istovremeno prikazana objekta u odnosu na prezentaciju pojedinačnih objekata (Kinsbourne i Warrington, 1962; Humphrey i sur., 1994). Stoga se takvi nedostaci uočavaju ne samo u složenim scenama, već i kada je potrebno integrirati zasebne komponente u jedan objekt. Dakle, bolesnici s Balintovim sindromom obično imaju poteškoća u percipiranju više objekata istovremeno i u procjeni odnosa između više objekata u sceni. Ti se nedostaci ne moraju uočiti samo u složenim scenama, već i kada se lokalni elementi pojedinačnih objekata moraju integrirati u perceptivnu globalnu cjelinu. Stoga, za razliku od zdravih promatrača, pacijenti sa simultanagnozijom tipično pokazuju pristranost prema lokalnim oblicima, čak do te mjere da ne mogu identificirati globalne podražaje (Mevorach i sur., 2014).

Pažnja usmjerena na obilježja

Iako predmeti mogu biti prirodnija psihološka jedinica za usmjeravanje ponašanja, a prostor je lako dostupan za orijentaciju, ipak postoje slučajevi u kojima je korisno usredotočiti se na sastavne značajke objekta unutar zadanog mjesta. I zaista, pažnja se može posvetiti ne samo prostoru ili objektu, već i određenom obilježju. Iako je takva pažnja manje proučavana od spacijalne pažnje, rezultati sugeriraju da se oslanjaju na blisko povezane mehanizme. Pažnja temeljena na obilježjima, tj. sposobnost poboljšanja reprezentacije slikovnih komponenti u cijelom vidnom polju koje su povezane s određenom značajkom, trebala bi biti osobito korisna kada se traži podražaj s tim obilježjem. Ova sposobnost otkrivanja takvog obilježja (ili

bihevioralno relevantne stavke među distraktorskim stavkama) temelj je vrlo popularne paradigme u vizualnoj psihofizici – vizualne pretrage. U eksperimentima s vizualnim pretraživanjem, mete i distraktori razlikuju se po najmanje jednom obilježju (boji ili orijentaciji), a meta se obično definira unaprijed prije prezentacije niza pretraživanja. Bez obzira na to otkrivaju li ispitanici metu pomoću paralelnog procesa pretraživanja ili pomoću serijskog procesa koji vodi mehanizam prepoznavanja kroz slijed potencijalnih ciljnih lokacija (Wolfe, 2004; prema Maunsell i Treue, 2006), otkrivanje konačne mete moglo bi se ubrzati poboljšanjem reprezentacije komponenti slike koji odgovaraju praćenom obilježju (npr. crvena boja ili okomita orijentacija) i potiskivanjem obilježja distraktora. Takva modulacija mogla bi se postići jačanjem odgovora svih neurona koji preferencijalno reagiraju na praćeno obilježje, čime se selektivno jača reprezentacija podražaja koji dijele praćeno obilježje prije bilo koje faze u kojoj se objekti prepoznaju (Maunsell i Treue, 2006).

Neuronski korelati pažnje temeljene na obilježjima identificirani su u nekim od najranijih studija oslikavanja mozga i nastavljaju se aktivno istraživati u studijama funkcionalne magnetske rezonancije (Maunsell i Treue, 2006). Primjerice, Saenz, Buracas i Boynton (2002) su koristili funkcionalnu magnetsku rezonancu (fMRI) kod ljudi kako bi testirali može li pažnja temeljena na obilježjima globalno utjecati na vizualne kortikalne odgovore na podražaje izvan promatrane lokacije. Pažnja usmjerena na obilježje (boja ili smjer kretanja) povećala je odgovor kortikalnih vizualnih područja na prostorno udaljeni, zanemareni podražaj koji ima isto obilježje.

Stroop efekt

Najpopularniji zadatak za proučavanje pažnje temeljene na obilježjima kod ljudi je Stroop zadatak (Stroop, 1935; prema Polk i sur., 2008). Naime, taj zadatak nam može pokazati koja je uloga obilježja kod usmjeravanja pažnje. Zadatak ispitanika je imenovati boje kojom su napisane riječi za boje. U slučaju kada je riječ za boju nesukladna boji u kojoj je prikazana, ispitanicima je teško imenovati boju, odnosno imenovanje je sporije i s više grešaka nego u kontrolnom zadatku u kojem se imenuje boja besmislenih riječi ili skupa znakova (semantičko pamćenje i percepcija upućuju na različit odgovor). U sukladnom uvjetu ispitanici su nešto brži nego u kontrolnom uvjetu (za 20-tak ms) i tada govorimo o Stroopovoj facilitaciji. S druge strane, nesukladni uvjet dovodi do Stroopove interferencije, odnosno do sporijeg reagiranja u odnosu na kontrolni uvjet, a koje može biti i preko 100 ms.

Neuronske mreže kao način modeliranja mozgovnih funkcija

Razumijevanje složenosti ljudskog mozga

Mozak je kompleksni sustav ili mreža u kojoj mentalna stanja proizlaze iz interakcije između više fizičkih i funkcionalnih razina (Bassett i Gazzaniga, 2011). Razumijevanje tog sustava zaista nije niti malo jednostavan zadatak. Ljudi su vrlo složena bića i objašnjavanje procesa koji im leže u podlozi stavlja veliki izazov za znanost. Kako bismo razumjeli na koji način funkcionira ljudski mozak, potrebno je staviti naglasak na interdisciplinarnost te kombinirati različite znanstvene pristupe. Nužno je imati spoznaje iz neurofiziologije i neuropsihologije, biti upoznat s biofizičkim i sinaptičkim svojstvima neurona, znati anatomsku i funkcionalnu strukturu korteksa itd. (Rolls i Deco, 2001).

Nasreću, 1980-ih i 1990-ih, zahvaljujući velikoj intelektualnoj revoluciji, došlo je do brzog razvoja upravo tih znanstvenih područja s posebnim naglaskom na neurobiologiju i eksperimentalnu psihologiju. To nas je dovelo bliže razumijevanju biološkog i kognitivnog funkcioniranja nego što je većina znanstvenika prije ovog vremena i mogla zamisliti. Međutim, u isto vrijeme, razvila se nova pokretačka snaga – računalna znanost, a kao njezina grana posebno je napredovala umjetna inteligencija. S obzirom na daljnji razvoj ovih područja te još uvijek nepotpuno razumijevanje cjelokupnog sustava ljudskog mozga, nije posve neprirodno tražiti zajednička načela organizacije ovih polja (Butz i Kutter, 2017). Ona se ogledaju u posve novom načinu proučavanja funkcioniranja ljudskog mozga, točnije, u računalnom neuronskom pristupu (Rolls i Deco, 2001).

Prvi val interesa za neuronske mreže, također poznate kao paralelna distribuirana obrada, pojavio se nakon uvođenja pojednostavljenih neurona koji su predstavljali modele bioloških neurona te konceptualne komponente za sklopove koji bi mogli obavljati računalne zadatke. U svom najopćenitijem obliku, neuronska mreža je stroj dizajniran za modeliranje načina na koji mozak obavlja određeni zadatak ili funkciju od interesa (Haykin, 2009). To je računalni model s određenim svojstvima kao što je sposobnost prilagodbe ili učenja, generaliziranja, grupiranja ili organiziranja podataka (Kröse i van der Smagt, 1996). Mreža se obično implementira pomoću elektroničkih komponenti ili se simulira u softveru na digitalnom računalu (Haykin, 2009). Kako je prethodno spomenuto, nadahnuće za neuronske mreže izvorno dolazi iz studija mehanizama za obradu informacija u biološkim živčanim sustavima, posebno u ljudskom mozgu, a i velik dio trenutnog istraživanja algoritama neuronskih mreža usmjeren je na stjecanje dubljeg razumijevanja obrade informacija u biološkim sustavima (Bishop, 1994).

Biološke neuronske mreže

Dvije vrste stanica grade živčani sustav: živčane i potporne. Temelj živčanog sustava je živčana stanica – neuron (Pinel, 2001). Iako neuroni postoje u različitom broju oblika, za većinu je karakteristično razgranato stablo dendrita koje osigurava ulazak inputa u neuron, dok akson djeluje kao izlaz. Komunikacija između neurona odvija se na spojevima koji se nazivaju sinapse (Bishop, 1994). Neuron dobiva informacije od ostalih neurona ili pak osjetnih stanica, integrira ih te svoju obradu šalje ostalim neuronima (Domijan, 1999). Iako je svaki neuron relativno spor sustav za obradu informacija (radi na efektivnoj vremenskoj skali od oko 1 ms), masovni paralelizam obrade informacija u mnogim sinapsama istovremeno dovodi do učinkovite snage obrade koja uvelike premašuje snagu današnjih superračunala (Bishop, 1994). Sposobnost obrade podataka neurona je posljedica njegovih električnih svojstava (Domijan, 1999). Informacije koje primaju neuroni nazivaju se živčanim impulsima i elektrokemijske su prirode (Rathus, 2000). Niz živčanu stanicu prenosi se električni naboj i to zbog kemijskih promjena koje su prisutne u stanici. Također, važno je napomenuti da postoje razlike u koncentracijama iona (najvažniji ioni su oni klora, natrija i kalija) u stanici i izvan nje te da je membrana različito propusna za pojedine ione. To dovodi do razlike u električnom potencijalu (membranskom potencijalu). Svaki spomenuti ion razlikuje se u koncentraciji u stanici i izvan nje te na njega utječu dva gradijenta: električni i koncentracijski (Domijan, 1999). Naime, neuroni, kroz pukotine (sinapse), primaju ulazne podatke od drugih neurona. U tim situacijama, dolazi do otpuštanja transmitera koji prelaze u sinaptičku pukotinu te proizvode depolarizaciju ili hiperpolarizaciju u postsinaptičkom neuronu otvaranjem određenih ionskih kanala. Ekscitacijski inputi dovode do depolarizacije te neuron pokreće akcijski potencijal, dok svi inputi koje neuron prima, a koji uzrokuju njegovu hiperpolarizaciju, smanjuju vjerojatnost da će se aktivirati (jer se membranski potencijal odmiče od kritičnog praga na kojem se kreće akcijski potencijal) i opisuju se kao inhibitorni (Rolls i Deco, 2001).

Ovdje ukratko naveden i pojednostavljen prikaz bioloških neuronskih sustava daje prikladnu polaznu točku za raspravu o modelima umjetnih mreža (Bishop, 1994). Naime, ukoliko krenemo od baze živčanog sustava, tj. jednoga neurona te ga razmotrimo u kontekstu umjetnih neuronskih mreža da se zaključiti da se neuron može zamisliti na jednostavan način kao računalni element koji zbraja svoje ulaze unutar svoje vremenske konstante i, kad god taj zbroj, bez bilo kakvih inhibicijskih učinaka, prijeđe prag, proizvodi akcijski potencijal koji se širi na sve njegove izlaze. Ova jednostavna ideja ugrađena je u mnoge modele neuronskih mreža (Rolls i Deco, 2001).

Umjetne neuronske mreže

Umjetne neuronske mreže su analitički i obrazovni alat koji oponaša obrasce obrade informacija u ljudskom mozgu. Danas je poprilično raširena uporaba inteligentnih sustava i umjetnih neuronskih mreža, što neki svrstavaju i u redove osnovnih matematičkih operacija (Jamshidi i sur., 2018). Mreža je sustav sastavljen od mnogo jednostavnih elemenata za obradu koji rade paralelno, a čija je funkcija određena strukturom mreže, snagom veze i obradom koja se izvodi na računalnim elementima i čvorovima (Levine, 2019). Neuronske mreže se sastoje od dva, obično tri, a ponekad i više slojeva homogenih procesorskih jedinica. Ulazni sloj kodira ulazne karakteristike. Svaki element može predstavljati drugačiji perceptivni atribut ili element osjetilnog organa kao što je, primjerice, mrežnica. Izlazni sloj kodira izlazne karakteristike. Svaki element može predstavljati različitu reakciju ponašanja ili se svi elementi mogu koristiti za postizanje određenog ponašanja, kao što je npr. prepoznavanje lica. Srednji sloj, koji se često naziva skriveni sloj, nije izravno uključen ni u ulazne ni u izlazne procese, već ih posreduje. Bitno je primijetiti da je svaki element ulaznog sloja povezan sa svakim elementom u srednjem sloju koji je povezan sa svakim elementom u izlaznom sloju (Tryon, 1993).

Rad s neuronskim mrežama motiviran je postavkom da je ljudski mozak vrlo složeno, nelinearno i paralelno računalo, tj. sustav za obradu informacija. Ono ima sposobnost organiziranja svojih strukturnih sastavnih dijelova, poznatih kao neuroni, tako da obavlja određene proračune izrazito brzo, i to čak mnogo puta brže od najbržeg digitalnog računala koje danas postoji (Haykin, 2009). Pristup neuronskih mreža omogućuje računalno testiranje teorija koje proizlaze iz takvih spoznaja. Dakle, kako bismo ispitali je li nečije razumijevanje mozga uopće ispravno, možemo simulirati takvu teoriju na računalu i pokazati može li ona izvršiti određeni zadatak te ima li ta simulacija slična svojstva kao pravi mozak (Rolls i Deco, 2001).

Simulacijsko modeliranje

Postavlja se pitanje kako povezati kognitivnu neuroznanost vidne percepcije i selektivne pažnje s računalnim modelima neuronskih mreža. To je moguće uz pomoć simulacijskog modeliranja. Prema Domijanu (1999) simulacijsko modeliranje je znanstveno područje koje nastoji razumjeti složene pojave sastavljene od pozamašnog broja varijabli te interakcija među njima. Iako se u području vidne percepcije analizira sustav koji već postoji, nisu nam poznati mehanizmi na temelji kojih on obavlja svoje funkcije. Hipoteze o mehanizmima tog sustava možemo postaviti na temelju rezultata psihofizičkih i neuroznanstvenih istraživanja, tj. njihovih

ograničenja. Hipoteze se formuliraju na poseban način, i to u obliku algoritama. Algoritmi su poprilično jasne upute o tome kako se podražaji iz vanjskoga svijeta pretvaraju u ponašanje ili doživljavanje. Ti algoritmi testiraju se pomoću računalnih simulacija gdje se postavljeni model podvrgava različitim podražajima. Dobiveni rezultati zatim se uspoređuju sa spoznajama iz empirijskih istraživanja. Dakako, bitno je za naglasiti da će simulacijsko modeliranje donijeti smislene rezultate samo ukoliko se zasniva na kvalitetnim podacima o funkcioniranju stvarnoga sustava (Domijan, 1999).

Marrova teorija

Važno je razmotriti pitanje reprezentacije prilikom primjenjivanja simulacijskog modeliranja u percepciji. Prema Marru (1982; prema Domijan, 1999) reprezentacija je formalni mehanizam koji diktira vrstu informacija te manipuliranje istima. Na primjer, ulazne informacije za perceptivni model predstavljaju se matricom brojeva koji su sukladni funkcioniranju fotoreceptora u mrežnici. Odnosno, umjesto da idemo izučavati stvarnu mrežnicu, stvaramo model koji ima njezina bitna svojstva (nekada određena i zanemarujemo), a sve s ciljem istraživanja pretvorbe podataka koje mrežnica obavlja. Dakle, mi na ovaj način imamo mogućnost provoditi eksperimente koje na stvarnom sustavu zbog raznih ograničenja ne možemo. Simulacijsko modeliranje stoga može obogatiti naša znanja o vidnoj percepciji.

Marrov pristup zasnovan je na paradigmi obrade informacija, baš kao i cjelokupan pristup neuronskih mreža. To jest, na vidni sustav gleda se kao na svojevrsni uređaj koji obrađuje podatke. Domijan (1999) opisuje da Marr razlikuje tri razine na kojima treba analizirati takav uređaj. Prva razina jest komputacijska teorija (*engl. computational theory*). Ona želi otkriti čime se uređaj bavi i koji je razlog tome. Dakle, traži se cilj obrade informacija, zašto ga je potrebno ostvariti i logiku načina na koji to postiže. Druga razina jest reprezentacija i algoritam. Ona nastoji odgovoriti na pitanje kako možemo primijeniti danu računalnu teoriju. Ovdje je nužno odrediti reprezentaciju inputa i outputa te algoritam za pretvorbu ulaznih u izlazne podatke. Posljednja razina poznata je kao strojna (*engl. hardware*) implementacija. Na ovoj razini potrebno je utvrditi fizički moguć uređaj koji može primijeniti dani algoritam i reprezentaciju podataka. Algoritmi se mogu primijeniti u raznim fizičkim uređajima, ali koji će uređaj biti najisplativiji za primjenu ovisi zapravo o spomenutim algoritmima (Marr, 1982; prema Domijan, 1999).

Neuronske mreže za vidnu selektivnu pažnju

Razvijanje računalnih modela koji opisuju kako se pažnja raspoređuje unutar dane vizualne scene bio je važan izazov za računalnu neuroznanost. Potencijalna primjena ovih arhitektura u umjetnom vidu za zadatke poput nadzora, automatskog otkrivanja ciljeva, navigacijskih pomagala i robotske kontrole pruža dodatnu motivaciju (Itti i Koch, 2001). Računalni modeli vidne pažnje naglašavaju kontrolu razvoja pažnje odozdo prema gore temeljenu na slici (*engl. bottom-up image-based control*) (Itti i Koch, 2001). Oslanjaju se na koncept karte istaknutosti, odnosno retinotopske karte koja kodira koliko je svaka lokacija na karti karakteristična u odnosu na svoju pozadinu. Karta istaknutosti integrira paralelne ulaze iz mapa obilježja koje kodiraju vizualna obilježja kao što su boje, orijentacije, smjerovi kretanja i tako dalje. Svaka mapa obilježja detektira prisutnost svog namjenskog obilježja, ali također kodira i kontrast obilježja, to jest koliko se otkrivena značajka razlikuje od svog lokalnog susjedstva. Karta istaknutosti šalje povratni ulaz u mapu odabira, koja potom odabire lokaciju s maksimalnom amplitudom na mapi istaknutosti. Seleksijska mapa pokazuje gdje se nalazi fokus pažnje u određenom trenutku. Izračun istaknutosti i odabir najistaknutije lokacije ovise o inhibitornim interakcijama u neuronskoj mreži. Stoga će prvo biti razmotrena lateralna inhibicija (Marić, 2022).

Lateralna inhibicija

Lateralna inhibicija prva je detaljno izučena neuronska arhitektura. Prvi puta je uočena kod potkovastog raka (*lat. Limulus polyphemus*), tj. njegovih senzornih receptora koji su specifično osjetljivi na svjetlosne podražaje (Anderson, 1995; prema Domijan, 1999). Na što se zapravo odnosi lateralna inhibicija? Kako bi se razumjela ova pojava potrebno je krenuti od objašnjavanja osnovnih spoznaja. Naime, istraživanja električnih impulsa koji prolaze kroz tijelo neurona i dolaze do motornih stanica pokazala su da će neuronska aktivnost ovisiti ne samo o količini svjetlosti koju on upija u sebe nego i količini koju upijaju njegovi okolni, tj. susjedni receptori. Što je veća aktivnost okolnih receptora, to je manja aktivnost onoga kojeg mi promatramo. Ovakva saznanja omogućuju zaključivanje o inhibitornim vezama, točnije o lateralnoj inhibiciji (s obzirom da se radi o receptorima u istom sloju neurona). Isto tako, lateralna inhibicija nije uvijek istog intenziteta. Ukoliko promatramo jedan receptor, na njega će najveći inhibitorni utjecaj imati njegovi najbliži susjedi, dok će oni neuroni koji su više udaljeni od promatranoga imati puno manji utjecaj. Pojednostavljeno rečeno, što su inhibitorne veze udaljenije, ujedno su i slabije. Posve je razumljivo iz navedenoga zaključiti da lateralna inhibicija ima vrlo važnu ulogu u razumijevanju mehanizama kako vidnog, tako i drugih osjetnih sustava. Potvrđena je i kod brojnih drugi vrsta te

se stoga smatra jedinstvenom polazišnom točkom za obradu osjetnih podražaja (Anderson, 1995; prema Domijan, 1999).

Što se tiče vidnog sustava, lateralna inhibicija, kao anatomski raspored, prisutna je u svim fazama vizualne obrade, počevši od retine i lateralne genikulatne jezgre do vidnog korteksa (Spillmann, 2014; Spillmann i sur., 2015). Ona pridonosi stvaranju receptivnog polja stanice (Marić, 2022). U računalnom modeliranju često se razlikuju dvije vrste lateralnih inhibicijskih arhitektura: nerekurentna ili uzlazna inhibicija (*engl. nonrecurrent or feedforward*) i rekurentna ili povratna inhibicija (*engl. recurrent or feedback inhibition*) (Levine, 2019). Nerekurentna inhibicija odnosi se na projekciju bočnih inhibicijskih kolaterala na kasniju fazu obrade u hijerarhiji. Dakle, neuroni unutar istog mrežnog sloja ne djeluju jedni na druge. Umjesto toga, inhibicijski učinak dolazi do izražaja u sljedećoj fazi obrade. Nerekurentna inhibicija koristi se u modeliranju rane vizualne obrade, uključujući percepciju prostora, svjetline i pokreta (Grossberg, 1988). Drugi oblik lateralne inhibicije je rekurentna inhibicija (Levine, 2019) koja se odnosi na međusobne lateralne interakcije unutar istog sloja neurona. Mreža s rekurentnom inhibicijom tipično se sastoji od niza ekscitatornih čvorova recipročno povezanih s malom populacijom inhibicijskih interneurona. U ovom slučaju moguća je složenija dinamika uključujući oscilacije i kaos (Ermentrout, 1992). Vrsta dinamike koju će mreža prikazati određena je njezinim parametrima, odnosno sinaptičkim težinama koje kontroliraju snagu samoekscitacije i lateralne inhibicije. U određenim rasponima parametara, mreža s rekurentnom inhibicijom će se zaustaviti na fiksnoj točki gdje jedan neuron ostaje maksimalno aktivan, dok su svi ostali neuroni inhibirani do nule (Rutishauser i Douglas, 2009; Rutishauser i sur., 2011). Pobjednik je neuron koji primi najjači input. Ovo je ekstremni oblik natjecanja poznat kao „pobjednik uzima sve“ (*engl. winner-takes-all, WTA*) (Marić, 2022).

WTA

Natjecanje kroz zajedničku inhibiciju snažan je model neuronskog računanja (Maass, 2000; Douglas i Martin, 2007). Natjecateljske (konkurentske) mreže obično se sastoje od populacije ekscitatornih neurona koji pokreću zajednički skup inhibicijskih neurona, a koji zauzvrat osiguravaju globalnu negativnu povratnu spregu ekscitatornim neuronima (Douglas i Martin, 1991). Winner-takes-all (WTA) mreže su jedan primjer ovog motiva, koji je opsežno proučavan. Neurofiziološke i anatomske studije pokazale su da WTA krugovi modeliraju bitna obilježja kortikalnih mreža (Douglas i sur., 1989; Mountcastle, 1997). WTA mreže su one mreže

u kojima je lateralna inhibicija tako snažna da na kraju ostaje aktivan samo jedan neuron i to onaj koji je imao najveću početnu aktivnost. Zbog toga se takve mreže nazivaju „pobjednik uzima sve“.

Ova posebna sposobnost ljudskih neurona pokazala se iznimno bitnom s obzirom da se često možemo pronaći u situacijama gdje moramo donositi odluke kao što je npr. odabrati kojim smjerom krenuti na putu do cilja (lijevo ili desno), birati između borbe ili bijega kada smo u opasnoj situaciji itd. U modelima koji se bave kategoriziranjem, WTA mreža predstavlja bitnu komponentu. Razlog leži u činjenici da je neophodna aktivacija jednog neurona koji odgovara objektu i to onda kada ga je potrebno na osnovi predloženih obilježja kategorizirati ili prepoznati. Za to vrijeme ostatak neurona mora biti ugašen kako se ne bi stvorila zbrka oko identificiranja danog objekta (Domijan, 1999). Inputi koje WTA mreža odabere koriste se, osim za modeliranje donošenja odluka, i za prepoznavanje objekata i vidne pažnje (Grossberg, 1988). U modeliranju vizualne selektivne pažnje WTA mreža se koristi za odabir najistaknutijeg mjesta na koje treba usmjeriti pažnju (Itti i Koch, 2001).

Primjeri WTA neuronskih modela za pojedine vrste pažnje

Grossberg (1973; prema Marić i Domijan, 2018a) je predložio rekurentni kompetitivni model mape koji se temelji na ranžiranju nelinearne interakcije između sinaptičkog ulaza i membranskog potencijala. Izlaz modela ovisi o točnom obliku signalne funkcije koja se koristi za pretvaranje membranskog potencijala u brzinu aktiviranja. Kada je signalna funkcija odabrana da raste brže od linearne, mreža pokazuje WTA ponašanje. Nasuprot tome, kada je funkcija signala sigmoidna (oblik grčkog slova sigma „ Σ “), mreža može odabrati više pobjednika ako imaju slične razine aktivnosti. Najvažnije svojstvo ovog modela je postojanje praga gašenja (PG). Svi neuroni čija je aktivnost iznad PG su pojačani, a svi neuroni čija je aktivnost ispod PG su potisnuti. U ranžirnom modelu PG je fiksna i ovisna o parametrima mreže.

F-WTA

Marić i Domijan (2018a) predložili su novi model WTA mreže koji može istovremeno odabrati više prostornih lokacija na temelju zajedničke vrijednosti obilježja. Model su nazvali F-WTA mreža (*engl. feature-based WTA*), a služi za modeliranje pažnje usmjerene na obilježja. Pokazali su kako F-WTA mreža implementira teoriju Bulove mape na način da su standardnu WTA mrežu obogatili su s dva računalna mehanizma: retrogradnom inhibitornom signalizacijom i dendritima. Retrogradna inhibitorna signalizacija dinamički regulira sinaptički prijenos i na taj način smanjuje ukupnu količinu inhibicije te omogućava postojanje više pobjednika u mreži.

Samoekscitacija i komunikacija između susjednih ekscitatornih neurona ide preko dendrita, gdje su dendrijske grane modelirane kao nezavisne jedinice sa sigmoidnim funkcijama čiji se outputi linearno sumiraju u glavnom deblu i tijelu stanice. Ova dendrijska nelinearnost sprječava pretjeranu ekscitaciju u mreži, što omogućava mreži da bude osjetljiva na veličinu ulaznog signala.

U simulaciji formiranja Bulove mape, kao odgovor na sekvencijalnu prezentaciju crvene i zelene boje, F-WTA mreža odabire sva obilježja bez obzira na boju. Kada se pažnja usmjeri na crvenu boju mreža selektivno povećava aktivnost neurona koji odgovaraju lokacijama crvene boje u ulaznoj slici, a inhibira lokacije sa zelenom bojom, tj. mreža formira Bulovu mapu. Mreža zbog samoekscitacije zadržava lokacije odabranog obilježja u radnom pamćenju čak i nakon prekida utjecaja silaznih signala. Kada opažač odluči preusmjeriti pažnju na drugo obilježje, mreža može odabrati sve lokacije novog obilježja i potisnuti lokacije vezane uz trenutno odabrano obilježje bez potrebe za vanjskim resetom. U radu je uspješno simuliran i presjek i unija između dvaju obilježja. Raniji modeli WTA mreže nisu bili sposobni za takvu integraciju jer zahtijevaju da trenutni pobjednik bude izvana inhibiran kako bi se omogućilo premještanje fokusa pažnje s jedne lokacije na drugu (Kaski i Kohonen, 1994; prema Marić i Domijan, 2018a).

U drugim simulacijama ilustrirano je da F-WTA mreža može, uz pažnju usmjerenu na obilježja, podržati i spacijalnu i objektnu pažnju. Kada je spacijalni znak iz frontalnih očnih polja dan samo na jednoj lokaciji u jednoj od mapa obilježja, mreža će odabrati samo tu lokaciju. Susjedni neuroni neće biti odabrani iako su recipročno povezani s ciljnim neuronom budući da primaju slabiji input u odnosu na njega. Rekurentna ekscitacija koja iz njega proizlazi ograničena je dendrijskom nelinearnošću. Kada se spacijalni znak ukloni, zanimljivo je da se aktivnost mreže počinje širiti od ciljnog neurona prema rubu cijelog objekta. Dakle, u ovom je slučaju mreža odabrala sve lokacije povezane s ciljnom lokacijom i tako pokazala da može objasniti i objektno orijentiranu pažnju (Marić i Domijan, 2018a).

Neuronski model za mentalno praćenje konture

Marić i Domijan (2019) razvili su neuroračunalni prikaz dinamike mentalnog praćenja konture. Njihov model temelji se na prethodno spomenutoj F-WTA mreži (Marić i Domijan, 2018a) koju su ugradili u veću neuronsku arhitekturu s CDN (*engl. contour-detection network*) mrežom za praćenje kontura s više prostornih skala. CDN mreža kontrolira ekscitatornu povratnu petlju ovisno o veličini prostorne skale iz F-WTA. Što je više prostornih skala paralelno aktivno, to neuron u F-WTA prima veću ekscitaciju iz šireg susjedstva i tako dovodi do bržeg praćenja konture (Marić i Domijan, 2019).

Naime, bihevioralni i neuronski podaci sugeriraju da se vizualna pažnja širi duž segmenata konture kako bi ih povezala u jedinstvenu reprezentaciju objekta. Takvo selektivno širenje pažnje odvaja ciljnu konturu od distraktora u procesu poznatom kao mentalno praćenje konture. Rekurentna kompetitivna mapa razvijena je za simulaciju dinamike mentalnog praćenja konture. U modelu, lokalna ekscitacija suprotstavlja se globalnoj inhibiciji i omogućuje širenje pojačane aktivnosti na ciljnoj konturi. Opseg lokalnih ekscitatornih interakcija moduliran je izlazom mreže za otkrivanje kontura u više skala, koja ograničava brzinu širenja aktivnosti na način ovisan o razmjeru. Nadalje, mreža za otkrivanje L-spojnicama omogućuje praćenje za promjenu smjera na L-spojevima, ali ne i na X- ili T-spojevima (koji se pojavljuju na sjecištu dviju različitih kontura), čime se sprječava prelijevanje na konture distraktora. Računalne simulacije utjecaja udaljenosti kontura ilustriraju da vrijeme praćenja raste monotono s većom udaljenošću znaka od ciljne lokacije te povećanjem blizine distraktora. Također, u simulacijama utjecaja zakrivljenosti kontura vrijeme praćenja raste monotono s većom udaljenošću znaka od ciljne lokacije te s većom zakrivljenošću konture. Predloženi model pokazao je kako razrađena verzija WTA mreže može implementirati složenu kognitivnu operaciju kao što je mentalno praćenje konture (Marić i Domijan, 2019).

Nakon iznesenih primjera neuronskih mreža za pojedine vrste vidne selektivne pažnje može se zaključiti da računalni modeli mogu pomoći razumjeti mehanizme na kojima se zasniva vidna pažnja. Takav prikaz ne možemo dobiti samo na temelju analize eksperimentalnih rezultata. Naprotiv, potrebna nam je formalna analiza o tome na koji način se inputi pretvaraju u outpute. Formalna analiza pruža pregled prednosti i nedostataka modela s obzirom na vrste informacija koje isti predstavlja i načina na kojima njima manipulira (Domijan, 1999).

Kritike neuronskih mreža

Iako su neuronske mreže uspješne u modeliranju različitih aspekata ljudskog djelovanja, one ipak ne predstavljaju sveobuhvatnu teoriju kognitivnog funkcioniranja (Domijan, 1999). Unatoč očiglednoj korisnosti i prednostima računalnog modeliranja, treba biti svjestan i njihovih nedostataka. Prva zamjerka koja se nameće jest ta da su modeli previše jednostavni, odnosno kompleksni (O'Reilly i Munakata, 2000). Modeli, nužno, uključuju niz pojednostavljenja u njihovoj implementaciji. Ova pojednostavljenja možda neće obuhvatiti sve relevantne pojedinosti biologije, okoliša, zadatka i tako dalje, dovodeći u pitanje valjanost modela. S druge strane, drugi se kritičari žale da su modeli previše složeni da bi se razumjelo zašto se ponašaju na način na koji se ponašaju, pa stoga ne pridonose našem razumijevanju ljudskog ponašanja. Nadalje, još jedna

uobičajena zabrinutost je ta da mehanicistički, redukcionistički modeli nikada ne mogu govoriti o pravoj biti ljudske spoznaje (O'Reilly i Munakata, 2000). Također, važan prigovor usmjeren je i na to da i dalje mehanizmi neuronskih mreža nisu analizirani matematički. Drugim riječima, nerijetko nam nije jasan način (ili svaki pojedini korak) na koji je mreža došla do nekog ponašanja. (Fodor i Pylyshyn, 1988; prema Domijan, 1999). Posljednja kritika upućena je nedostatku kumulativnih istraživanja. Čini se da postoji opća percepcija da je modeliranje na neki način manje kumulativno od drugih vrsta istraživanja. Ova percepcija može biti djelomično posljedica relativne mladosti i ekspanzivnog rasta modeliranja. Međutim, kako polje počinje sazrijevati, počinju se pojavljivati i kumulativni radovi (O'Reilly i Munakata, 2000). Računalne simulacije neuronskih mreža ključni su alati u trenutnoj eksploziji rada u znanosti o mozgu. Naime, dinamiku velikih skupova neurona još je teško izravno promatrati. Potrebne su dodatne metodologije koje bi istražile kako su kolektivna svojstva neuronske mreže povezana s njezinim komponentama, a one zasigurno proizlaze iz računalnih znanosti s obzirom da računala imaju sposobnost implementacije i testiranja formalnih modela distribuiranih moždanih procesa (Grossberg i Mingolla, 1986).

Zaključak

Neuronske mreže sposobne su prikupljati, pamtit, analizirati i obrađivati veliki broj podataka dobivenih nekim eksperimentima ili numeričkim analizama. One su ilustracija sofisticirane tehnike modeliranja koja se može koristiti za rješavanje mnogih složenih problema. Jedan od glavnih primjera paradigme računalnog neuronskog pristupa jest funkcioniranje vida, s obzirom da je riječ o dovoljno složenom problemu da zahtijeva računalni pristup, a u isto vrijeme i dalje nije riješen u sustavima umjetnog vida koji rade u prirodnim scenama. Vid također pokreće i temeljna pitanja u kognitivnoj znanosti – u radu obrađeno funkcioniranje percepcije i pažnje. Naime, pažnja je izrazito složen psihološki fenomen i nije ju moguće razumjeti koristeći samo jedan znanstveni pristup. U potrazi za razumijevanjem vidnog sustava postalo je sve jasnije da je integracija neurobiologije, psihologije i računalnog pristupa ključna. Računalni pristupi mogu otkriti kako će vidni sustav vjerojatno riješiti probleme, čime se poboljšava naše razumijevanje neurobiologije u osnovi psiholoških procesa, dok otkrića neurobiologije nude ključna načela za razvoj računalnih tehnika za modeliranje neuronskih sustava vida. U ovom radu dana je do sada poznata teorijska osnova vidne pažnje, a posljedično i percepcije, te je povezana s računalnim modelima koji nas nastoje približiti detaljnijem shvaćanju ovoga kompleksnog psihološkog fenomena. Predstavljeni su primjeri neuronskih mreža za pojedine vrste vidne selektivne pažnje i

navedeni su njihovi doprinosi. Može se primijetiti da su spomenuti modeli prešli „puku“ implementaciju određene psihološke teorije i postali okvir za razumijevanje pažnje, od pojedinačne stanice do razine sustava. Međutim, uvijek postoji mjesta za napredak te se računalna neuroznanost vidne pažnje, baš kao i sve druge grane znanosti, mora nastavljati razvijati i prevazići spomenute kritike i ograničenja.

Literatura

- Bassett, D. S. i Gazzaniga, M. S. (2011). Understanding complexity in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5), 200-209. doi:10.1016/j.tics.2011.03.006
- Bishop, C. M. (1994). Neural networks and their applications. *Review of Scientific Instruments*, 65(6), 1803-1832. <https://doi.org/10.1063/1.1144830>
- Borojević, S. i Gvozdenović, V. (2013). Is attention necessary in perception? *Suvremena psihologija*, 16(2), 171-183. <https://hrcak.srce.hr/127199>
- Bulter, J. (2001). Feedback connections and conscious vision. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 369-370. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01730-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01730-7)
- Butz, M. V. i Kutter, E. F. (2017). *How the mind comes into being: Introducing cognitive science from a functional and computational perspective*. Oxford: Oxford University Press.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1484-1525. doi:10.1016/j.visres.2011.04.012
- Cave, K. R. i Bichot, N. P. (1999). Visuospatial attention: Beyond a spotlight model. *Psychonomic Bulletin & Review*, 6(2), 204-223. <https://doi.org/10.3758/BF03212327>
- Chen, Z. (2012). Object-based attention: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(5), 784–802. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0322-z>
- Domijan, D. (1999). *Neuronske mreže za percepciju svjetlina i oblika*. Neobjavljena doktorska disertacija. Zagreb: Odsjek za psihologiju Filozofskog fakulteta u Zagrebu.
- Domijan, D. i Marić, M. (2022). A multi-scale neurodynamic implementation of incremental grouping. *Vision Research*, 197, 108057. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2022.108057>
- Douglas, R. J. i Martin, K. A. C. (2007). Recurrent neuronal circuits in the neocortex. *Current Biology*, 17(13), R496–R500. doi:10.1016/j.cub.2007.04.024
- Douglas, R. J. i Martin, K. A. C. (1991). Opening the grey box. *Trends in Neurosciences*, 14(7), 286–293. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(91\)90139-L](https://doi.org/10.1016/0166-2236(91)90139-L)
- Douglas, R. J., Martin, K. A. C. i Whitteridge, D. (1989). A canonical microcircuit for neocortex. *Neural Computation*, 1(4), 480–488. <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.480>
- Eriksen, C. W. i St. James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40(4), 225–240. <https://doi.org/10.3758/BF03211502>
- Eriksen, C. W. i Yeh, Y.-Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 583–597. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.11.5.583>

- Ermentrout, B. G. (1992). Complex dynamics in winner-take-all neural nets with slow inhibition. *Neural Networks*, 5(3), 415-431. doi:10.1038/s41598-017-18666-3
- Feldman, J. A. i Shastri, L. (2006). Connectionism. U Nadel, L. (Ur.), *Encyclopedia of Cognitive Science* (Vol. 1, str. 680-687). London: Nature Publishing Group.
- Gage, N. M. i Baars, B. J. (Ur.) (2018). *Fundamentals of cognitive neuroscience. A beginner's guide*. (2nd ed.). Amsterdam: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03767-7>
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B. i Mangun, G. R. (2019). *The biology of the mind*. New York: WW Norton.
- Goldstein, E. B. (2011). *Osjeti i percepcija*. Jastrebarsko: Naklada Slap.
- Grossberg, S. (1988). Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures. *Neural Networks*, 1, 17-61. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(88\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0893-6080(88)90021-4)
- Grossberg, S. i Mingolla, E. (1986). Computer simulation of neural networks for perceptual psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 18(6), 601-607. <https://doi.org/10.3758/BF03201435>
- Haykin, S. S. (2009). *Neural networks and learning machines* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. U Pashler, H. (Ur.), *Attention (1st Ed., str. 119-154)*. London: University College London Press.
- Hollingworth, A., Maxcey-Richard, A. M. i Vecera, S. P. (2012). The spatial distribution of attention within and across objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(1), 135–151. <https://doi.org/10.1037/a0024463>
- Humphrey, G. K., Goodale, M. A., Jakobson, L. S. i Servos, P. (1994). The role of surface information in object recognition: Studies of a visual form agnostic and normal subjects. *Perception*, 23(12), 1457–1481. <https://doi.org/10.1068/p231457>
- Itti, L. i Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(3), 194-203. <https://doi.org/10.1038/35058500>
- Jamshidi, M. B., Alibeigi, N., Rabbani, N., Oryani, B. i Lalbakhsh, A. (2018, Studeni). *Artificial neural networks: A powerful tool for cognitive science*. Prezentirano na 2018 IEEE 9th Annual information technology, electronics and mobile communication conference (IEMCON), Vancouver, Kanada. doi:10.1109/IEMCON.2018.8615039
- Kravitz, D. J. i Behrmann, M. (2011). Space-, object-, and feature-based attention interact to organize visual scenes. *Attention, Perception, & Psychophysics* 73, 2434–2447. doi:10.3758/s13414-011-0201-z
- Kinsbourne, M. i Warrington, E. K. (1962). A disorder of simultaneous form perception. *Brain* 85, 461–486. doi:10.1093/brain/85.3.461

- Kröse, B. i van der Smagt, P. (1996). *An introduction to neural networks*. Amsterdam: The University of Amsterdam.
- Lennie, P. (1998). Single units and visual cortical organization. *Perception*, 27, 889-935. doi:10.1068/p270889
- Levine, D. S. (2019). *Introduction to neural and cognitive modeling* (3rd ed.). New York: Routledge.
- Marić, M. (2022). *Neurodynamic models of top-down effects on visual perception*. Unpublished doctoral dissertation. Rijeka: University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences.
- Marić, M., i Domijan, D. (2019). Neural dynamics of spreading attentional labels in mental contour tracing. *Neural Networks*, 119, 113–138. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.07.016>
- Marić, M. i Domijan, D. (2018a). A neurodynamic model of feature-based spatial selection. *Frontiers in Psychology*, 9(417), 1-22. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00417>
- Marić, M. i Domijan, D. (2018b). Mogu li kognicija i emocije utjecati na vid? *Psihologijske teme*, 27(2), 311-338. <https://hrcak.srce.hr/203799>
- Maass, W. (2000). On the computational power of winner-take-all. *Neural Computation*, 12(11), 2519–2535. doi:10.1162/089976600300014827
- Maunsell, J. H. i Treue, S. (2006). Feature-based attention in visual cortex. *Trends in Neurosciences*, 29(6), 317-322. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.04.001>
- Mevorach, C., Shalev, L., Green, R. J., Chechlac, M., Riddoch, M. J. i Humphreys, G. W. (2014). Hierarchical processing in Balint's syndrome: A failure of flexible top-down attention. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(113), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00113>
- Mountcastle, V. (1997). The columnar organization of the neocortex. *Brain*, 120(4), 701–722. doi:10.1093/brain/120.4.701
- Mozer, M. C. i Vecera, S. P. (2005). Space- and object-based attention. U Itti, L., Rees G. i Tsotsos, J. K. (Ur.). *Neurobiology of Attention* (1st ed., str. 130–134). Amsterdam: Academic Press.
- Nieuwenstein, M. R., Potter, M. C. i Theeuwes, J. (2009). Unmasking the attentional blink. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(1), 159–169. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.35.1.159>
- Nobre, A. C. (2018). Attention. U Wixted, J. T. i Serences, J. T. (Ur.), *Stevens' handbook of experimental psychology and cognitive neuroscience, language and thought* (4th ed., str. 241-315). New York: John Wiley & Sons.

- Nobre, A. C. i Kastner, S. (2014). *The Oxford handbook of attention*. Oxford: Oxford University Press.
- O'Grady, R. B. i Müller, H. J. (2000). Object-based selection operates on a grouped array of locations. *Perception & Psychophysics*, 62(8), 1655–1667. doi:10.3758/bf03212163
- O'Reilly, R. C. i Munakata, Y. (2000). *Computational explorations in cognitive neuroscience: Understanding the mind by simulating the brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Palmer, S. E. (1999). *Vision science: Photons to phenomenology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Pinel, J. (2002). *Biološka psihologija*. Jastrebarsko: Naklada Slap.
- Polk, T. A., Drake, R. M., Jonides, J. J., Smith, M. R. i Smith, E. E. (2008). Attention enhances the neural processing of relevant features and suppresses the processing of irrelevant features in humans: A functional magnetic resonance imaging study of the Stroop task. *Journal of Neuroscience*, 28(51), 13786-13792. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1026->
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25. doi:10.1080/00335558008248231
- Rathus, S. A. (2000). *Temelji psihologije*. Jastrebarsko: Naklada Slap.
- Rutishauser, U. i Douglas, R. J. (2009). State-dependent computation using coupled recurrent networks. *Neural Computation*, 21(2), 478–509. doi:10.1162/neco.2008.03-08-734
- Rutishauser, U., Douglas, R. J. i Slotine, J. J. (2011). Collective stability of networks of winner-take-all circuits. *Neural Computation*, 23(3), 735–773. doi:10.1162/NECO_a_00091
- Roelfsema, P. R. i Houtkamp, R. (2011). Incremental grouping of image elements in vision. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 2542-2572. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0200-0>
- Rolls, E. i Deco, G. (2001). *Computational neuroscience of vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Saenz, M., Buracas, G. T. i Boynton, G. M. (2002). Global effects of feature-based attention in human visual cortex. *Nature Neuroscience*, 5(7), 631-632. doi:10.1038/nn876
- Shomstein, S. i Yantis, S. (2004). Configural and contextual prioritization in object-based attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 247–253. <https://doi.org/10.3758/BF03196566>
- Shomstein, S. i Yantis, S. (2002). Object-based attention: Sensory modulation or priority setting? *Perception & Psychophysics*, 64, 41–51. <https://doi.org/10.3758/BF03194556>
- Simons, D. J. i Ambinder, M. S. (2005). Change blindness. *Current Directions in Psychological Science*, 14(1), 44–48. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2005.00332.x>

- Simons, D. J. i Rensink, R. A. (2005). Change blindness: past, present, and future. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(1), 16–20. doi:10.1016/j.tics.2004.11.006
- Spillmann, L. (2014). Receptive fields of visual neurons: The early years. *Perception*, 43(11), 1145–1176. doi:10.1068/p7721
- Spillmann, L., Dresch-Langley, B. i Tseng, C. H. (2015). Beyond the classical receptive field: The effect of contextual stimuli. *Journal of Vision*, 15(9), 7. doi:10.1167/15.9.7
- Tan, C. (2017). Computational neuroscience of vision: Visual disorders. U Zhao, Q. (Ur.), *Computational and Cognitive Neuroscience of Vision*, (1st ed., str. 297-315). Singapore: Springer Nature.
- Treisman, A. M. i Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97-136. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5)
- Tryon, W. W. (1993). Neural networks: I. Theoretical unification through connectionism. *Clinical Psychology Review*, 13(4), 341-352. [https://doi.org/10.1016/0272-7358\(93\)90017-G](https://doi.org/10.1016/0272-7358(93)90017-G)
- Ullman, S. (1996). *High-level vision: object recognition and visual cognition*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ullman, S. (1984). Visual routines. *Cognition*, 18(1–3), 97–159. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(84\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0010-0277(84)90023-4)
- Vatterott, D. B. i Vecera, S. P. (2015). The attentional window configures to object and surface boundaries. *Visual Cognition*, 23(5), 561-576. <https://doi.org/10.1080/13506285.2015.1054454>
- Vranić, A. (2009). Ograničenje temporalne pažnje: Teorijska osnova i nalazi istraživanja treptaja pažnje. *Suvremena psihologija*, 12(1), 155-172. <https://hrcak.srce.hr/82668>