



MARIA OLKKONEN & TONI SAARELA

Aisti-informaatiosta havainnoksi: värikonstanssin ongelma

Värit auttavat meitä jäsentämään näkökentän kohteita objekteiksi ja niiden taustoiksi, helpottavat objektien tunnistamista sekä tarjoavat tietoa pintojen ja materiaalien ominaisuuksista. Silmiin tuleva valo ei kuitenkaan suoraan kerro pintojen ominaisuuksista, sillä se riippuu aina sekä valaistuksesta että siitä, miten nämä pinnat heijastavat valoa. Ihmisen näköjärjestelmä kykenee – ainakin osittain – ratkaisemaan tämän ”värikonstanssin” ongelman: värihavaintomme on suhteellisen pysyvä huolimatta suuristakin muutoksista valaistuksessa. Aiemmin opitulla tiedolla ja ennako-oletuksilla on mahdollisesti tärkeä rooli värikonstanssissa, sillä ennalta opittu tieto auttaa rajaamaan mahdollisia tapoja tulkita aistisignaali pinnoiksi ja valaistuksiksi.

Näköaistin käyttäminen erilaisiin arkipäiväisiin tehtäviin tuntuu helpolta: osaamme valita kypsän tomaatin syötäväksi, tunnistamme tutun henkilön kasvot väkijoukosta, tai kurkotamme vaivatta pöydällä olevaan kahvikuppiin. Mutta nämä tehtävät tuntuvat helpoilta vain sen takia, ettei meillä ole pääsyä siihen aivoissa tapahtuvaan nopeaan tietojenkäsittelyyn, jonka ansiosta kykenemme tunnistamaan pintojen ominaisuuksia, läheisten kasvoja ja esineiden muotoja. Havaitsemme näkökentän kohteiden värit, muodot, koot ja materiaalit usein suhteellisen pysyvinä, vaikka olosuhteet kuten katseluetäisyys ja valaistus vaihtelevat suuresti. Tämän pysyvyyden saavuttamista kutsutaan havaintokonstanssin ongelmaksi.

Aisti-informaatiosta havainnoksi: värikonstanssin ongelma

Tarkastellaan konstanssiongelmaa ensin lähemmin värihavainnossa. Nisäkkäillä värihavainnon mahdollistaa se, että silmän verkkokalvolla on useammanlaisia reseptorisoluja (ihmisellä kolmenlaisia), jotka reagoivat tiettyihin valon aallonpituuksiin herkemmin kuin toisiin (Kuva 1a). Ihmisen S-tapit ovat herkimpiä lyhyille, M-tapit keskipitkille ja L-tapit pitkille näkyvän valon aallonpituuksille. Värihavainto syntyy aivoissa useiden prosessien kautta eri tappisolujen aktivaatioita vertaamalla.¹

Millaiseen ulkomaailmasta tulevaan informaatioon värihavainto sitten perustuu? Kun katsomme omenaa suorassa auringonvalossa (Kuva 1a), siitä heijastuva valo tarkentuu sarveiskalvon ja linssin kautta verkkokalvolle. Kunkin pinnan reflektanssista eli heijastuskyvystä riippuu, mitä valon aallonpituuksia se absorboi ja mitä se heijastaa. Koska tämän omenan pinta absorboi

eniten lyhyitä ja pitkiä aallonpituuksia, heijastuu siitä silmään eniten keskipitkiä aallonpituuksia, jolloin omena nähdään vihreänä tai kellertävänä. Mutta mitä tapahtuu, kun omenaa katsotaan toisessa valaistuksessa, esimerkiksi varjossa? Omena osuva valo sisältää tällöin suhteessa enemmän lyhyitä aallonpituuksia, jolloin omenasta heijastuu myös silmään enemmän lyhyitä aallonpituuksia (Kuva 1b). Vallalla olevan käsityksen mukaan värinäön eräs keskeinen tarkoitus on saada tietoa selviytymiselle tärkeistä objektien ominaisuuksista kuten tuoreudesta ja kypsyydestä, jotka korreloivat pinnan reflektanssin kanssa². Tästä herää kysymys, miten silmiin heijastuvasta valosta kyetään erottelemaan pinnan reflektanssi ja valaistuksen aallonpituussisältö? Tätä havaintokonstanssin osa-alueita kutsutaan värikonstanssiksi. Värikonstanssin saavuttamista hankaloittaa lisäksi se, että värihavainto perustuu vain kolmeen silmän verkkokalvon tappisolutyyppiin, jotka ovat herkkiä hieman erilaisille aallonpituuksille. Verkkokalvolle lankeava valo koodataan näiden kolmen tappiityypin aktivaatioina, joista aivojen pitää erottaa pinnan ominaisuuksien ja valaistuksen vaikutus (Kuva 1b ja c).

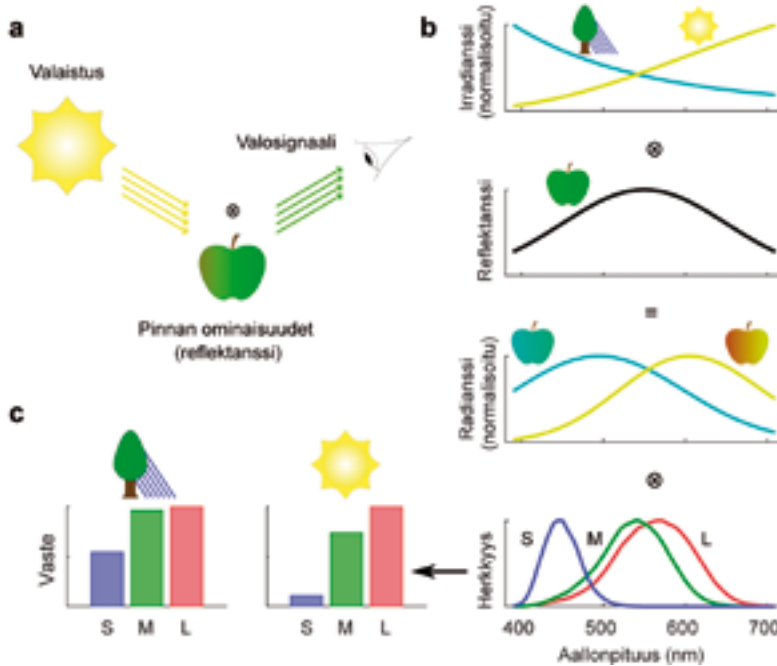
Kysymys siitä, ”sijaitsevatko” värit mielessä vai ulkomaailmassa, jakaa käsityksiä filosofiassa. Esimerkkejä eri näkemyksistä ovat värirealismi (värit ovat ulkomaailmassa) ja antirealismi/eliminativismi (värit ovat vain mielessä)³. Havaintokonstanssin ajatus on, että havainto tuottaa tietoa näkökentän kohteiden pysyvistä ominaisuuksista. Värikonstanssin tapauksessa ominaisuus perustuu siihen, miten nämä kohteet heijastavat valoa, eli niiden reflektanssiin. Vaikkei kolmen reseptorityypin aktivaatioista koko reflektanssispektriä saakaan palautettua, värikonstanssi kuitenkin mahdollistaa jonkin pysyvän tai invariantin ominaisuuden tunnistamisen olosuhteista riippumatta. Se on oletettavasti kehittynyt siksi, että ky-

vystä tunnistaa tietty pinta tai materiaali samaksi eri valaistusolosuhteissa on ollut evoluutiossa hyötyä. Emme ota tässä tarkemmin kantaa siihen, tarkoittaako tämä, että ”värit ovat ulkomaailmassa”. Toteamme monien muiden havaintotutkijoiden tapaan, että *havaittu* väri *perustuu* ulkomaailman valonlähteistä säteilevään ja pinnoista heijastuvaan valoon⁴. Toisin sanoen, pinnoilla on ominaisuus, jonka me havaitsemme värinä, mikä tarjoaa meille hyödyllistä informaatiota, vaikka pintojen ja värihavainnon välillä ei olisikaan yksi yhteen -vastaavuutta.

Näköjärjestelmämme toimii niin hyvin, ettemme yleensä kiinnitä huomiota valaistusmuutoksiin, kun menemme valosta varjoon tai ulkoa sisälle, eikä meillä ole yleensä ongelmia tunnistaa esineiden pintavärejä eri valaistuksissa. Kypsät banaanit näyttävät yleensä keltaisilta kaikissa valaistuksissa. Mutta emme tiedä, miten aivot saavuttavat tämän, sillä konstanssiongelman ratkaisu ei ole yksiselitteinen: ei ole laskennallisesti mahdollista palauttaa pinnan reflektanssiominaisuutta tappiaktivaatioista ilman rajoittavia tekijöitä – mille tahansa heijastu-

neelle aallonpituusjakaumalle on olemassa ääretön määrä valaistuksen ja reflektanssin yhdistelmiä, jotka voivat tuottaa saman jakauman. Yksi mahdollinen strategia värikonstanssin saavuttamiseen on eri tappityyppien aktivaation vertaaminen näkökentän eri kohteiden välillä⁵. Ihmisen näköjärjestelmä saattaa käyttää informaatiota tappien suhteellisesta aktivaatiosta auttamaan värikonstanssin saavuttamisessa⁶, mutta tämä ei yksin riitä selittämään ihmisen värikonstanssia, kuten sitä, että tietyissä tilanteissa monimutkaisemmat näkymän ominaisuudet (esimerkiksi kolmiulotteinen konfiguraatio) vaikuttavat värihavaintoon verkkokalvokuvan ollessa identtinen⁷. Moderni konstanssitutkimus pyrkii ymmärtämään niitä aivo- ja laskennallisia mekanismeja, jotka mahdollistavat riittävän pysyvän havaintokokemuksen pinnan ominaisuuksista kaikissa katseluolosuhteissa⁸.

Värihavainto ei ole ainoa havainnon osa-alue, jossa konstanssiongelma ilmenee. Tästä käy esimerkkinä kuva 2a, jossa kaksi kiiltävää kuppia on valokuvattu normaalin ja hyvin diffuusin valaistuksen alla. Normaalisissa valais-



Kuva 1. Värikonstanssin ongelma.

a: Saamme informaatiota objektien pintojen ominaisuuksista silmiin tulevan valosignaalin välityksellä, joka on objektin pinnasta heijastunutta valoa. Silmiin tuleva valo riippuu siis sekä pinnan reflektanssista että valaistuksesta. b: Yllin kuva näyttää kahden eri valaistuksen, suoran auringonvalon ja epäsuoran valon tai varjon aallonpituusjakauman. Epäsuorassa valossa on suhteellisesti enemmän energiaa lyhyillä aallonpituuksilla kuin suorassa valossa. Seuraava kuva esittää omenan reflektanssijakaumaa, eli sitä kuinka paljon valoa omenan pinta heijastaa kullakin valon aallonpituudella. Kolmas kuva näyttää omenasta heijastuneen valon aallonpituusjakauman ensimmäisen kuvan suorassa ja epäsuorassa auringonvalossa. Tämä signaali saadaan, kun kerrotaan keskenään valon spektri ja pinnan reflektanssijakauma. Silmään tuleva valosignaali koodataan verkkokalvolla kolmen tappisolutyypin aktivaatioina; näiden herkkyydet aallonpituuden funktiona on kuvattu alimmassa kuvassa. c: Omenasta silmiin lankeava valo kahden valaistuksen alla kuvattuna kolmen tappisolun aktiviteettina. Jotta värikonstanssi toteutuisi, täytyy tappiaktivaatioiden perusteella päätellä, mikä pinnan reflektanssi kunkin valaistuksen alla on ollut.

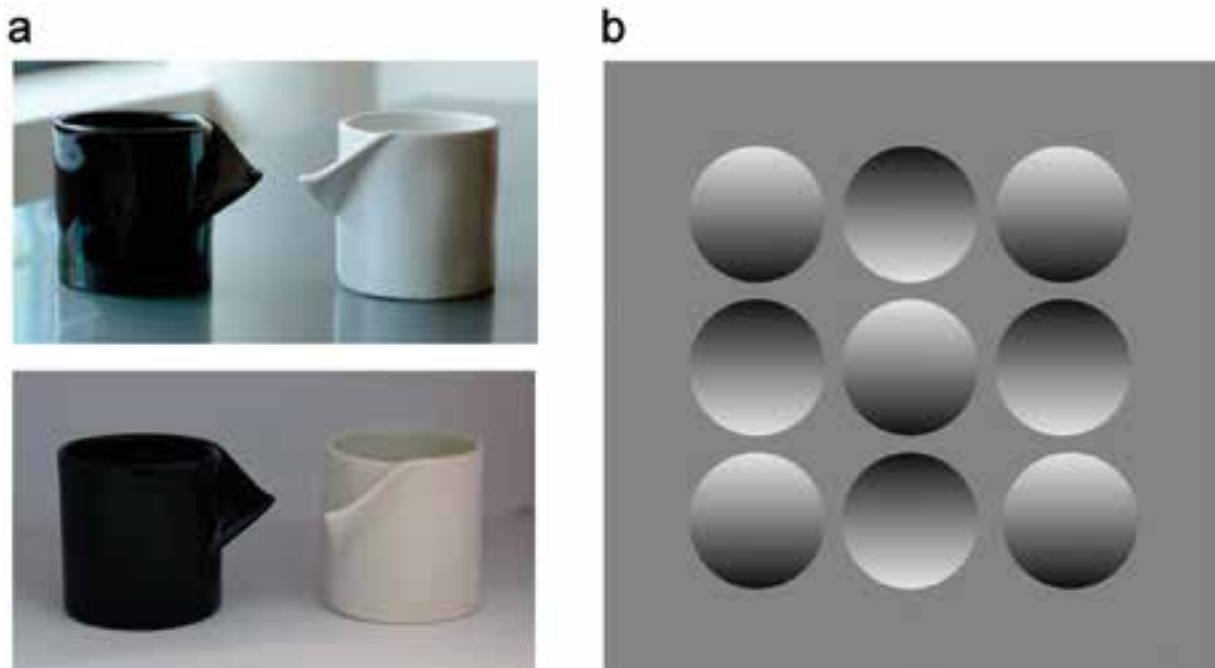
tuksessa kuppien pinnoilla näkyy valon heijastuksia, jotka saavat kupit näyttämään kiiltäviltä. Diffuusissa valaistuksessa heijastuksia ei synny, jolloin kupit näyttävät mattapintaisilta, ja näin ollen tässä esimerkissä havaintokonstanssi ei toteudu. Tämä tapahtuu, koska aivot joutuvat laskemaan kuppien materiaalin verkkokalvolle heijastuvan informaation perusteella, joka on aina puutteellista ja tässä tapauksessa johtaa väärään tulkintaan pintamateriaalista.

Toinen esimerkki löytyy muodon havainnosta. Esineiden kolmiulotteisen muodon havaitseminen ei ole triviaalia, koska kolmiulotteinen maailma muodostaa verkkokalvolle kaksiulotteisen kuvan. Maailman kolmiulotteinen rakenne täytyy päätellä tästä kaksiulotteisesta kuvasta erilaisten vihjeiden perusteella. Joskus opittu tieto vaikuttaa päättelyn lopputulokseen. Useimmat näkevät kuvan 2b kulmissa ja keskellä olevat muodot kuperina, ja loput neljä muotoa koverina, vaikka kaksiulotteiset muodot paperilla eivät tietyksi ole kumpiakaan. Havainnon synnyttäjänä on aivoissamme ilmeisesti evo-

luution aikana kehittynyt oletus siitä, että valo tulee ylhäältä päin (*light-from-above prior*⁹). Tämä oletus tukee tulkintaa, että varjostus alhaalla viittaa kuperaan muotoon ja varjostus ylhäällä viittaa koveraan muotoon.

Mahdollisia ratkaisuja konstanssiongelmaan

Aisti-informaatiosta syntyneestä havainnosta on sitä enemmän hyötyä, mitä paremmin se kertoo siitä ulko-maailman ominaisuudesta, jota pyrimme arvioimaan. Tässä tehtävässä kohtaamme niin sanotun käänteisen ongelman: arvioidessamme esimerkiksi pinnan reflektanssia silmän verkkokalvolle lankeavasta valosta, aivot joutuvat ”kääntämään” yhtälön, jonka mukaan verkkokalvon saavuttanut valo on pinnan reflektanssin ja pinnalle lankeavan valon tulo (Kuva 1). Kyseessä on sama ongelma kuin jos pyytäisimme jotakuta arvaamaan, mitkä kaksi lukua on kerrottu tuloon 42. Tämä ei selvästi ole mahdollista ilman lisätietoa, mutta jos kerromme, että kyseisten lukujen erotus on 1, saattaa tehtävä helpottua.



Kuva 2. Konstanssiongelma materiaalin ja muodon havaitsemisessa.

a: Kaksi kuppia on kuvattu luonnollisen ja diffuusin valaistuksen alla. Kupit näyttävät kiiltäviltä luonnollisessa valaistuksessa (yläpaneeli), mutta mattapintaisilta diffuusissa valaistuksessa (alapaneeeli). Tässä tilanteessa materiaalikonstanssi siis pettää, koska kuvassa ei ole tarpeeksi informaatiota arvioida materiaalia oikein.

b: Tässä kuvassa muodot näyttävät joko kuperilta tai koverilta sen mukaan, miten ne on varjostettu, vaikka kummatkaan muodot eivät todellisuudessa ole kolmiulotteisia. Muodon havaintoon vaikuttaa oletus valon tyypillisestä tulosuunnasta. Koska valo tulee yleensä ylhäältä päin, näyttävät alta varjostetut muodot kuperilta ja ylhäältä varjostetut muodot koverilta, koska tämä tulkinta on yhtenevä ylhäältä tulevan valon kanssa.

Viimeisen parin vuosikymmenen aikana on tullut enemmän ja enemmän vallalle näkemys, jonka mukaan näköjärjestelmämme tukeutuu kulloisenkin aisti-informaation lisäksi myös aiemmin opittuun tietoon ympäristön ominaisuuksista ja säännönmukaisuuksista arvioidessamme ulkomaailman ominaisuuksia vajavaisen aisti-informaation perusteella¹⁰. Tämä ehdotus ei ole kuitenkaan uusi, ja se juontaa juurensa jo Hermann von Helmholtziin (1821–1894), joka puhui tiedostamattomasta päätelmästä (*unbewusster Schluss*¹¹) – automaattisesta aiemmin opitun tiedon käytöstä havaintojen ”laskeamisessa”.

Aiemmin opitun tiedon käyttö havainnon käänteisen ongelman rajoittamiseksi ei ole ainoa mahdollinen ratkaisu. Ongelmaa voi rajoittaa myös yhdistämällä tietoa useasta eri lähteestä¹². Jos haluamme esimerkiksi arvioida tomaatin kypsyyttä, voimme arvioida sen väriä, tuoksua sekä kimmoisuutta. Lopullinen kypsyyshavainto on näiden kolmen vihjeen yhdistelmä, ja parhaaseen tulokseen päästään antamalla luotettavimmille vihjeille eniten painoarvoa. Jos esimerkiksi värisignaali on tietyssä tilanteessa luotettavin, kypsyyshavainto perustuu voimakkaimmin värihavaintoon. Tällaisesta ”vihjeiden integroinnista” (englanniksi usein käytetään käsitteitä *cue integration* tai *data fusion*) on paljon viitteitä eri havaintoilmiöissä, sekä aistien välillä että niiden sisällä. Ihmiset yhdistävät esimerkiksi näkö- ja tuntuinformaatiota tilastollisesti arvioiden hyvin optimaalisesti arvioidessaan esineiden kokoa¹³. Sama pätee näkö- ja kuuloinformaation yhdistämiseen äänen lähteen paikallistamisessa. Kun näköinformaatio on paikannuksessa luotettavampaa kuin kuulo, sitä painotetaan enemmän; tästä johtuu myös niin kutsuttu vatsastapuhujaillusio (*ventriloquist effect*¹⁴). Myös väri-informaatio integroidaan tietoon muista pinnan ominaisuuksien kuten tekstuurista ja vaaleudesta sekä reunojen paikannuksessa että hahmontunnistuksessa¹⁵.

Keskitymme tässä näistä kahdesta yllämainitusta ratkaisusta ensimmäiseen eli aiemmin opitun tiedon vaikutukseen. Periaatteena on, että aiemmin opitun tiedon käyttö havaintoprosessissa rajoittaa käänteistä ongelmaa ja mahdollistaa sen ratkaisun, kuten jo Helmholtz ehdotti. Aiemmin opitun tiedon käyttöä havainnossa voidaan mallintaa tilastollisilla malleilla, jotka perustuvat 1700-luvulla eläneen tilastotieteilijä Thomas Bayesin sääntöön. Bayesin säännön mukaan tapahtuman x todennäköisyys voidaan laskea yhdistämällä tapahtuman *a priori* -todennäköisyys (tämä kuvastaa tapahtuman todennäköisyyttä riippumatta aistihavainnosta – esimerkiksi eri pintarefleksansien ilmenemistä luonnossa) ja tapahtuman uskottavuus (*likelihood*), kun otetaan huomioon aisti-informaatio. Aisti-informaatio on aina jossain määrin epävarmaa – kaikkien neuraaliseen viestintään liittyy kohinaa. Mitä epävarmempaa aisti-informaatio on, sitä enemmän ennakkotietoa painotetaan. Tämä on tärkeä periaate, jonka testaamista kokeellisilla menetelmillä käsittelemme seuraavaksi.

Palataan siis värihavaintoon. Esittelemme seuraavaksi värikonstanssin mittaamista ja erilaisia värihavainnon

ilmiöitä, jotka kyetään selittämään bayesilaisessa viitekehysessä. Tarkastelemme sitten muutamaa bayesilaista mallia, joilla on selitetty värihavainnon ilmiöitä. Lopuksi esitämme näkemyksemme siitä, mihin suuntaan tutkimusala on kehittymässä.

Värikonstanssi laboratoriossa

Värikonstanssia on tutkittu empiirisesti paljon viimeisen sadan vuoden aikana¹⁶. Tutkimusten päätarkoitus on ollut kuvata näköjärjestelmän kykyä kompensoida valaistus- ja kontekstimuutoksia yksinkertaisissa laboratorio-olosuhteissa. Tulokset ovat vaihtelevia: joissain tutkimuksissa on havaittu melkein täydellinen kompensatio valaistusmuutoksille, kun taas toisissa tutkimuksissa on enemmän koehenkilöiden välistä vaihtelua ja epätäydellistä kompensatiota¹⁷.

Vaihtelevia tuloksia saattaa selittää havaintokokeuksen moniulotteisuus, joka luo haasteita havainnon mittaamiseen. Värihavainnon moniulotteisuutta kuvaa tilanne, jossa katsomme kahta valkoista paperiarkkia vierekkäin niin, että toinen on varjossa ja toinen valossa. Näemme, että molemmat paperit ovat valkoisia, mutta näemme myös, että varjossa oleva paperi näyttää tummemmalta. Pystymme toisin sanoen ainakin jossain määrin havaitsemaan samanaikaisesti sekä objektien ominaisuudet (joihin näköjärjestelmällä ei ole suoraa pääsyä) että silmiin tulevan valon ominaisuudet (eli sen aistisignaalin josta objektien ominaisuudet estimoidaan)¹⁸. Laboratoriossa ei ole aina selvää, arvioivatko koehenkilöt objektin, silmiin heijastuneen valon vai valaistuksen ominaisuuksia, ja tämä todennäköisesti aiheuttaa koehenkilöiden välistä vaihtelua tuloksissa.

Ongelmaa pahentaa se, että värihavaintoa on perinteisesti tutkittu yksinkertaisilla ja varsin epäluonnollisilla ärsykkeillä, ja koehenkilöitä on pyydetty esimerkiksi vertaamaan kahden ärsykkeen väriä valaistusreunan yli (*asymmetric matching*) tai asettamaan kohdeärsykkeen väri harmaaksi eri valaistuksissa (*achromatic adjustment*). Kumpikaan tehtävä ei ole kovin helppo tai luonnollinen, mikä saattaa saada koehenkilöt käyttämään strategioita, joita he eivät normaaleissa katseluolosuhteissa käyttäisi¹⁹. Tästä syystä monet tutkijat suosivat nykyään luonnollisempien ja ekologisesti validimpien tehtävien käyttöä, kuten värin nimeämistä²⁰ tai värin tunnistusta²¹, ja realistisempia ärsykeitä kuten tietokoneella mallinnettuja kolmiulotteisia objekteja²² tai valokuvia luonnollisista objekteista²³.

Ennakkotiedon rooli värikonstanssissa: pitkällä aikavälillä opittu ennakkotieto

Mikäli aiemmin opitulla tiedolla on todellinen vaikutus havaintoon, pitäisi tämän näkyä myös siinä, miten havaitsemme värejä. Vaikka Helmholtzin aikainen Ewald Hering (1834–1918) oli Helmholtzin kanssa eri mieltä siitä, kuinka paljon kognitio vaikuttaa havaintoon, hän kuitenkin ehdotti, että muistiväri eli asioiden tyyppi-

linen väri auttaa niiden värin havaitsemista vaihtelevissa valaistusolosuhteissa²⁴. Tätä ehdotusta tutkittiin jonkin verran 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla, minkä jälkeen muistivärit unohtuivat puoleksi vuosikymmeneksi. Grace Adams raportoi ensimmäisenä, että muistiväri vaikuttaa esineiden havaittuun väriin hankalissa valaistusolosuhteissa²⁵. Adamsin koehenkilöt oppivat testiärsykkeen (sinertävästä paperista leikattu purkki) värin normaalissa valaistuksessa tehtävässä, jossa heitä pyydettiin vertaamaan testiärsykettä väripyörään. Koekentekijä sääti väripyörää koehenkilön neuvomana niin kauan, että se näytti samanväriseltä kuin testiärsyke. Tätä toistettiin noin 1000 säätökertaa. Varsinaisessa kokeessa testiärsykkeen näköinen ärsyke, joka oli leikattu harmaasta paperista, oli valaistu kellertävällä valaistuksella ja koehenkilöiden piti verrata ärsykkeen väriä väripyörään. Ne viisi koehenkilöä, jotka olivat ottaneet osaa oppimiskokeeseen, havaitsivat harmaan ärsykkeen värin sinertävänä tai violetina, kun taas kontrollikoehenkilöillä ei ilmennyt vastaavaa havaintoharhaa. Vastaavanlaisia tuloksia, joissa muistiväri vaikutti ärsykkeen havaittuun väriin, saatiin myöhemmin muissa tutkimuksissa²⁶.

On kuitenkin epäselvää, voidaanko näistä tuloksista päätellä muistin tai ennakkotiedon vaikuttavan *havaintoon*. Testiärsykkeen vertaaminen väripyörään klassisissa muistivärikokeissa vaatii sekä lyhytkestoista muistia että kielellisiä prosesseja, mikä herättää kysymyksen, onko vaikutus pikemminkin kielellisen arvion tasolla. Kun koehenkilöt Karl Dunckerin kokeessa vertasivat puun lehteä väripyörään, on helppo ajatella, että lehti on kenties herättänyt miellelyhtymän vihreään väriin, ja tämän takia koehenkilö on pyytänyt koekentekijää säätämään väripyörän vihreämmäksi, vaikka lehti ei välttämättä näyttäisi sen vihreämmältä kuin kontrolliärsykkeenä toimiva aasin kuva²⁷.

Puoli vuosisataa alkuperäisten muistiväritutkimusten jälkeen näyttöteknologia ja -ohjelmistot olivat kehittyneet riittävästi, jotta kokeet pystyttiin toistamaan ilman vastaavanlaisia ongelmia. Maria Olkkonen ja kollegat näyttivät koehenkilöille yksitellen valokuvia tutuista hedelmistä ja vihanneksista ja pyysivät koehenkilöitä säätämään kuvien värit siten, että ne näyttivät harmailta²⁸. Näin vältettiin kielelliseen prosessointiin ja muistiin liittyvät ongelmat, koska koehenkilöiden ei tarvinnut raportoida koekentekijälle havainnostaan, eikä heidän tarvinnut pitää ärsykettä työmuistissa koetta tehdessään. Tulokseksi todettiin, että koehenkilöt eivät tehneet kuvista keskimäärin harmaita, vaan säätivät ne hieman kunkin luonnollisen värin vastavärin suuntaan. Esimerkiksi banaani säädettiin hieman sinertäväksi. Tekijät tulkitsivat tämän siten, että kun kuvat olivat oikeasti harmaita, ne näyttivät vielä hieman värillisiltä kunkin objektin luonnollista väriä vastaavasti, jolloin koehenkilöiden piti poistaa tämä värivahvistus lisäämällä siihen hieman vastaväriä. Lisätyn vastavärin määrä kertoi muistivärieffektin voimakkuudesta²⁹. Muistivärieffekti yleistyy eri valaistuksiin³⁰, tuttuihin keinotekoisiihin objekteihin³¹, ja jopa yrityslogoihin³². Funktionaalisella magneettire-

sonanssikuvauksella on osoitettu, että muistivärien vaikutus näköinformaation prosessointiin alkaa jo varhaisella näköaivokuorella³³.

Jos ennalta opitun tiedon käyttö on havainnossa yleinen periaate, näköjärjestelmän pitäisi käyttää ennakkotietoa myös muista luonnollisten kuvien lainalaisuuksista, kuten esimerkiksi luonnollisesta valaistuksesta. Luonnollinen valaistus vaihtelee päivän mittaan keskipitkiä aallonpituuksia sisältävän kellertävän auringonvalon ja lyhyempiä aallonpituuksia sisältävän sinertävän epäsuoran auringonvalon (varjon) välillä, ja sisävaloissa on samanlaista vaihtelua (ks. Kuva 1). Värivaikutelmaltaan vihreä tai punainen valo on harvinaisempaa. Käyttäväkö näköjärjestelmä tietoa näistä valaistusympäristön lainalaisuuksista?

Tätä on pohdittu kauan, ja David H. Brainard ja kollegat löysivätkin viitteitä heikoista valaistusoletuksista³⁴. Silti vasta sini-mustan mekon tapaus kevättälvella 2015 sai väritutkijat laajemmin tutkimaan asiaa. Sosiaalisessa mediassa julkaistu kuva jakoi mielipiteet siitä, kuvasiko se sini-mustaa vai valko-kultaista mekkoa³⁵. Kuva oli yli-valottunut ja rajattu niin, ettei taustaa nähnyt kunnolla – kuvassa oli siis vain vähän vihjeitä siitä, missä valaistuksessa mekko oli kuvattu. Tutkijat arvelivat pian, että yksilöiden välisiä eroja selittivät erilaiset oletukset valaistuksen suhteen. Ne, jotka olettivat mekon olevan suoraan valaistu, näkivät sen sini-mustana, kun taas ne, jotka olettivat mekon olevan varjossa tai takaa valaistu, näkivät sen valko-kultaisena. Kumpikin näistä vaihtoehtoista voi tuottaa saman verkkokalvokuvan, mikä aiheuttaa monitulkintaisen tilanteen mekon pintavärin suhteen³⁶. Tätä hypoteesia on sittemmin testattu sekä laboratorioissa että verkkokyselyillä, ja näyttää siltä, että mekon havainto korreloi ainakin jonkin verran yksilöllisten valaistusoletusten kanssa³⁷.

Nopeasti opittu ennakkotieto ja Bayes

Aivot siis vaikuttavat käyttävän ennalta opittua tietoa rakentaessaan edustusta maailmasta aisti-informaation perusteella. Oletukset esimerkiksi valaistuksesta tai hedelmien väristä ovat voineet syntyä pitkän ajan kuluessa. Mutta myös hyvin lyhyessä ajassa opitut oletukset vaikuttavat havaintoon voimakkaasti. Keskilukuharha on psykologiassa tunnettu ilmiö, jossa arviot ärsykeistä harhautuvat aiemmin koettujen ärsykkeiden keskiarvoa kohden³⁸. Ilmiö on osoitettu muun muassa koon³⁹, viivan pituuden⁴⁰, aikaintervallien⁴¹, sekä värin⁴² suhteen. Voisiko tässä ilmiössä olla kysymys tilannesidonnaisen ennakkotiedon oppimisesta?

Paymon Ashourian ja Yonatan Loewenstein pyrkivät selittämään keskilukuharhaa viivan pituuden arvioinnissa bayesilaisella mallilla, joka ottaa huomioon koehenkilöiden epävarmuuden ja kokeen aikana esitetyn ärsykejakauman⁴³. He tekivät ensiksi kokeen, jossa koehenkilöt vertasivat kahden peräjälkeen esitetyn viivan pituutta usean koekerran aikana, jolloin he oppivat implisiittisesti kokeessa käytettyjen ärsykkeiden pituusjakauman.

Koehenkilöt olivat hyviä keskipitkien viivojen muistamisessa, mutta muistivat pitkät viivat lyhyempinä kuin ne oikeasti olivat, ja lyhyet viivat pidempinä, aivan kuten voi odottaa keskilukuharhasta. Tutkijoiden bayesilainen malli sopi hyvin koehenkilöiden tuloksiin. Tämän kaltainen malli kykenee selittämään keskilukuharhan myös muissa ärsykeavaruuksissa⁴⁴.

Huomionarvoista bayesilaisissa malleissa on se, että ennakkotietoa painotetaan sen mukaan, kuinka kohinaista aisti-informaatio on. Jos ärsyke nähdään hyvissä katse-olosuhteissa eikä siitä ole paljon epävarmuutta, on ennakkotiedolla vähäisempi paino kuin jos ärsyke-informaatio on jostain syystä kohinaa. Kokeellisesti kohinaa voi lisätä kahdella tavalla: ärsykkeeseen voidaan lisätä *ulkoista* kohinaa, esimerkiksi näyttämällä ärsyke häiriöärsykkeiden joukossa, jotka vaikeuttavat tehtävää, tai lisäämällä *sisäistä* kohinaa, esimerkiksi pidentämällä aikaa, jonka koehenkilö joutuu pitämään ärsykettä muistissaan ennen sen vertaamista toiseen ärsykkeeseen. Maria Olkkonen, Patricia F. McCarthy ja Sarah R. Allred testasivat tätä ennustetta kokeessa, jossa koehenkilöiden piti verrata kahden ärsyksen väriä lyhyen muistiviiveen yli⁴⁵. Sisäistä kohinaa muunneltiin muuttamalla viiveen pituutta 0,4 sekunnista 4 sekuntiin; ulkoista kohinaa muunneltiin lisäämällä ensiksi esitetyn ärsyksen värikohinaa (ärsyke oli tehty pienistä ruuduista, ja näiden ruutujen väri otettiin joko kapeamasta tai leveämmästä värijakaumasta kohinatilanteen mukaan). Tulokseksi saatiin, että harha koko ärsykesarjan keskiväriä kohti kasvoi, kun kohina kasvoi. Tulos oli samankaltainen sekä ulkoiselle että sisäiselle kohinalle.

Muistiharhasta muistiväreihin: millä aikavälillä muistivärit syntyvät?

Yllä on esitetty kahdenlaisia esimerkkejä siitä, miten opittu tieto ja oletukset vaikuttavat värihavaintoon. Ensinnäkin: oletettavasti hyvin pitkän ajan kuluessa eri objekteille voi syntyä omat ”muistivärit”, jotka vaikuttavat värihavaintoon vetäen värihavaintoa puoleensa. Toiseksi: jo hyvin lyhyessä ajassa, yhden laboratorioissa suoritetun kokeen aikana, koehenkilöiden havaitsema väri vääristyy kokeen aikana nähdyn värijakauman keskiarvoa kohden. Tästä seuraa kaksi mielenkiintoista jatkokysymystä, johon tämänhetkinen tutkimuksemme keskittyy. Ensinnä, kuinka nopeasti aiemmin nähtyjen värien jakauma alkaa vaikuttaa havaintoon? Sekunneissa, minuuteissa vai kymmenissä minuuteissa? Toinen kysymys koskee muistivärien syntymistä: Kuinka nopeasti uusia muistivärejä voi syntyä? Kuinka paljon kokemusta tähän tarvitaan? Onko eri muistivärejä mahdollista tuottaa uusille, ennestään vieraille objekteille havaintokokeiden yhteydessä laboratorioissa?

Alustavien tulosten mukaan yhden kokeen aikana nähtyjen värien jakauma alkaa vaikuttaa värihavaintoon lähes välittömästi, ja tämä vaikutus on selvästi mitattavissa jo ensimmäisen noin sadan esitetyn ärsyksen aikana⁴⁶. Yhteneviä tuloksia on saatu muiden ärsykkeiden piirteiden, kuten reunan tai viivan kallistuskulman, havaintoa koskevissa tutkimuksissa⁴⁷.

Värihavainnon bayesilainen mallinnus

Ennakkotieto ympäristön säännönmukaisuuksista saattaa siis auttaa aivoja rakentamaan mahdollisimman käyttökelpoisen edustuksen maailmasta. Ennakkotiedon vaikutusta havaintoon voidaan mallintaa malleilla, joissa havainto perustuu Bayesin teoreeman mukaiseen päätelyyn⁴⁸. Bayesilaisten havaintomallien perusidea on seuraava: havaitsija saa tietoa jostakin tapahtumasta x (”tapahtuma” määritellään laveasti, ja se voi olla esimerkiksi tietyn reflektanssin omaavan pinnan esittäminen havaintokokeen osallistujalle) ainoastaan aisti-informaation y kautta. Havaitsija pyrkii y :n perusteella päättämään, mikä tapahtuma x aiheutti y :n. Tapahtuman x posterioritodennäköisyys saadaan kertomalla tapahtuman x uskottavuus sen prioritodennäköisyydellä:

$$P(x|y) = (P(y|x) \times P(x)) / P(y)$$

Tapahtuman x uskottavuus, $P(y|x)$ kuvastaa aisti-informaation y todennäköisyyttä ehdollistettuna tapahtumalla x – toisin sanoen, kuinka todennäköisesti tapahtuma x aiheuttaisi aistidatan y . Tapahtuman x prioritodennäköisyys $P(x)$ kuvastaa tapahtuman x todennäköisyyttä riippumatta datasta – esimerkiksi, kuinka todennäköisesti tomaatit ovat punaisia. $P(y)$ on datan kokonaistodennäköisyys, ja se skaalaa posterioritodennäköisyyden välille 0–1.

Brainard kollegoineen mallinsivat ensimmäisinä värihavaintoa muuttuvissa valaistusolosuhteissa bayesilaisella mallilla⁴⁹. He pyrkivät mallintamaan sekä tilanteita, joissa koehenkilöt ovat hyviä arvioimaan ärsykkeiden pintaväriä valaistusmuutosten yli, että tilanteita, joissa koehenkilöt tekevät järjestelmällisesti virheitä. Esimerkkinä helposta tilanteesta on näkymä, joka on valaistu yhdellä valonlähteellä, jolloin värihavainto on yleensä suhteellisen todenmukaista. Objektien värin arviointi on vaikeampaa, jos näkymä on valaistu useammalla valonlähteellä tai jos objektin taustaa on muunneltu siten, ettei se heijasta valaistuspekttriä takaisin katsojan silmiin. Brainardin ja kumppaneiden malli ottaa huomioon värihavainnon epävarmuuden verkkokalvomekanismien tasolla ja mallintaa värihavaintoa (eli todennäköisintä pintaväriä kullekin aistiärsykkeelle) käyttämällä päivänvalon eri vaiheisiin perustuvaa ennakkojakaumaa. Parhaiten koehenkilöiden suorituksen – sekä oikeat että väärät vastaukset – selitti malli, joka käytti höllästi päivänvaloon perustuvaa ennakkojakaumaa. Näyttää siis siltä, että aivoissa on tietoa siitä, miten päivänvalo muuttuu päivän aikana, mutta tämä tieto ei ole kovin tarkkaan rajattua.

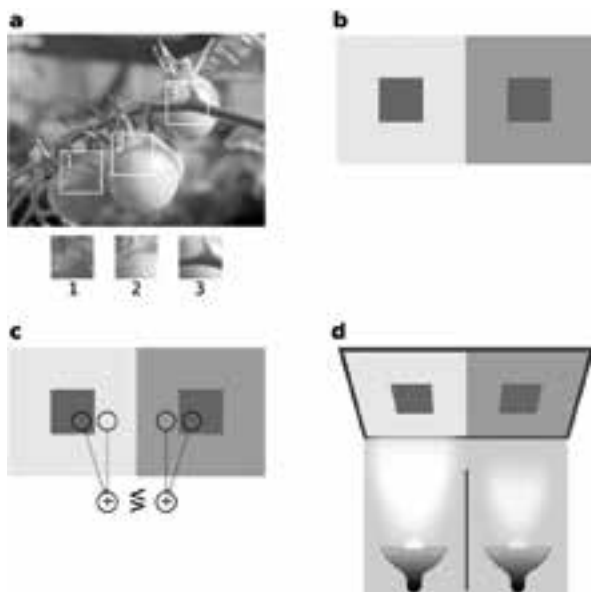
Olkkonen & Allred tekivät mielenkiintoisen havainnon muistin ja värikontekstin vuorovaikutuksesta värimuistitehtävässä: jos koehenkilöiden pitää verrata kahden ärsyksen väriä sekä lyhyen muistiviiveen että taustavärin muutoksen yli, muistiharha on pienempi kuin mitä sen pitäisi olla, jos lasketaan yhteen pelkän muistiviiveen tai pelkän taustan aiheuttama havainto-

harha. Muistin ja värikontekstin vaikutus havaintoon ovat toisin sanoen subadditiivisia.⁵⁰ Tulos tuntuu epäintuitiiviselta, eikä sitä pystytä selittämään olemassa olevilla havainto- tai muistiteorioilla. Ymmärtääksemme mistä tässä vuorovaikutuksessa oli kysymys, vertasimme kahta mallia, jotka perustuvat laajalti hyväksytyihin selityksiin värikontekstiefekteistä⁵¹. Siirryimme väreistä harmaasävyärsykkeisiin, koska vaaleushavainnossa on sama konstanssiongelma kuin värihavainnossa, mutta se on laskennallisesti yksinkertaisempaa. Kuva 3a näyttää, kuinka samankaltaiset luminanssimuutokset verkkokalvokuvassa saattavat aiheutua valaistumuutoksista tai pintareflekssimuutoksista, ja konstanssin saavuttamiseksi täytyy nämä kaksi syytä erottaa aivan kuten värihavainnon tapauksessa.

Kuva 3b esittää klassista simultaanikontrastia, jossa kaksi samanlaista kohdeärsykettä näyttävät erilaisilta taustojen vaikutuksesta. Ensimmäisen, klassisen selityksen mukaan ärsykkeen havaittu kirkkaus tai väri määräytyy sen mukaan, mitä taustaa vasten sitä katsotaan. Ärsykkeet, joilla on sama reunakontrasti, näyttävät yhtä kirkkailta tai samanvärisiltä⁵². Tämä malli selittää sen, miksi kaksi kohdeärsykettä kuvassa 3b näyttävät niin erilaisilta – niillä on eri reunakontrasti, mikä saa ne näyttämään erilaisilta (Kuva 3c). Toisen selityksen mukaan, joka sopii laajasti ottaen Helmholtzin tiedostamattoman päätelmän viitekehukseen, aivot ”olettavat”, että vaalealla taustalla oleva ärsyke on kirkkaasti valaistu, ja tummalla taustalla oleva ärsyke on varjossa (Kuva 3d). Toisin sanoen taustojen väriero johtuu siitä, että ne on eri tavoin valaistu, ei siitä, että niillä olisi eri pintaväri. Koska keskustaärsykkeistä tulee saman verran valoa silmiin, pitää niiden pintavärien olla erilainen. Kirkkaassa valaistuksessa oleva keskiharmaa ärsyke nähdään täten tummana, ja varjossa oleva keskiharmaa ärsyke vaaleana⁵³. Tämä muistuttaa yllämainittua selitystä mekkoilmiölle.

Mallinsimme havaintoa samoissa koetilanteissa kuin mitä koehenkilömme olivat tehneet. Kokeen tarkoitus oli testata muistin ja taustan yhteisvaikutusta vaaleushavaintoon. Koehenkilön tehtävänä kullakin koekerralla oli sanoa kumpi ärsyke (vasen/oikea) näytti vaaleammalta. Kokeessa oli neljä tilannetta: ensimmäisessä mitattiin havaittu vaaleus ja vaaleuden erottelukynnykset perustilanteessa; toisessa mitattiin muistiviiveen vaikutus vaaleushavaintoon; kolmannessa mitattiin taustan vaikutus vaaleushavaintoon; ja neljännessä mitattiin taustan ja muistin yhteisvaikutus.

Koe soveltui hyvin testaamaan kahta mallia, jotka perustuivat yllämainittuihin teorioihin. Kutsumme malleja kontrastimalliksi ja reflektanssimalliksi sen mukaan, mitä mallihavaintosijat yrittävät arvioida. Kummassakin mallissa koehenkilöiden sisäistä epävarmuutta kuvattiin kahdella tavalla: havaintokohinalla sekä muistikohinalla. Mallihavaintosijan vastaus kullakin koekerralla riippui siitä, miten kummankin ärsykkeen vaaleus arvioitiin; tämä riippui sekä mallikoehenkilön sisäisestä kohinasta että ennakkotiedosta, joka opittiin kokeen aikana. Kontrastimallissa ennakkotieto kuvasti ärsykkeen ja taustan välisen kontrastin todennäköisyyttä, ja reflektanssimallissa se kuvasti sekä pinnan vaaleuden että valaistuksen kirkkauden todennäköisyyttä. Vaaleusarvio oli Bayesin teoreeman mukaan ennakkotiedon ja aisti-informaation uskottavuuden tulo. Sekä kontrastimalli että reflektanssimalli selittivät koehenkilöiden vastaukset pelkässä muistitilanteessa, mutta reflektanssimalli selitti paremmin pelkän taustan vaikutuksen vaaleushavaintoon sekä taustan ja muistin vuorovaikutuksen. Tästä voi päätellä, että kun koehenkilöt yrittävät arvioida ärsykkeen vaaleutta tai väriä, heillä on sisäinen malli siitä, miten valaistus ja pinnan ominaisuudet vaikuttavat toisiinsa, ja he käyttävät ennakkotietoa pinnan ominaisuuksista ja väreistä apuna epävarmoissa havaintotilanteissa.



Kuva 3. Vaaleuskonstanssin tapaus.

a: Pinnasta heijastuva valo vaihtelee näkymän yli johtuen pinnan reflektanssivaihteluista (1, 3) sekä valon spatiaalisesta vaihtelusta (2).

b: Simultaanikontrasti-illuusiossa kaksi kohdeärsykettä näyttävät erilaisilta, vaikka niistä lankeaa silmiin saman verran valoa. Tämä ilmiö on selitetty kontrastin vastavuudella (c) tai reflektanssin estimoimisella (d).

c: Kontrastihypoteesi. Näköjärjestelmä näkee kaksi kohdetta samana, kun niiden reunakontrastit ovat samat. Tässä taustakontrastit ovat erilaiset, vaikka kohteiden luminanssi on sama. Tämän takia kohteet näyttävät erilaisilta.

d: Reflektanssiestimaatiohypoteesi. Näköjärjestelmä tulkitsee luminanssieron kahden taustan välillä johtuvan valaistuserosta. Koska kohteilla on sama luminanssi mutta ne ovat eri valaistuksen alla, pitää niillä näin ollen olla eri reflektanssi. Kohteilla on tästä johtuen eri havaittu vaaleus.

Mitä seuraavaksi?

Tässä artikkelissa mainitut havaintoilmiöt ovat yhteeneväisiä teorian kanssa, jonka mukaan lajin- tai yksilönkehityksen aikana, ja lyhyemmälläkin aikavälillä, opittu ennakkotieto vaikuttaa värihavaintoon. Suurin osa tutkimuksista on kuitenkin tehty laboratorio-olosuhteissa keinotekoisilla ja verraten yksinkertaisilla ärsykkeillä, joten on epäselvää, kuinka hyvin tulokset näistä kokeista yleistyvät jokapäiväisiin havaintotilanteisiin. Useat tutkimusryhmät ovat tiedostaneet ongelman ja alkaneet käyttää esimerkiksi tietokonegrafiikkaa apuna luonnollisempien ärsykkeiden tuottamisessa⁵⁴. Toinen vaihtoehto on käyttää oikeita valaistusympäristöjä, mikä on haastavaa koska ärsykkeiden kontrollointi ja kokeiden toteuttaminen käytännössä on hyvin aikaa vievää⁵⁵. Koska on kuitenkin mahdollista, että hyvin keinotekoisilla ärsykkeillä ei päästä käsiksi luonnollisissa katselutilanteissa aktiivisiin havaintomekanismeihin, on tärkeää laajentaa havaintotutkimusta luonnollisempiin ärsykkeisiin.

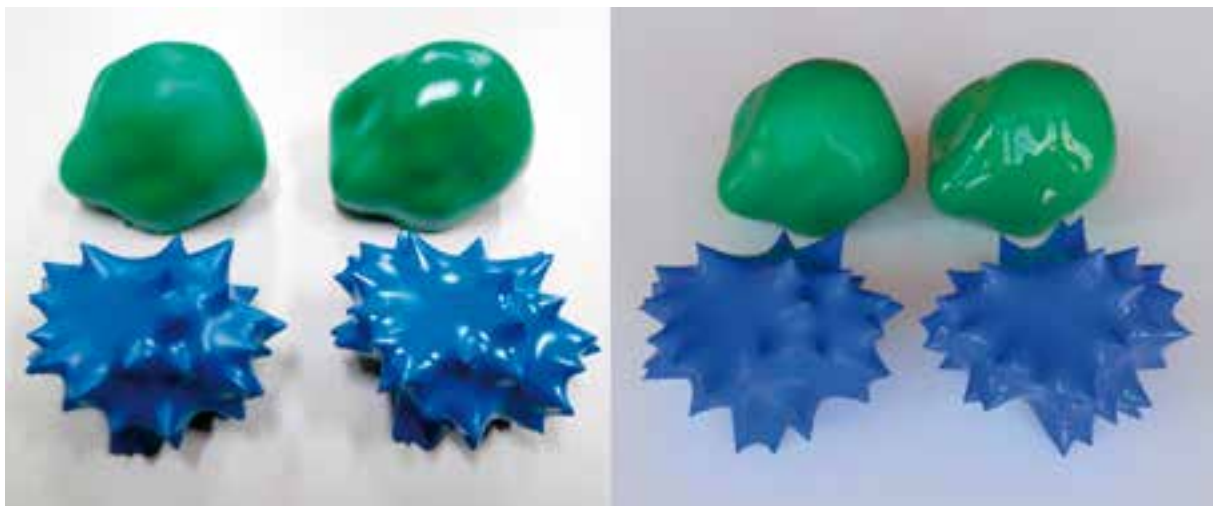
Olemme alkaneet käyttää sekä tietokonegrafiikan avulla tehtyjä 3D-ärsykejä että 3D-tulostettuja oikeita muotoja laboratoriossamme (Kuva 4). Nämä ärsykkeet ovat keinotekoisia, ja näin ollen mahdollistavat ärsykkeen ominaisuuksien täydellisen kontrollon kokeellista tutkimusta varten. Samalla ne kuitenkin mahdollistavat entistä realistisemmat muodon ja pinnan ominaisuuksien vaihtelut. Kokeellisessa havaintotutkimuksessa ärsykkeen ominaisuuksien (esimerkiksi värin) kontrollointi on tärkeää; havainnon mittaaminen ei ole mahdollista ilman täydellistä kuvausta ärsykkeestä. Yksinkertaisia ärsykejä on helpompi kontrolloida, ja hyvin yksinkertaisten ärsykkeiden avulla on saatu huikea määrä tietoa värin ja muiden pinnan ominaisuuksien käsittelystä aivoissa.

Realistisemmilla ärsykkeillä voi kuitenkin olla mahdollista päästä käsiksi mekanismeihin, jotka määrittävät värihavaintoa luonnollisessa ympäristössä ja jotka saattavat jäädä huomiotta hyvin yksinkertaisia ärsykejä käytettäessä.

Emme yhä edelleenkaan täydellisesti ymmärrä, miten aivot kykenevät rakentamaan johdonmukaisen ja hyödyllisen edustuksen ulkomaailmasta kohinaisen ja puutteellisen aisti-informaation perusteella, mutta teorioiden, laskennallisten mallien ja tutkimusmenetelmien kehittyminen viimeisten parin vuosikymmenen aikana lupaa hyvää konstanssitutkimuksen tulevaisuudelle.

Viitteet

- 1 Gegenfurtner & Kiper 2003.
- 2 Sama, 1.
- 3 Ks. esim. Byrne & Hilbert 2003; Chirimuuta 2015.
- 4 Vrt. Teller 2003.
- 5 Dannemiller 1993; Foster & Nascimento 1994.
- 6 Foster ym. 2001.
- 7 Bloj, Kersten & Hurlbert 1999.
- 8 Värikonstanssi on perinteisesti määritelty tarkoittamaan ärsykkeen havaitun värin vastaavuutta eri valaistusolosuhteissa (*appearance constancy*). Täydellinen konstanssi näin määriteltynä tarkoittaisi, että sama pinta, esimerkiksi puun lehti, näyttäisi täsmälleen samalta keskipäivän auringossa ja varjossa (ks. Zaidi & Bostic 2008, Kuva 1). Tämä ei selvästikään pidä paikkaansa, vaan konstanssi laboratoriossa mitattuna on yleensä epätäydellistä (Thouless 1931). Väljemmän määritelmän mukaan konstanssiin riittää, jos kyetään *tunnistamaan* sama pinta eri valaistuksissa, vaikka pinta ei näyttäisi identtistä; esim. jos kyetään valitsemaan sama vihreä pinta kahdessa eri valaistuksessa monien eri häiriöärsykkeiden joukosta (Zaidi & Bostic 2008). Jälkimmäinen määritelmä ei edellytä havaitun värin identiteettiä, mutta se ei myöskään sulje pois havainnon tasolla tapahtuvaa korjausta. Se ei siis tarkoita pelkästään päätöksenteon tasolla tapahtuvaa korjausta. Monien modernien konstanssitutkimusmenetelmien mukaan havaintoprosessin päämäärä (*computational*



Kuva 4. Realistisempia ärsykejä konstanssitutkimukseen.

Vasemmassa kuvassa on kaksi 3D-tulostimella tulostettua muotoa, jotka on käsitelty matta- sekä kiiltävällä maalilla. Oikealla on samat muodot tietokonegrafiikalla renderoituina, myös kahdella eri värillä ja kahdella eri kiiltävyydellä. 3D-mallit on tehty vapaan lähdekoodin Shapetoolbox-työkalulla⁵⁶.

- goal, Marr 1982) on tunnistaa objekteja eri katseluolosuhteissa, jolloin täydellinen havaintokostanssi ei ole välttämätöntä.
- 9 Brewster 1826; Metzger 1936; von Fieandt 1949; Kleffner & Ramachandran 1992; Sun & Perona 1998; Adams, Graf & Ernst 2004.
- 10 Yuille & Kersten 2006.
- 11 von Helmholtz 1867.
- 12 Clarke & Yuille 1990; Trommershäuser, Körding & Landy 2011.
- 13 Ernst & Banks 2002.
- 14 Alais & Burr 2004.
- 15 Saarela & Landy 2012 & 2015.
- 16 Ks. mm. Brainard & Radonjic, 2014, Foster 2011, Smithson 2005.
- 17 Melkein täydellisestä kompensatiosta esim. Hansen ym. 2007; Murray ym. 2006; epätäydellisestä kompensatiosta esim. Valberg & Lange-Malecki 1990; Brainard, Brunt & Speigle 1997.
- 18 Pystymme myös havaitsemaan samalla sekä objektien että valaistuksen ominaisuudet (Zaidi 1998; Tokunaga & Logvinenko 2010).
- 19 Foster 2003; Logvinenko & Maloney 2006.
- 20 Esim. Speigle & Brainard 1996; Olkkonen, Witzel, Hansen & Gegenfurtner 2010.
- 21 Zaidi & Bostic 2008; Radonjic, Cottaris & Brainard 2015.
- 22 Esim. Yang & Maloney 2001; Lee & Smithson 2016.
- 23 Esim. Olkkonen, Hansen & Gegenfurtner 2008.
- 24 Hering 1920.
- 25 Adams 1924.
- 26 Esim. Duncker 1939; Bruner, Postman & Rodrigues 1951; mutta ks. Bolles, Hulicka & Hanly 1959.
- 27 Duncker 1939.
- 28 Olkkonen, Hansen & Gegenfurtner 2008; Ks. myös Hansen, Olkkonen, Walter & Gegenfurtner 2006.
- 29 Muistivärieffektin voimakkuus näyttää kuitenkin riippuvan objektin luonnollisen värin läheisyydestä ns. päivänvaloakseliin, jolla värit vaihtelevat sinisen ja keltaisen välillä. Tällä akselilla epävarmuus väristä on suurempaa kuin muilla väriavaruuden akselleilla (ks. esim. Witzel ym 2017, kuva 6d). Tämä epävarmuus selittää mahdollisesti sen, miksi muistivärieffekti on yleensä voimakkaampi keltaisille ja sinisille objekteille (Olkkonen ym. 2008; Witzel ym 2011).
- 30 Sama, 30.
- 31 Witzel, Valkova, Hansen & Gegenfurtner 2011.
- 32 Kimura ym. 2013.
- 33 Bannert & Bartels 2013.
- 34 Brainard ym. 2006.
- 35 Esim. Lafer-Sousa, Hermann & Conway 2015.
- 36 Ks. Brainard & Hurlbert 2015, kuva 2.
- 37 Esim. Toscani, Gegenfurtner & Doerschner 2017; Witzel, Racey & O'Regan 2017; Wallisch 2017.
- 38 Hollingworth 1910.
- 39 Sama, 42.
- 40 Duffy ym. 2010; Ashourian & Loewenstein 2011.
- 41 Jazayeri & Shadlen 2010.
- 42 Olkkonen, McCarthy & Allred 2014.
- 43 Ashourian & Loewenstein 2011.
- 44 Esim. Chalk, Seitz & Series 2010; Jazayeri & Shadlen 2010; Petzschner & Glasauer 2011.
- 45 Sama, 46.
- 46 Olkkonen & Saarela 2017.
- 47 Gekas, McDermott & Mamassian 2017.
- 48 Knill & Richards 1996.
- 49 Sama, 38.
- 50 Olkkonen & Allred 2014.
- 51 Olkkonen, Saarela & Allred 2016.
- 52 Wallach 1948.
- 53 Ks. Lotto & Purves 2000.
- 54 Ks. esim. Radonjic & Brainard 2015; Lee & Smithson 2016.
- 55 Esim. Granzier, Vergne & Gegenfurtner 2014; Hedrich & Ruppertsberg 2009; Morimoto ym. 2017; Peirce ym. 2014. github.com/saarela/ShapeToolbox. Toni Saarela, ShapeToolbox: Creating 3D Models for Vision Research 2018.

Kirjallisuus

- Adams, Grace K., An Experimental Study of Memory Color and Related Phenomena. *The American Journal of Psychology*. Vol. 34, 1923, 359–407.
- Adams, Wendy J., Graf, Eric W. & Ernst, Marc O., Experience Can Change the "Light-From-Above" Prior. *Nature Neuroscience*. Vol 7, No. 10, 2004, 1057–8.
- Alais, David & Burr, David, Ventriloquist Effect Results from Near-Optimal Bimodal Integration. *Current Biology*. Vol. 14, No. 3, 2004, 257–262.
- Ashourian, Paymon & Loewenstein, Yonatan, Bayesian Inference Underlies the Contrast Bias in Delayed Comparison Tasks. *PLoS ONE*. Vol. 6, No. 5, 2011, e19551.
- Bannert, Michael M. & Bartels, Andreas, Decoding the Yellow of a Gray Banana. *Current Biology*. Vol. 23, No. 22, 2013, 2268–2272.
- Bloj, Marina G., Kersten, Daniel & Hurlbert, Anya C., Perception of Three-Dimensional Shape Influences Colour Perception through Mutual Illumination. *Nature*. Vol. 402, No. 6764, 1999 877–879.
- Bolles, Robert C., Hulicka, Irene M. & Hanly, Barbara, Colour Judgment as a Function of Stimulus Conditions and Memory Colour. *Canadian Journal of Psychology*. Vol. 13, No. 3, 1959, 175–185.
- Brainard, David H. & Hurlbert, Anya C., Colour Vision: Understanding #TheDress. *Current Biology*. Vol. 25, No. 13, 2015, R551–R554.
- Brainard, David H., Longère, Philippe, Delahunt, Peter B., Freeman, William T., Kraft, James M. & Xiao, Bei, Bayesian Model of Human Color Constancy. *Journal of Vision*. Vol. 6, No. 11, 2006, 1267–1281.
- Brainard, David H., Brunt, Wendy A. & Speigle, Jon M., Color Constancy in the Nearly Natural Image. I. Asymmetric Matches. *Journal of the Optical Society of America A*. Vol. 14, 1997, 2091–2110.
- Brewster, David, On the Optical Illusion of the Conversion of Cameos into Intaglios and of Intaglios into Cameos, with an Account of Other Analogous Phenomena. *Edinburgh Journal of Science*. Vol. 4, 1826, 99–108.
- Bruner, Jerome S., Postman, Leo & Rodrigues, John, Expectation and the Perception of Color. *The American Journal of Psychology*. Vol. 64, No. 2, 1951, 216–227.
- Chalk, Matthew, Seitz, Aaron R. & Series, Peggy, Rapidly Learned Stimulus Expectations Alter Perception of Motion. *Journal of Vision*. Vol. 10, No. (8):2, 2010, 1–18.
- Chirimuuta, Mazviita, *Outside Color: Perceptual Science and the Puzzle of Color in Philosophy*. MIT Press, Cambridge (MA) 2015.
- Clarke, James J. & Yuille, Alan L., *Data Fusion for Sensory Information Processing*. Kluwer Academic, Boston (MA) 1990.
- Dannemiller, James L., Rank Orderings of Photoreceptor Photon Catches from Natural Objects Are Nearly Illuminant-Invariant. *Vision Research*. Vol. 33, No. 1, 1993, 131–140.
- Duffy, Sean, Huttenlocher, Janellen, Hedges, Larry V. & Crawford, L. Elizabeth., Category Effects on Stimulus Estimation: Shifting and Skewed Frequency Distributions. *Psychonomic Bulletin & Review*. Vol. 17, No. 2, 2010, 224–230.
- Duncker, Karl, The Influence of Past Experience upon Perceptual Properties. *The American Journal of Psychology*. Vol. 52, 1939, 255–265.
- Ernst, Marc O. & Banks, Martin S., Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion. *Nature*. Vol. 415, No. 6870, 2002, 429–433.
- Foster, David H., & Nascimento, Sergio M., Relational Colour Constancy From Invariant Cone-Excitation Ratios. *Proceedings of the Royal Society of London B*, Vol. 257, No. 1349, 1994, 115–121.
- Foster, David H., Nascimento, Sergio M., Amano, Kinjiro, Arend, Larry, Linnell, Karina J., Nieves, Juan Luis, Plet, Sabrina & Foster, Jeffrey S., Parallel Detection of Violations of Color Constancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 98, No. 14, 2001, 8151–8156.
- Foster, David H., Does Colour Constancy Exist? *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 7, No. 10, 2003, 439–443.
- Gegenfurtner, Karl R. & Kiper, Daniel C., Color Vision. *Annual Review of Neuroscience*. Vol. 26, 2003, 181–206.
- Geisler, William S., Visual Perception and the Statistical Properties of Natural Scenes. *Annual Review of Psychology*. Vol. 59, 2008, 167–92.
- Gekas, Nikos, McDermott, Kyle & Mamassian, Pascal, Perceptual Effects of Adaptation Over Multiple Timescales. *Journal of Vision*. Vol. 17, No. 10, 2017.
- Gibson, James J. & Radner, Minnie, Adaptation, After-Effect and Contrast in the Perception of Tilted Lines. I. Quantitative studies. *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 453, 1937, 186–196.
- Girshick, Ahna R., Landy, Michael S. &

- Simoncelli, Eero P., Cardinal Rules. Visual Orientation Perception Reflects Knowledge of Environmental Statistics. *Nature Neuroscience*. Vol. 14, No. 7, 2011, 926–932.
- Granzier, Jeroen, Vergne, Romain & Gegenfurtner, Karl R., The Effects of Surface Gloss and Roughness on Color Constancy for Real 3-D Objects. *Journal of Vision*. Vol. 14, No. 2, 2014, 1–20.
- Hansen, Thorsten, Olkkonen, Maria, Walter, Sebastian & Gegenfurtner, Karl R., Memory Modulates Color Appearance. *Nature Neuroscience*. Vol. 9, No. 11, 2006, 1367–8.
- Hedrich, Monica & Ruppertsberg, Alexa I., Color Constancy Improves for Real 3D Objects. *Journal of Vision*. Vol. 9, No. 4, 2009, 1–16.
- Hering, Ewald, *Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn*. Springer, Berlin 1920.
- von Helmholtz, Hermann, *Handbuch der Physiologischen Optik*. Leopold Voss, Leipzig 1967.
- Hollingworth, Harry L., The Central Tendency of Judgment. *The Journal of Philosophy*. Vol. 7, No. 17, 1910, 461–469.
- Jazayeri, Mehrdad & Shadlen, Michael N., Temporal Context Calibrates Interval Timing. *Nature Neuroscience*. Vol. 13, No. 8, 2010, 1020–6.
- Kimura, Atsushi, Wada, Yuji, Masuda, Tomohiro, Goto, Sho-Ichi, Tsuzuki, Daisuke, Hibino, Haruo, Cai, Dongsheng & Dan, Ippeta, Memory Color Effect Induced by Familiarity of Brand Logos. *PLoS ONE*. Vol. 8, No. 7, 2013, 1–8.
- Kleffner, Dorothy A., & Ramachandran, V. S., On the Perception of Shape from Shading. *Perception & Psychophysics*. Vol. 52, No. 1, 1992, 18–36.
- Knill, David C. & Richards, Whitman, *Perception as Bayesian Inference*. Cambridge University Press, New York 1996.
- Lafer-Sousa, Rosa, Hermann, Katherine L. & Conway, Bevil R., Striking Individual Differences in Color Perception Uncovered by “The Dress” Photograph. *Current Biology*. Vol. 25, 2015, R1–2.
- Lee, Robert J. & Smithson, Hannah E., Low Levels of Specularity Support Operational Color Constancy, Particularly when Surface and Illumination Geometry Can Be Inferred. *Journal of the Optical Society of America A*. Vol. 33, No. 3, 2016, 306–318.
- Logvinenko, Alexander D. & Maloney, Laurence T., The Proximity Structure of Achromatic Surface Colors and the Impossibility of Asymmetric Lightness Matching. *Perception and Psychophysics*. Vol. 68, No. 1, 2006, 76–83.
- Lotto, R. Beau & Purves, Dale, An Empirical Explanation of Color Contrast. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 97, No. 23, 2000, 12834–9.
- Marr, David, *Vision. A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W.H. Freeman, San Francisco 1982.
- Metzger, Wolfgang, *Laws of Seeing* (Gesetze des Sehens, 1936). Käänt. Lothar Spillman. MIT Press, Cambridge (MA) 2006.
- Morimoto, Takuma, Mizokami, Yoko, Yaguchi, Hirohisa & Buck, Steven L., Color Constancy in Two-Dimensional and Three-Dimensional Scenes: Effects of Viewing Methods and Surface Texture. *i-Perception*. Vol. 8, No. 6, 2017, 1–20.
- Murray, Ian J., Daugirdiene, Ausra, Vaitkevicius, Henrikas, Kulikowski, Janus J. & Stanikunas, Rytis, Almost Complete Colour Constancy Achieved With Full-Field Adaptation. *Vision Research*. Vol. 46, 2006, 3067–3078.
- Olkkonen, Maria & Allred, Sarah R. Short-term Memory Affects Color Perception in Context. *PLoS ONE*. Vol. 9, No. 1, 2014, 1–11.
- Olkkonen, Maria & Saarela, Toni P. Quickly-Forming, Shape-Dependent Memory Biases in Color Perception. *Journal of Vision*. Vol. 17, No. 10, 2017, 391.
- Olkkonen, Maria, Saarela, Toni P. & Allred, Sarah R., Perception-Memory Interactions Reveal a Computational Strategy For Perceptual Constancy. *Journal of Vision*. Vol. 16, No. 3, 2016, 1–21.
- Olkkonen, Maria, Hansen, Thorsten, & Gegenfurtner, Karl R., Color Appearance of Familiar Objects: Effects of Object Shape, Texture, and Illumination Changes. *Journal of Vision*. Vol. 8, No. 5, 2008, 1–16.
- Olkkonen, Maria, McCarthy, Patricia F. & Allred, Sarah R., The Central Tendency Bias in Color Perception: Effects of Internal and External Noise. *Journal of Vision*. Vol. 14, No. 11, 2014, 1–15.
- Olkkonen, Maria, Hansen, Thorsten & Gegenfurtner, Karl R., Categorical Color constancy for Simulated Surfaces. *Journal of Vision*. Vol. 9, No. 12, 2009, 1–18.
- Olkkonen, Maria, Witzel, Christoph, Hansen, Thorsten & Gegenfurtner, Karl R., Categorical Color Constancy for Real Surfaces. *Journal of Vision*. Vol. 10, No. 9, 2010, 1–22.
- Pearce, Bradley, Crichton, Stuart, Mackiewicz, Michal, Finlayson, Graham D. & Hurlbert, Anya, Chromatic Illumination Discrimination Ability Reveals that Human Colour Constancy Is Optimised for Blue Daylight Illuminations. *PLoS ONE*. Vol. 9, No. 2, 2014, e87989.
- Petzschner, Frederike H., & Glasauer, Stefan, Iterative Bayesian Estimation as an Explanation for Range and Regression Effects: a Study on Human Path Integration. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 31, No. 47, 2011, 17220–9.
- Radonjić, Ana, Cottaris, Nicolas P., & Brainard, David H., Color Constancy In a Naturalistic Goal-Directed Task. *Journal of Vision*. Vol. 15, No. 13, 2015, 1–21.
- Saarela, Toni P., & Landy, Michael S., Combination of Texture and Color Cues in Visual Segmentation. *Vision Research*. Vol. 58, 2012, 59–67.
- Saarela, Toni P., & Landy, Michael S., Integration Trumps Selection in Object Recognition. *Current Biology*. Vol. 25, No. 7, 2015, 920–927.
- Speigle, Jon M., & Brainard, David H., Is Color Constancy Task Independent. *Proceedings of the 4th IS&T/SID Color Imaging Conference*. Scottsdale (AZ), 1996, 167–172.
- Sun, Jennifer, & Perona, Pietro, Where Is the Sun? *Nature Neuroscience*. Vol. 1, No. 3, 1998, 183–184.
- Teller, Davida, Color: A Vision Scientist’s Perspective. *Behavioral and Brain Sciences*. Vol. 26, No. 1, 2003, 48–49 (commentary).
- Thouless, Robert H., Phenomenal Regression to the Real Object. I. *British Journal of Psychology*. Vol. XXI, No 1, 1931, 339–359.
- Tokunaga, Rumi, & Logvinenko, Alexander D., Material and Lighting Hues of Object Colour. *Ophthalmic and Physiological Optics*. Vol. 30, No. 5, 2010, 611–617.
- Toscani, Matteo, Gegenfurtner, Karl R., & Doerschner, Katja, Differences in Illumination Estimation in #thedress. *Journal of Vision*. Vol. 17, No. 1, 2017, 1–22.
- Trommershäuser, Julia, Körding, Konrad P., & Landy, Michael S. (toim.), *Sensory Cue Integration*. Oxford University Press, New York 2011.
- Valberg, Arne, & Lange-Malecki, Bettina, ‘Color Constancy’ in Mondrian Patterns – A Partial Cancellation of Physical Chromaticity Shifts by Simultaneous Contrast. *Vision Research*. Vol. 30, No. 3, 1990, 371–380.
- von Fieandt, Kai, Das Phänomenologische Problem Von Licht und Schatten. *Acta Psychologica*. Vol. VI, 1949, 337–357.
- Wallach, Hans, Brightness Constancy and the Nature of Achromatic Colors. *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 38, No. 3, 1948, 310–324.
- Wallisch, Pascal, Illumination Assumptions Account for Individual Differences in the Perceptual Interpretation of a Profoundly Ambiguous Stimulus in the Color Domain: “The Dress.” *Journal of Vision*. Vol. 17, No. 4, 2017, 1–14.
- Witzel, Christoph, Valkova, Hanna, Hansen, Thorsten, & Gegenfurtner, Karl R., Object Knowledge Modulates Colour Appearance. *i-Perception*. Vol. 2, 2001, 13–49.
- Witzel, Christoph, Racey, Chris, & O’Regan, J. Kevin., The Most Reasonable Explanation of “The Dress”: Implicit Assumptions About Illumination. *Journal of Vision*. Vol. 17, No. 2, 2017, 1–19.
- Yang, Joong Nam, & Maloney, Laurence T., Illuminant Cues in Surface Color Perception: Tests of Three Candidate Cues. *Vision Research*. Vol. 41, 2001, 2581–2600.
- Yuille, Alan, & Kersten, Daniel, Vision as Bayesian Inference. Analysis by Synthesis? *Trends in Cognitive Sciences*. Vol. 10, No. 7, 2006, 301–308.
- Zaidi, Qasim, Identification of Illuminant and Object Colors. Heuristic-Based Algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*. Vol. 15, No. 7, 1998, 1767–1776.
- Zaidi, Qasim & Bostic, Marques, Color Strategies for Object Identification. *Vision Research*. Vol. 48, No. 26, 2008, 2673–81.