

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Tietotekniikan osasto

**KANDIDAATINTYÖ
VÄRIVAIKUTELMATEKIJÖITÄ HUOMIOIVAT VÄRIEROJEN
LASKENTAMALLIT**

Jukka Honkonen
2006

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Tietotekniikan osasto

Jukka Honkonen

Värivaikutelmatekijöitä huomioivat värierojen laskentamallit

Kandidaatintyö

2006

58 sivua, 12 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja: Professori Arto Kaarna

Hakusanat: värivaikutelmailmiöt, värivaikutelmamallit, värieromallit
Keywords: color appearance phenomena, color appearance models, color difference formulas

Värin havaitseminen on monimutkainen tapahtuma, johon vaikuttaa lukuisia tekijöitä. Havaittua väriä eli värivaikutelmaa ennustavat mallit huomioivat taustan ja valonlähteen kromaattisuus- ja intensiteettiominaisuuksia. Värejä käyttävässä teollisuudessa on tarve värien määrittelyn lisäksi mitata värieroja esimerkiksi värillisten tuotteiden laadunvalvonnassa.

Värivaikutelmamalleja ja värierojen laskentamalleja on pitkään kehitetty toisistaan erillisinä. Tässä työssä tarkastellaan värivaikutelmailmiöitä ja sekä värivaikutelma- ja värieromallien ominaisuuksia. Lisäksi selvitetään värivaikutelmamallien ja värieromallien yhteensovittamista.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of Information Technology

Jukka Honkonen

Color appearance phenomena and color difference formulas

Thesis for the Degree of Bachelor of Science in Technology

2006

58 pages, 12 figures, 3 tables

Examiner: Professor Arto Kaarna

Keywords: color appearance phenomena, color appearance models, color difference formulas

Perceiving color is a complex process which is affected by many factors. There are models that predict color appearance which is influenced by properties of background, surround and illumination. In the graphical industry there is a need to measure also color differences for example in quality monitoring applications.

Color appearance models and color difference formulas have traditionally been developed separately. In this thesis color appearance phenomena, color appearance models and color difference formulas are studied. In addition the question about combining color appearance models and color difference formulas is discussed.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	ONGELMA, TYÖN TAVOITTEET JA RAJAUKSET	1
1.2	TYÖN RAKENNE.....	2
2	TERMINOLOGIAA	2
3	VÄRIHAVAINTOON VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ	4
3.1	VÄRIVAIKUTELMAILMIÖT	4
3.1.1	<i>Simultaanikontrasti</i>	5
3.1.2	<i>Terävöitys</i>	5
3.1.3	<i>Leviäminen</i>	6
3.1.4	<i>Bezold-Brücke sävysiirtymä</i>	6
3.1.5	<i>Abney-efekti</i>	6
3.1.6	<i>Helmholtz-Kohlrausch -efekti</i>	7
3.1.7	<i>Hunt-efekti</i>	7
3.1.8	<i>Stevens-efekti</i>	8
3.1.9	<i>Helson-Judd -efekti</i>	8
3.1.10	<i>Bartleson-Breneman -ilmiö</i>	8
3.2	NÄYTTEEN KOKO JA KATSELUKULMA	9
3.3	METAMERISMI.....	9
3.4	IKÄÄNTYMISEN VAIKUTUS VÄRINÄKÖÖN	10
3.5	KROMAATTINEN MUKAUTUMINEN.....	10
3.5.1	<i>Valaistuksen mitätöinti</i>	11
3.5.2	<i>Vastaavat värit -datajoukot</i>	11
4	KROMAATTISEN MUKAUTUMISEN MALLIT	13
4.1	VON KRIES -MALLI.....	14
4.2	NAYATANIN MALLI.....	15
4.3	CAT02	16
5	VÄRIVAIKUTELMAMALLIT	17
5.1	CIELAB JA CIELUV	18
5.1.1	<i>Yhtenäinen väriavaruus</i>	18
5.1.2	<i>CIELAB-malli</i>	19
5.1.3	<i>CIELUV-malli</i>	22
5.2	HUNTIN VÄRIVAIKUTELMAMALLI.....	22
5.2.1	<i>Mallin tarvitsemat lähtötiedot</i>	23
5.2.2	<i>Mukautumismalli</i>	24
5.2.3	<i>Vastaväridimensiot</i>	27
5.2.4	<i>Värivaikutelma-attribuutit</i>	28
5.2.5	<i>Huntin mallin heikkouksia</i>	30
5.3	LLAB.....	31
5.4	CIECAM97s.....	33
5.4.1	<i>Mallin tarvitsemat lähtötiedot</i>	34
5.4.2	<i>Mukautumismalli</i>	34
5.4.3	<i>Vastaväridimensiot ja vaikutelma-attribuutit</i>	36
5.5	CIECAM02.....	37
5.5.1	<i>Mallin tarvitsemat lähtötiedot</i>	37
5.5.2	<i>Mukautumismalli</i>	38
5.5.3	<i>Vastaväridimensiot ja vaikutelma-attribuutit</i>	40
6	VÄRIEROJEN LASKENTAMALLIT	43
6.1	CIELAB ΔE	43
6.2	PAINOTETUT VÄRIEROMALLIT	45
6.2.1	<i>CIE94</i>	45
6.2.2	<i>CIEDE2000</i>	47
6.3	VÄRIVAIKUTELMAMALLIEN JA VÄRIEROMALLIEN YHDISTÄMISESTÄ	47
6.3.1	<i>LLAB:in värieromalli</i>	48
6.3.2	<i>CIECAM02:n värieromalleja</i>	48

7	TULEVAISUUDEN SUUNTAUKSIA	52
7.1	KUVAVAIKUTELMAMALLIT	52
8	POHDINTA	53
	LÄHTEET	56

1 Johdanto

Värien tarkkaa määrittelyä tarvitaan useissa sovelluksissa esimerkiksi valmistettaessa värillisiä tuotteita ja tulosteita sekä tuotettaessa värejä näyttölaitteilla. Värien mittatiedon numeroinnin mahdollistavien värimallien lisäksi tarvitaan malleja, joilla voidaan huomioida katseluolosuhteissa tapahtuvien muutosten vaikutusta värihavaintoon; laitteiden erilaiset värinmuodostustekniikat, valaistustaso, valonlähteen kromaattiset ominaisuudet sekä lukuisat muut tekijät vaikuttavat havaittavaan väriin. Käytännön sovellusten kannalta keskeinen osa kolorimetriaa on värimäärittelyn ja väriin vaikuttavien tekijöiden huomioinnin lisäksi värierojen määrittely, jota tarvitaan esimerkiksi toleranssien asettamiseen valmistettaville värillisille tuotteille. Värierojen laskeminen on tärkeää myös laitekohtaisten väriavaruuksien välisissä muunnoksissa, joita tarvitaan tarkkaa värintoistoa edellyttävissä graafisissa prosesseissa.

Fairchild (1998, 63-64) jakaa kolorimetrian perus- ja edistyneeseen kolorimetriaan. Peruskolorimetrian avulla voidaan ennustaa vastaavatko kahden erilaisen spektrijakauman aiheuttamat värihavainnot toisiaan tietyissä, tarkasti määritellyissä katseluolosuhteissa. Värit määritellään numeerisesti kolmikomponenttisina tristimulusarvoina, jolloin samoilla väriarvoilla esitettävät värit nähdään toisiaan vastaavina määritellyissä katseluolosuhteissa, kun havainnoijana on standardi havainnoija. Nämä CIE:n (Commission Internationale de l'Eclairage) määrittelemät peruskolorimetriset mallit luovat pohjan kaikille värimalleille.

Edistynyt kolorimetria laajentaa peruskolorimetriaa huomioimalla erilaisia standardikatseluolosuhteista poikkeavia tekijöitä, jotka vaikuttavat värihavaintoon. Valaistustason ja valonlähteen kromaattisten ominaisuuksien lisäksi värivaikutelmaa muuttavat mm. taustan väri ja luminanssi sekä näytteen koko ja tekstuuri. Edistyneemmän kolorimetrian malleilla, värivaikutelmamalleilla (color appearance models), ennustetaan näitä valonlähteen ja taustan ominaisuuksissa tapahtuvien muutosten vaikutusta havaittuun väriin eli väriin värivaikutelmaan.

1.1 Ongelma, työn tavoitteet ja rajaukset

Vaikka värierojen määrittelyn lähtökohdaksi voisi ajatella olevan mahdollisimman tarkka vertailtavien näytteiden värivaikutelman määrittely, on värierojen laskentamalleja kuitenkin kehitetty perinteisesti värivaikutelmamalleista erillisinä.

Työn tavoitteena oli luoda katsaus siihen, millaisia värivaikutelmaan vaikuttavia tekijöitä voidaan huomioida värierojen laskennassa, mikä kiteytyy kysymykseen värivaikutelmamallien ja värieromallien yhteensovittamisesta.

Työssä rajoituttiin nykysovellusten kannalta keskeisten mallien tarkasteluun. Kehitystyön alla olevia kuvavaikutelmamalleja käsiteltiin vain yleisluonteisesti.

1.2 Työn rakenne

Luvussa kaksi käsitellään keskeisiä väriin liittyviä termejä, joita tarvitaan värivaikutelmaa määriteltäessä. Kolmas luku esittelee lyhyesti erilaisia värihavaintoon vaikuttavia tekijöitä. Kaikkia näistä tekijöistä ei voida huomioida värivaikutelmamalleissa, mutta ne kertovat osaltaan näköjärjestelmän kompleksisuudesta sekä värivaikutelma- ja värieromallien pohjalla olevan visuaaliseen datan hankintaan vaikuttavista tekijöistä. Neljäs luku käsittelee kromaattisen mukautumisen malleja, jotka luovat pohjan seuraavassa luvussa esitellyille värivaikutelmamalleille. Luvussa kuusi käsitellään CIELAB-pohjaisten värierojen laskentamallien lisäksi värivaikutelmamallien ja värieromallien yhdistämistä. Seitsemännessä luvussa luodaan lyhyt katsaus värivaikutelmamallien mahdollisiin seuraajiin, kuvavaikutelmamalleihin. Viimeisessä, kahdeksannessa luvussa pohditaan värierojen laskennan nykytilaa ja kehittymistä.

2 Terminologiaa

Väreihin liittyvän terminologian määrittelemisen on tärkeää, sillä erilaisia väritermejä esiintyy runsaasti värivaikutelma- ja värieromallien laskentakaavoissa. Arkikielessä termejä käytetään kuitenkin usein väljästi. Lisäksi kaikista kielistä ei löydy termeille hyviä vastineita, mikä korostaa osaltaan väriin liittyvien ominaisuuksien määrittelyn tärkeyttä. Wyszecki & Stiles (1982, 487) ja Fairchild (1998, 100-106) määrittelevät värin ja sitä tarkemmin kuvailevia värivaikutelma-attribuutteja seuraavasti.

Väri (Color)

Väri on se näköhavainnon ominaisuus, jonka avulla havaitsija havaitsee eroja kahdessa rakenteettomassa, samankokoisessa ja -muotoisessa kentässä.

Väri on mikä tahansa kromaattisen ja akromaattisen sisällön yhdistelmä. Kromaattisia

värinimiä ovat esimerkiksi keltainen, oranssi, ruskea, punainen, pinkki, vihreä, sininen, purppura jne. ja akromaattisia, värisävyttömiä, värinimiä esimerkiksi valkoinen, harmaa ja musta.

Värin numeeriseen ilmaistamiseen tarvitaan jäljempänä esiteltäviä attribuutteja. Näistä värin kromaattisia ominaisuuksia määrittelevät värisävy (hue), värikkyys (colourfulness), kroma (chroma), saturaatio (saturation) sekä akromaattiset attribuutit kirkkaus (brightness) ja valoisuus (lightness).

Suhteutetulla värillä (related color) tarkoitetaan värialueita, joka nähdään suhteessa muihin väriin. Suhteuttamaton väri (unrelated color) puolestaan nähdään eristyksessä muista väreistä.

Värisävy (Hue)

Värisävy on värihavainnon ominaisuus, joka määrittellään sen mukaan kuinka samanlaiselta kohdealue näyttää havaittujen värien: sininen, vihreä, keltainen ja punainen tai niiden yhdistelmien kanssa.

Kromaattisella värillä on värisävy ja akromaattiselta väriltä se puuttuu. Akromaattisia värejä ovat valkoinen, harmaa ja musta.

Kirkkaus (Brightness)

Kirkkaus on se näköaistimuksen ominaisuus, joka määräytyy sen mukaan kuinka voimakkaalta kohde näyttää tai kuinka paljon kohteen sisältävä alue emittoi valoa. Kirkkaudella tarkoitetaan absoluuttista havaintoa.

Valoisuus (Lightness)

Valoisuus on alueen kirkkaus suhteessa samalla lailla valaistun, valkoisena havaittavan alueen kirkkauteen. Valoisuudesta käytetään myös nimitystä suhteellinen kirkkaus, sillä se ei ole kirkkauden tavoin absoluuttinen ominaisuus, sillä se on normalisoitu valaistuksen ja katseluolosuhteiden mukaan.

Värikkyys (Colourfulness)

Värikkyys (kromaattisuus, värikylläisyys) määrittellään sen mukaan kuinka kromaattisena, kylläisenä, väri nähdään. Värikkyys siis kuvailee värisävyn intensiteetin.

Kroma (Chroma)

Kroma on alueen värikkyys suhteessa samalla lailla valaistun, valkoisena havaittavan alueen kirkkauteen. Kroma on siis suhteellinen värikkyys, joka esiintyy vain suhteellisilla väreillä.

Saturaatio (Saturation)

Saturaatio on alueen värikkyys suhteessa sen kirkkauteen. Kroman tavoin saturaatio on suhteellinen värikkyys, mutta saturaatiossa värikkyyttä verrataan alueen omaan kirkkauteen, jolloin se voidaan määrittää myös, kun kohde nähdään suhteuttamattomana värinä, eli eristyksessä muista väreistä.

Väriä määriteltäessä tarvitaan siis tieto värisävystä sekä kirkkaus- ja kylläisyystieto ilmoitettuna joko absoluuttisten tai suhteellisten määritteiden avulla. Kirkkaus ja värikkyys ovat värin absoluuttisia ominaisuuksia ja valoisuus, kroma sekä saturaatio puolestaan suhteellisia ominaisuuksia.

3 Värihavaintoon vaikuttavia tekijöitä

Ilmiöitä ja tekijöitä, jotka vaikuttavat värin värivaikutelmaan, eli siihen millaisena havaitsemme värin, tiedetään lukuisia ja useiden vaikutusmekanismeja pystytään mallintamaan. Osaan värien näkemiseen liittyvistä tekijöistä vaikuttavat puhtaasti näköjärjestelmämme fysiologiset ominaisuudet. Värihavaintoon vaikuttaa kuitenkin myös kognitiivisia ja psykologisia tasoja, jotka vaikeuttavat värivaikutelman matemaattista mallintamista.

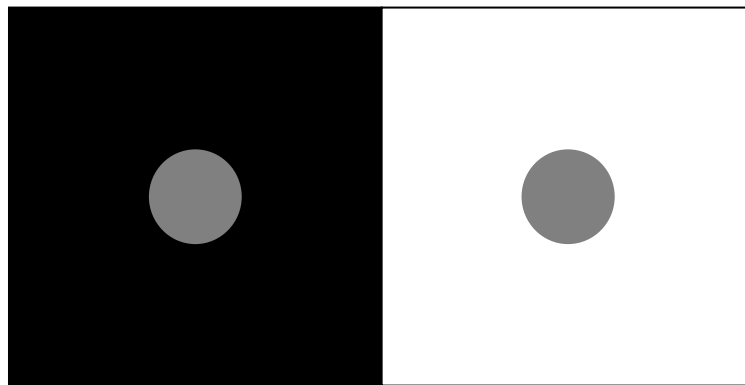
3.1 Värivaikutelmailmiöt

Monet tunnetuista, visuaalisilla kokeilla todetuista väreihin vaikuttavista ilmiöistä ovat saaneet nimen, yleensä ilmiön havainneen tutkijan mukaan. Näistä värivaikutelmailmiöistä helpoiten arkipäivän tilanteissa itse todettavia, värihavaintoa muuttavia tekijöitä ovat muutokset näytteen taustan väri- ja valoisuusarvoissa. Useat valaistukseen liittyvät muutokset värissä tulevat harvemmin ilmi johtuen suurelta osin näköjärjestelmämme mukautumiskyvystä sekä kognitiosta.

3.1.1 Simultaanikontrasti

Simultaanikontrasti (simultaneous contrast) -ilmiö kuvaa taustan värin vaikutusta värivaikutelmaan. Kun näytteen taustaväri vaihdetaan, näytteen värivaikutelma muuttuu kohti taustan vastaväriä. Värissä tapahtunut muutos noudattaa näköteorian vastaväriteoriaa, lisäten vastakkaisten väridimensioiden eroa. Näin tumma tausta vaalentaa kohdetta ja vaalea tausta saa sen näyttämään tummemmalta (ks. kuva 1), punainen vihreämmältä, sininen keltaisemmalta ja kääntäen. Simultaanikontrasti-ilmiö riippuu kuitenkin merkittävästi myös nähtävän kohteen avaruudellisesta rakenteesta.

Simultaanikontrastista käytetään myös nimitystä kromaattinen induktio, mikäli tausta on värillinen tai valoisuusinduktio taustan ollessa akromaattinen. [Fairchild 1998, 135-137]



Kuva 1 Simultaanikontrasti akromaattisilla väreillä. Harmaat ympyrät ovat fyysisesti samanvärisiä

3.1.2 Terävöitys

Terävöitys (crispning) -ilmiössä kahden näytteen välinen väriero nähdään sitä suurempana, mitä lähempänä taustan väri on näytteiden väriä. [Fairchild 1998, 137]



Kuva 2 Terävöitys -ilmiö akromaattisilla väreillä. Kullakin taustavärillä olevan väriparin väriero on yhtä suuri. (Ylärivin ja alarivin ympyrät ovat keskenään samanvärisiä.)

3.1.3 Leviäminen

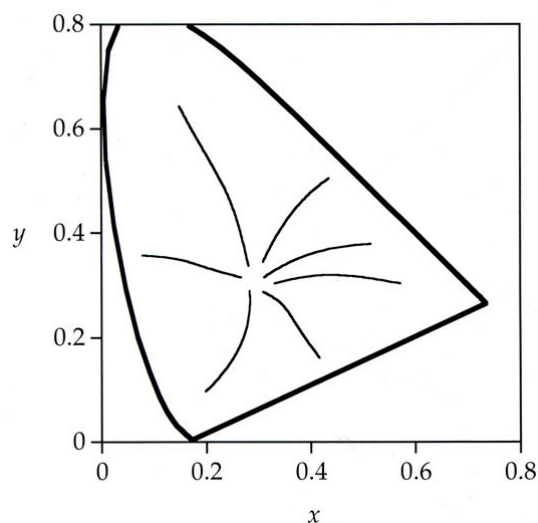
Mikäli väriärsyke on tiheätaajuuksinen tai hyvin pienikokoinen, simultaanikontrasti-ilmiö korvautuu leviämisiilmiöllä. Leviämisessä (spreading) väriärsyksen väri sekoittuu taustan väriin. Väriärsyksen kuvallisen taajuuden ollessa tarpeeksi suuri, leviäminen tapahtuu täydellisesti, kuten katsoessa näyttöjä ja painettuja rasterikuvia normaalilta katseluetäisyydeltä. Leviämistä tapahtuu kuitenkin myös, kun väriärsyksen kuvallinen taajuus on silminnähtävää. [Fairchild 1998, 138]

3.1.4 Bezold-Brücke sävysiirtymä

Värisävyä ei voida ilmaista tarkasti aallonpituuden avulla, sillä havaittu värisävy riippuu sen luminanssista. Bezold-Brücke sävysiirtymä (Bezold-Brücke hue shift) kuvaa monokromaattista väriä emittoivan näytteen värisävyn muuttumista, kun sen luminanssi muuttuu. Mikäli luminanssi vähenee kymmenesosaan alkuperäisestä, muutos pitkäaaltoisimpien, punaisten näytteiden aallonpituudessa, joissa ilmiö erityisesti tulee esiin, voi olla suuruusluokaltaan -30 nm. [Fairchild 1998, 139-140]

3.1.5 Abney-efekti

Värisävy ei myöskään pysy vakiona, kun monokromaattiseen valoon lisätään valkoista valoa, vaikka vallitseva aallonpituus pysyy samana. Kun samana värisävynä aistittavia, saturaatioiltaan vaihtelevia värisävyjä kuvataan xy-kromaattisuusdiagrammissa, ne eivät ilmiöstä johtuen muodosta suoraa viivaa. [Fairchild 1998, 140]



Kuva 3 Värisävyiltään vakioita näytejoukkoja kuvattuna CIE 1931 -kromaattisuusdiagrammissa [Fairchild 1998, 140]

Bezold-Brücke sävysiirtymä ja Abney-efekti kertovat näköjärjestelmämme epälineaarisuudesta, jonka johdosta aallonpituuden tai vallitsevan aallonpituuden avulla ei voida täsmällisesti määrittellä värisävyä. [Fairchild 1998, 140]

3.1.6 Helmholtz-Kohlrausch -efekti

Väriärsykkeen kirkkaus riippuu sen luminanssin lisäksi myös kromaattisuudesta. Kromaattisuuden kasvaessa, luminanssin pysyessä vakiona, nähdään näyte kirkkaampana. Tämän Helmholtz-Kohlrausch-efektin johdosta XYZ-järjestelmän Y-arvo määrittelee vain luminanssin, eikä suoraa arviota havaitusta kirkkaudesta. [Fairchild 1998, 141]

Yksi lähestymistapa Helmholtz-Kohlrausch-efektin mallintamiseen on Ware ja Cowan yhtälöt, joissa määritellään kromaattisuudesta riippuva korjauskerroin, F.

$$F = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4$$

Kaksi väriärsykettä nähdään yhtä kirkkaina, mikäli seuraava yhtäsuuruus on voimassa:

$$\log(L_1) + F_1 = \log(L_2) + F_2$$

missä L on luminanssi ja F on edellisen kaavan mukainen korjauskerroin.

Ware ja Cowan yhtälöt on johdettu suhteuttamattomille väreille (unrelated color). Helmholtz-Kohlrausch -efektin vaikutukseen suhteutetuille väreille (related color) on myös johdettu yhtälöitä. [Fairchild 1998, 142]

3.1.7 Hunt-efekti

Kun värinäytteen luminanssia kasvatetaan, havaittu kromaattinen kontrasti eli värikkyys (colourfulness) kasvaa. Heikossa valaistuksessa väri nähdään vähemmän värikkäänä kuin jos valaistustaso on korkea. Tämän Hunt-efektin johdosta värivaikutelmamalleissa täytyy huomioida absoluuttinen luminanssitaso. [Fairchild 1998, 144-145]

Huntin ilmiön mukaisesti värikkyys ei kuitenkaan kasva erittäin korkeilla, kuitenkin alle silmälle vahingollisilla luminanssitasoilla, esimerkiksi kirkkaassa auringonvalossa. Tällöin alkaa tapahtua tappisolusignaalien heikkenemistä, vaalenemisilmiötä (bleaching), mikä vähentää havaittua värikkyyttä. Kyseinen ilmiö on huomioitu ainoastaan Huntin värivaikutelmamallissa. [Fairchild 1998, 254]

3.1.8 Stevens-efekti

Hunt-efektiin läheisesti liittyvä Stevens-efekti kuvaa valoisuuskontrastin kasvua luminanssin kasvun myötä. Luminanssitason kasvaessa tummat värit näyttävät tummemmilta ja vaaleat vaaleammilta. Musta siis näyttää mustemmalta, kun valaistustasoa kasvatetaan. [Fairchild 1998, 145-146]

3.1.9 Helson-Judd -efekti

Mikäli värinäytettä katsotaan monokromaattisessa valaistuksessa, näytteen värisävy muuttuu kohti valonlähteen värisävyä, mikäli näyte on taustaansa vaaleampi. Mikäli näyte on taustaansa tummempi, muutos näytteen värisävyssä tapahtuu kohti valonlähteen käänteisvärisävyä.

Koska kyseinen Helson-Judd -efekti tulee ilmi vain valonlähteen värin ollessa lähes monokromaattinen, ei sillä ole suurta merkitystä käytännön valaistusolosuhteissa. Ilmiö katoaa täysin, mikäli monokromaattiseen valolähteeseen lisätään 5 % valkoista valoa. Joissakin värivaikutelmamalleissa, kuten Huntin ja Natayatani et al -malleissa kuitenkin huomioidaan Helson-Judd -efektin vaikutus. [Fairchild 1998, 146-148]

3.1.10 Bartleson-Breneman -ilmiö

Bartleson ja Breneman tutkivat taustan luminanssin vaikutusta kompleksisen, kuvamaisen näytteen havaitsemiseen. Kokeelliset tulokset osoittivat, että taustan suhteellisen luminanssin kasvattaminen lisää kontrastia. Tämä johtuu siitä, että tumma tausta vaalentaa tummia sävyjä vaikuttamatta juurikaan vaaleisiin sävyihin, sillä valkoinen havaitaan valkoisena, riippumatta merkittävästi taustan valoisuusmuutoksista. Näin tumma tausta vähentää ja kirkas tausta lisää kontrastia. Ilmiön johdosta esimerkiksi pimeällä projisoitaviksi tarkoitettujen valokuvakalvojen fyysinen kontrasti tehdään suuremmaksi, mikä tasapainottaa tumman taustan aiheuttamaa kontrastivähennystä. Ilmiön intuitiivisuutta vähentää käytännön vastakkaisilta tuntuvat kokemukset, jossa additiivista värinmuodostusta käyttävien laitteiden, kuten näyttöjen kontrastia saadaan lisättyä vähentämällä huoneen valaistusta. Valaisun lisääminen lisää tällaisessa tilanteessa usein näytön pinnasta heijastuvaa valoa, jolloin näytön fyysinen kontrasti heikkenee. Bartleson-

Breneman ilmiö tulee kuitenkin esille, jos näytön taustaa voidaan valaista, ilman että se aiheuttaa näytön pinnasta heijastuvan valon määrän kasvua.

Esimerkiksi RLAB ja Huntin värivaikutelmamalli sisältävät ennusteet taustan vaikutuksesta havaittuun kontrastiin. [Fairchild 1998, 149-150]

3.2 Näytteen koko ja katselukulma

Näytteen koko ja katseluetäisyys vaikuttavat keskuskuoppaan (fovea) ja muualle verkkokalvolle piirtyvän kuvan kokoon. Koska tappi- ja sauvasolujen esiintymistiheys verkkokalvolla ei ole vakio, vaikuttaa näytteen koko sekä myös näytteen ja katseen kohteen välinen kulma havaittuun väriin.

Värimallien pohjalla olevat CIE:n xyz-värinsovitusfunktiot on määritelty standardin havainnoijan mukaan. Nämä perustuvat kokeellisiin testeihin, joissa havainnoija näkee tietynkokoisen värinäytteen. CIE 1931 -standardihavainnoijan määrittämissä tummalla taustalla oleva näyte on 2° katselukulman (viewing angle) kokoinen, jolloin se piirtyy ainoastaan tarkan näkemisen alueeseen, foveaan. CIE 1964 -standardihavainnoija kuvaa 10° kokoinen näytteen havaintsijaa. 10°-havainnoijan $x_{10}y_{10}z_{10}$ -värinsovitusfunktioiden luonnissa käytetyissä kokeissa 2°:n kokoinen keskusta oli musta, jolloin fovea ei vaikuttanut tuloksiin. Lisäksi alhaisessa valaistuksessa väriin vaikuttava tappisolujen vaikutus (rod intrusion) pyrittiin laskennallisesti poistamaan. 10°-havainnoijan värinsovitusfunktioita suositellaan käytettäväksi, kun 4°:n katselukulma ylittyy. [Berns 2000, 50-54]

3.3 Metamerismi

Kaksi väriä voi tuottaa saman värihavainnon, vaikka niiden spektrijakauma on erilainen. Tällaisten värien sanotaan olevan keskenään metameereja. Kun metameerinen pari nähdään samanlaisena vain tietyssä valaistuksessa, puhutaan valonlähdemetameriasta (illuminant metamerism). Havainnoijametameriasta (observer metamerism) on kysymys silloin, kun kahdesta havainnoijasta, jolla on normaali värinäkö, vain toinen havaitsee metameerisessa näyteparissa värieron. [Berns 2000, 126-128]

3.4 Ikääntymisen vaikutus värinäköön

Ikääntymisen myötä silmän linssi kovettuu, jolloin se absorboi ja hajottaa enemmän lyhytaallonpituisia violetteja ja sinisiä värejä, jolloin kuvan keltaisuus lisääntyy. Vaikka näköjärjestelmä mukautuu osittain asteittain tapahtuvaan keltaisuuden lisääntymiseen, näkökokeissa vanhemmat ihmiset näkevät erityisesti purppuran värit nuoria havainnoijia punaisempina suuremman osan sinisestä absorboituessa.

Lisäksi foveassa eli verkkokalvon keskikuopassa on keltainen filteri, macula, joka suojaa lyhytaallonpituiselta säteilyltä. Makulaarisen pigmentin (macular pigment) määrä vaihtelee havainnoitsijakohtaisesti, mutta siinä ei kuitenkaan tapahdu muutoksia ikääntymisen myötä linssin tavoin. Linssin muutokset ja maculan keltaiset filterit aiheuttavat suurimmat erot normaalin värinäön omaavien ihmisten värien näkemisessä. [Fairchild 1998, 5-7]

3.5 Kromaattinen mukautuminen

Värivaikutelman kannalta erittäin oleellinen tekijä on näköjärjestelmämme mukautuminen erilaisiin valaistusolosuhteissa tapahtuviin muutoksiin. Muutokset valaistustasossa sekä valaistuksen värissä eivät näin ollen vaikuta suoraan havaittuun väriin. Kromaattinen mukautuminen ei ole kuitenkaan usein täydellistä; valonlähteen värin muuttuessa havaitaan usein merkittäväkin muutos värivaikutelmassa. Muutos havaitussa värissä olisi kuitenkin vielä suurempi ilman kromaattisen mukautumisen mekanismeja, jotka pyrkivät likimain säilyttämään värivaikutelman. [Fairchild 1998, 175-182]

Mukautuminen sekä valoisaan, että pimeään on huomioitu osassa värivaikutelmamalleja. Esimerkiksi Huntin värivaikutelmamalli on suunniteltu ennustamaan värivaikutelmaa valaistuksen muutoksissa tapahtuvissa erittäin suurissa muutoksissa.

Valonlähteen värisävy muutoksiin mukautuminen eli kromaattinen mukautuminen on värien näkemisen kannalta kuitenkin valoisuus- ja pimeysmukautumista paljon tärkeämpi mukautumisen muoto, minkä johdosta se sisältyy kaikkiin värivaikutelmamalleihin. [Fairchild 1998, 175-182]

Usein kromaattista mukautumista pidetään vain sensoritason ominaisuutena, jolloin kolmen tappisolutyypin herkkyydet muuttuvat itsenäisesti, toisin kuin pimeys- ja

valoisuusmukautumisessa, jolla viitataan tappisolujen osalta kaikkien tappisolutyypin herkkyyden yleiseen muuttumiseen. Mukautumisilmiöön voi kuitenkin osallistua myös muita, korkeamman tason värinäkömekanismeja. [Fairchild 1998, 175-177]

3.5.1 Valaistuksen mitätöinti

Näköjärjestelmämme mukautumista ei voida selittää pelkästään fysiologisilla mekanismeilla, sillä osa kromaattisesta mukautumisesta on kognitiivista.

Kognitiivisella tasolla tapahtuvaa, havaittavan kohteen värin tulkintaa valaistusympäristön perusteella kutsutaan valaistuksen mitätöinniksi (discounting-the-illuminant). Tämä lisää värien havaitsemisen riippumattomuutta valaistuksessa tapahtuvista muutoksista. Yleisesti käytetty esimerkki valkoisen kohteen havaitsemisesta lähes samanvärisenä valkoisena erilaisissa valaistusolosuhteissa perustuu tietoomme kohteen, valonlähteen ja ympäristön ominaisuuksista.

Värivaikutelmamalleista esimerkiksi Huntin malli sekä RLAB-malli sisältävät valaistuksen mitätöinnin huomioimismahdollisuuden. Tämä mahdollistaa esimerkiksi paperitulosteiden värien vertailun erilaisissa valaistusolosuhteissa. Valaistuksen mitätöinti -mekanismit toimivat vain valoa heijastavia kohteita tarkasteltaessa, jolloin additiivista värimuodostusta käyttäviä näyttölaitteita katsottaessa ilmiötä ei esiinny. [Fairchild 1998, 150-157]

3.5.2 Vastaavat värit -datajoukot

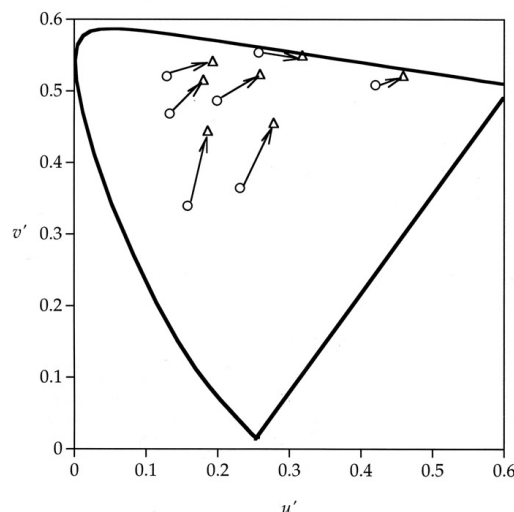
Kaksi tristimulusarvoiltaan poikkeavaa värinäytettä, jotka nähtynä erilaisissa valaistusolosuhteissa tuottavat samanlaisen havainnon väristä, ovat vastaavia värejä (corresponding colors) määritellylle katseluolosuhteille. Näkökokeiden perusteella on luotu vastaavat värit -datajoukkoja, jotka sisältävät kahdessa erilaisessa katseluolosuhteessa värivaikutelmaltaan toisiaan vastaavien värien XYZ-tristimulusarvopareja. Vastaavat värit -datajoukkoja käytetään sekä kromaattisen mukautumisen mallien että myös muita värivaikutelmatekijöitä huomioivien värivaikutelmamallien testaamiseen. Mallien avulla laskettuja värijoukon arvojen ennusteita erilaisissa valaistusolosuhteissa verrataan vastaavat värit -datajoukkojen tuloksiin. [Fairchild 1998, 189-191; Hunt 2004]

Vastaavat värit -datajoukkojen keräämiseen on käytetty erilaisia koejärjestelyjä.

Haploskooppisissa vastaavuuskokeissa (haploscopic matching) havainnoijan vasen silmä on mukautettu oikeasta silmästä poikkeaviin katseluolosuhteisiin. Ongelmana tällaisten kokeiden tuloksissa on niiden vaatima oletus kromaattisen mukautumisen tapahtumisesta itsenäisesti molempien silmien osalta. Vaikka oletus voikin olla pätevä sensoritason mukautumismekanismeille, ei se kuitenkaan päde kognitiivisen tason mekanismeille. [Fairchild 1998, 189-191; Luo 2004]

Vastaavia värejä on selvitetty myös koejärjestelyjen avulla, joissa havainnoijat määrittelevät värien vastaavuudet tietyssä katseluolosuhteissa perustuen esimerkiksi Munsellin värijärjestelmän standardiolosuhteisten värien muistamiseen. Värien muistamisen mahdollinen vääristyminen vähentää tuloksien tarkkuutta, eikä testattava värijoukko voi olla kovin laaja. [Fairchild 1998, 189-191; Luo 2004]

Suuruusluokka-arviointitekniikoissa (magnitude estimation), joiden avulla voidaan tuottaa vastaavat värit -datan lisäksi myös värivaikutelmadataa, havainnoijat määrittelevät mitta-asteikkoarvoja värien attribuuteille, kuten valoisuudelle, kromalle ja värisävylle tai kirkkaudelle, värikyydelle ja värisävylle. Tällaiset koejärjestelyt eivät vaadi havainnoijien pitkää perehdyttämistä, mutta tuloksissa ei päästä suureen tarkkuuteen. [Fairchild 1998, 189-191; Luo 2004]



Kuva 4 Brenemanin vastaavat värit -datajoukon näytteitä, jotka kuvaavat samanlaisena havaittavaa väriä illuminant D65:ssä ja illuminant A:ssa [Fairchild 1998, 192]

Erityisesti suuruusluokka-arviointimenetelmällä saadun datan analysointi vastaavat värit -datan muodostamiseksi on haasteellista. Nykyisten kromaattisen mukautumisen mallien

vertailussa käytetään usein suuruusluokkamenetelmään perustuvasta LUTCHI-datasta johdettua vastaavat värit -dataa. Nayatani (2006) nostaa esille tarpeen LUTCHI-datajoukon analysointimenetelmien lisätutkimuksesta, jotta LUTCHI-datajoukosta vastaavat värit -datan muodostavat menetelmät saataisiin yhtenäisiksi.

4 Kromaattisen mukautumisen mallit

Kromaattisen mukautumisen mallit (chromatic adaptation models) mahdollistavat lähtövalaistusolosuhteissa nähtäviä värejä vastaavien värien laskemisen uusissa valaistusolosuhteissa. Malleista käytetään myös nimitystä kromaattisen mukautumisen muunnosmalli (chromatic adaptation transform, CAT), kun malli sisältää myös käänteismallin. Mikäli jossakin sovelluksessa ei tarvitse huomioida valaistuksen kromaattisuusmuutosten lisäksi muita värivaikutelmaan vaikuttavia tekijöitä, soveltuu kromaattisen mukautumisen malli yksinkertaiseksi vaihtoehdoksi värivaikutelmamallille. Kromaattisen mukautumisen mallit luovat perustan värivaikutelmamalleille. [Fairchild 1998, 193-194; Hunt 2004]

Kromaattisen mukautumisen mallintaminen vaatii CIE XYZ -arvojen ilmaisemisen LMS-tappisoluvasteiden avulla (cone excitations, cone responses). Mallista riippuen näitä eri aallonpituusalueisiin reagoivien tappisolujen signaaleja kuvataan myös RGB tai $\rho\gamma\beta$ -merkinnöillä. Seuraava kaavio kuvaa CAT-mallien toimintaperiaatetta:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X_1 Y_1 Z_1 & \rightarrow & L_1 M_1 S_1 & \rightarrow & L_a M_a S_a & \rightarrow & L_2 M_2 S_2 & \rightarrow & X_2 Y_2 Z_2 \\
 \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \\
 3 \times 3 & & VC_1 & & VC_2 & & 3 \times 3 & &
 \end{array}$$

XYZ-tristimulusarvot muunnetaan LMS-arvoiksi lineaarisella 3x3 -matriisimuunnoksella. Alkuperäiset valaistusolosuhteet huomioidaan VC_1 (viewing condition) -tiedon avulla, jolloin saadaan mukautuneet $L_a M_a S_a$ -signaalit. Mukautuneista signaaleista voidaan käänteisprosessin avulla ennustaa vastaava väri $X_2 Y_2 Z_2$ VC_2 :n määrittelemissä valaistusolosuhteissa. [Fairchild 1998, 193-194]

4.1 von Kries -malli

Kromaattisen mukautumisen malleista tärkein on matemaattinen tulkinta Johannes von Kriesin hypoteesista, jonka mukaan tappisolutyypit ovat täysin riippumattomia toisistaan ja mukautuvat yksinomaan oman funktionensa mukaisesti.

Hypoteesin matemaattisessa tulkinnassa kukin LMS -tappisoluvasteista normalisoidaan skaalaamalla niitä seuraavasti:

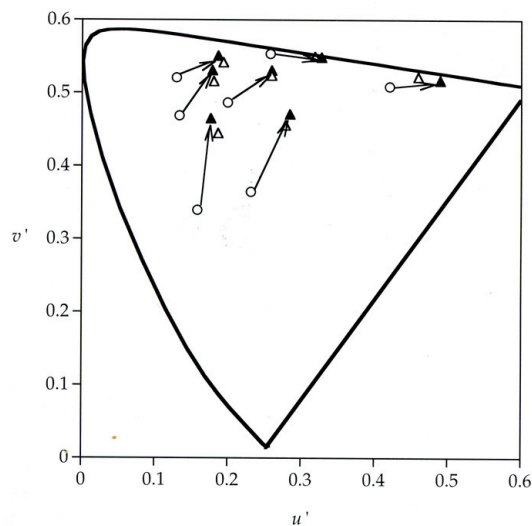
$$\begin{aligned} L_a &= k_L L & k_L &= 1/L_{\max} & k_L &= 1/L_{\text{white}} \\ M_a &= k_M M & \text{missä } k_M &= 1/M_{\max} & \text{tai } k_M &= 1/M_{\text{white}} \\ S_a &= k_S S & k_S &= 1/S_{\max} & k_S &= 1/S_{\text{white}} \end{aligned}$$

Mikäli esimerkiksi näkymän valkoinen kohde sisältää paljon lyhyitä aallonpituuksia, skaalautuu S_a -tappisoluvaste pienemmäksi ennustaen mukautumisen jälkeen nähtävien värien sinisyyden vähenemistä.

Mallin avulla voidaan ennustaa väri, joka vastaa alkuperäistä väriä uudessa valaistusolosuhteessa seuraavasti:

$$\begin{aligned} L_2 &= (L_1 / L_{\max 1}) L_{\max 2} \\ M_2 &= (M_1 / M_{\max 1}) M_{\max 2} \\ S_2 &= (S_1 / S_{\max 1}) S_{\max 2} \end{aligned}$$

[Fairchild 1998, 201-203]



Kuva 5 von Kries -mallin ennustamia vastaavia värejä verrattuna Brenemanin vastaavat värit -datajoukon (avoimet kolmiot) tuloksiin [Fairchild 1998, 203]

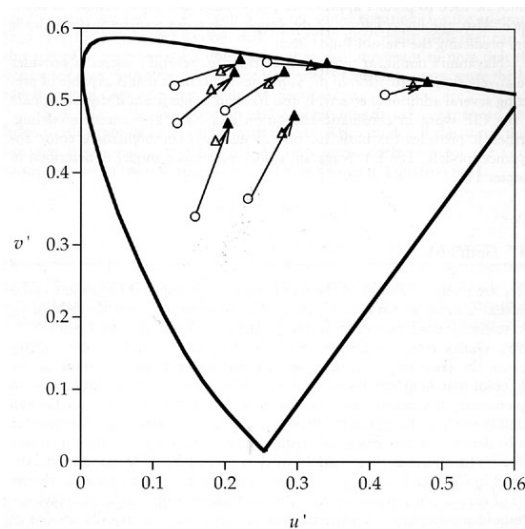
4.2 Nayatanin malli

von Kriesin mallia on kehitetty muodostamalla epälineaarisia kromaattisen mukautumisen malleja. Eräs tällainen on Nayatanin malli, jonka yleistetty muoto Fairchildin (1998) mukaan on seuraava:

$$L_a = a_L \left(\frac{L + L_n}{L_0 + L_n} \right)^{\beta_L} \quad M_a = a_M \left(\frac{M + M_n}{M_0 + M_n} \right)^{\beta_M} \quad S_a = a_S \left(\frac{S + S_n}{S_0 + S_n} \right)^{\beta_S}$$

Mallissa L_a , M_a ja S_a ovat L , M ja S -tappisoluvasteista mukautumisen jälkeen saatavat tappisolusignaalit; L_n , M_n ja S_n ovat kohinatermejä (noise term) ja L_0 , M_0 ja S_0 ovat tappisoluvasteet mukautumiskentälle (adapting field). β_L , β_M ja β_S -eksponentit riippuvat mukautumiskentän luminanssista. a_L , a_M ja a_S -vakiot perustuvat periaatteeseen, jonka mukaan tarkka värivakioisuus pätee näytteelle, jolla on sama luminanssikerroin kuin mukautumistaustalla. [Fairchild 1998, 206]

Brenemanin vastaavat värit -joukolla testattuna malli antaa melko hyviä tuloksia, muttei kuitenkaan yhtä hyviä kuin yksinkertainen von Kriesin malli. Tämä johtuu osittain siitä, että Brenemanin datan luonnissa käytettiin olosuhteita, joissa valaistuksen mitätöinti-ilmiötä ei voinut tapahtua, minkä johdosta kromaattinen mukautuminen oli vähäisempää. Tämän voi huomata kuvasta, jossa Nayatanin mallin ennusteissa on liikaa hehkulampun aiheuttamaa keltaista.



Kuva 6 Nayatanin epälineaarisen mukautumismallin ennusteita ja vastaavat värit -dataa (avoimet kolmiot) [Fairchild 1998, 207]

Toisin kuin von Kriesin mallia, joka on luminanssista riippumaton ja lineaarinen, Nayatanin mallia voidaan käyttää luminanssiriippuvaisten ilmiöiden, kuten Huntin- ja Stevensin efektien ennustamiseen. Nayatanin mallin epälineaarisuus mahdollistaa myös käytännössä vähemmän merkityksellisen Helson-Judd -ilmiön huomioimisen. [Fairchild 1998, 207-208]

4.3 CAT02

CIECAM97s-väriaiikutelmamallin pohjalla oleva Bradfordin mukautumismalli on suurelta osin von Kriesin -mallin kaltainen, mutta sisältää kuitenkin siniseen kanavaan vaikuttavan eksponentiaalisen epälineaarisuuden sekä optimoidut tappisoluvasteet (cone responsivities). Sinisen kanavan epälineaarisuus hankaloitti kuitenkin CIECAM97s-mallin käänteismallin muodostamista, minkä johdosta kehitettiin parempia muunnosmatriiseja, joilla XYZ-arvot muunnetaan RGB-arvoiksi ennen niiden von Kries -normalisointia. [Fairchild 2005, 179-182]

$$M = \begin{bmatrix} 0.8562 & 0.3372 & -0.1934 \\ -0.8360 & 1.8327 & 0.0033 \\ 0.0357 & -0.0469 & 1.0112 \end{bmatrix} \quad M_{Li} = \begin{bmatrix} 0.7982 & 0.3389 & -0.1371 \\ -0.5918 & 1.5512 & 0.0357 \\ 0.0008 & -0.0239 & 0.9753 \end{bmatrix}$$

$$M_{Susstrunk} = \begin{bmatrix} 1.2694 & -0.0988 & -0.1706 \\ -0.8364 & 1.8006 & 0.0357 \\ 0.0294 & -0.0315 & 1.0018 \end{bmatrix} \quad M_H = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Eri tavoin optimoituja XYZ-RGB -muunnosmatriiseja sekä normaalit tappisoluvasteet tuottava M_H , Hunt-Pointer-Estévez -matriisi. [Fairchild 2001]

Hieman erilaisia tuloksia antavia, optimoituja muunnosmatriiseja käyttämällä voitiin muodostaa lineaarisia CAT:eja, jotka antoivat yhtä hyviä tuloksia testatuilla datajoukoilla kuin CIECAM97s:n epälineaarinen CAT. [Fairchild 2005, 179-181]

CIE TC8-01 (Technical Committee 8-01) valitsi CAT02:n pohjaksi lineaarisen muunnosmatriisin, joka oli optimoitu suurelle joukolla vastaavat värit -dataa ja jonka tulokset olivat likimäärin CIECAM97s:n epälineaarista muunnosta vastaavia. Näiden

matriisien avulla lasketut RGB-vastearvot XYZ-arvoille ovat spektraalisesti terävämpiä ja sisältävät myös negatiivisia arvoja. [Fairchild 2005, 179-182]

CAT02-malli on yksinkertaisimmassa muodossaan seuraavan kaavan mukainen. Tässä oletetaan kromaattisen mukautumisen olevan täydellistä.

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = M_{CAT02}^{-1} \begin{pmatrix} R_{adapt2} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & G_{adapt2} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & B_{adapt2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/R_{adapt1} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/G_{adapt1} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/B_{adapt1} \end{pmatrix} M_{CAT02} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

[Fairchild 2005, 181]

5 Värivaikutelmamallit

Edellä kuvatuilla kromaattisen mukautumisen malleilla voidaan laskea ennusteita vastaavista väreistä kahden, vain valaistuksen kromaattisuuden osalta eroavien katseluolosuhteiden välillä. Joissakin kuvantuottosovelluksissa tämä riittää. Usein on kuitenkin tarvetta huomioida myös muiden tekijöiden aiheuttamia muutoksia havaitussa värissä.

Kuten esitellyt värivaikutelmamallit kuvaavat, värihavaintoon vaikuttaa valaistuksen kromaattisuuden lisäksi mm. valaistustaso sekä taustan ja ympäristön väri- ja kirkkausominaisuudet. Näiden tekijöiden vaikutusta ennustetaan värivaikutelmamallien (color appearance models) avulla. Värivaikutelmamalleilla lasketaan ennusteita määritellyssä katseluolosuhteessa havaittavan värin vaikutelma-attribuuteille. Tällöin kahdessa erilaisessa katseluolosuhteessa värit havaitaan samanlaisena, mikäli värivaikutelmamallin kyseisille olosuhteille ennustamat vaikutelma-attribuutit ovat samat.

CIE:n TC1-34 määrittelee värivaikutelmamallin mallina, joka sisältää ennusteet vähintään suhteellisille värin attribuuteille, joita ovat valoisuus (lightness), kroma (chroma) ja värisävy (hue). Lisäksi mallin tulee sisältää kromaattisen mukautumisen malli. [Fairchild 1998, 217]

Yksinkertaisimmat määritelmän täyttävät värivaikutelmamallit eivät kuitenkaan huomioi monimutkaisempien mallien tavoin esimerkiksi taustan kolorimetrisia ominaisuuksia, eivätkä sisällä ennusteita absoluuttisille värivaikutelmatekijöille, joita ovat kirkkaus (brightness) ja värikkyys (colourfulness).

Värivaikutelmamallit rakentuvat kromaattisen mukautumisen mallien päälle. Värinäytteen (stimulus) ja yleensä valonlähteestä mitattujen mukautumisnäytteen (adapting stimulus) XYZ-tristimulusarvojen lisäksi lähtötiedoiksi voidaan tarvita mallista riippuen tietoa absoluuttisesta luminanssitasosta, taustasta ja ympäristöstä. Kromaattisen mukautumisen mallien avulla saatavista, normalisoiduista tappisoluvasteista saadaan muita annettuja tietoja hyväksikäyttäen laskettua korkeamman tason signaaleja, joiden perusteella voidaan ennustaa värin vaikutelma-attribuutteja. [Fairchild 1998, 218]

Värivaikutelmamalleja on lukuisia ja usein eri mallit soveltuvat parhaiten tiettyihin sovelluksiin, esimerkiksi valaistus- ja kuvanvalmistusteollisuudessa. Toiset mallit ovat laskennallisesti yksinkertaisia, mutta ne eivät mahdollista värivaikutelmailmiöiden vaikutuksen huomioimista laajimpien mallien tavoin. Laajimpien mallien ongelma on kuitenkin niiden laskennallinen raskaus, mikä vähentää niiden soveltuvuutta yleiskolorimetrisiksi malleiksi.

Seuraavassa on esitelty pääpiirteittäin joitakin tärkeimpiä värivaikutelmamalleja ja niiden sisältämiä laskukaavoja erityisesti niiltä osin, joissa huomioidaan kuvailtuja värivaikutelmailmiöitä.

5.1 CIELAB JA CIELUV

Yksinkertaisimmat määritelmän täyttävät värivaikutelmamallit ovat CIELAB ja CIELUV. Mallit kehitettiin 1970-luvun alussa, jolloin oli tarvetta luoda selkeä suositus yleisesti käytettäväksi värierojen laskentamalliksi. Vuonna 1976 CIELAB:ista ja CIELUV:ista tuli CIE:n suositus värierojen laskentakäyttöön. Mallien perusteella muodostettuja väriavaruuksia nimitettiin yhtenäisiksi väriavaruuksiksi (uniform color space). [Fairchild 1998, 219]

5.1.1 Yhtenäinen väriavaruus

Ideaalitapauksessa yhtenäisessä väriavaruudessa samansuuruinen matka mihin tahansa suuntaan kaikissa väriavaruuden pisteissä aiheuttaisi samansuuruisen muutoksen havaitussa värissä. Näin esimerkiksi yhden yksikön suuruinen ΔE -värieroarvo mitattuna

kahdesta punaisesta näytteestä vastaisi samansuuruista havaittua värieroa esimerkiksi kahden harmaan näytteen välillä, kun myös näiden väriero on yhden yksikön suuruinen. CIELAB:issa yhtenäisyystavoitteeseen ei kuitenkaan tiukasti ottaen olla päästy. CIE määrittelee yhtenäisen väriavaruuden kolmiulotteiseksi väriavaruudeksi, jossa yhtä suuret matkat vastaavat likimain havaittua värieroa. [Fairchild 1998, 94; Luo et al. 2005]

Vaikka laskennallinen teho on kasvanut merkittävästi väritutkimuksen edistyessä viimeisten vuosikymmenten aikana, väriavaruudeltaan yhtenäisen, havaintoa vastaavasti tasavälisen väriavaruuden kehittämisen tekee vaikeaksi lukuisat tekijät. Yksi osatekijä on se, että visuaalinen data on luonnostaan hyvin vaihtelevaa, kohinaista, mikä vaikeuttaa väridatan analysointia. Värin havaitsemistapahtuma onkin erittäin kompleksinen. [Berns 2000, 63]

5.1.2 CIELAB-malli

CIELAB-malli tarvitsee lähtötiedoikseen ärsykkeen (stimulus) sekä referenssivalkoisen XYZ-tristimulusarvot. CIELAB:in kromaattisen mukautumisen malli on von Kriesin mallin muunneltu versio, jossa näytteen tristimulusarvot normalisoidaan suoraan referenssivalkoisen tristimulusarvojen avulla, tekemättä ensin muunnosta tappisoluvasteiksi. Kuutiojuuren avulla saadaan huomioitua fyysisten mittausten ja näköjärjestelmän vasteiden epälineaarista suhdetta ja sopivilla kertoimilla pyritään mahdollisimman yhtenäiseen väriavaruuteen. Väri kuvataan kolmen, vastaväriteorian mukaisen L^* , a^* ja b^* -komponentin: valoisa-pimeä, punainen-vihreä, keltainen-sininen -vasteen avulla. L^* , a^* ja b^* -komponenttien avulla voidaan laskea kromin ja värisävykulman arvot, C^* ja h^* , joiden avulla $L^*a^*b^*$ -väriavaruus voidaan esittää myös sylinterikoordinaatistossa. [Fairchild 1998, 219-220]

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega^{1/3} & \omega > 0.008856 \\ 7.787(\omega) + 16/116 & \omega \leq 0.008856 \end{cases}$$

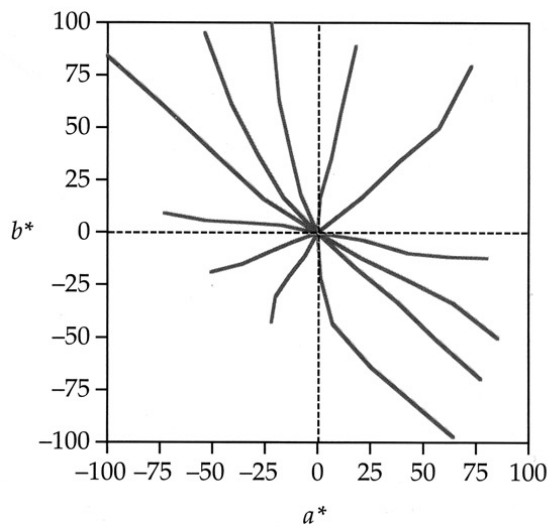
$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$h_{ab}^* = \tan^{-1}(b^* / a^*)$$

[Fairchild 1998, 219]

5.1.2.1 CIELAB:in heikkouksia

CIELAB-väriavaruudesta on tullut kansainvälinen de facto -väriavaruusstandardi. Väriavaruus on kuitenkin vain likimain yhtenäinen. CIELAB-väriavaruuden epäyhtenäisyys tulee ilmi erityisesti suurilla kroma-arvoilla, joita voidaan tuottaa näyttölaitteilla. Mikäli esimerkiksi CRT-laitteella tuotetaan CIELAB:in ennusteiden mukaan värisävyiltään vakioita näytteitä, havaitaan värisävyssä kuitenkin selviä muutoksia Munsell-värijärjestelmän näytteitä korkeammilla kroma-arvoilla, mikä näkyy kuvasta 7. [Fairchild 1998, 221-225]



Kuva 7 Vakiona havaittuja värisävyviivoja kuvattuna CIELAB:in a^*b^* -tasossa. [Fairchild 1998, 225]

Lisäksi CIELAB:in von Kriesin mukautumismallista poikkeava XYZ-tristimulusarvojen suora normalisointi rajoittaa mallin suorituskykyä.

von Kries malli voidaan ilmaista matriisimuodossa seuraavasti:

$$\begin{vmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} L \\ M \\ S \end{vmatrix}$$

Kun LMS-tappisoluvasteet muunnetaan XYZ-tristimulusarvoiksi käyttäen muunnoksessa matriisiä M, voidaan von Kries mallille johtaa seuraavanlainen esitysmuoto:

$$M = \begin{bmatrix} 0.390 & 0.689 & -0.079 \\ -0.230 & 1.183 & 0.046 \\ 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.74k_L + 0.26k_M & 1.32k_L - 1.32k_M & -0.15k_L - 0.05k_M + 0.20k_S \\ 0.14k_L - 0.14k_M & 0.26k_L + 0.74k_M & -0.03k_L + 0.03k_M \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}$$

XYZ-tristimulusarvoja ei voida siis normalisoida von Kries mallia käyttäen diagonaalimatriisin avulla. Tämän johdosta CIELAB:in sisältämä suora XYZ-arvojen normalisointi ei noudata von Kriesin mallia. Tämä "wrong von Kries" -kromaattisen mukautumisen malli ei mallinna hyvin päivänvalosta poikkeaviin valaistusolosuhteisiin mukautumista. Kun Brenemanin vastaavat värit -datajoukkoa verrataan CIELAB:in kromaattisen mukautumisen mallin ennustuksiin, suoriutuu CIELAB von Kries -mallia huominkin. [Fairchild 1998, 224-227]

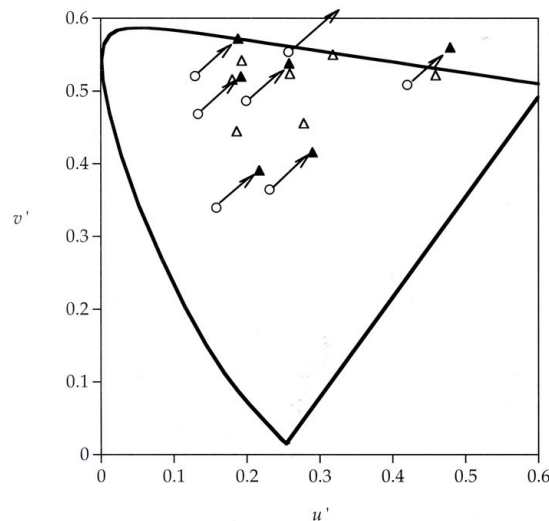
CIELAB:in epäuniformiuden ja epätarkan kromaattisen mukautumisen mallin lisäksi mallin yksinkertaisuus lisää tarvetta muiden, laajempien värivaikutelmamallien käytölle. Koska CIELAB:issa ei huomioida yleistä luminanssitasoja, sen avulla ei voida ennustaa luminanssista riippuvien ilmiöiden, kuten Huntin ja Stevensin efektien vaikutusta. Lisäksi taustan tai ympäristön ominaisuuksista riippuvia simultaanikontrasti- ja Bartleson-Breneman ilmiöitä ei huomoida, kuten ei myöskään kognitiivista valaistuksen mitätöinti-ilmiötä. CIELAB ei mahdollista myöskään ennusteiden laskemista absoluuttisille värivaikutelma-attribuuteille: kirkkaudelle ja värikkyydelle.

CIE:n mukaan CIELAB -avaruus onkin tarkoitettu samakokoisten ja -muotoisten objektien värieröjen vertailuun niiden taustan ollessa valkoisen ja keskiharmaan väliltä ja havaitsijan

ollessa mukautunut kenttään, jonka kromaattisuus ei ole liian kaukana keskimääräisen päivänvalon kromaattisuudesta. [Fairchild 1998, 228-229]

5.1.3 CIELUV-malli

CIE:n vuonna 1976 suosittama toinen värivaikutelmamalli, CIELUV, käyttää CIELAB:in kromaattisen mukautumisen mallista poikkeavaa mallia. CIELUV:in mukautumismalli perustuu kromaattisuuskoordinaattien erotuksiin ($u'-u'_n$, $v'-v'_n$) toisin kuin CIELAB:in kerronnallinen tristimulusarvojen skaalaus (X/X_n , Y/Y_n , Z/Z_n). Erotukseen perustuvan kromaattisen mukautumisen mallin ennustamat tulokset ovat CIELAB:in kromaattisen mukautumisen mallia huonompia. Vastaavia värejä ennustettaessa CIELUV-malli on epätarkka ja sen ennusteet voivat kuvautua nähtävien värien alueen ulkopuolelle.



Kuva 8 CIELUV-mallilla ennustettuja vastaavia värejä verrattuna Brenemanin vastaavat värit -datajoukon (avoimet kolmiot) tuloksiin [Fairchild 1998, 230]

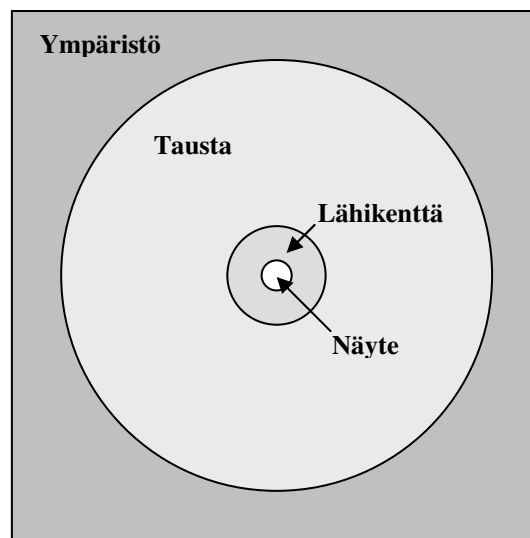
Huonosti toimiva kromaattisen mukautumisen malli riittää sulkemaan CIELUV:in pois vartenotettavien värivaikutelmamallien joukosta. CIELUV soveltuukin huonosti myös värierojen laskentaan (Alman et al. 1989, cit. Fairchild 1998, 230). CIE:n uudemmat värieromallit CIE94 ja CIEDE2000 pohjautuvatkin CIELAB-avaruuteen. [Fairchild 1998, 230]

5.2 Huntin värivaikutelmamalli

Huntin värivaikutelmamalli on nykyisistä värivaikutelmamalleista laajin ja monimutkaisin.

Monien muiden värivaikutelmamallien ominaisuudet pohjautuvatkin Huntin mallin rakenteisiin. Malli on kehitetty erityisesti kuvantuottosovelluksiin ja se mahdollistaa lukuisten värien näkemiseen vaikuttavien ilmiöiden huomioimisen. Vaikutelma-attribuutteja voidaan laskea sekä suhteutetuille väreille että muista väreistä erillisille, suhteuttamattomille väreille erilaisilla tausta- ja ympäristöominaisuuksilla, eri värisissä valaistuksissa, valaistustason vaihdellessa hämärästä sauvasolunäkemisestä aina erittäin kirkkaisiin olosuhteisiin.

Huntin malli vaatii katselukentän tarkempaa määrittelyä, jota seuraava kuva havainnollistaa.



Kuva 9 Katselukentän osat: ympäristö (surround), tausta (background), lähikenttä (proximal field) ja näyte (stimulus). Alueet nähdään oikeassa suhteessa katsottuna n. 12 cm etäisyydeltä, jolloin näyte muodostaa 2° kulman. Alkuperäinen kuva: [Fairchild 1998, 163]

Tässä esitetyt Huntin värivaikutelmamallin laskentakaavat perustuvat Fairchildin (1998, 247-265) esitykseen Huntin mallista suhteutetuille väreille.

5.2.1 Mallin tarvitsemat lähtötiedot

Huntin malli tarvitsee lähtötiedoikseen CIE 1931 2° -standardihavainnoijan mukaiset x,y-kromaattisuuskoordinaatit valonlähteen ja mukautumiskentän kromaattisuusarvoista sekä taustan, lähikentän, referenssivalkoisen ja näytteen kromaattisuusarvoista sekä luminanssikertoimista (Y). Luminanssiriippuvaisien vaikutelmailmiöiden ennustamista varten tarvitaan tieto referenssivalkoisen ja mukautumiskentän absoluuttisesta

luminanssitason (cd/m²).

Lisäksi täytyy määrittää hämäräluminanssi (scotopic luminance, scotopic cd/m²) mukautumiskentälle, jotta sauvasolujen vaikutus voidaan huomioida. Koska hämäräluminanssitieto, L_{AS}, on harvoin saatavilla, voidaan se arvioida normaalin (photopic) -luminanssitason, L_A ja korreloidun väriämpötilan, T, avulla seuraavasti:

$$L_{AS} = 2.26L_A [(T / 4000) - 0.4]^{1/3}$$

[Fairchild 1998, 249]

Kaavaa tarvitaan myös laskettaessa tarvittavaa näytteen ja referenssivalkoisen hämäräluminanssien suhdetta.

Malli tarvitsee myös lukuisia lähtötietoparametreja, joiden avulla määritellään tarkemmin katseluolosuhteita. Kaksi tällaista ovat katselukentän ympäristön kromaattisuuden (N_c) ja kirkkauden (N_b) perusteella määräytyvät ympäristön induktiokertoimet. Mikäli haluttuun katseluolosuhteisiin optimoituja kertoimia ei ole olemassa, käytetään valmiita taulukkoarvoja. Tällaisissa taulukoissa katselutilanteita on määritelty esimerkiksi näytöille hämärissä ympäristöissä, pimeässä heijastetuille kalvoille ja normaaleille näkymille.

Vastaavat kromaattisuus- ja kirkkausinduktiokertoimet, N_{cb} ja N_{bb}, tarvitaan myös taustan osalta. Mikäli optimoituja taustan induktiokertoimia ei ole saatavilla, voidaan ne laskea referenssivalkoisen ja taustan luminansseista Y_w ja Y_b seuraavilla kaavoilla:

$$N_{cb} = 0.725(Y_w / Y_b)^{0.2}$$

$$N_{bb} = 0.725(Y_w / Y_b)^{0.2}$$

[Fairchild 1998, 249]

Lähtötiedoksi tarvitaan vielä tieto, tapahtuuko valaistuksen mitätöinti -ilmiö kyseisissä olosuhteissa.

5.2.2 Mukautumismalli

Ennen mallin sisältämän kromaattisen mukautumisen mallin laskutoimenpiteiden suorittamista täytyy XYZ-tristimulusarvot muuttaa tappisoluvasteiksi. Huntin mallissa

käytetään tappisoluvasteista $\rho\gamma\beta$ -merkintöjä. Näytteen lisäksi muunnos suoritetaan referenssivalkoisen, taustan ja lähikentän tristimulusarvoille. Muunnoksessa käytetään seuraavaa Hunt Pointer Estevez -matriisia

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

[Fairchild 1998, 250]

Kromaattisen mukautumisen malli on merkittävästi muunneltu muoto von Kries -mallista. Mukautuneet tappisoluvasteet, $\rho_a\gamma_a\beta_a$, saadaan näytteen, $\rho\gamma\beta$, ja referenssivalkoisen, $\rho_w\gamma_w\beta_w$, avulla seuraavien kaavojen mukaisesti. von Kriesin hypoteesi näkyy suhteista ρ/ρ_w , γ/γ_w ja β/β_w .

$$\rho_a = B_\rho [f_n(F_L F_\rho \rho / \rho_w) + \rho_D] + 1$$

$$\gamma_a = B_\gamma [f_n(F_L F_\gamma \gamma / \gamma_w) + \gamma_D] + 1$$

$$\beta_a = B_\beta [f_n(F_L F_\beta \beta / \beta_w) + \beta_D] + 1$$

[Fairchild 1998, 250]

Kaavat sisältävät lukuisia erikseen laskettavia parametreja.

f_n -funktioita tarvitaan mallintamaan tappisolujen epälineaarista vastetta luminanssitason, joka voi Huntin mallissa olla hyvin laajaskaalainen.

$$f_n[I] = 40 [I^{0.73} / (I^{0.73} + 2)]$$

F_L on luminanssitason mukautumiskerroin, mikä sisältää absoluuttisen luminanssitason, L_A , mahdollistaen värivaikutelmailmiöistä esimerkiksi Stevensin ja Huntin ilmiön ennustamisen.

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3}$$

$$k = 1/(5L_A + 1)$$

Kertoimien F_ρ , F_γ ja F_β avulla huomioidaan, kuinka täydellistä kromaattinen mukautuminen on. Mikäli valaistuksen mitätöinti -ilmiö tapahtuu, kromaattinen

mukautuminen on täydellistä, jolloin kaikki kertoimet saavat arvon 1. Kertoimet lasketaan absoluuttisen luminanssin ja referenssivalkoisen tappisoluvasteiden avulla. Kromaattinen mukautuminen tulee täydellisemmäksi mukautumisluminanssin kasvaessa. [Fairchild 1998, 251-252].

ρ_D , γ_D , β_D -parametrit puolestaan mahdollistavat Helson-Judd -efektin ennustamisen, mihin tarvitaan luminanssitiedot taustasta (Y_b), referenssivalkoista (Y_w) ja näytteestä.

$$\rho_D = f_n [(Y_b / Y_w) F_L F_\gamma] - f_n [(Y_b / Y_w) F_L F_\rho]$$

$$\gamma_D = 0.0$$

$$\beta_D = f_n [(Y_b / Y_w) F_L F_\gamma] - f_n [(Y_b / Y_w) F_L F_\beta]$$

[Fairchild 1998, 253]

Helson-Judd ilmiötä ei kuitenkaan esiinny tyypillisimmissä katseluolosuhteissa, jolloin ρ_D , γ_D ja β_D -kertoimet asetetaan nolllaksi. Helson-Judd ilmiötä ei myöskään esiinny valaistuksen mitätöinti -ilmiön tapahtuessa, kertoimien F_ρ , F_γ ja F_β saadessa arvon 1.

Kromaattisen mukautumisen malli tarvitsee lähtötiedoikseen vielä kertoimet, joiden avulla huomioidaan erittäin korkeiden luminanssitasojen aiheuttamaa aistittujen värien haalistumista. Nämä vaalenemiskertoimet (cone bleach factors) pienenevät suurilla, kasvavilla luminanssiarvoilla, mikä aiheuttaa mukautumiskaavoissa reseptorin antaman signaalin heikkenemistä. Vaalenemiskertoimet lasketaan seuraavasti:

$$B_\rho = 10^7 / [10^7 + 5L_A (\rho_w / 100)]$$

$$B_\gamma = 10^7 / [10^7 + 5L_A (\gamma_w / 100)]$$

$$B_\beta = 10^7 / [10^7 + 5L_A (\beta_w / 100)]$$

Mikäli lähikenttä ja tausta eivät ole akromaattisia, kromaattista induktiota l. simultaanikontrastia mallinnetaan säätämällä mukautumiskaavoissa olevaa referenssivalkoista. Mukautuneita referenssivalkoisen signaaleja (ρ'_w , γ'_w , β'_w) säädetään taustan (ρ_b , γ_b , β_b) ja lähikentän (ρ_p , γ_p , β_p) sekä alkuperäisien referenssivalkoisen (ρ_w , γ_w , β_w) tappisoluvasteiden avulla.

$$\rho'_w = \frac{\rho_w [(1-p)p_\rho + (1+p)/p_\rho]^{1/2}}{[(1+p)p_\rho + (1-p)/p_\rho]^{1/2}}$$

$$\gamma'_w = \frac{\gamma_w [(1-p)p_\gamma + (1+p)/p_\gamma]^{1/2}}{[(1+p)p_\gamma + (1-p)/p_\gamma]^{1/2}}$$

$$\beta'_w = \frac{\beta_w [(1-p)p_\beta + (1+p)/p_\beta]^{1/2}}{[(1+p)p_\beta + (1-p)/p_\beta]^{1/2}}$$

$$p_\rho = (\rho_p / \rho_b)$$

$$p_\gamma = (\gamma_p / \gamma_b)$$

$$p_\beta = (\beta_p / \beta_b)$$

p saa arvoja väliltä 0–(-1) kun simultaanikontrasti-ilmiötä ilmenee, jolloin taustan ja lähikentän kromaattisuus vaikuttavat havaittuun testiväriin taustan vastaväriin suuntaan. Kun leviämisiä esiintyy, jolloin testinäytteeseen ”leviää” taustan kromaattisuutta, saa p arvoja 0–1. Useissa käytännön tilanteissa tausta oletetaan kuitenkin akromaattiseksi, jolloin edellä olevat kaavat jätetään huomioimatta.

Näin saadut mukautuneet tappisoluvasteet ρ_a , γ_a , β_a , ovat perustana vastaväridimensioiden (opponent color dimensions) ja vaikutelma-attribuuttien laskennalle.

5.2.3 Vastaväridimensiot

Huntin mallin vastaväridimensiot lasketaan seuraavasti:

$$A_a = 2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a - 3.05 + 1$$

$$C_1 = \rho_a - \gamma_a$$

$$C_2 = \gamma_a - \beta_a$$

$$C_3 = \beta_a - \rho_a$$

Näistä A_a on akromaattinen signaali. Kromaattisten värierosignaalien C_1 , C_2 ja C_3 avulla ilmaistaan kaikki mahdolliset verkkokalvon tuottamat vastakkaissignaalit, joiden fysiologisten vastaavuuksien esiintyminen ei ole kuitenkaan selvillä. Näiden

värierosignaalien avulla voidaan laskea perinteisempiä vaikutelma-attribuutteja. [Fairchild 1998, 255]

5.2.4 Värivaikutelma-attribuutit

Värisävy lasketaan vastaväriteorian mukaisten värierosignaalien C_1 , C_2 ja C_3 avulla. Värisävy voidaan ilmaista esimerkiksi värisävykulmana, h_s .

$$h_s = \tan^{-1} \left[\frac{(1/2)(C_2 - C_3)/4.5}{C_1 - (C_2/11)} \right]$$

Saturaation, s , laskemiseksi täytyy ensin laskea keltaisuus-sinisyyden, M_{YB} , ja punaisuus-vihreys, M_{RG} , vasteet värierosignaaleista.

$$M_{YB} = 100 \left[(1/2)(C_2 - C_3/4.5) \right] \left[e_s (10/13) N_c N_{cb} F_t \right]$$

$$M_{RG} = 100 \left[C_1 - (C_2/11) \right] \left[e_s (10/13) N_c N_{cb} \right]$$

e_s on eksentrisyyserroin (eccentricity factor), joka saadaan lineaarisesti interpoloimalla värisävykulman h_s ja taulukkoarvojen avulla. N_c ja N_{cb} ovat alussa mainitut ympäristön ja taustan kromaattisuusinduktiokertoimet. Matalan luminanssin tritanopiakerroin (low-luminance tritanopia factor), F_t , lasketaan seuraavasti:

$$F_t = L_A / (L_A + 0.1)$$

Matalan luminanssin tritanopia on ilmiö, jonka mukaan normaalin värinäön omaavien havainnoijien aistimat kelta-sini -värisignaali-vasteet heikkenevät luminanssin heiketessä. Tämä johtuu lyhyille aallonpituuksille herkkien tappisolujen muita tappisolutyyppejä korkeammasta luminanssikynnyksestä. [Fairchild 1998, 257]

M_{YB} ja M_{RG} -vasteiden avulla voidaan laskea yleinen kromaattisuusvaste, M .

$$M = (M_{YB}^2 + M_{RG}^2)^{1/2}$$

Näin voidaan laskea saturaatio s .

$$s = 50M / (\rho_a + \gamma_a + \beta_a)$$

Kirkkaus-attribuutti muodostuu seuraavasti:

$$Q = \{7[A + (M/100)]\}^{0.6} N_1 - N_2$$

Yleisen akromaattisen signaalin, A , laskemiseen tarvitaan muutamia välivaiheita. Niissä huomioidaan akromaattisen mukautuneen signaalin, A_a , lisäksi saunasolujen vaikutus hämäräluminanssiin, L_{AS} ja näytteen sekä referenssivalkoisen hämärävasteet (scotopic response) S ja S_w . Lisäksi A :han vaikuttaa taustan kirkkausinduktiokerroin N_{bb} .

Helmholtz-Kohlrausch -ilmiön mukaisesti kirkkauteen vaikuttaa akromaattisen vasteen, A , lisäksi myös kromaattinen vaste, M .

Stevensin ja Bartleson-Brenemanin ilmiöiden mukaisesti testinäytteen ympäristön ominaisuudet vaikuttavat kirkkauteen. Tämä otetaan huomioon N_1 ja N_2 termien avulla.

$$N_1 = (7A_w)^{0.5} / (5.33N_b^{0.13})$$

$$N_2 = 7A_w N_b^{0.362} / 200$$

N_b on ympäristön kirkkauden induktiokerroin. A_w on referenssivalkoiselle testinäytteen tapaan monivaiheisesti koko mallin läpi laskettu akromaattinen signaali. Muiden vaikutelma-attribuuttien laskemiseksi myös referenssivalkoisen kirkkaus, Q_w , täytyy laskea.

Valoisuus, J , lasketaan seuraavasti:

$$J = 100(Q/Q_w)^z$$

CIE:n määritelmän mukaisesti valoisuus on näytteen kirkkauden suhde referenssivalkoisen kirkkauteen. Huntin mallissa käytetyn eksponentin, z , avulla huomioidaan valoisuus-simultaanikontrastin vaikutusta seuraavasti:

$$z = 1 + (Y_b/Y_w)^{1/2}$$

Taustan suhteellisen luminanssin kasvaessa näyte nähdään tummempana, mikä vastaa simultaanikontrasti-ilmiön kuvaamaa, havaittua vaikutusta.

Huntin mallin korrelaatti kromalle, C_{94} , saadaan suhteellisen kirkkauden, saturaation ja taustan suhteellisen luminanssin avulla seuraavasti:

$$C_{94} = 2.44s^{0.69} (Q/Q_w)^{Y_b/Y_w} (1.64 - 0.29^{Y_b/Y_w})$$

Värikkyyys saadaan lasketun kromin ja kaavassa edellä määritellyn luminanssitason mukautumiskertoimen, F_L , avulla

$$M_{94} = F_L^{0.15} C_{94}$$

[Fairchild 1998, 247-265]

5.2.5 Huntin mallin heikkouksia

Usein erityisesti kuvantuotantosovelluksissa pitää voida käyttää värimalleja molempiin suuntiin. Huntin mallin monimutkaisuuden johdosta sille ei voida kuitenkaan johtaa analyttisesti käännteismallia, jossa värivaikutelma-attribuuteista lähtien saataisiin laskettua XYZ-tristimulusarvot. Likimääräisenkin käännteismallin muodostaminen on erityisen vaikeaa, mikäli lähtötietoina ei ole kaikkia vaikutelma-attribuutteja, vaan esimerkiksi vain valoisuus, kroma ja värisävy.

Käännteismalli saadaan muodostettua, mikäli sauvasoluvasteiden vaikutus jätetään huomioimatta. Huntin (1991, 257) mukaan näin voidaan tehdä, mikäli luminanssitermi $5L_A$ saa 10 cd/m² korkeampia arvoja. Useissa tarkkaa arviointia vaativissa värituotantosovelluksissa luminanssitaso on merkittävästi korkeampi.

Käännteismalli voidaan muodostaa myös suorittamalla joidenkin käännteismallin osien peräkkäisapproksimoiteja. Useimmissa sovelluksissa on kuitenkin yksinkertaisempaa suorittaa peräkkäisapproksimoiteja koko mallille, iteroiden kunnes vaikutelma-attribuuteista saadaan tristimulusarvot. Iterointi on kuitenkin suurille datajoukoille hidasta. Laskentanopeutta voidaan kasvattaa käyttämällä normaalin ja käännteismallin perusteella rakennettua, kolmiulotteista taulukkoa (LUT, lookup-table), ja sen sisältämien arvojen interpolointia. Kuitenkin hidas taulukon laskenta uusiin katseluolosuhteisiin tekee Huntin värivaikutelmamallista sopimattoman joihinkin sovelluksiin. [Fairchild 1998, 261-262]

Huntin mallin laajuudesta aiheutuvan kompleksisuuden lisäksi mallin käytettävyyttä heikentää useissa tilanteissa tiettyihin olosuhteisiin optimoitujen parametriarvojen tuntemattomuus. Approksimoitujen parametreja käytettäessä malli voi suoriutua myös erittäin huonosti. [Fairchild 1998, 264-265]

5.3 LLAB

Luo et al. (1996) julkaisivat ensimmäisen version LLAB-värivaikutelmamallista. Tämä värivaikutelmamalli koostuu BFD-kromaattisen mukautumisen mallista ja muunnellusta CIELAB-avaruudesta. LLAB:in suorituskykyä testattiin LUTCHI-datajoukolla, ennustamalla mallin avulla erilaisissa olosuhteissa vaikuttavia valonlähteen, ympäristön, akromaattisen taustan, näyteen koon ja luminanssitason vaikutuksia. Tutkimuksen mukaan LLAB:in suorituskyky oli samanlainen Huntin värivaikutelmamallin kanssa. LLAB ei kuitenkaan sisällä matalilla luminanssitasoilla vaikuttavan sauvasolvasteen huomiointia Huntin mallin tavoin.

Seuraavassa kuvatut LLAB:in ominaisuudet ovat Fairchildin [1998, 292-299] kuvauksen mukaisia, pääosin parannellusta LLAB-mallista.

LLAB pohjautuu RLAB-värivaikutelmamalliin. RLAB, ja näin myös LLAB, on CIELAB:in kehitetty versio, joka pyrkii parantamaan erityisesti CIELAB:in päivänvalosta poikkeavissa valaistusolosuhteissa huonoja ennusteita antavaa kromaattisen mukautumisen mallia. LLAB onkin laajennus CIE:n kolorimetriaan ollen suhteellisen yksinkertainen malli. Malli on suunniteltu yleiskolorimetriseksi malliksi, joka sisältää myös värierojen laskentamallin.

LLAB:in sisältämän BFD-kromaattisen mukautumisen mallin avulla suoritetaan tristimulusarvojen muunnos RGB-arvoiksi, joista lasketut, mukautuneet arvot ilmaistaan $R_rG_rB_r$ -muodossa.

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{vmatrix}$$

$$M = \begin{vmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{vmatrix}$$

LLAB:issa käytettyjen RGB-signaalien, jotka eivät täysin vastaa fysiologisia tappisoluvasteita, lisäksi toinen mukautumismallille ominainen piirre on muunnoksessa käytetty tristimulusarvojen normalisointi Y:n suhteen.

Mukautuneet RGB -signaalit, $R_rG_rB_r$, ilmaistaan testinäytteen olosuhteessa havaittua väriä

vastaavana värinä (corresponding color) määritellyissä referenssiolosuhteissa (CIE:n illuminant D65; $X_{0r}=95.05$, $Y_{0r}=100.0$, $Z_{0r}=108.88$). Mukautuneet arvot saadaan seuraavien kaavojen mukaisesti.

$$R_r = [D(R_{0r} / R_0) + 1 - D]R$$

$$G_r = [D(G_{0r} / G_0) + 1 - D]G$$

$$B_r = [D(B_{0r} / B_0^\beta) + 1 - D]B^\beta$$

Määriteltävä valaistuksen mitätöinti-parametri, D, saa arvon 1.0 valaistuksen mitätöinti-ilmion esiintyessä, jolloin mukautuminen valonlähteeseen on täydellistä. Mikäli mukautumista ei tapahdu, D määritellään nolllaksi.

Pitkien ja keskipitkien aallonpituuksien signaaleille, R_r ja G_r , suoritetaan yksinkertainen von Kries -tyyppinen muunnos, toisin kuin lyhyen aallonpituuden signaaleille, B_r , sen laskentakaavan ollessa epälineaarinen. Eksponentti, β , riippuu mukautumisesta seuraavasti:

$$\beta = (B_0 / B_{0r})^{0.0834}$$

Ennen vastaväridimensioiden laskemista muunnetaan $R_r G_r B_r$ -arvot vielä $X_r Y_r Z_r$ -tristimulusarvoiksi.

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} R_r Y \\ G_r Y \\ B_r Y \end{pmatrix}$$

LLAB:in vastaväridimensiot ovat muunneltuja CIELAB-kaavoja:

$$L_L = 116f(Y_r / 100)^z - 16$$

$$z = 1 + F_L (Y_b / 100)^{1/2}$$

$$A = 500[f(X_r / 95.05) - f(Y_r / 100)]$$

$$B = 200[f(y_r / 100) - f(Z_r / 108.88)]$$

missä

$$f(\omega) = (\omega)^{1/F_s}, \text{ kun } \omega > 0.008856$$

ja

$$f(\omega) = \left[\left(0.008856^{1/F_s} - 16/116 \right) / 0.008856 \right] \omega + 16/116, \text{ kun } \omega \leq 0.008856$$

[Fairchild 1998, 294-295]

Vastaväridimensioiden laskentakaavat ovat yksinkertaisia, sillä useita tarvittavia parametreja määritellään taulukkoarvojen perusteella. Taulukkoarvoja tarvitaan valoisuusinduktiokertoimelle (lightness induction factor), F_L ja ympäristön induktiokertoimelle, F_s sekä värikyyden laskennassa kromainduktiokertoimelle, F_c . Myös mukautumismallissa tarvittava valaistuksen mitätöinti -tekijälle, D , on taulukoitu arvoja. Parametrien arvoja löytyy erilaisille katseluolosuhteille, kuten kuville, näyttölaitteille ja heijastetuille kuville valaistustasoltaan vaihtelevilla ympäristöillä. LLAB:issa voidaan laskea vaikutelma-attribuutteja valoisuudelle, kromalle, värikyydelle, saturaatiolle ja värisävylle.

LLAB on suhteellisen yksinkertainen, mahdollisesti tarkan kromaattisen mukautumisen mallin sisältävä värivaikutelmamalli, joka huomioi ympäristön ominaisuuksia. Malli ei kuitenkaan huomio Stevensin efektiä, epätäydellistä mukautumista, Helmholtz-Kohlrausch -efektiä, eikä Helson-Judd -efektiä. Lisäksi LLAB:ista ei voi muodostaa käänteismallia analyttisesti, mikä vähentää merkittävästi mallin yleiskäyttöisyyttä. [Fairchild 1998, 296-299]

5.4 CIECAM97s

CIECAM97s värivaikutelmamalli syntyi tarpeeseen saada CIE:n suositus yleisesti käytettävästä värivaikutelmamallista. Mallin luoneen CIE TC1-34:n (Technical Committee) alkuperäinen tarkoitus oli julkaista laaja CIECAM97c (comprehensive) -malli, joka huomioisi Huntin mallin tavoin lukuisia värivaikutelmailmiöitä sekä CIECAM97s (simple) -malli käytettäväksi esimerkiksi laiteriippumattomissa kuvantuottosovelluksissa (color imaging). Laajempaa mallia ei kuitenkaan koskaan julkaistu. [Fairchild 2005, 252-255]

Seuraavassa on esitetty CIECAM97s laskentamalli karkeasti Fairchildin (2005, 252-260) esityksen mukaan.

5.4.1 Mallin tarvitsemat lähtötiedot

CIECAM97s malli tarvitsemiä lähtötietoja ovat:

- mukautumiskentän luminanssi, L_A , jonka oletetaan yleensä olevan 20% mukautumiskentän valkoisen luminanssista
- näytteen ja valkoisen trisimulusarvot lähtöolosuhteissa, XYZ ja $X_wY_wZ_w$
- taustan suhteellinen luminanssi lähtöolosuhteissa, Y_b
- ympäristön vaikutusta huomioiva vakio, c
- kromaattisen induktion kerroin, N_c
- kirkkauskontrastikerroin, F_{LL}
- mukautumisasteen määrittelevä kerroin, F

c , N_c , F_{LL} ja F saavat arvoja taulukosta. [Fairchild 2005, 255-256]

5.4.2 Mukautumismalli

Kromaattisen mukautumisen mallin alussa lasketaan referenssiolosuhteisiin mukautuneet arvot, $R_cG_cB_c$, joista saadaan reseptoritasoa korkeamman tason mukautumismekanismen huomioivat, jälkimukautuneet, tappisoluvasteet (post-adaptation cone responses), R'_a, G'_a, B'_a .

Ensin näytteen ja valkoisen XYZ-arvot normalisoidaan ja muunnetaan RGB-tappisoluvasteiksi seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_B \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix}, \text{ missä } M_B = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix}$$

Kromaattisen mukautumisen malli noudattelee von Kriesin mallin ideaa. Lyhyen aallonpituuden kanavan vaste on kuitenkin epälineaarinen riippuen eksponentista p .

$$R_c = [D(1.0/R_w) + 1 - D]R$$

$$G_c = [D(1.0/G_w) + 1 - D]G$$

$$B_c = [D(1.0/B_w^p) + 1 - D]B^p$$

$$p = (B_w / 1.0)^{0.0834}$$

Mukautumisaste, D, asetetaan 1.0:ksi, kun mukautuminen on täydellistä tai valaistuksen mitätöinti -ilmiö esiintyy. Epätäydelliselle mukautumiselle voidaan laskea arvo mukautumiskentän luminanssin L_a ja taulukosta saatavan, mukautumista määrittelevän F-termin avulla:

$$D = F - F / [1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2 / 300)]$$

Saaduista referenssiolosuhteen $R_c G_c B_c$ arvoista lasketaan Hunt-Pointer-Estevez -tappisoluvasteet ennen jälkimukautuneiden $R'_a G'_a B'_a$ -tappisoluvasteiden laskemista (jotka lasketaan edellisten kaavojen kautta myös valkoiselle myöhempiä laskutoimituksia varten.)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_H M_B^{-1} \begin{bmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{bmatrix} \text{ missä } M_H = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$R'_a = \frac{40(F_L R' / 100)^{0.73}}{[(F_L R' / 100)^{0.73} + 2]} + 1$$

$$G'_a = \frac{40(F_L G' / 100)^{0.73}}{[(F_L G' / 100)^{0.73} + 2]} + 1$$

$$B'_a = \frac{40(F_L B' / 100)^{0.73}}{[(F_L B' / 100)^{0.73} + 2]} + 1$$

$$k = 1 / (5L_A + 1)$$

$$F_L = 0.2k^4 (5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2 (5L_A)^{1/3}$$

Myöhemmissä kaavoissa tarvittavia kertoimia, kuten taustan induktiokerroin, n , tausta- ja kromaattinen kirkkausinduktiokerroin N_{bb} ja N_{cb} sekä eksponentiaalisen epälinearisuuden tekijä, z , saadaan seuraavasti:

$$n = Y_b / Y_w$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2}$$

$$z = 1 + F_{LL} n^{1/2}$$

5.4.3 Vastaväridimensiot ja vaikutelma-attribuutit

Punainen-virheä ja keltainen-sininen -dimensiot, a ja b saadaan seuraavasti

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a)$$

Värisävykulma h , akromaattinen vaste A (sekä vastaavasti A_w valkoiselle), valoisuus, J ja kirkkaus, Q , lasketaan yksinkertaisilla kaavoilla:

$$h = \tan^{-1}(b/a)$$

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 2.05]N_{bb}$$

$$J = 100(A/A_w)^{cz}$$

$$Q = (1.24/c)(J/100)^{0.67}(A_w + 3)$$

Saturaatio, s , kroma, C ja värikkyys M saavat seuraavan muodon:

$$s = \frac{50(a^2 + b^2)^{1/2} 100e(10/13)N_c N_{cb}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a}$$

$$C = 2.44s^{0.69}(J/100)^{0.67n}(1.64 - 0.29^n)$$

$$M = CF_L^{0.15}$$

Eksentrisyykkertoimen (eccentricity factor), e , laskennassa tarvitaan värisävykulman perusteella määriteltyjen taulukkoarvojen lineaarista interpolointia.

Vaikka CIECAM97s ei aivan mahdollista analyttisen käänteismallin luontia, sen käänteismalli on paljon aiempien mallien likimääräisiä muunnoksia yksinkertaisempi ja tarkempi.

Vaikka CIECAM97s on suhteellisen yksinkertainen malli, se mahdollistaa useiden vaikutelma-attribuuttien (J, Q, C, M, s ja h) ennustamisen ja huomio useita mukautumis-, ympäristö- ja luminanssiiriipuvaisia ilmiöitä. Malli ei kuitenkaan huomio korkeiden luminanssitasojen aiheuttamaa vaalenemisilmiötä (bleaching), hämärässä vaikuttavien sauvasolujen vaikutusta eikä esimerkiksi Helson-Judd-efektiä. [Fairchild 2005, 255-259]

CIECAM97s-malli tuli nopeasti käyttöön kaupallisissa sovelluksissa, erityisesti kuvateollisuudessa. CIE:n suosituksena myös tutkijoiden osoittama kiinnostus mallia kohtaan oli laajaa. Testaaminen toi laskentamallin rajoitukset nopeasti esille ja synnytti merkittäviä kehitysehdotuksia, mitkä olivat johtamassa julkaistun CIECAM02-mallin syntymiseen. [Fairchild 2005, 264]

5.5 CIECAM02

Nopeasti teollisuussovelluksissa yleistyneen CIECAM97s-mallin arvioinnin ja kehitystyön tuloksena syntyi yksinkertaisempi ja tehokkaampi, CIECAM02-värivaikutelmamalli.

Fairchildin (2005, 265-266) mukaan malli on CIECAM97s-malliin verrattuna laskennallisesti yksinkertaisempi, helpommin käännettävissä ja suoriutuu yhtä hyvin tai paremmin kaikilla saatavissa olevilla datajoukoilla. CIECAM02 onkin tämänhetkinen CIE:n suositus yleisesti käytettävästä värivaikutelmamallista.

Seuraavassa on kuvattu CIECAM02-värivaikutelmamallin laskentakaavoja Fairchildin (2005, 265-277) esityksen mukaan.

5.5.1 Mallin tarvitsemat lähtötiedot

CIECAM02-mallin tarvitsemia lähtötietoja ovat:

- näytteen ja valkoisen pisteen suhteelliset tristimulusarvot, XYZ ja $X_w Y_w Z_w$, (CIE

1931 2° -havainnoijalle)

- mukautumisluminanssi, L_A , (cd/m^2), yleensä 20% näkymän valkoisen kohteen luminanssista
- ympäristön suhteellinen luminanssi (pimeä, hämärä, keskimääräinen)
- päätös, tapahtuuko valaistuksen mitätöinti -ilmiötä.

Yleensä ympäristön suhteellinen luminanssi määritellään keskimääräiseksi tulosteille, hämäräksi CRT-näytöille tai televisioille ja pimeäksi heijastetuille kalvoille, vaikka myös muunlaiset taustamäärittelyt ovat mahdollisia. Kun ympäristön suhteelliseen luminanssiin vaikuttava ympäristö on määritelty, saadaan sen perusteella taulukosta vakiot eksponentiaaliselle epälineaarisuustekijälle (c), kromaattisuusinduktiokertoimelle (N_c) sekä mukautumistason maksimiarvolle (F). [Fairchild 2005, 266-267]

Katseluolosuhde	c	N_c	F
Keskimääräinen ympäristö	0.69	1.0	1.0
Hämärä ympäristö	0.59	0.9	0.9
Pimeä ympäristö	0.525	0.8	0.8

Taulukko 1 Katseluolosuhteen mukaan määräytyviä lähtöparametreja CIECAM02:lle [Fairchild 2005, 267]

5.5.2 Mukautumismalli

Yksi merkittävimmistä muutoksista CIECAM97s -malliin nähden on lineaarisen, von Kries -tyyppisen kromaattisen mukautumismallin käyttö. Lineaarinen mukautumismalli yksinkertaistaa CIECAM02:a ja mahdollistaa sen yksinkertaisen analyttisen käännöksen.

Näytteen ja mukautumisstimuluksen XYZ-arvot muunnetaan ensin RGB-arvoiksi M_{CAT02} -matriisin avulla:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \text{ missä } M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

[Fairchild 2005, 267-268]

Mukautumisasteen määrittelevä D-kerroin asetetaan 1.0:ksi valaistuksen mitätöinti -ilmiön

esiintyessä ja nollassa, kun mukautumista ei tapahdu. Valaistuksen mitätöinnin oletetaan yleensä tapahtuvan objektihavainnoille, kuten katsottaessa tulosteita. Emissivisiä näyttöjä, kuten CRT-näyttöjä katsottaessa, ilmiötä ei esiinny. 0–1 välillä olevia arvoja voidaan laskea seuraavasti:

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) e^{\left(\frac{-(L_A + 42)}{92} \right)} \right]$$

Mukautuneet tristimulusvasteet, $R_C G_C B_C$, jotka kuvaavat vastaavia värejä referenssiolosuhteisessa (CIE illuminant E), lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$R_C = [(100D / R_W) + (1 - D)]R$$

$$G_C = [(100D / G_W) + (1 - D)]G$$

$$B_C = [(100D / B_W) + (1 - D)]B$$

Toinen vaihtoehto on käyttää tässä 100:ksi määriteltyjen arvojen tilalla Y_W -arvoa kussakin kaavassa, millä on pieni vaikutus lopullisiin vaikutelma-attribuutteihin. Lasketattavan yhtenäistämiseksi em. kaavoja suositellaan yleisesti käytettäväksi. [Fairchild 2005, 268-269]

Jatkolaskuissa tarvitaan joitakin katseluolosuhteista riippuvia tekijöitä, kuten luminanssitason mukautumiskerroin, F_L , induktiokertoimet N_{bb} ja N_{cb} ja epälinearisoinen eksponentti z .

$$k = 1 / (5L_A + 1)$$

$$F_L = 0.2k^4 (5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2 (5L_A)^{1/3}$$

$$n = \frac{Y_b}{Y_w}$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2}$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n}$$

Jälkimukautumisen epälineaarisen kompression (post-adaptation nonlinear compression) huomioimiseksi mukautuneet $R_C G_C B_C$ -signaalit muunnetaan M_{CAT02} -määrittämisestä

paremmin tappisoluvasteita vastaaviksi Hunt-Pointer-Estevez -vasteiksi (R'G'B').

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{pmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{pmatrix}$$

$$M_{HPE} = \begin{pmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix}$$

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{pmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{pmatrix}$$

Muunnoksen voi ajatella muuntavan ensin käänteismatriisin avulla $R_C G_C B_C$ -arvot XYZ-arvoiksi, jotka muunnetaan edelleen Hunt-Pointer-Estevez -vasteiksi.

Jälkimukautuneiden $R'_a G'_a B'_a$ -vasteiden laskentakaavat poikkeavat CIECAM97s:n vastaavista hieman, mikä mahdollistaa saturaation yksinkertaisen määrittelyn.

$$R'_a = \frac{400(F_L R'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R'/100)^{0.42}} + 0.1$$

$$G'_a = \frac{400(F_L G'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G'/100)^{0.42}} + 0.1$$

$$B'_a = \frac{400(F_L B'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B'/100)^{0.42}} + 0.1$$

5.5.3 Vastaväridimensiot ja vaikutelma-attribuutit

Vastaväriasteet a ja b saadaan seuraavasti:

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a)$$

Asteina ilmoitettava värisävykulma, h, lasketaan kuten CIELAB ja CIECAM97s -malleissa.

$$h = \tan^{-1}(b/a)$$

Eksentrisyyserroin, e_t , on CIECAM97s:n mukainen. CIECAM02 -mallissa se on kuitenkin muotoiltu analyttisesti seuraavan kaavan mukaisesti:

$$e_t = 1/4 \left[\cos \left(h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3.8 \right] \pi$$

Akromaattinen vaste A, lasketaan mukautuneiden tappisoluvasteiden ja kirkkausinduktio-kertoimen avulla.

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{bb}$$

Valoisuuden laskennassa tarvitaan valkoiselle edellisen kaavan mukaisesti lasketun akromaattisen vasteen A_w lisäksi ympäristökertoimen, c ja eksponentin z taulukkoarvoja

$$J = 100(A/A_w)^{cz}$$

Kirkkauden laskemisessa tarvitaan lisäksi luminanssitason mukautumiskerrointa, F_L .

$$Q = (4/c)\sqrt{J/100}(A_w + 4)F_L^{0.25}$$

Kromaa, C, laskettaessa lasketaan ensin väliarvo t, johon vaikuttavat saturaation lisäksi taustan ja ympäristön kromaattiset induktio kertoimet (N_c ja N_{cb}) sekä eksentrisyyserroin e_t .

$$t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a}$$

$$C = t^{0.9} \sqrt{J/100} (1.64 - 0.29^n)^{0.73}$$

Kromaan suhteessa oleva värikkyys, M, kasvaa Huntin ilmiön mukaisesti mukautumisluminanssin kasvun myötä.

$$M = CF_L^{0.25}$$

Saturaatio, s, saa arvonsa näytteen värikyyden suhteesta sen omaan kirkkauteen

$$s = 100\sqrt{M/Q}$$

[Fairchild 2005, 265-275]

CIECAM97s-malliin nähden merkittävä parannus on CIECAM02:n käänteismallin yksinkertaisuus, mikä on pääosin lineaarisen mukautumismallin ansiota. Yksinkertainen käänteismalli on tärkeä esimerkiksi kuvantuotto-sovelluksissa. Käänteismallin vaiheet, lähettäessä mallin kuvaaman väriavaruuden dimensioina usein käytetyistä JCh (valoisuus, kroma ja värisävy) -arvoista, ovat seuraavat:

1. Lasketaan t lähtien C ja J -arvoista
2. Lasketaan e_t h:sta
3. Lasketaan A lähtien A_w ja J -arvoista
4. Lasketaan a ja b lähtien t, e_t , h ja A -arvoista
5. Lasketaan R'_a , G'_a ja B'_a lähtien A, a ja b -arvoista
6. Lasketaan R' , G' ja B' käyttäen käänteistä epälineaarisuutta
7. Muunnetaan nämä $R_C G_C B_C$ -arvoiksi lineaarisella muunnoksella
8. Käännetään kromaattisen mukautumisen mallin perusteella RGB-arvoiksi, ja niistä saataviksi XYZ-arvoiksi.

Yksityiskohtainen kuvaus käänösprosessista löytyy CIE:n (CIE 2004, cit. Fairchild 2005, 274) CIECAM02-mallin teknisestä raportista. Raportti sisältää myös muita mallin implementoituihin ja parametrien asetukseen liittyviä ohjekuvauksia. Taulukkoarvoja löytyy esimerkiksi näyttölaitteen valkoiselle pisteelle ja mukautumisluminanssille, L_a , (cd/m^2), mikäli näytön katseluympäristö on esimerkiksi hämärät kotiolot tai toimistolle tyypilliset, keskimääräiset valaistusolosuhteet. [Fairchild 2005, 275]

CIECAM02 ennustaa kaikkia samoja värivaikutelmatekijöitä kuin CIECAM97s-malli ja sisältää kaikkien tärkeimpien vaikutelma-attribuuttien laskumahdollisuuden huomioiden mahdollisen epätäydellisen mukautumisen. Kumpaakaan mallia ei ole tarkoitettu Huntin mallin tavoin erittäin korkeiden luminanssitasojen vaalenemisilmion tai hämrien, tappisoluvaiikutteisien valaistusolosuhteiden huomioimiseen. CIECAM02-mallin yksinkertaisempi toteutus ja yhtä hyvä tai parempi suorituskyky CIECAM97s-malliin nähden tekee CIECAM97s-mallin tarpeettomaksi. [Fairchild 2005, 275-276; Li ja Luo 2005]

6 Värierojen laskentamallit

Värieromallien kehittämisen yksi tärkeä tavoite on luoda teollisuuden käyttöön objektiivinen, yksittäiseen, standardin ja vertailtavan värin väliseen ΔE -värieroarvoon perustuva hyväksy-hylkää päätöksentekojärjestelmä. Muita värieromallien tyypillisiä sovelluskohteita ovat metamerismin arvioiminen ja erilaiset värikuvien käsittely- ja tuottosovellukset graafisessa teollisuudessa. Tämän tavoitteen saavuttamisessa on päästy lähemmäksi mallien kehittämisen myötä. [Luo2006; Melgosa et al. 2004]

Koska värierojen määrittelyssä halutaan selvittää ihmisen havaitsemaa eroa värissä, perustuvat myös nämä laskentamallit visuaalisista kokeista saatuihin tuloksiin. Tällaisissa koejärjestelyissä on käytetty värierojen määrittelyyn seuraavanlaisia menetelmiä, joissa

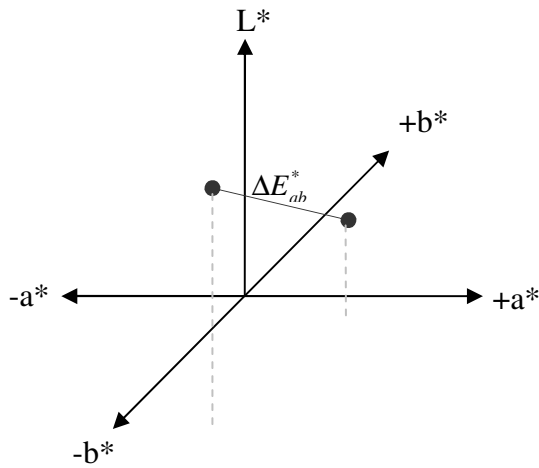
- havainnoija antaa havaitsemilleen kahden näytteen värierolle tai värien väliselle suhteelle numeerisia arvoja.
- havainnoija valitsee lähimmät parit kolmesta tai useammasta näytteestä.
- mitataan samojen/erilaisten näytteiden löytämiseen kuluva aikaa.
- havainnoija säätää harmaan näytteen valoisuutta siten, että sen väriero kiinteään harmaaseen vastaa kahden värillisen näytteen värieroa.

[Griffin ja Sepehri 2002]

6.1 CIELAB ΔE

Ennen vuotta 1976 värieromalleja oli johdettu yli 20. Luo (2006) jakaa ensimmäiset värierojen laskentamallit kolmeen eri tyyppiin: MacAdamsin ellipsejä sovittaviin malleihin, Munsellin dataa sovittaviin malleihin ja lineaarisesti CIE:n tristimulusväriavaruudesta muunnettaviin malleihin. Munsellin dataa sovittavasta ANLAB-mallista johdettiin laajasti käytetty CIELAB:in värieromalli. [Berns 2000, 108-09; Luo 2006]

CIELAB:in sisältämä, visuaalisesti likimääräisesti tasavälinen väriavaruus mahdollistaa värierojen laskennan. Värieroarvot lasketaan kahden näytteen L^* , a^* , b^* -koordinaattien etäisyytenä euklidisessa, 3-ulotteisessa väriavaruudessa.



Kuva 10 Väriero euklidisena etäisyytenä CIELAB-avaruudessa

CIELAB:in väriero, ΔE_{ab}^* , saadaan laskettua seuraavasti:

$$\Delta E_{ab}^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2}$$

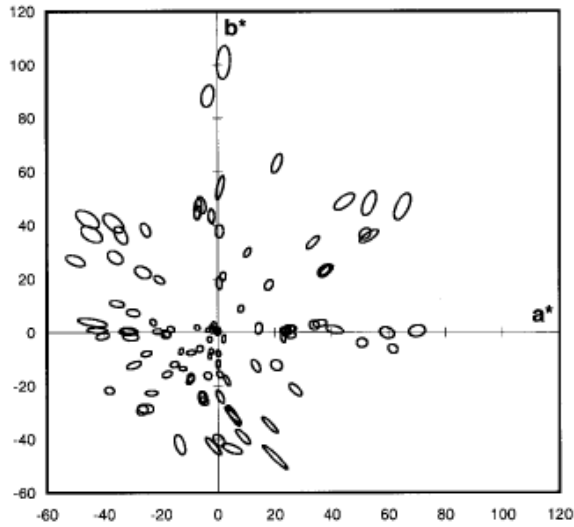
$$\Delta E_{ab}^* = [\Delta L^{*2} + \Delta C_{ab}^{*2} + \Delta H_{ab}^{*2}]^{1/2}$$

missä värisävyero, ΔH_{ab}^* , saa muodon:

$$\Delta H_{ab}^* = [\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}]^{1/2}$$

[Hunt 1991, 76]

Koska CIELAB-avaruus on tunnetusti epäyhtenäinen, yhtä suurilla CIELAB ΔE -arvoilla, eli näytteiden välisillä etäisyyksillä väriavaruudessa, on eroja havaituissa värierojen suuruudessa riippuen näytteiden sijainnista CIELAB:in väriavaruudessa. Epäyhtenäisyyttä havainnollistavat kuvan 11 mukaiset a^*b^* -tasossa kuvatut värierotusellipsit (color discrimination ellipses), jotka kuvaavat väriavaruuden eri osissa havaittuja värejä, jotka havaitaan samana värinä ellipsien sisällä. Värierojen laskennan kannalta ellipsimuoto on ongelmallinen, koska samansuuruinen matka eri puolilla väriavaruutta ei siten vastaa havaittua värieroa, korostuen pienillä värieroarvoilla. Ideaalisen väriavaruuden kuvaama värierotusdata muodostaisi vakiokokoisia ympyröitä. Kuvasta 11 nähdään CIELAB-avaruudessa kuvattujen, vähiten kylläisien värien ellipsien olevan pienimpiä ja suurenevan kroman kasvaessa. [Luo et al. 2001]



Kuva 11 Värierotusellipsejä (color discrimination ellipses) Luon ja Riggin kokeiden pohjalta kuvattuna a* b* -diagrammissa [Luo et al. 2001]

6.2 Painotetut värieromallit

Tutkimustulokset keskikokoisia ja pieniä värieroja sisältävillä joukoilla osoittavat, ettei CIELAB numeroi tarkasti pieniä ja keskikokoisia värieroja. CIELAB:in muunnoksiin perustuvia kehittyneempiä värieromalleja, kuten CMC(1:c), BFD(1:c) ja CIE94 kehitettiin käyttäen aiempia datajoukkoja suurempia näytepari- ja havainnoijamääriä. [Luo 2006]

Painotetuissa värieromalleissa värieroja lasketaan kuitenkin CIELAB-avaruudessa. Havaittua värieroa pyritään korjaamaan painottamalla laskettavien värieronäytteiden valoisuus, kroma ja värisävyarvoja.

6.2.1 CIE94

CIE94 on CMC:n yksinkertaistettu versio. Vertailtavien näytteiden tristimulusarvoista lasketaan ensin CIELAB-mallin mukaiset L*, a* ja b* -arvot. Niiden avulla laskettuja valoisuus, kroma ja värisävyarvoja painotetaan painotusfunktioilla, S_L, S_C ja S_H, joiden avulla havaittujen värierojen yhtenäisyyttä pyritään parantamaan.

CIE94:n laskentakaava on seuraava:

$$\Delta E_{94}^* = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0.045C_{ab}^*$$

$$S_H = 1 + 0.015C_{ab}^*$$

Valoisuus-, kroma- ja värisävyerot lasketaan seuraavasti:

$$\begin{Bmatrix} \Delta L \\ \Delta a^* \\ \Delta b^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_1^* - L_2^* \\ a_1^* - a_2^* \\ b_1^* - b_2^* \end{Bmatrix}$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_1^* - C_2^* \quad \Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}}$$

Kun toista näytettä voidaan pitää vertailukohteena, standardina, C_{ab}^* -arvo on kyseisen näytteen kroma-arvo. Kun kumpaakaan näytettä ei voida pitää vertailun lähtökohtana, lasketaan seuraavan kaavan mukainen geometrinen keskiarvo.

$$C_{ab}^* = C_{ab, \text{standard}}^* \quad \text{tai} \quad C_{ab}^* = \sqrt{C_{ab,1}^* C_{ab,2}^*}$$

[Berns 2000, 120-121; Griffin ja Sepheri 2002]

Katseluolosuhteissa tapahtuvien muutoksien vaikutusta voidaan huomioida parametrisillä tekijöillä k_L , k_C ja k_H , jotka saavat taulukon 2 mukaisissa referenssiolosuhteissa arvon 1.0

Valonlähde	CIE:n illuminant D65-simulaattori
Valaistusvoimakkuus	1000 lx
Havainnoija	Normaali värinäkö
Katselumoodi	Objekti
Näytteen koko	4° visuaalista kulmaa suurempi
Näytteen erottelu	Suora reunakontakti
Näytteen värieron suuruusluokka	0–5 CIELAB-yksikköä
Näytteen rakenne	Ei näkyvää kuviointia tai epäyhtenäisyyttä

Taulukko 2 CIE:n määrittelemät referenssiolosuhteet CIE94-värieromallille [Fairchild 1998, 95]

Parametreille k_L , k_C ja k_H voidaan antaa tiettyyn spesifiseen katseluolosuhteeseen määriteltyjä, yhdestä poikkeavia arvoja, kun halutaan korjata esimerkiksi näytteen koon, tekstuurin tai erottelun (separaatio) aiheuttamaa vaikutusta väriin. CIE94-värieromalli on parantanut CIELAB:in värieroarviointia erityisesti teollisuusolosuhteisiin määritellyillä parametreilla. [Fairchild 1998, 94-95; Melgosa 2000]

6.2.2 CIEDE2000

Vuonna 1998 perustettiin CIE:n tekninen komitea TC 1-47 kehittämään edelleen värieromalleja. Lukuisia laajoja ja luotettavia datajoukkoja apuna käyttäen syntyi CIEDE2000-malli, josta tuli CIE:n suositus vuonna 2001. [Luo 2006]

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right) \right]^{1/2}$$

[Melgosa et al. 2004]

CIEDE2000-mallissa on CIE94-mallin sisältämien värisävyn ja kroman painotusfunktioiden lisäksi rotaatiotermin, R_T , joka parantaa sinisen alueen kroma- ja värisävyeroja. Lisäksi CIELAB:iin nähden parannuksena on a^* -akselin uudelleenskaalaus, mikä vaikuttaa pääasiassa matalakromaisiin, lähellä harmaata oleviin, väreihin. [Melgosa et al. 2004]

Tutkimuksessa, jossa käytettiin CIEDE2000-mallin kehityksessä käytettyä yhdistettyä datajoukkoa, osoitettiin, että CIE94-mallin tuoma parannus CIELAB:in euklidisen etäisyyteen perustuvan värieroon on merkittävämpi kuin CIEDE2000:n tuoma parannus CIE94-malliin nähden. Molemmissa malleissa tärkein kehitys on kromaerokorjauksen ansiota. [Melgosa et al. 2004]

CIE94 ja CIEDE2000 -mallit ovat useisiin käytännön tilanteisiin suhteellisen monimutkaisia, mutta lähitulevaisuudessa ongelma saattaa ratketa uusien lähestymistapojen myötä. [Melgosa et al. 2004]

6.3 Värivaikutelmamallien ja värieromallien yhdistämisestä

Yksinkertaisen CIELAB-värivaikutelmamallin jälkeen julkaistuja lukuisia värivaikutelmamalleja ei ole yleensä tarkoitettu värierojen laskentaan. Eräs poikkeus on

vuonna 1996 julkaistu suhteellisen yksinkertainen LLAB-värivaikutelmamalli, johon on sisällytetty laskentakaavat värierojen laskentaan.

Myös laajempien värivaikutelmamallien avulla värierojen arvioiminen on kuitenkin mahdollista, koska värivaikutelmamallin sisältämien vaikutelma-attribuuttien perusteella voidaan muodostaa kolmiulotteinen, yhtenäinen väriavaruus. [Luo et al. 2006]

6.3.1 LLAB:in värieromalli

LLAB pitää sisällään muunnellun CIELAB-väriavaruuden, jossa värieroja voidaan laskea seuraavasti:

$$\Delta E_L = \left[(\Delta L/l)^2 + \Delta A_L^2 + \Delta B_L^2 \right]^{1/2}$$

Valoisuuden painokerroin, l , asetetaan värieron suuruusluokan mukaan. Havaittavilla värieroilla $l=1.0$, hyväksyttävillä värieroilla $l=1.5$ ja suurilla värieroilla $l=0.67$. [Fairchild 1998, 297]

Luo et al. (1996) testasivat LLAB:in suorituskykyä myös värierodatajoukoilla, jolloin se osoitti vastaavaa suorituskykyä kuin CMC, CIE94 ja BFD.

6.3.2 CIECAM02:n värieromalleja

CIECAM97s- ja CIECAM02 -värivaikutelmamallien sopivuutta värierojen laskentaan on myös tutkittu [Li et al. 2003, cit. Luo et al. 2005]. Tutkimuksessa käytettiin kahta värierodatajoukkoa, joista toinen sisälsi suuria (LCD) ja toinen pieniä värieroja (SCD). Näiden perusteella todettiin värivaikutelmamallin vaikutelma-attribuuteista valoisuuden, värikyyden ja värisävykulman soveltuvan parhaiten yhtenäisen polaariväriavaruuden muodostamiseen. Tutkimus osoitti lisäksi CIECAM02-mallin suoriutuvan CIECAM97s-mallia paremmin kaikissa väriavaruuden osissa.

Luo et al. (2005) julkaisivat kaksi CIECAM02-malliin perustuvaa yhtenäistä väriavaruutta, jotka olivat hieman muunneltuja versioita aiemmista LCD- ja SCD -dataa sovittavista avaruuksista. Lisäksi he testasivat uusia väriavaruuksia käyttäen värierodatajoukkoa illuminant A -valaistuksessa. Tällä hetkellä ei ole olemassa CIE:n suositusta värierojen laskemiseen päivänvalosta poikkeavissa valaistusolosuhteissa. [Luo et al. 2005]

Tutkimuksessa käytettiin lukuisia datajoukkoja. LCD-datajoukko koostui kuudesta datajoukosta (CII-Zhu, OSA, Guan, BADB-Textile, Pointer ja Munsell), joissa oli pintamateriaalien, kuten tekstiili- maali- ja mustenäytteiden lisäksi CRT-näytöllä tuotettuja värejä, CIELAB ΔE -arvon vaihdellessa 9:stä 14:ään. SCD-data koostui CIEDE2000-mallin luonnissa käytettyjen datajoukkojen (BFD, RIT-Dupont, Leeds ja Witt) yhdistelmästä. SCD-datajoukko koostui 3652 näyteparista, joiden keskimääräinen CIELAB ΔE -arvo oli 2,5. [Luo et al. 2005]

Näiden datajoukkojen avulla muodostettiin yhtenäisiä väriavaruuksia ja värieromalleja, jotka pohjautuivat CIECAM02:n valoisuus (J), värikkyys(M) ja värisävykulma (h) -attribuuttien määrittelemiin dimensioihin. Tarkoituksena oli johtaa malli, joka säilyttäisi yksinkertaisen rakenteen ja tarvitsisi vain vähäisiä muutoksia alkuperäiseen CIECAM02:iin. Näin saatiin kaksi väriavaruutta, CAM02-LCD ja CAM02-SCD.

Luo et al. (2006) jatkoivat tutkimusta ja muodostivat SCD- ja LCD -datajoukoista yhdistettyä UCS-datajoukkoa (uniform color space) sovittavan värieromallin. CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCD -väriavaruuksissa laskettaville värieroilte muotoiltiin kaavat, joiden yleinen muoto on seuraavanlainen:

$$\Delta E' = \sqrt{(\Delta J' / K_L)^2 + \Delta a'^2 + \Delta b'^2}$$

missä

$$J' = \frac{(1 + 100c_1)J}{1 + c_1J}$$

$$M' = (1/c_2) \ln(1 + c_2M)$$

$$a' = M' \cos(h), \quad b' = M' \sin(h)$$

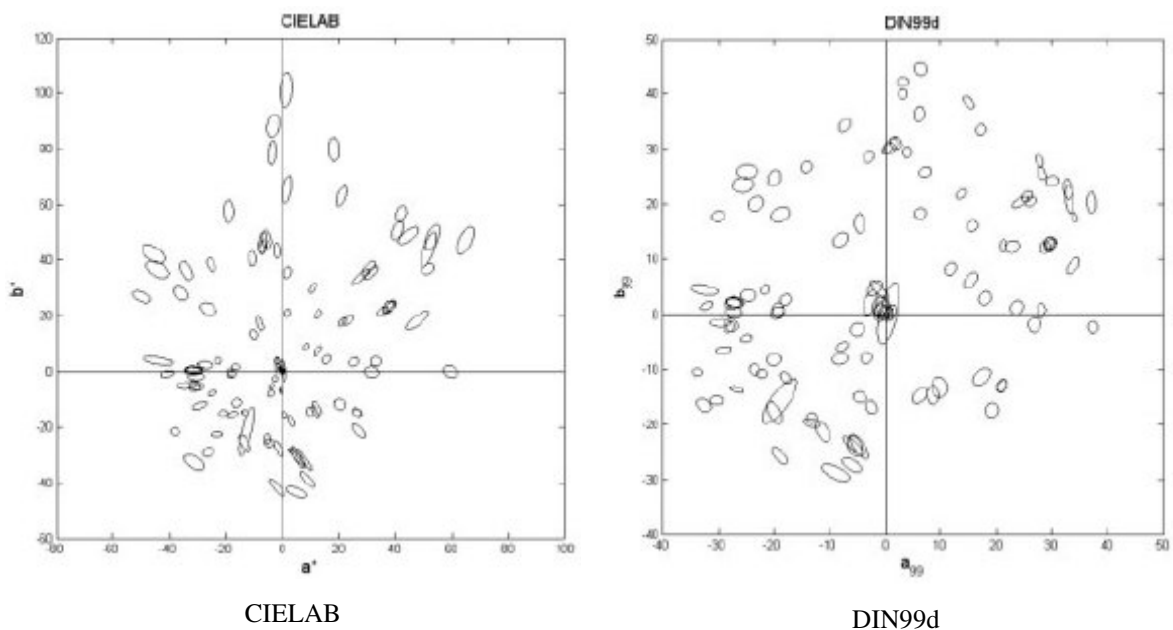
J, M ja h ovat CIECAM02:n valoisuus, värikkyys ja värisävykulma. $\Delta J'$, $\Delta a'$ ja $\Delta b'$ lasketaan J' , a' ja b' -eroina ”standardin” ja vertailunäytteen välillä. K_L , c_1 ja c_2 -vakiot saavat omat arvonsa kullekin optimoidulle värieromallille (LCD, SCD ja UCS).

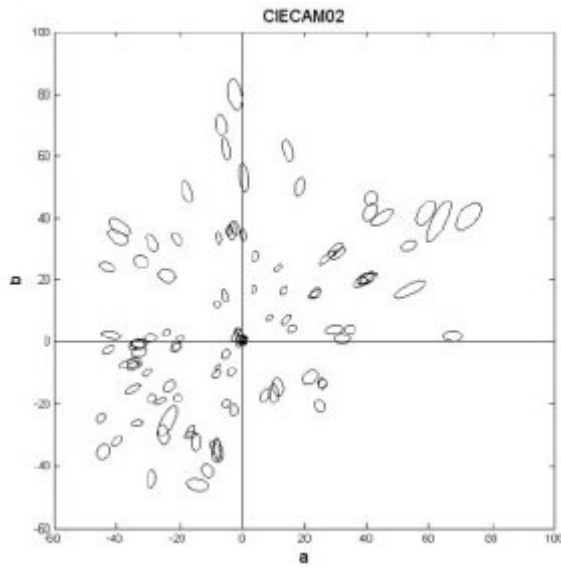
Versiot	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
K_L	0.77	1.24	1.00
c_1	0.007	0.0007	0.007
c_2	0.0053	0.0363	0.0228

Taulukko 3 CIECAM02:n värierojen laskentamalleissa tarvittavia vakioita mallin eri väriavaruusversioille

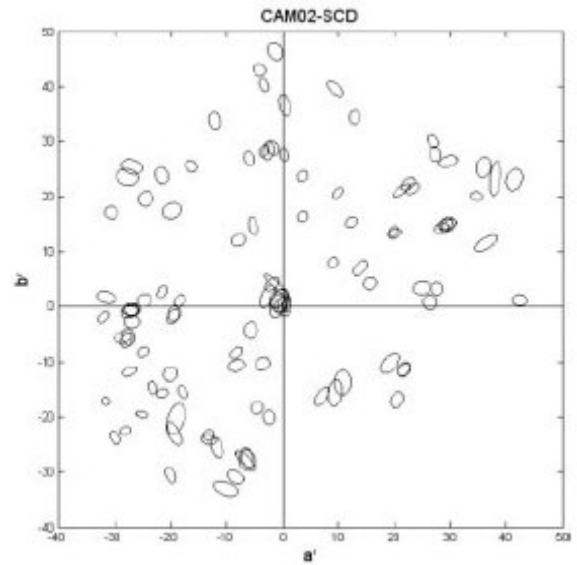
Luo et al. (2006) vertailivat mallien suorituskykyä lukuisiin muihin värieromalleihin (CIELAB, CMC, CIE94, BFD, CIEDE2000, DIN99d, IPT), joiden tuloksena CAM02-LCD ja CAM02-SCD suoriutuivat joko parhaiten tai parhaimpien mallien tavoin ennustaessaan sitä dataa, johon malli oli sovitettu (LCD tai SCD). Myös BFDA datajoukkoa käytettäessä CAM02-LCD ja CAM02-SCD suoriutuivat toiseksi parhaiten BFD-mallin jälkeen. BFD-mallin käyttö on kuitenkin rajoittunut illuminant A:n käyttöön. Myös CAM02-UCS, joka oli kehitetty sovittamaan sekä LCD- että SCD-dataa, antoi tyydyttäviä tuloksia, vain hieman CAM02-LCD ja CAM02-SCD -malleja huonompia LCD- ja SCD-datalle. CAM02-UCS on merkittävä siinä mielessä, että sitä voi käyttää sovelluksiin, jossa värierot vaihtelevat pienistä suuriin. Tällaisia sovelluksia tarvitaan esimerkiksi paino- ja muissa graafisen alan teollisuussovelluksissa. [Luo et al. 2006]

CIECAM02-pohjaisissa värieroavaruuksissa kuvatut aiempien visuaalisten kokeiden värieroellipsit osoittivat, että useimmat ellipseistä CAM02-SCD ja CAM02-LCD -avaruuksissa kuvattuina ovat lähellä vakiokokoisia ympyröitä. Lupaavien tuloksien perusteella CIECAM02 voisi olla hyvä ehdokas yleiseksi värimalliksi kaikkiin kolorimetrisiin tarkoituksiin. [Luo 2006]

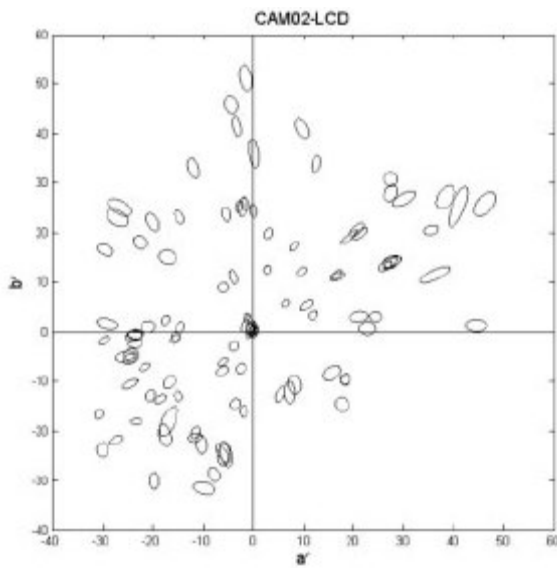




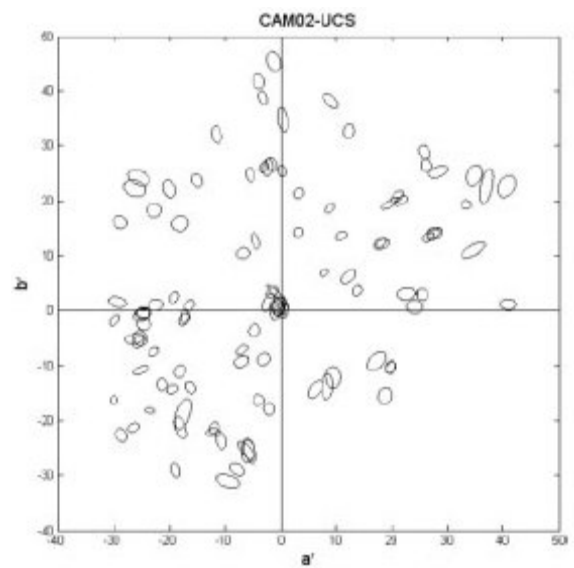
CIECAM02



CAM02-SCD



CAM02-LCD



CAM02-UCS

Kuva 12 Kokeellisia kromaattisuuserotteluellipsejä (chromatic discrimination ellipses) kuvattuna eri väriavaruuksissa. [Luo et al. 2006]

7 Tulevaisuuden suuntauksia

CIECAM97s-värivaikutelmamallin julkaisun jälkeen sen rajoituksia löydettiin nopeasti ja niihin tehtiin parannusehdotuksia, mitkä johtivat CIECAM02-mallin julkaisuun kuuden vuoden kuluttua CIECAM97s-mallin julkaisusta. Koska CIECAM02-mallin kohdalla samanlaajuista kehittämistarvetta ei ole ilmennyt, CIECAM02 tulee säilymään CIE:n värivaikutelmamallisuositukseksi jonkin aikaa. CIECAM02-malli ennustaa hyvin tämänhetkistä visuaalista dataa, joten mallin merkittävä kehittäminen vaatii täsmällisempää tai nykyistä merkittävästi laajempaa kokeellista dataa. Visuaalisen koedatan muodostaminen on kuitenkin vaikeaa johtuen luonnollisesta havaittajien välisestä vaihtelusta. [Fairchild 2005, 277]

7.1 Kuvavaikutelmamallit

Fairchild ja Johnson (2004) arvioivat, että seuraavat kehitysasteet värivaikutelman mallintamisessa ja kuvanlaadun mittauksessa (image quality metric) eivät perustu värivaikutelmamallien kehitykseen. Tutkimus onkin suuntautunut kompleksisempien, kuvamaisien havaintojen ennustamiseen ja laajempaan katseluolosuhteiden huomioimiseen malleissa. Tämä kuvavaikutelman mallintaminen (image appearance modeling) laajentaa värivaikutelmamalleja katseluolosuhteisiin, jotka vastaavat paremmin luonnollisen näkymän kompleksisia rakenteellisia (spatial) ja ajallisia (temporal) ominaisuuksia.

Rakenteellisille ja aikaan liittyville ominaisuuksille on aiemmin kehitetty malleja niiden vaikutuksesta näköhavaintoon, kuitenkin värivaikutelmasta erillisinä. Esimerkiksi S-CIELAB-malli suunniteltiin rakenteellisten ominaisuuksien, kuten painotuotteiden rasteripisteiden esikäsittelijäksi CIE:n värieromalleihin. Konvoluutiokerneleihin perustuen S-CIELAB:illa arvioitiin kontrastiherkkyysfunktioita (contrast sensitivity function), jotka mahdollistavat ihmiselle näkymättömän informaation poistamisen, painokuvan tapauksessa erivärisien mustepisteiden leviämisen tasaiseksi väriksi. Aikaan liittyvällä dynaamisella mukautumisella on merkitystä esimerkiksi liikkuvan kuvan värien havaitsemisessa. Kuvavaikutelmamallien tarkoitus on yhdistää näitä tekijöitä ennustavat mallit ja värivaikutelmamallit. [Fairchild 2005, 336]

Värivaikutelmamallien sisältämien attribuuttien, kuten valoisuus, kirkkaus, värikyvyys,

kroma ja värisävy, lisäksi kuvavaikutelmamallit laajentavat listaa tuomalla mukaan attribuutteja, kuten terävyys, rakeisuus, kontrasti ja resoluutio.

Fairchild (2005, 340-346) esittelee iCAM-kuvavaikutelmamallin yleisen rakenteen. Digitaalisen kuvan tapauksessa kuvan määrittelevien pikseliarvojen lisäksi käytetään kuvasta muodostettuja, ”sumeita”, low-pass kuvia, jotka sisältävät tietoa absoluuttisesta luminanssista, mikä mahdollistaa kromaattisen mukautumisen asteen, simultaanikontrastin sekä Huntin ja Stevensin efektien ennustamien värikyyden ja kirkkauskontrastin muutoksien huomioimisen tarkemmin kuvan alueella. Rakenteellisia ominaisuuksia huomioimaan käytetään rakenteellista suodatusta (spatial filtering) poistamaan silmälle näkymättömän rakenteellisen taajuuden aiheuttamaa variaatiota eli ennustamaan leviämislmiötä (spreading). Käytännön sovelluksista iCAM-mallia on käytetty esimerkiksi HDR-kuvien (high dynamic range) renderöintiin.

8 Pohdinta

Värivaikutelmatekijöitä voidaan huomioida värierojen mittaamisessa eri laajuudessa. CIE:n vuonna 1976 julkaisema CIELAB-malli, joka kehitettiin juuri värierojen mittaamistarkoituksiin, täyttää myös CIE:n määritelmän värivaikutelmamallista. Väriässä tapahtuvia muutoksia se huomio ainoastaan mukautumismallin avulla. Kromaattisen mukautumisen vaikutus värivaikutelmaan on kuitenkin muita väriin vaikuttavia tekijöitä merkittävämpi. Tämän johdosta CIELAB:in ΔE -värierojen laskentamalli soveltuu useisiin värieromittaussovelluksiin, jossa on olennaista huomioida vain valaistuksen väriässä tapahtuvia muutoksia. Vaikka CIELAB:in määrittelemä väriavaruus on tunnetusti vain likimain yhtenäinen, se on kuitenkin edelleen CIE:n suositus käytettäväksi sovelluksiin, jossa tarvitaan yhtenäistä väriavaruutta.

CIELAB:in väriavaruuden epäyhtenäisyyden aiheuttama epätarkkuus yksinkertaiseen, väriavaruudessa mitattuun etäisyyteen perustuvaan, ΔE -värieroarvoon johti painotettujen värieromallien syntyyn. Niiden perustana on kuitenkin edelleen CIELAB-avaruus, mutta painokertoimien avulla värierolaskentamalli voidaan optimoida tiettyihin olosuhteisiin, jolloin mallin avulla lasketut värierot saadaan vastaamaan paremmin havaittua värieroa. Näin myös värivaikutelmailmiöitä voidaan huomioida, mutta koska se vaatii kyseisiin olosuhteisiin sopivien parametrien määrittelemisen, painotettujen värimallien käyttö ei sovellu muuttuvien katseluolosuhteiden ennustamiseen. Useisiin teollisuussovelluksiin on

kuitenkin määritelty parametreja. Uusimmat painotetut värierojen laskentamallit, kuten CIE:n värierojen laskentamallisuusositus, CIEDE2000, ovatkin tuoneet merkittävää parannusta muuttumattomissa olosuhteissa tapahtuviin värieromittauksiin. Vaikka painotettujen värieromallien pohjalla oleva epäyhtenäinen CIELAB-väriavaruus saisi uuden, yhtenäisemmän kilpailijan, jota CIE suosittelisi CIELAB-avaruuden käytön sijaan, todennäköisesti nykyisten, ”riittävän hyvien”, CIELAB-avaruuspohjaisten sovelluksien käyttäminen jatkuisi vielä pitkään. Bernsin (2000, 121) mukaan yhtenäisemmän väriavaruuden saaminen värierojen laskennan lähtökohdaksi olisi kuitenkin painotettuja värieromalleja parempi ratkaisu. Värierojen laskennan teollisuussovelluksien siirtyminen yhtenäisemmän väriavaruuden päälle toisi kuitenkin painotettuihin värieromalleihin siirtymiseen nähden enemmän kustannuksia ohjelmistopäivitysten ja koulutuksen muodossa. CIE:n tekninen komitea 1-55 on perustettu teollisuuden värierolaskenta-sovelluksiin sopivan, yhtenäisen väriavaruussuosituksen muodostamiseksi.

Laajempien värivaikutelmamallien vaikutelma-attribuutteihin perustuva väriavaruus voisi olla ratkaisu yleiseksi kolorimetriseksi väriavaruudeksi. Erilaisten väriin vaikuttavien tekijöiden, kuten luminanssitason, valaistuksen värin ja taustan ominaisuuksien huomioiminen laajentaa mallien yleiskäyttöisyyttä. Koska vaikutelma-attribuutit määrittelevät havaitun värin, värivaikutelmamallin väriavaruus mahdollistaa tietyssä katseluolosuhteissa nähtävän värieroparin värieromäärityksen lisäksi erilaisissa katseluolosuhteissa olevien värinäytteiden värierojen laskemisen. Värivaikutelmamalleja voidaankin käyttää esimerkiksi metamerian ennustamiseen, mikä on tietyissä värikriittisissä sovelluksissa arvokas tieto. Koska kaikkia värivaikutelmamallien vaatimia tietoja ei saada laskettua mittaustiedon perusteella, myös värivaikutelmamallit vaativat asetettavien parametrien muodossa tietoa esimerkiksi värivaikutelmailmiöiden esiintymisestä tietyssä tilanteessa. Yksinkertaisemmissa värivaikutelmamalleissa on kuitenkin usein määritelty taulukkoarvoja, joita käyttämällä voidaan saada hyviä ennusteita, vaikka taulukkoarvot eivät olisikaan juuri tiettyihin katseluolosuhteisiin optimoituja.

Erityisesti CIECAM02-värivaikutelmamalliin perustuvat väriavaruudet vaikuttavat tuoreiden tutkimusten mukaan lupaavilta ehdokkailta yleiskolorimetrisiksi väriavaruuksiksi. CIECAM02-pohjaisten väriavaruuksien värieromallit ovat osoittautuneet useissa tilanteissa suorituskyvyltään useita tällä hetkellä laajasti käytettäviä värieromalleja paremmiksi.

CIECAM02 suhteellisen yksinkertainen värivaikutelmamalli, mikä on myös sen vahvuus. Käytännön sovelluksissa se tulee toimimaan taustalla esimerkiksi Windowsin tulevan Vista-käyttöjärjestelmän värinhallintajärjestelmässä. Erilaisten laitteiden ominaisuuksien, kuten näyttöjen valkoisen pisteen tai tulostuspaperin värin sekä katseluympäristön valaistusominaisuuksien huomioiminen värinhallintaketjussa vaatii värivaikutelmamallin käyttöä. Värinhallintajärjestelmässä värierojen laskentaa tarvitaan esimerkiksi, kun suoritetaan sellaisen tulostettavan kuvan, joka sisältää tulostimen toistoalan ulkopuolisia värejä, muuntaminen tulostimella toistettaviksi väreiksi siten, että ero havaitussa värissä olisi mahdollisimman pieni.

Värivaikutelmamalleja laajentamaan tarkoitettut, tuoreet kuvavaikutelmamallit saattavat tuoda myös värierojen laskentaan uusia ulottuvuuksia kuvamaisten, kompleksisten näytteiden rakenteellisten ominaisuuksien huomioimisen osalta. Oletettavaa kuitenkin on, että värivaikutelmamallit ja niiden värieromallit eivät tule katoamaan, vaan niitä käytetään sovelluksissa, johon niiden huomioimien värivaikutelmatekijöiden vaikutuksen ennustaminen riittää.

Lähteet

Alman D. H., Berns R. S., Snyder G. D, Larson W. A. (1989) *Performance testing of color-difference metrics using a color tolerance dataset*. Color Research & Application, Volume 14, s. 139-151

Berns Roy S. (2000) *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology, 3rd ed.* New York, Wiley, cop. 2000, 247 s. ISBN: 0-471-19459-X

CIE (2004), CIE TC8-01 Technical Report, *A Colour Appearance Model for Color Management Systems: CIECAM02*. CIE Pub. 159 (2004)

Fairchild Mark D. (1998) *Color appearance models*. Reading (MA): Addison-Wesley 417 s. [Ensimmäinen painos 1997] ISBN 0-201-63464-3

Kirjaan tehdyt korjaukset saatavissa: <http://www.cis.rit.edu/fairchild/CAM.html>

Fairchild Mark D. (2001) *A revision of CIECAM97s for practical applications* Color Research & Application, Vol. 26, Issue 6, December 2001, s. 418-427

Fairchild M.D. ja Johnson G.M. (2004) *The iCAM framework for image appearance, image differences, and image quality*. Journal of Electronic Imaging, Vol. 13, s. 126-138 [Viitattu 01.06.2006]

Saatavissa: <http://www.cis.rit.edu/mcsl/iCAM/>

Fairchild Mark D. (2005) *Color appearance models 2nd ed.* Chichester, Wiley, 385 s. ISBN:0-470-01216-1

Kirjaan tehdyt korjaukset saatavissa: <http://www.cis.rit.edu/fairchild/CAM.html>

Griffin Lewis D. ja Sepehri Arsalan (2002) *Performance of CIE94 for nonreference conditions*. Color Research & Application, Vol. 27, Issue 2, April 2002, s. 108-115

Hunt R. W. G. (1991) *Measuring Colour - 2nd ed.* New York: Ellis Horwood 313 s. ISBN 0-13-567686-X

Li C., Luo M. R., Cui G. H. (2003) *Colour-Differences Evaluation Using Colour Appearance Models*. The 11th Color Imaging Conference, IS&T and SID, Scottsdale, Arizona, s. 127-131 (2003)

Li C. J. ja Luo M. R. (2005) *Testing the robustness of CIECAM02*.
Color Research & Application, Vol. 30, Issue 2, April 2005, s. 99-106

Luo M. Ronnier, Lo Mei-Chun, Kuo Wen-Guey (1996) *The LLAB (l:c) colour model*.
Color Research & Application, Vol. 21, Issue 6, December 1996, s. 412-429

Luo M. R., Cui G., Rigg B (2001) *The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000*. Color Research & Application, Vol. 26, Issue 5, October 2001, s. 340-350

Luo M. R. (2004) *Tutorial material for Colour Appearance Modeling*. CGIV 2004
Aachen

Luo M. R., Li C., Cui G. (2005) *Combining Colour Appearance Model with Colour Difference Formula*. AIC Colour 05, 10th Congress of the International Colour Association, Granada, Spain, s. 235-240

Luo M. Ronnier, Cui Guihua, Li Changjun (2006) *Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model*. Color Research & Application, Vol. 31, Issue 4, August 2006, s. 320-330

Luo M. Ronnier (2006) *Colour Difference Formulae: Past, Present and Future*. (abstract)
ISCC/CIE Expert Symposium, Ottawa, Ontario
[Viitattu 29.05.2006]
Saatavissa: <http://www.iscc.org/jubilee2006/abstracts.html>

Melgosa Manuel (2000) *Testing CIELAB-based color-difference formulas*.
Color Research & Application, Vol. 25, Issue 1, February 2000, s 49-55

Melgosa Manuel, Huertas Rafael, Berns Roy S (2004) *Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas*. Journal of the Optical Society of America A/Vol. 21, No.12, s.2269-2275

Nayatani Yoshinobu (2006) *Development of chromatic adaptation transforms and concept for their classification*. Color Research & Application Vol. 31, Issue 3, June 2006, s. 205-217

Wyszecki, Günther ja W.S. Stiles (1982) *Color science : concepts and methods, quantitative data and formulae Second Edition*. New York : Wiley, cop., 950 s. ISBN: 0-471-02106-3 (Classics Library Edition)