

TEORIJE I MODELI PERCEPCIJE SVJETLINA

Veseljka Rebić

Odsjek za psihologiju, Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ivana Lučića 3, 10 000 Zagreb

verebic@ffzg.hr

Sažetak

Perceptivna konstantnost svjetlina označava činjenicu da svjetlinu površine doživljavamo relativno stabilnom, bez obzira na stalne promjene u intenzitetu svjetla koje pada u oko. Generalno se smatra da konstantnost svjetlina ovisi o procjeni reflektivnosti površine. Međutim, nije poznato na koji način vidni sustav procjenjuje reflektivnost jer je svjetlo koje pada u oko mješavina i reflektivnosti i intenziteta osvjetljenja. Prikazani modeli i teorije percepcije svjetlina razlikuju se ovisno o neuralnoj razini kojoj pripisuju subjektivnu interpretaciju luminacije. Prema jednim, perceptivna konstantnost posljedica je neuralne organizacije i kodiranja jarkosti na nižim razinama vidnog puta, dok prema drugima ovisi o višim kognitivnim funkcijama koje integriraju niz informacija o vidnoj slici. U radu su izložene najutjecajnije teorije i modeli, kao i njihove eksperimentalne provjere.

Glavne riječi: percepcija svjetlina, percepcija jarkosti, konstantnost svjetlina, simultani akromatski kontrast

Više od jednog stoljeća znanstvenici pokušavaju objasniti zašto nam je ugljen crn i kad ga gledamo obasjanog sunčevom svjetlošću, a primjerice ovaj papir bijel i kad se nalazi u polumračnoj sobi. Drugim riječima, iako predmeti pod jakim izvorom osvjetljenja reflektiraju puno više svjetla u naše oči nego pri slabom osvjetljenju, čini se da to ne mijenja bitno doživljaj njihove boje i svjetline. Crno je crno, a bijelo bijelo, bez obzira na uvjete u kojima ih promatramo. Kako je to moguće? Kao i u području percepcije visine zvuka te području percepcije boja, i ovdje su se u teorijskim pristupima 'sukobila' dva lucidna uma: Hermann von Helmholtz i Ewald Hering. 'Duhovi' njihove debate prisutni su i dan danas. Cilj ovog rada je prikazati neke od najboljih empirijski potvrđenih teorijskih postavki, ali i upozoriti na nejasnoće koje u ovom istraživačkom području još uvijek postoje.

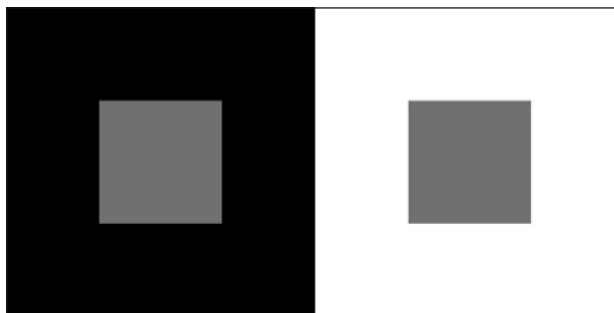
Problem konstantnosti svjetlina

Podražaj na koji reagiraju fotoreceptori je svjetlo reflektirano s površina okolnih predmeta. Intenzitet reflektiranog svjetla ili *luminacija* ovisi o dva faktora: jačini osvjetljenja površine i njenoj reflektivnosti. Reflektivnost površine je konstantna, jer ovisi o fizičkim atributima predmeta, a stupanj osvjetljenja neprestano varira. Sukladno tome varira i luminacija. Ipak, iako se fizikalni podražaj koji oko prima s određene površine u funkciji vremena neprestano mijenja, predmet ćemo perceptivno doživljavati kao relativno konstantan u boji i svjetlini. U akromatskoj percepciji, ova se pojava naziva *konstantnost doživljaja svjetline*.

Dva su subjektivna atributa svjetla, a odnose se na doživljeni intenzitet svjetla ili *jarkost* (*engl. brightness*), te na percipiranu reflektivnost promatrane površine, tj. *svjetlinu* predmeta (*engl. lightness*). Svjetlina određuje kromatsku kvalitetu slike (u akromatskoj percepciji doživljenu nijansu sive boje), odnosno percipiranu zasićenost boje. Jarkost je percipirani intenzitet svjetla koje dolazi s površine, odnosno subjektivni korelat luminacije objekta. Iako se u generalnim teorijskim raspravama često ne radi distinkcija između ova dva pojma, bitno ih je razlikovati pri opisu određenih iluzija svjetline (Kingdom, 2003) te u okviru eksperimenata koji induciraju sudionike ili na procjenjivanje percipiranog *intenziteta* svjetla (*brightness*) ili procjenjivanje *nijanse* akromatskog podražaja (*lightness*). Pokazano je da usmjerenje uputom na procjenu jarkosti ili svjetline može dovesti do različitih rezultata (Arend i Špehar, 1993).

Pojava perceptivne konstantnosti neophodan je adaptivni mehanizam koji ističe prirodu ljudske percepcije: naš doživljaj svijeta nije *točan*, već *smislen*. Prevedeno u psihofizičke termine, između promjena fizikalnih karakteristika podražaja i promjena u njihovim subjektivnim korelatima ne postoji linearna povezanost. Na to upućuju i fenomeni kod kojih vidni sustav 'griješi' u održavanju konstantnosti. Naime, niz perceptivnih pojava koje nazivamo *iluzije svjetline*, ilustrira da se percepcija svjetline neke površine može promijeniti iako su i reflektivnost i osvjetljenje, a time i luminacija površine konstantim. Jedna od najstarijih i najpoznatijih iluzija svjetline je simultani kontrast (slika 1.): sivi kvadrat na lijevoj i desnoj strani slike ima istu luminaciju, no doživljavamo ga tamnijim kada se nalazi na bijeloj površini, a svjetlijim kada se nalazi na crnoj. Simultani kontrast, kao i neke druge iluzije svjetline (primjerice Whiteova iluzija i Benarijev križ na slici 3.), vrlo zorno demonstrira da, za razliku od luminacije koja je invarijantno vezana uz određenu površinu, doživljaj svjetline neke površine ovisi o okruženju u kojem se ta površina nalazi.

Na koji način vidni sustav održava konstantnost te zašto se javljaju iluzije svjetline? S obzirom na to da je svjetlo koje pada na mrežnicu produkt osvjetljenja i reflektivnosti, to znači da je slika koja se stvara na mrežnici u informacijskom smislu nejednoznačna – odnosno sadrži međusobno pomiješane i neodvojive informacije i o osvjetljenju i o reflektivnosti, pa se nijedna od tih informacija ne kodira direktno na mrežnici. Osvjetljenje je varijabilno, što znači vidni sustav, da bi postigao konstantnost u doživljaju svjetlina, mora na neki način ignorirati promjene luminacije



Slika 1. Simultani akromatski kontrast. Sive površine na obje strane imaju istu luminaciju, no površina okružena crnom podlogom doima se svjetlija od one okružene bijelom podlogom.

nastale zbog promjena osvjetljenja i uzeti u obzir samo promjene nastale zbog reflektivnosti površine. Mehanizmi putem kojih vidni sustav obavlja taj zadatak još nisu poznati. Predloženi modeli i teorije razlikuju se ovisno o neuralnoj razini kojoj pripisuju subjektivnu interpretaciju luminacije – prema jednima, perceptivna konstantnost ovisi o ‘višim’ kognitivnim funkcijama koje integriraju niz informacija o vidnoj slici, dok je prema drugima konstantnost posljedica fizioloških mehanizama proizašlih iz neuralne organizacije na nižim razinama vidnog puta.

Teorije orijentirane na kodiranje informacija na nižoj neuralnoj razini ističu važnost dva faktora: integraciju informacija o lokalnom kontrastu s rubova površina, te neuronske filtere osjetljive na prostornu frekvenciju i orijentaciju kontrasta.

Istraživači koji smatraju da viši kognitivni faktori utječu na doživljaj svjetline ističu važnost percepcije dubine preko perceptivnih znakova, poput rubova, kutova i elemenata perceptivnog grupiranja, a dio autora zastupa hipotezu o procjeni svjetline primarno preko informacija o osvjetljenju. U radu su izložene i teorije koje problem konstantnosti rješavaju kroz objašnjenje mehanizama određivanja apsolutne vrijednosti luminacije.

Integracija lokalnog kontrasta na nižim razinama vidnog puta

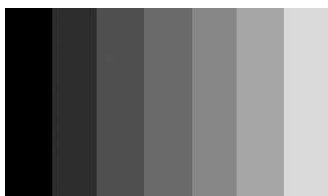
Ljudsko oko ne reagira na potpuno jednolične podražaje, već je za proces percepcije nužno postojanje promjenjivih svjetlosnih opažaja. Ključnu ulogu u vidnoj percepciji imaju razlike u kontrastu intenziteta svjetlosti različitih dijelova vidne slike, a ne apsolutan intenzitet reflektiranog svjetla. Istraživanja su pokazala da na retini postoje stanice koje reagiraju na kontraste, a ne na ukupnu veličinu stimulacije svjetlom (Shapley i Enroth Cugell, 1984).

Jedan od prvih istraživača u ovom području, E. Hering još je u 19. st. istaknuo je da, iako apsolutna veličina luminacije varira s osvjetljenjem, *relativna* količina

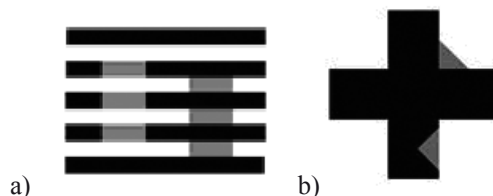
svjetla reflektiranog s neke površine u odnosu na okolne površine ostaje ista. Prema Heringovu tumačenju, za doživljaj konstantnosti uopće nije nužna informacija o osvjetljenju, već je ključan podatak *omjer svjetla* reflektiranog sa susjednih površina. Mehanizam koji kodira informacije o luminaciji Hering opisuje kao 'recipročne interakcije u vidnom polju' (Hering, 1974/1964, prema Economou, Zdravkovic i Glichrist, 2007, str. 1.) i time konstantnost doživljaja svjetline povezuje s procesom koji odgovara nešto kasnije otkrivenom mehanizmu lateralne inhibicije. Lateralna inhibicija posljedica je svojstva organizacije neurona na mrežnici, a kod životinja je utvrđena i na drugim razinama vidnog puta (Creutzfeldt i Ito, 1968; Singer i Creutzfeldt, 1970). Očituje se time da ekscitacija neurona na određenom retinalnom području uzrokuje inhibiciju susjednih neurona, čime se pojačava kontrast svjetline na susjednih područja. Već je napomenuto da ključni podražaj vidnog sustava nije apsolutni intenzitet luminacije, već *kontrast luminacije* susjednih površina, što je u skladu s Heringovim postavkama.

Lateralna inhibicija djeluje na način da pojačava percepciju kontrasta, tj. kontrast jarkosti na rubovima (*engl. border contrast*). Izvrstan primjer takvog kontrasta su Machove pruge (slika 2.). Svaka pruga na slici ima homogenu luminaciju, no područje uz lijevi rub svake pruge vidi se kao svjetlije od ostatka pruge. Fizički kontrast koji postoji na rubovima pruga tako se pojačava još više.

Međutim, dok je lateralna inhibicija uvjerljivo objašnjenje pojavnosti kontrasta na rubovima, nejasno je u kojoj mjeri se može objasniti promjenu percepcije svjetline veće površine, primjer čega je i simultani kontrast. Naime, interakcija zbog lateralnih veza vrijedi za neurone *susjednih* područja retine i širi se na područje koje odgovara malom dijelu vidnog kuta, dok simultani kontrast doživljajno djeluje na relativno velik stupanj vidnog kuta – 10° i više (Yund i Armington, 1975). Nadalje, postoji niz drugih iluzija svjetline, poput Whitove iluzije i Benaryjeva križa (slika 3.), kod kojih se javlja suprotan efekt od onog kojeg bi očekivali prema lateralnoj inhibiciji.



Slika 2. Machove pruge. Svaka pruga je područje homogene luminacije, a ipak se uz lijevi rub svake pruge vidi područje svjetlije od ostatka pruge. Kako svaka pruga na lijevoj strani graniči s tamnijom površinom, lateralna inhibicija na lijevim rubovima uzrokuje doživljaj diskontinuiteta luminacije.



Slika 3. Iluzije koje se ne mogu objasniti lateralnom inhibicijom. a) Whiteova iluzija. Sive pruge na crnoj podlozi doimaju se svjetlijima od onih na bijeloj podlozi. b) Benaryjev križ. Luminacija sivih trokuta je jednaka a i lokalni kontrast na rubovima oba trokuta je jednak (dvije stranice graniče s crnom, a jedna s bijelom površinom). Ipak, trokut 'unutar' crnog kraka doživljavamo svjetlijim od gornjeg trokuta.

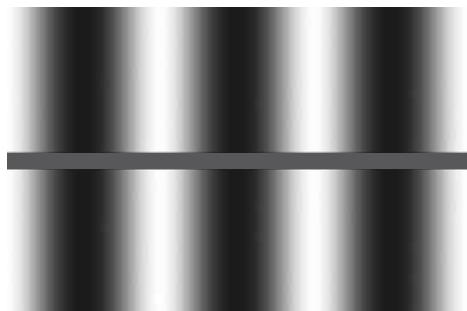
Hipoteza o neuralnom kodiranju svjetline/jarkosti na retini dodatno je popularizirana zahvaljujući radu Wallacha, koji je (1948) postulirao prvi zakon doživljajne konstantnosti svjetlina prema tzv. *omjernom pravilu*, gdje je u osnovi doživljavanja konstantnosti uspoređivanje omjera luminacije susjednih površina. Wallach je i eksperimentalno pokazao (1948) da se dvije površine doživljavaju jednake po svjetlini kada je omjer luminacija između percipiranih površina i njihova neposrednog okruženja jednak, bez obzira na apsolutnu razinu osvjetljenja. S obzirom na to da je omjer luminacija površina konstantan, može se postulirati da je to ključ za procjenu svjetline površina. Omjer luminacija nužno implicira kodiranje informacija o lokalnom ili graničnom kontrastu, no ako granični kontrast zaista određuje doživljaj svjetline, postavlja se pitanje na koji način vidni sustav integrira informacije sa svih rubova na vidnoj slici. Land i McCann (1971) konstruirali su neuralni model nazvan *Retinex*, koji na osnovi integracije lokalno utvrđenih omjera luminacije na rubovima, izračunava relativnu reflektivnost površina kompleksnih prikaza. Pokazalo se da je *Retinex* uspješan u izračunima ishoda nekih iluzija, poput Craick O'Brien-Cornsweet iluzije i Mondrian predložka, no također da ne funkcionira na trodimenzionalnim prikazima (Adelson, 2000). Jedan od razloga jest to što se u *Retinex* modelu svi oštri rubovi tretiraju kao rubovi reflektivnosti, jer se osvjetljenje tretira kao varijabla koja se vidnim poljem širi po niskoj prostornoj funkciji i čiji se efekt praktički poništava djelovanjem neuronske interakcije. Međutim i rubovi nastali zbog osvjetljenja mogu dovesti do dramatičnih promjena percepcije svjetline, iako retinalna slika zapravo ostaje jednaka (Gilchrist, 1977). Shapley i Reid (1985) radili su kvantitativnu provjeru *Retinex* modela i pokazali da same informacije o lokalnom kontrastu ne mogu biti dovoljne za nastali perceptivni doživljaj jer efekt kontrasta na rubovima opada u funkciji povećanja vidnog kuta, te zaključuju da integracija kontrasta na rubovima samo djelomično pridonosi percepciji svjetlina.

Tokom 80-ih i 90-ih godina razvijen je i niz drugih modela koji se osnivaju na ekstrakciji i integraciji informacija o kontrastu na rubovima, s različitim izmjenama

koje su pokušale ukloniti nedostatke prijašnjih modela. Većina ovih modela polazi od tzv. DOG pravila (*engl. Difference of Gaussian*). DOG je matematički algoritam pomoću kojeg se iz slike generira distribucija frekvencija prostornog kontrasta i uklanjaju područja visokog kontrasta. Tako su Grossberg i Todorović (1988) predložili model prema kojem se najprije na razini mrežnice ekstrahiraju informacije o lokalnom kontrastu nastalom na osnovi lateralne inhibicije, čime se signalizira samo svjetlina na rubovima, a zatim svjetlinu površine između rubova popunjava neki viši kortikalni mehanizam (*filling-in* fenomen). Model dobro objašnjava niz iluzija svjetlina, poput Hermannove rešetke, Craik-O'Brian-Cornsweet efekta i Mondrian predložka. Sličan model, koji se također veže uz perceptivno popunjavanje predložili su i Pessoa, Mingolla, i Neumann (1995). Efekt perceptivnog popunjavanja kod doživljaja svjetline demonstriran je i u psihofizičkim istraživanjima. Paradiso i Nakayama (1991) su tehnikom maskiranja podražaja demonstrirali postojanje perceptivnog popunjavanja svjetline koje se zaustavlja na rubovima luminacije, a Salmela i Laurinen (2007) pokazali su da perceptivno popunjavanje ovisi o teksturi površine podražaja, te pretpostavili da se popunjavanje širi jedino među neuronima koji reagiraju na istu prostornu orijentaciju.

Neuralni filteri za procesiranje informacija o prostornoj frekvenciji i orijentaciji kontrasta

Noviji modeli orijentirani su na objašnjenje svjetline putem multiplih kortikalnih filtera različito osjetljivih na različite prostorne frekvencije i orijentacije kontrasta (Kingdom i Moulden, 1992, Blakeslee i McCourt, 1997, 1999, 2001) i za razliku od prijašnjih modela, nisu usmjereni na ekstrakciju i integraciju kontrasta na rubovima. Blakeslee i McCourt (1997) su predložili model rađen na perceptivnom fenomenu koji se naziva indukcija rešetke (*engl. grating induction*). Indukciju rešetke je originalno formirao McCourt (1982). Horizontalna siva pruga izgleda

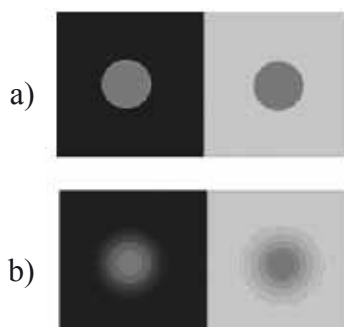


Slika 4. Indukcija rešetke (McCourt, 1982). Luminacija horizontalne pruge je konstantna, no doživljavamo je kao naizmjenično svjetliju i tamniju.

kao da ima promjenjivu luminaciju, naizmjenično tamnu pa svijetlu (slika 4.), no zapravo je luminacija horizontalne pruge konstantna. Kingdom i Moulden (1992) su pokazali da se efekt indukcije rešetke može izračunati preko modela temeljenog na paralelnom filtriranju kroz višestruke neuronske filtere.

Iako je indukcija rešetke fenomen s područjem nehomogene jarkosti, Blakeslee i McCourt (1997) navode da se klasični simultani kontrast zapravo može definirati kao indukcija rešetke s izrazio niskom prostornom frekvencijom. Njihov model dobro predviđa efekt i simultanog kontrasta i indukcije rešetke, što ide u prilog tvrdnji da su ove iluzije zapravo različite varijante istog fenomena. Nadalje, prema Kingdomu (2003), razlog zbog kojeg se javlja simultani kontrast leži upravo u smanjenoj ljudskoj osjetljivosti za procesiranje podražaja niske prostorne frekvencije, što je posebno izraženo pri niskom kontrastu. Za razliku od brojnih autora koji tvrde da su znakovi dubine, poput rubova ploha, ključni za percepciju svjetlina (Grossberg i Todorović 1988, Adelson, 1993; Adelson i Pentland, 1996, Gilchrist, Kossyfidis, Bonato, Agostini, Cataliotti, Li i Spehar, 1999), Kingdom smatra da rubovi ne doprinose puno doživljaju konstantnosti. U prilog ovoj tvrdnji idu rezultati istraživanja McCourta i Blakeslee (1993), koji su pokazali da zamućivanje rubova kod simultanog kontrasta zapravo povećava efekt iluzije (slika 5.). Na slici 5b vidimo prikaz simultanog kontrasta moduliranog preko niske prostorne frekvencije, tako da nema jasno ocrtanih rubova. Iluzija je jača nego kod klasičnog simultanog kontrasta (5a), što je suprotno predviđanjima modela baziranih na lokalnom kontrastu.

Blakeslee i McCourt su (1999) u neuralni model inkorporirali filtere osjetljive na smjer kontrasta po tzv. ODOG pravilu (*engl. oriented difference of Gaussian*). ODOG model uspijeva predvidjeti efekt i nekih drugih perceptivnih fenomena poput Whiteove iluzije. Međutim, Economou, Zdravkovic i Gilchrist (2007) provjerili su ODOG model na stvarnim eksperimentalnim podacima i utvrdili da slaganja predviđanja modela i bihevioralnih rezultata nisu velika. Kako navode, ODOG model točno predviđa smjer iluzornog efekta, no u kvantitativnom smislu, predviđanja modela su puno snažnija od stvarnih efekata dobivenih u eksperimentima.



Slika 5. a) Klasični simultani kontrast. b) Simultani kontrast s zamućenim rubovima dovođi do izraženije iluzije nego kod a)

Iako neuralni modeli ne uspijevaju objasniti velik dio iluzija svjetline, niti dati jedinstveno objašnjenje mehanizma konstantnosti svjetline, njihova velika vrijednost leži u povezivanju bihevioralnih podataka s neuralnim mehanizmima. Neuronski filteri postulirani u spomenutim modelima operiraju na nižim razinama vidnog puta i predstavljaju svojevrsni pred-procesor koji kodira fizikalne aspekte podražaja (kontrast luminacija). Ono što se dalje procesira u vidnom sustavu je rezultat takvog kodiranja.

U posljednje vrijeme proveden je veći broj eksperimenata staničnog snimanja neuronske aktivacije čija je svrha bila ispitati postoje li dokazi o kodiranju svjetline/jarkosti na retini te primarnom vidnom korteksu. U tim istraživanjima mjeri se aktivacija neurona na promjenu luminacije podražaja (tzv. lokalna luminacija); te na simultani kontrast, tj. promjenu luminacije okolne površine uz konstantnu luminaciju podražaja, što inducira iluzornu promjenu jarkosti podražaja (tzv. globalna luminacija). Pokazalo se da iako već na mrežnici i u lateralnom koljenastom tijelu postoje neuroni koji reagiraju na promjene lokalne luminacije, neuroni koji reagiraju na indukciju jarkosti nađeni su tek u V1 području (Rossi, Rittenhouse i Paradiso, 1996; MacEvoy, Kim i Paradiso, 1998; Rossi i Paradiso, 1999; Huang, MacEvoy, i Paradiso, 2001; Kinoshita i Komatsu, 2001). Generalni je zaključak da subkortikalne razine kodiraju informacije o konturama vidne slike, dok se informacije o svjetlini procesiraju tek u korteksu. Nadalje, pokazano je i da aktivacija neurona u V1 području ne ovisi o apsolutnoj razini osvjtljenja (MacEvoy, Kim i Paradiso, 1998; Rossi i Paradiso, 1999). Kintosh i Komatsu (2001) su mjerili odgovor neurona na promjene u luminaciji i indukciji jarkosti u V1 području i detektirali su tri tipa neurona. Tip 1 su neuroni osjetljivi na lokalnu luminaciju, tip 2. neuroni koji reagiraju na modulaciju jarkosti, a tip 3. neuroni koji reagiraju i na promjene lokalne luminacije i na modulaciju jarkosti. Prema autorima, dva su moguća načina integracije informacija o jarkosti u V1 području. Prvi je kodiranje lokalnog kontrasta na neuronima tipa 1. u prvom koraku i prijenos tih informacija na neurone tipa 2. u drugom koraku. Druga mogućnost jest to da je aktivnost neurona tipa 2. posljedica složenije integracije informacija s neurona tipa 1 i 3.

Međutim, rezultati dobiveni u spomenutim istraživanjima ne upućuju nužno na to da je V1 prvo mjesto kodiranja svjetline – dobiveni rezultati mogu biti tek i refleksija procesiranja nekog višeg kortikalnog područja (MacEvoy i Paradiso, 2001). McCourt i Foxe (2004) snimajući mozgovne potencijale ustvrdili su da je percepcija jarkosti povezana s procesiranjem podražaja u najranijoj fazi vidnog kortikalnog procesiranja.

Neka istraživanja ne potvrđuju kodiranje jarkosti u V1 području. Roe, Lu i Hung (2005) su pri zadavanju Craik-O'Brian-Cornsweet iluzije snimali neurone u V1 i V2 području majmuna, te pokazali da u V2 području postoje neuroni koji se aktiviraju i kod iluzije, dok isti nisu nađeni u V1. Autori rezultate objašnjavaju razlikama specifičnostima podražajnog materijala. Istraživanja koja su pokazala kodiranje jarkosti u V1 koriste simultani kontrast koji, za razliku od Craik-O'Brian-Cornsweet iluzije

uključuje procesiranje informacija o luminaciji površine. Autori zaključuju da je V1 područje koje kodira lokalnu luminaciju površine, a V2 područje je zaduženo za kodiranje jarkosti i to na temelju globalne integracije informacija s vidne slike.

Rubovi, kutovi i transparentnost u teorijama segmentacije vidne slike

Teorije temeljene na graničnom kontrastu ne objašnjavaju u potpunosti konstantnost svjetlina. Čak i kada se uz lateralnu inhibiciju pretpostavi postojanje i drugih faktora poput perceptivnog popunjavanja, predloženi modeli ne objašnjavaju sve perceptivne iluzije, a posebice su neadekvatni kod trodimenzionalnih prikaza. Noviji modeli temeljeni na filtriranju također objašnjavaju samo dio iluzija (Kingdom, 2003, Logvinenko i Kane, 2004).

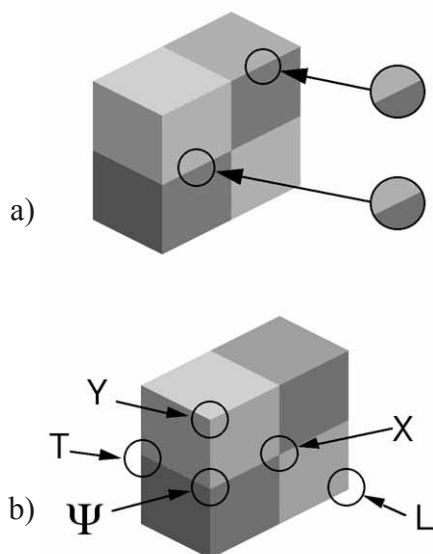
1970-ih godina javljaju se teorije prema kojima uz granični kontrast i niz drugih faktora poput informacija o rubovima, konturama, elementima perceptivnog grupiranja određuje doživljaj svjetline. Takvi perceptivni faktori, u čije su procesiranje uključeni viši kognitivni procesi, omogućuju vidnom sustavu da kreira odvojene reprezentacije reflektivnosti i osvjetljenja i na taj način održava konstantnost. Tako Bregstrom (1977) pretpostavlja da se varijacije luminancije s vidne slike analiziraju vektorski i razlažu na tri komponente - jedan je vektor reflektivnosti, drugi iluminacije, treći 3D oblika, a sličan model su predložili i Barow i Tenenbaum (1978), koji ove reprezentacije prvi nazivaju *intrinzične slike*.

Jedan od najvažnijih znakova putem kojih vidni sustav odvaja intrinzične slike je *priroda rubova* susjednih površina (Gilchrist, 1977). Prema modelu koji su predložili Gilchrist i Jacobsen (1983), vidni sustav može razlikovati rubove koji nastaju zbog promjena u prostornom razmještanju površina (reflektivnost) od onih koji nastaju zbog nejednakosti osvjetljenja. To se razlikovanje ne može odvijati na mrežnici jer tu promjene osvjetljenja i reflektivnosti stvaraju jednake slike, već prema Gilchristu i Jacobsenu (1983), takvu klasifikaciju potpomaže niz perceptivnih faktora. Primjerice, oštri rubovi uglavnom signaliziraju granice reflektivnosti. Eksperimentalna provjera na primjeru simultanog kontrasta potvrđuje važnost klasifikacije rubova: pokazalo se da ispitanici daju vrlo različite procjene svjetline centralnog kvadrata ovisno o tome percipiraju li rub između centralnog kvadrata i podloge kao rub reflektivnosti ili kao rub osvjetljenja (Gilchrist, 1988). Rubovi signaliziraju i doživljaj dubine. Prema Gilchristovu *principu koplanarnosti*, ako su površine u istoj ravnini, vidni sustav koristi relativnu luminaciju kao indeks svjetline, no ako ne leže u istoj ravnini, nemaju isto osvjetljenje, pa ekstrakcija relativne luminacije nije informativna za vidni sustav. Eksperimentalne provjere su pokazale različit doživljaj svjetline, ovisno o tome vide li se površine kao koplanarne ili ne (Gilchrist, 1977; Schirillo, Reeves i Arend 1990). Autori zaključuju da je svjetlina površine prvenstveno pod utjecajem onih površina koje su joj koplanarne.

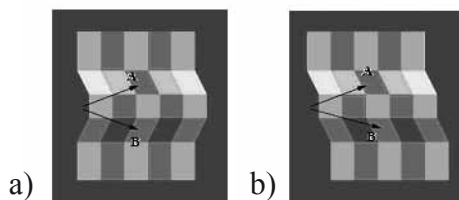
Adelson i Pentland (1996) također zastupaju stajalište da se vidna slika razlaže na zasebne slike osvjetljenja i reflektivnosti, te da granični kontrast ne igra veliku

ulogu u percepciji svjetlina. Adelson navodi da uz faktor reflektivnosti i osvjetljenja na percepciju svjetlina djeluje niz fizikalnih faktora, poput sjena, filtera, izmaglica i sl., a skupni utjecaj takvih fizikalnih faktora naziva se atmosfera. Da bi vidni sustav odvojio informacije o reflektivnosti od atmosferskih faktora, uz rubove su ključni i *kutovi* koje oni zatvaraju (Adelson 1993, Gilchrist i sur., 1999). Naime, konfiguracija kutova puno otkriva o prostornom položaju ploha te omogućava razdvajanje rubova reflektivnosti od rubova iluminacije (slika 6.), što naglašava utjecaj percepcije dubine na percepciju svjetline. Primjerice, pokazalo se da hipoteze temeljene na percepciji kutova mogu objasniti Whiteovu iluziju koja se ne može objasniti mehanizmima lokalnog kontrasta (Todorović, 1997).

Adelson je kreirao niz iluzija modificiranog simultanog kontrasta, a jedna od njih je tzv. valoviti Mondrian (Adelson, 1993). Površina označena s B čini se svjetlija od A, iako su im luminacije iste (slika 7a). Prema Adelsonu, za pojavu iluzije odgovorni su 'ψ' kutovi (između 2. i 3. te 3. i 4. reda) koji impliciraju različitu osvijetljenost A i B površina. Za onu koja ima jaču iluminaciju (A) procjenjuje da ima i manju reflektivnost i zato se doživljava tamnijom. No i ovo objašnjenje se pokazalo upitnim. Todorović je (1997) konstruirao izmijenjenu varijantu ove iluzije u kojoj se gubi efekt ψ kutova, ali efekt iluzije ostaje (slika 7b). Todorović zaključuje da neki drugi periferni mehanizam, osim lateralne inhibicije, može biti u podlozi ovog doživljajnog fenomena.

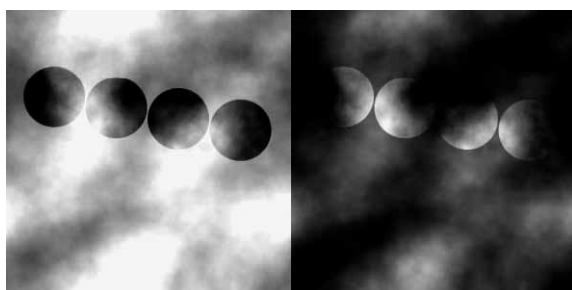


Slika 6. Na trodimenzionalnim prikazima rubovi nastaju ili zbog razlike u osvjetljenju ili zbog razlike u reflektivnosti površina. Različiti kutovi koje plohe zatvaraju znak su preko kojeg vidni sustav klasificira rubove (Adelson, 2000).



Slika 7. Zakrivljeni Mondrian. U oba prikaza, plohe označene strelicama izgledaju različito iako im je luminacija ista. a) originalna iluzija objašnjiva percepcijom dubine i osvjetljenja (Adelson, 1993). b) varijanta koja se ne može objasniti percepcijom dubine i osvjetljenja (Todorović, 1977).

Sljedeći bitan faktor u percepciji svjetline su *sjene i transparentnost*. Prema Andersonovoj *teoriji cijepanja* (*engl. scission theory*), vidni sustav na temelju kuteva rastavlja sliku na dva sloja: pozadinski sloj, tj. podlogu i prozirni iluminacijski sloj (Anderson, 1997). Teorija smatra da su i lokalni kontrast i percepcija rubova bitni za segmentaciju. Razlike u kontrastu na rubovima površina dovode do stvaranja iluzornih kontura okomitih na postojeće, a ovisno o geometrijskim aspektima kutova na tim rubovima koji signaliziraju dubinu te lokalnom kontrastu na rubovima, dolazi do ‘cijepanja’ slike. Područja niskog kontrasta rastavljaju se u višestruke slojeve, pozadinski i iluminacijski, a luminacija površine je produkt ta dva sloja. Perceptivni faktori poput kutova i elementi perceptivnog pripadanja omogućuju segmentaciju. Na sličan način objašnjava se i simultani kontrast. Anderson i Winawer (2005) su kreirali vrlo jaku iluziju dinamičkog simultanog kontrasta (statički je oblik prikazan na slici 8.). Likovi u simultano zadanim podražajima su istog prostornog rasporeda i iste luminacije, no okruženja su suprotna: kod jednog podražaja okruženje je u prosječnoj luminaciji svjetlije od lika, a kod drugog tamnije. Ključni element za kreiranje iluzije je modulacija kontrasta duž rubova lika i pozadine, koja se razlikuje



Slika 8. Uloga transparentnosti u doživljaju simultanog kontrasta. Krugovi na lijevoj i desnoj strani slike imaju istu luminaciju (prema Anderson i Winawer, 2005).

na svjetlom i tamnom okruženju. Na tamnom okruženju likovi se vide kao bijeli, vidljivi kroz tamnu polutransparentnu izmaglicu, a na svjetlom kao tamni vidljivi kroz svjetlu izmaglicu. Pristup nižih neuralnih razina ne može objasniti ovaj efekt. Prema teoriji cijepanja zbog kontrasta na rubovima slika se 'cijepa' tako da se krugovi razlažu na pozadinski i transparentni sloj. Na svjetlom okruženju, pozadinski sloj kruga se vidi kao tamnan (krug je tamna ploha), a transparentni sloj daje dojam svjetle izmaglice. Obrnuto je na tamnoj podlozi, gdje se krugovi razlažu u svjetlu pozadinu i tamni transparentni sloj. Autori su pokazali da se okretanjem kreirane podloge za 90° iluzija gubi, jer se mijenjaju varijacije rubnog kontrasta koje dovode do percepcije atmosferske transparentnosti.

Teorije interpretacija osvjetljenja

Još u 19. st., kao opoziciju Heringovu pristupu, Helmholtz je postavio hipotezu prema kojoj je ključ održavanja konstantnosti svjetline nesvjesna (današnji kognitivisti bi rekli automatska) kognitivna procjena osvjetljenja slike. Helmholtz je ovu postavku iznio u okviru svoje teorije percepcije boja, no navedeni je princip jednako primjenjiv i u akromatskoj percepciji. Helmholtzov princip može se objasniti na sljedeći način: vidni sustav, temeljem prethodnog iskustva, nesvjesno 'zna' povezanost između luminacije i osvjetljenja, pa se iz podražaja koji pada na mrežnicu (luminacija) može procijeniti trenutna razina osvjetljenja površine. Kako je luminacija umnožak reflektivnosti i osvjetljenja tj. $L = R \times I$, iz navedene formule slijedi da je putem kognitivne 'procjene' razine osvjetljenja, moguće 'izračunati' reflektivnost površine. Točan izračun reflektivnosti površine rezultira stabilnim doživljajem svjetlina.

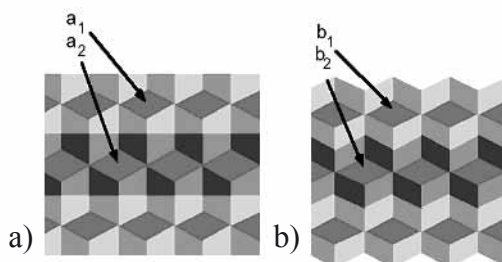
Prema Helmholtzovim postavkama, do pojave simultanog kontrasta dolazi zbog toga što svjetlu površinu pogrešno doživljavamo kao jače osvjetljeni dio slike u odnosu na dio s tamnom površinom, što posljedično dovodi do netočnog 'izračuna' reflektivnosti sivog kvadrata na svjetloj površini - čini nam se tamnijim. Najvažniji prigovor Helmholtzovoj teoriji iznio je Hering koji ističe cirkularnost objašnjenja - nejasno je na koji način vidni sustav dolazi do informacije o jačini osvjetljenja. Naime, poznato je da zbog adaptacije oka nismo u stanju registrirati apsolutnu razinu osvjetljenja. Ako je doživljena svjetlina posljedica procjene iluminacije, na koji način ljudi dolaze do te procjene? Da bismo reflektiranu svjetlost mogli koristiti kao indeks osvjetljenja, moramo znati svjetlinu, a da bismo odredili svjetlinu, moramo znati osvjetljenje. Drugi čest prigovor je da bi se prema Helmholtzovim postavkama, kod pogrešne procjene iluminacije trebali javljati puno jači efekti od onih koje obično demonstriraju iluzije svjetlina (Logvinenko, 2002).

Objašnjenja percepcije konstantnosti svjetlina dio su i nekih teorija segmentacije slike (Adelson, 1993; Anderson, 1997). Primjerice, kod Adelsonovog zida (slika 9.), kao i Andersonove iluzije simultanog kontrasta (slika 8.) autori pretpostavljaju

da percepcija osvijetljenja – inducirana transparentnim slojevima (sjenama), dovodi do krive procjene luminacije ciljne površine. Niz drugih istraživanja upućuje na to da osvijetljenje može utjecati na doživljaj svjetline. Primjerice, Gilchrist i Jacobsen su (1983) pokazali da se procjene ispitanika razlikuju ovisno o tome interpretiraju li rub luminacije kao rub osvijetljenja ili rub refleksivnosti, Knill i Kersten (1991) su pokazali da na procjenu svjetline utječe i interpretacija postupnih varijacija u luminaciji, kakve se pripisuju osvijetljenju, a značajan efekt procijenjenog osvijetljenja demonstrirao je i Howe (2006).

Logvinenko i Ross (2005) zastupaju stajalište da su procjene o osvijetljenju nezostavan dio mehanizma održavanja konstantnosti. Kako navode, u svakodnevnom životu informacije o osvijetljenju su toliko informativne da se pretpostavka o njihovom isključivanju čini doista neekonomičnom. Prema Logvinenku (1999), ono što vidni sustav uzima u obzir nije apsolutno osvijetljenje (tu vrijede prigovori upućeni Helmholtzu), već tzv. doživljeno osvijetljenje. Doživljeno osvijetljenje je komponenta koja se veže uz površinu, a ne uz fizičko osvijetljenje ili izvor svjetla (Logvinenko i Ross, 2005).

Logvinenko, Kane i Ross (2002) te Logvinenko i Ross (2005) proveli su niz eksperimenata koristeći Adelsonove iluzije kako bi pokazali da objašnjenja temeljena na segmentaciji vidne slike na osnovi kutova ne stoje. Kod Adelsonove iluzije zida, preko zida sastavljenog od kocki prevučen je tamni filter (slika 9a). Svjetlina gornje plohe pojedine kocke (tzv. romb) procjenjuje se različito ovisno o tome prekriva li je tamni filter (a2 na slici 9a) ili ne (a1 na slici 9a), iako su svim rombovima zapravo luminacije jednake. Rombovi u dijelu bez filtera procjenjuju se kao da su jače osvijetljeni, zbog čega im se pripisuje manja reflektivnost i vide se tamnijima. Granični kontrast ne može objasniti iluziju, jer kad se filteri maknu i zamijene plohami kao na slici 9b, iluzija je znatno smanjena, iako granični kontrast ostaje isti. Adelson (1993) iluziju objašnjava postojanjem X kuteva koje filteri čine u interakciji s kockama, što inducira doživljaj dubine i transparentnosti.



Slika 9. Iluzija zida. U oba prikaza, plohe označene strelicama izgledaju različito iako im je luminacija ista. a) indukcija filtera rezultira doživljajno jakom iluzijom. b) zamjena filtera kockama smanjuje iluziju (Adelson, 1993).

Logvinenko, Kane i Ross (2002) eksperimentalno su ispitali razlike u procjenama svjetlina ova dva prikaza i pokazali da je razlika vrlo mala, što znači da se iluzija ne može tumačiti X kutovima. Kako bi provjerili može li se efekt iluzije pripisati graničnom kontrastu, autori su od kartona napravili 3D reprezentaciju verzije Adelsonova zida prikazane na slici 9b. Pokazalo se da kod ovakvog prikaza iluzija nestaje u potpunosti, što znači da lokalni kontrast nikako ne igra ulogu, jer 3D i 2D slika imaju istu reprezentaciju na mrežnici. Autori zaključuju da je konstantnost svjetline u prirodnim uvjetima vezana uz procjenu osvjjetljenja. Iluzije svjetline su zapravo slikovne iluzije koje sadrže slikovne znakove osvjjetljenja. Kako je mehanizam konstantnosti vezan uz osvjjetljenje, davanje točne procjene o osvjjetljenju slikovnog prikaza može dovesti do netočne procjene luminacije, što je slučaj i kod Adelsonova zida.

Problem određivanje apsolutne vrijednosti luminacije

Dosad izložene teorije usmjerene su na određivanje faktora koji su osnovi održavanja konstantnosti i neuralne razine na kojoj se procesiraju. Gilchrist i sur. (1999) navode da takav pristup zanemaruje po njima najvažnije pitanje u percepciji svjetlina, a to je kako se iz relativne luminacije koja je pretpostavljeno ulazni podražaj za vidni sustav, izračunava apsolutna luminacija koju doživljavamo. Lokalni kontrast daje informacije o relativnom odnosu luminacija površina, no različite vrijednosti luminacija mogu dovesti do istih omjera. Primjerice, površina od 80% reflektivnosti koja se vidi kao bijela ima 4x veću reflektivnost od površine s 20% reflektivnosti koja se vidi kao siva. Isto tako 20% siva površina ima 4x veću reflektivnost od crne površine s 5% reflektivnosti. No ni jedna teorija ne objašnjava na koji se način određuje apsolutna vrijednost navedene sive površine.

Na osnovi rezultata istraživanja koja su pokazala utjecaj percepcije dubine (Gilchrist 1977; Adelson, 1993; Bonato, Cataliotti, Manente, Delenero, 2003; Gülçü i Farell, 2005), kao i utjecaj različitih faktora perceptivnog grupiranja na doživljaj svjetline (Agostini i Galmonte, 1999; Agostini i Galmonte, 2002; Soranzo i Agostini, 2003); Gilchrist i sur. (1999) postavljaju teoriju određivanja referentne točke ili tzv. *teoriju sidrenja* (engl. *anchoring theory*). Prema ovoj teoriji, referentna točka različito utječe na procjenu svjetline ostalih dijelova slike, ovisno o faktorima grupiranja. Naime, prema ovoj teoriji, vidna slika dijeli se na globalno i lokalna polja. Globalno je cjelokupno vidno polje, a lokalna su polja određena faktorima grupiranja. Svaki je element ujedno član i globalnog i lokalnog polja.

Li i Gilchrist (1999) serijom su eksperimenata utvrdili da se polje s najvećom luminacijom percipira kao bijelo i služi kao referentna točka za ostala polja na sceni, a Gilchrist i Cataliotti (1994) pokazali su da se najveće polje na sceni percipira kao bijelo, pa na kraju zaključuju da se referentna točka na nekoj sceni određuje interakcijom između najvećeg polja i onog najveće luminacije. Teorijom referentne točke moguće je objasniti nastajanje niza perceptivnih iluzija. Primjerice, simultani

kontrast se objašnjava time što je, na lokalnom planu, centralni kvadrat na lijevoj strani slike 1. referentna točka i njegov je doživljaj pomaknut prema bijelom, te se on doima svjetlijim. To se ne događa kod desnog centralnog kvadrata, jer je bijela površina na kojoj on leži referentna točka i na lokalnom (desni dio slike 1.) i na globalnom planu (cijela slika 1.). Desni kvadrat i referentna točka su i lokalno i globalno u istom odnosu i zato je doživljaj svjetline desnog centralnog kvadrata nepromijenjen. Prema istom principu objašnjen je i niz drugih iluzija, poput Whiteove i Benarijeve iluzije, Adelsonova Mondriana (za detalje vidjeti Gilchrist, Kossyfidis, Bonato, Agostini, Cataliotti, Li i Spehar, 1999).

Teorija sidrenja je sveobuhvatna u fenomenološkom smislu jer daje interpretacije gotovo svih problema vezanih uz područje percepcija svjetlina, no nažalost ne postulira moguće fiziološke procese koji bi se nalazili u podlozi ovih procesa, niti pokušava u svoje postavke integrirati do sada objavljene rezultate fizioloških istraživanja.

U novije vrijeme Bressan je (2006) na Gilchristovim postavkama razvila novi model određivanja referentne točke, tzv. dvostruko-sidreću teoriju (*engl. double-anchoring theory ili DAT*). Prema njenom modelu, svaka se površina sidri dva puta: jedan put po Gilchristovom pravilu, gdje je najsvjetlija površina bijela, a u drugom koraku referentna se točka određuje po pravilu da se pozadina ciljne površine tretira kao sidrište, odnosno bijela površina. Teorija se također osniva na, u odnosu na Gilchrista, nešto izmijenjenim pravilima grupiranja. Bressan navodi da postoje tzv. faktori grupiranja tzv. jake forme, primjerice faktor dobrog nastavljanja čija jaka forma je T kut ili faktor sličnosti dubine, čija jaka forma je koplanarnost, te faktori sličnosti luminacije. Elementi koji se grupiraju prema 'jakoj' formi čine stabilna polja. Faktori 'slabog' grupiranja su pažnja, iskustvo i slično. Bressan je teoriju provjerila na nizu eksperimentalnih rezultata i uspjela objasniti rezultate dobivene za velik broj iluzija (Bressan, 2006). Za DAT teoriju vrijede isti prigovori navedeni za Gilchristovu teoriju – model je fenomenološki i ne nudi objašnjenje fiziologije mehanizama u podlozi percepcije svjetlina.

Integracijski pristup

Kada se sumiraju nalazi dosadašnjih istraživanja, vidljivo je da debata koji su započeli Helmholtz i Hering o tome procesira li se svjetlina na nižim ili višim razinama vidnog puta još uvijek nije razriješena. Neurofiziološka istraživanja upućuju na to da se svjetlina ne kodira na mrežnici i da reprezentacija svjetline/jarkosti u mozgu zasigurno nije retinotopna, no rezultati upućuju na važnu ulogu ranog neuralnog kortikalnog procesiranja u doživljaju svjetlina. Nadalje, niz psihofizioloških istraživanja i neuralnih modela također pruža dokaze u korist ranog kodiranja jarkosti u mozgu.

S druge strane, velik broj istraživanja pokazao je i da su viši perceptivni faktori uključeni u percepciju svjetlina. U tim se istraživanjima najčešće ispituje doživljaj

svjetline kod kompleksnijih trodimenzionalnih prikaza koji su bliži predmetima koje svakodnevno opažamo i uglavnom se pokazalo da pretpostavljeni neurofiziološki modeli ranog kortikalnog kodiranja jarkosti nisu, barem ne jedini, mehanizam kojim se može objasniti doživljaj svjetline. S druge strane, ako su viši perceptivni faktori nužni za percepciju i konstantnost doživljaja svjetline, znači da pri određivanju svjetline objekta, mi taj objekt najprije moramo prepoznati, odrediti njegov položaj u prostoru u odnosu na druge predmete i interpretirati cijelu sliku. Gledano s neurofiziološke strane, to bi značilo određivanju svjetline prethodi niz drugih operacija, što implicira da je percepcija svjetlina relativno spor proces, a takva tvrdnja ne stoji.

Gdje leži rješenje ove dileme? U novije vrijeme, većina se autora slaže da je percepcija svjetlina višedimenzionalan proces te da ne postoji isključivo jedan fiziološki lokalitet na kojem se kodiraju jarkost i svjetlina (Paradiso, 2000; Kingdom, 2003), dakle i centralni i periferni mehanizmi su bitni. Baš kao i u području percepcije boja, gdje se pokazalo da su postavke dvaju suprotstavljenih teorija – Young-Helmholtzove trokromatske teorije i Heringove teorije oponentnih procesa – zapravo točne, može se pretpostaviti da se i pri percepciji svjetlina informacije kodirane putem ‘nižih’ i ‘viših’ neuralnih procesa integriraju u cjelovit doživljaj. Primjerice, Kingdom (2003) navodi da i u teorijskom i u istraživačkom smislu treba razlikovati percepciju jarkosti od percepcije svjetline. Percepcija jarkosti se osniva na mehanizmima niže neuralne razine koje obrađuju prostorno širenje jarkosti kroz neuralne filtere. Rezultat takve obrade zatim služi za održavanje konstantnosti svjetline uzimajući u obzir i razinu osvjetljenja, pri čemu ulogu ima i percepcija rubova, kutova, sjena i transparentnosti. Takvi navodi mogu objasniti i zašto određena teorija ili model dobro funkcioniraju samo za određeni tip iluzije. Tako su teorije koje zastupaju važnost ranog neuralnog procesiranja uglavnom usmjerene na percepciju jarkosti i u istraživanjima koriste iluzije jarkosti, poput Crik-O’Brian iluzije ili indukcije jarkosti. S druge strane, pristupi intrinzičnih slika osnivaju se na složenim 3D prikazima, za čije objašnjenje treba uključiti više kognitivne faktore.

Gilchrist i sur. (1999) smatraju da zapravo postoje dvije vrste konstantnosti: *konstantnost neovisna o podlozi* i *konstantnost neovisna o osvjetljenju*. Granični kontrast vjerojatno igra ulogu samo kod prvog tipa konstantnosti, dok su za drugi bitni viši perceptivni faktori. Isto tako, kao što postoje dvije vrste konstantnosti, postoje i dvije vrste iluzija. Logvinenko i Ross (2005) iluzije jarkosti nazivaju iluzijama Heringova tipa, objašnjive nižim neuralnim mehanizmima, a iluzije poput Adelsonova zida iluzijama Helmholtzova tipa, objašnjive mehanizmima procjene osvjetljenja. Naravno, postoje i one vrste iluzija koje nije lako klasificirati u jednu od ovih kategorija, primjer čega je i iluzija klasičnog simultanog kontrasta, koju neki autori smatraju iluzijom jarkosti, a drugi iluzijom svjetline. Kako svaka teorija u području konstantnosti svjetlina nudi svoje objašnjenje ove iluzije i postoji niz dokaza u prilog svakom od tih objašnjenja, može se reći da je simultani kontrast dobar istraživački model za daljnje ispitivanje mehanizama integracije viših i nižih neuralnih procesa u doživljaju konstantnosti.

Zaključno, danas se zna da percepcija svjetlina nije određena samo jednim faktorom, već uključuje više mehanizama i više razina neuralnog funkcioniranja. Ono što ostaje kao istraživačka nepoznanica jest način međusobne integracije informacija koje se kodiraju na različitim razinama vidnog puta, tj. *relativan* doprinos pojedinih faktora koji utječu na doživljaj svjetline. Umjesto teorija koje zastupaju jedinstveno i uniformno objašnjenje, smjer u kojem se kreću nova istraživanja jest razvoj modela koji na dovoljno specifičan način mogu objasniti kako procesiranje u različitim kortikalnim područjima doprinosi doživljaju svjetlina.

LITERATURA

- Adelson, E.H., Pentland, A.P. (1996). The perception of shading and reflectance. U: D. Knill, W. Richards (Ur.), *Visual Perception: Computation and Psychophysics*, str. 409-423. New York: Cambridge University Press.
- Adelson, E.H. (1993). Perceptual Organization and the Judgment of Brightness. *Science*, 262, 2042-2044.
- Adelson, E.H. (2000). Lightness Perception and Lightness Illusions. U: M. Gazzaniga (Ur.), *The New Cognitive Neurosciences*, str. 339-351. Cambridge, MA: MIT Press
- Agostini, T., Galmonte, A. (1999). Spatial articulation affects lightness. *Perception & Psychophysics*, 61, 1345-1355.
- Agostini, T., Galmonte, A. (2002). Perceptual organization overcomes the effects of local surround in determining simultaneous lightness contrast. *Psychological Science*, 13, 89-93.
- Anderson, B.L. (1997). A theory of illusory lightness and transparency in monocular and binocular images: the role of contour junctions. *Perception* 26, 419-453.
- Anderson, B.L., Winawer, J. (2005). Image segmentation and lightness perception. *Nature*, 34, 79-83.
- Arend, L.E., Špehar, B. (1993). Lightness, brightness, and brightness contrast: 1. Illuminance variation. *Perception & Psychophysics*, 54, 446-456.
- Barrow, H.G., Tenenbaum, J. (1978). Recovering intrinsic scene characteristics from images. U: A.R. Hanson, E.M. Riseman (Ur.), *Computer Vision Systems*, str. 3-26. New York: Academic Press.
- Bergstrom, S.S. (1977). Common and relative components of reflected light as information about the illumination, colour, and three-dimensional form of objects. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18, 180-186.
- Blakeslee, B., McCourt, M.E. (1997). Similar mechanisms underlie simultaneous brightness contrast and grating induction. *Vision Research*, 7, 2849-2869.
- Blakeslee, B., McCourt, M.E. (1999). A multiscale spatial filtering account of the White effect, simultaneous brightness contrast and grating induction. *Vision Research*, 39, 4361-4377.
- Blakeslee, B., McCourt, M.E. (2001). A multiscale spatial filtering account of the Wertheimer-Benary effect and the corrugated Mondrian. *Vision Research*, 41, 2487-2502.

- Bonato, F., Cataliotti, J., Manente, M., Delenero, K. (2003). T-junctions, apparent depth and perceived lightness contrast. *Perception & Psychophysics*, 65, 20-30.
- Bressan, P. (2006). The place of white in a world of grays: A double-anchoring theory of lightness perception. *Psychological Review*, 113, 526-553.
- Creutzfeldt, O., Ito, M. (1968). Functional synaptic organization of primary visual cortex neurones in the cat. *Experimental Brain Research*, 6, 324-352.
- Economou, E., Zdravkovic, S., Gilchrist, A. (2007). Anchoring versus spatial filtering accounts of simultaneous lightness contrast. *Journal of Vision*, 7, 1-15.
- Gilchrist, A.L. (1977). Perceived Lightness Depends on Perceived Spatial Arrangement. *Science*, 195, 185-197.
- Gilchrist, A.L. (1988). Lightness contrast and failures of constancy: A common explanation. *Perception & Psychophysics*, 43, 415-424.
- Gilchrist, A.L., Jacobsen, A. (1983). Lightness constancy through a veiling luminance. *Journal of Experimental Psychology*, 9, 936-944.
- Gilchrist, A.L., Kossyfidis, C., Bonato, F., Agostini, T., Cataliotti, J., Li, X., Spehar, B. (1999). An Anchoring Theory of Lightness Perception. *Psychological Review*, 106, 795-834.
- Gilchrist, A., Cataliotti, J. (1994). Anchoring of surface lightness and multiple illumination levels. *Investicative ophthalmology and vision science (suplement)*, 35, 2165.
- Grossberg, S., Todorović, D. (1988). Neural dynamics of 1-D and 2-D brightness perception: a unified model of classical and recent phenomena. *Perception & Psychophysics*, 43, 241-277.
- Gülçü, B., Farell, B. (2005). Influence of target size and luminance on the White-Todorović effect. *Vision Research*, 45, 1165-1176.
- Howe P.D.L. (2006). Testing the coplanar ratio hypothesis of lightness perception. *Perception*, 35, 291 – 301.
- Huang, X., MacEvoy, S.P., Paradiso, A.M. (2002). Perception of Brightness and Brightness Illusions in the Macaque Monkey. *The Journal of Neuroscience*, 22, 9618-9625.
- Kingdom, F.A.A. (2003). Levels of Brightness Perception. U: L. Harris, M. Jenkin (Ur.), *Levels of Perception*, str. 23-46. New York: Springer-Verlag.
- Kingdom, F., Moulden, B. (1992). A multi-channel approach to brightness coding. *Vision Research*, 32, 1565-1582.
- Kinoshita, M., Komatsu, H. (2001). Neural Representation of the Luminance and Brightness of a Uniform Surface in the Macaque Primary Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 86, 2559-2570.
- Knill, D.C., Kersten, D. (1991). Apparent surface curvature affects lightness perception. *Nature*, 351, 228-230.
- Land, E.H., McCann, J.J. (1971). Lightness and retinex theory. *Journal of Optical Society of America*, 61, 1-11.
- Li, X., Gilchrist, A.L. (1999). Relative area and relative luminance. *Perception and Psychophysics* 61, 771-785.
- Logvinenko A. D., Kane, J. (2004). Hering's and Helmholtz's types of simultaneous lightness contrast. *Journal of Vision*, 4, 1102-1110.
- Logvinenko A.D., Kane, J., Ross, D. (2002). Is lightness induction a pictorial illusion? *Perception*, 31, 73-82.

- Logvinenko, A.D. (1999). Lightness induction revisited. *Perception*, 28, 803-816.
- Logvinenko, A.D. (2002). Articulation in the context of edge classification. *Perception*, 31, 201-207.
- Logvinenko, A.D., Ross, D.A. (2005). Adelson's tile and snake illusions: A Helmholtzian type of simultaneous lightness contrast. *Spatial Vision*, 18, 25-72.
- MacEvoy, S.P., Paradiso, M.A. (2001). Lightness constancy in primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98, 8827-8831.
- MacEvoy, S.P., Kim, W., Paradiso, M.A. (1998). Integration of surface information in primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, 1, 616-620.
- McCourt, M.E., Foxe, J.J. (2004). Brightening prospects for early cortical coding of perceived luminance: a high-density electrical mapping study. *Neuroreport*, 15, 49-56.
- McCourt, M.E. (1982). A spatial frequency dependent grating-induction effect. *Vision Research*, 22, 119-134.
- McCourt, M.E., Blakeslee, B. (1993). The effect of edge blur on grating induction magnitude. *Vision Research*, 33, 2499-2507.
- Paradiso, M.A., Nakayama, K. (1991). Brightness perception and filling-in. *Vision Research*, 31, 1221-1236.
- Paradiso M.A. (2000). Visual Neuroscience: Illuminating the dark corners. *Current Biology*, 10, R15-18.
- Pessoa, L., Mingolla, E., Neumann, H. (1995). A contrast-and luminance-driven multiscale network model of brightness perception. *Vision Research*, 35, 2201-2223
- Roe A.W., Lu, H., Hung, C.P. (2005). Cortical processing of a brightness illusion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 3869-3874.
- Rossi A.F., Rittenhouse C.D., Paradiso M.A. (1996). The representation of brightness in primary visual cortex. *Science*, 273, 1104-1107.
- Rossi, A.F., Paradiso M.A. (1999). Neural correlates of perceived brightness in the retina, lateral geniculate nucleus, and striate cortex. *Journal of Neuroscience*, 19, 6145-6156.
- Salmela, V.R., Laurinen, P.I. (2007). Spatial frequency difference between textures interferes with brightness perception, *Vision Research*, 47, 452-459.
- Schirillo, J., Reeves, A., Arend, L. (1990). Perceived lightness, but not brightness, of achromatic surfaces, depends on perceived depth. *Perception & Psychophysics*, 48, 82-90.
- Shapley, R., Reid, R.C. (1985). Contrast and assimilation in the perception of brightness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 82, 5983-5986.
- Shapley, R.M., Enroth-Cugell, C. (1984). Visual adaptation and retinal gain controls. U: N. Osborne, G. Chader (Ur.), *Progress in Retinal Research*, str. 263-343. Oxford: Pergamon Press.
- Singer, W., Creutzfeldt, O.D. (1970). Reciprocal lateral inhibition of on- and off-center neurones in the lateral geniculate body of the cat. *Experimental Brain Research*, 10, 311-330.
- Soranzo, A., Agostini, T. (2003). Illumination-independent lightness constancy improves also when the ratio invariant is violated. *Perception*, 32, ECVF Abstract Supplement.
- Todorović, D. (1997). Lightness and junctions. *Perception*, 26, 379-394.

- Wallach, H. (1948). Brightness constancy and the nature of achromatic colors. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 310-324.
- Yund, E.W., Armington, J.C. (1975). Color and brightness contrast effects as a function of spatial variables. *Vision Research*, 15, 917-929.

THEORIES AND MODELS OF LIGHTNESS PERCEPTION

Summary

Lightness constancy means that perception of an object's lightness tends to be perceived as unchanging, despite changes in the amount of light striking the surface of an object. It is generally thought lightness is essentially determined by the percentage of light reflected from an object's surface. However, it is not clear how the visual system extracts information about object reflectance because the amount of light entering the eye confounds reflectance with the level of illumination in the scene. Several theories and models have been proposed as a solution for this problem. According to the low-level approach, lightness constancy depends on retinal mechanisms and brightness coding in the early visual processing stage. Another class of models considers higher perceptual mechanisms as the base of lightness constancy phenomena. Most influential theories and associated experimental findings are presented in this paper.

Key words: lightness perception; brightness perception; lightness constancy; simultaneous contrast

Primljeno: 17. 07. 2008.