

Värien teoria ja värimallit

Tietokonegrafikan seminaari kevät 2002

Matti Eskelinen

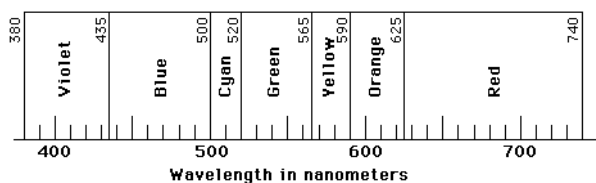
24. huhtikuuta 2002

1 Mitä väri on?

Mitään sellaista kuin väri ei ole olemassa luonnossa. Väri on jotakin mitä me ihmiset liitämme ympärillä olevaan maailmaan ja siinä oleviin kohteisiin. Väri on ihmisen vaste eri taajuiseen valoon, ja valo taas on vain sähkömagneettista säteilyä kaiken muun säteilyn joukossa. Aistimus väristä syntyy ihmisen silmissä ja aivoissa, ja sen takia väri on hyvin henkilökohtainen asia. Jokainen mieltää värit omalla tavallaan, ja jotkut eivät edes pysty näkemään värejä samalla lailla kuin toiset. Tämä kaikki tekee valosta kiehtovan luonnonilmiön, jolla on merkityksensä kaikille ihmisille.

1.1 Värien fysiikkaa

Valo on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on karkeasti välillä 280-1000 nanometriä. Kuvassa 1 on kaavakuva tästä spektristä. Tämän spektrin ääripäässä olevaa valoa, ultraviolettia ja infrapunaista, ihminen ei pysty näkemään. Monokromaattiseksi valoksi sanotaan sellaista säteilyä, joka koostuu yhdestä ainoasta aallonpituudesta. Tällaista valoa esiintyy kuitenkin hyvin harvoin, mm. laserissa, ja luonnossa ei käytännössä ollenkaan. Yleensä valo onkin spektriyhdistelmä lukuisista aallonpituuksista, joiden hallitsevuus valossa vaihtelee; juuri tämä aallonpituuksien kokoelma ja sen koostumuksen vaihtelu synnyttää erilaiset väriaistimukset.



Kuva 1: Ihmiselle näkyvä sähkömagneettisen spektrin osa.

Väri on aistimus, joka syntyy yhdistelmänä valonlähteestä, katseltavasta kohteesta ja aistijasta. Mitä tahansa näistä vaihdettaessa värin aistimus muuttuu. Valonlähde, joka voi olla aurinko, hehkulamppu, loisteputki tai muu sellainen, tuottaa valoa eli emittoi sähkömagneettista säteilyä. Eri valonlähteiden tuottama valo on erilaista, eli niiden spektri sisältää erilaisen yhdistelmän valon eri aallonpituuksia. Valo etenee maailmankaikkeudessa ja törmää erilaisiin kohteisiin. Kohteet imevät eli absorboivat osan valosta ja osa heijastuu eli siroaa; erilaiset pinnat heijastavat saman

valonlähteen valoa eri tavoin, ja eri valonlähteiden valo heijastuu samasta pinnasta eri tavoin. Kohteet mielletään jonkin tietyn värisiksi sen takia, että yleensä kappaleet muun muassa pintarakenteensa perusteella imevät tietyt aallonpituudet ja heijastavat loput. Heijastuvien aallonpituuksien spektriyhdistelmä määrää kappaleen värin.

Lopuksi aistimus väristä syntyy havainnoijan silmissä ja aivoissa. Eri eliöt aistivat värejä eri tavoin ja eri aallonpituuksilla, ja jotkin eliöt eivät näe värejä ollenkaan. Eri ihmisyksilötkin saattavat nähdä värit eri tavoin, ja lopuksi vielä värit mielletään eri tavoin riippuen kulttuurista ja henkilökohtaisista kokemuksista. Esimerkiksi tietyillä väreillä saattaa olla tietynlaista symboliikkaa tietyn kulttuurin edustajille tai jollekin yksittäiselle ihmiselle hänen henkilökohtaisen historiansa takia.

Kaiken tämä pohjalta voidaan sanoa, että vaikka värien käsite pohjautuu fysiikkaan, se on paljon enemmän kuin pelkkä luonnonilmiö.

1.1.1 Päävärit

Koulusta on varmasti jokaiselle tuttu päävärien käsite. Ne ovat värejä, joita sekoittamalla saadaan muodostettua toisia värejä. Kuvaamataidon tunneilla käytettiin punaisia, sinisiä ja keltaisia vesiväriä ja niistä pystyttiin sekoittamaan kaikki värit (ehkä mustaa lukuunottamatta) vähän harjoittelemalla, tai ainakin siltä tuntui. Joka tapauksessa, tästä saadaan tärkeä havainto siitä, että värejä voidaan sekoittaa keskenään ja saada näin uusia värejä.

1.1.2 Lisäys- ja vähennysvärit

Punaista, sinistä ja keltaista käytettiin siis koulussa ”pääväreinä”. Todellisia päävärejä on kuitenkin kahdenlaisia. Ns. lisäysvärit tai primaariset päävärit ovat punainen, sininen ja vihreä. Nimi lisäysväri johtuu siitä, että ne tavallaan lisäävät aistimukseen jotain; kun kappaletta valaistaan punaisilla, sinisillä ja vihreillä valoilla, ne tuovat lisää värejä kappaleen heijastamaan valoon. Kaikkia kolmea yhdistämällä saadaan valkoista valoa.

Vähennysvärit taas ovat syaani, magenta ja keltainen. Niitä saadaan yhdistämällä punaista, sinistä ja vihreää; esimerkiksi syaania saadaan yhdistämällä sinistä ja vihreää. Niitä kutsutaan myös sekundaarisiksi pääväreiksi juuri sen takia, että ne saadaan muodostettua primaarisista pääväreistä. Vähennysväreiksi niitä sanotaan siksi, että jos kappaletta maalataan syaanilla, magentalla ja keltaisella maalilla, ne poistavat kappaleen heijastamasta valosta värejä. Esimerkiksi jos kappale maalataan syaanilla maalilla, maalin sisältämä pigmentti poistaa heijastuvasta valosta keltaisen, jolloin jos kappaletta katsotaan valkoisessa valossa, se näyttää syaanilta. Kaikkia päävärejä yhdistettäessä poistetaan luonnollisesti kaikki väri, jolloin jäljelle jää mustaa.

Kuten edellä olleesta kuvaamataitoesimerkistä huomattiin, ”pääväreinä” voidaan käyttää mitä tahansa värejä, ja kaikkia värejä, sekä lisäys- että vähennysvärejä yhdistämällä saadaan uusia värejä. Viralliset, puhtaat päävärit ovat kuitenkin punainen, sininen ja vihreä sekä syaani, magenta ja keltainen.

1.1.3 Värejä tuottavat laitteet

Tämä artikkeli käsittelee värejä ennen kaikkea tietokonemaailman kannalta, sen takia on syytä hieman kerrata kuinka tietokonelaitteet tuottavat värejä. Laitteita on kolmea päätyyppiä: näytöt, tulostimet ja kuvanlukijat eli skannerit.

Näytöt tuottavat kuvan valoja sekoittamalla, siis niiden toiminta perustuu lisäysväreihin. Tyypillisesti näytössä on kolmenlaisia valoa emittoivia elementtejä, punaisia, vihreitä ja sinisiä. Näitä elementtejä on paljon vierekkäin ja ne muodostavat kuvapistettä. Jokaisen kuvapisteen kaikkien kolmen värielementin kirkkautta voidaan säätää erikseen, ja kun nämä kolmen väriset valot yhdistyvät, syntyy vaikutelma yksivärisestä kuvapistestä. Erilaisia mahdollisia värejä on suuri määrä, riippuen siitä, kuinka monta eri vaihtoehtoa värielementtien kirkkaudelle on. Kun näitä pieniä värikkäitä pisteitä on paljon lähekkäin, syntyy vaikutelma yhtenäisestä kuvasta.

Tulostimet tuottavat myös yhtenäisen kuvavaikutelman tulostamalla paperille paljon pieniä mustepisaroihin lähekkäin. Tulostimet käyttävät värillisiä mustepigmenttejä, joten ne perustuvat tietenkin vähennysväreihin. Ne tuottavat syaanin, magentan ja keltaisen värisiä mustepisaroihin, ja usein myös mustia. Useat tulostimet pystyvät tuottamaan myös näiden sekoituksia, eli punaisia, vihreitä ja sinisiä pisaroita.

Kuvanlukijat eli skannerit mittaavat kuvan heijastamaa valoa ja tallentavat sen tietokoneeseen ymmärtämäänsä muotoon. Sen toimintaperiaate on siis päinvastainen kuin tulostimilla ja näytöillä, jotka esittävät tietokoneen muistissa olevia kuvia ihmisen ymmärtämässä muodossa. Koska kuvanlukijat tutkivat heijastunutta valoa, ne käyttävät lisäysvärejä. Niissä on punaista, vihreää ja sinistä valoa aistivia antureita, joita on paljon lähekkäin ja jotka mittaavat päävärien värisen valon voimakkuutta pienillä kuvan aloilla kerrallaan. Näin ne näytteistävät kuvan pieniksi kuvapisteksiksi jotka voidaan tallentaa.

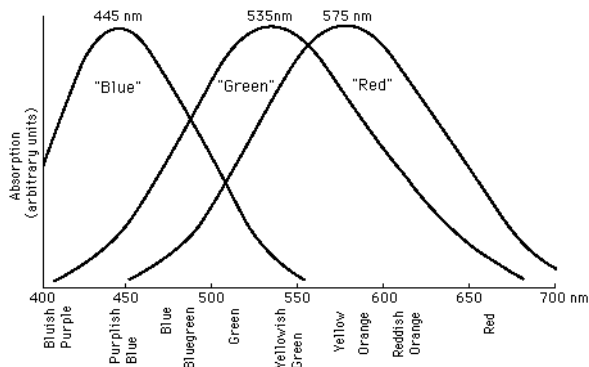
1.2 Värien fysiologiaa

Värien käsite pohjautuu pitkälti ihmisen tapaan aistia värejä. Ihmisen silmissä on kahdenlaisia valolle herkkiä soluja, joita sanotaan sauvoiksi ja tapeiksi. Niiden tehtävät ovat erilaiset. Sauvasoluissa on valolle herkkää proteiinia, ja ne aistivat valon kirkkautta. Sauvasoluja on huomattavasti enemmän kuin tappeja, ja ne ovat keskittyneet verkkokalvon reunoille; keskellä niitä ei ole ollenkaan. Sauvat vastaavat ääreinäöstä, liikkeen havainnoinnista ja pimeänäöstä (scotopic vision). Vastakohta tälle on päivänäkö (photopic vision).

Päivänäöstä ja värinäöstä huolehtivat tappisolut, joita on kolmenlaisia. Tapit ovat keskittyneet näkökentän keskikohtaan, reunoilla niitä on hyvin vähän. Tapit ovat parempia havaitsemaan pieniä yksityiskohtia, ja siksi ne vastaavat tarkasta näöstä, mutta ne eivät ole yhtä herkkiä valon kirkkauden muutoksille kuin sauvat. Kolmenlaiset tappisolut sisältävät kolmenlaista pigmenttiä, joista jokainen on herkkä tietyn taajuiselle valolle. Tappeja kutsutaan joskus punaisiksi, vihreiksi ja sinisiksi tapeiksi sen takia, että nämä ovat valon päävärit ja ihmisen ajatellaan aistivan niitä.

Kuitenkin, tappien aistimien spektrien huippukohdat eivät edes ole punaisessa, vihreässä ja sinisessä, ja lisäksi myös kukin tapeista aistii värejä laajalla aallonpituuskaistalla. Siksi suositellaan puhuttavan lyhyen, keskipitkän ja pitkän aallonpituusalueen tapeista. Kuvassa 2 on esitettyä tappisolujen aistimat aallonpituusalueet. Eri tappityyppijä ei ole saman verran, vaan niiden suhde on kutakuinkin 40:20:1,

eli lyhyen aallonpituuden tappeja on vähiten ja pitkän eniten. Lyhyen aallonpituuden tapit ovat kuitenkin huomattavasti herkempiä kuin pitkän aallonpituuden tapit. Kunkin tappijoukon vaikutus värinäössä onkin yhtä suuri, huolimatta lukumäärien suuresta erosta.



Kuva 2: Tappisolujen herkkyysalueet.

Ihmisen silmä siis näytteistää valon värin kolmelle kanavalle, ja väriaistimus syntyy näiden kanavien yhteisvaikutuksesta. Kanavat menevät osittain päällekkäin, mutta niiden huippukohdat ovat eri paikoissa. Näiden kolmen kanavan ja sauvasolujen aistiman valon intensiteetin sisältämä tieto koodataan jollakin lailla ennen kuin se viedään aivojen käsiteltäväksi. Vieläkään ei tiedetä varmuudella, miten aivot käsittelevät värejä, mutta erilaisia teorioita on olemassa. Toisen teorian mukaan värit koodataan kolmeen kanavaan siten, että punainen, vihreä ja sininen ovat kukin omana kanavanaan ja valoisuus liitetään mukaan näihin kanaviin. Toisen teorian, niin kutsutun vastaväriteorian mukaan olisi puna-vihreä, sini-keltainen ja musta-valkoinen kanava. Kumpikin näistä teorioista selittää joitakin kokeellisia havaintoja ihmisen näköaistimuksesta. Totuus lienee jonkinlainen yhdistelmä näistä kahdesta teoriasta.

Sauvasoluja on enemmän kuin tappeja, ja sen takia ihminen on herkempi valon kirkkauden kuin värin vaihtelulle. Tätä käytetään hyödyksi joissakin kuvan pakkausmenetelmissä, jossa valon kirkkausaste ja värisävy tallennetaan erikseen: Värisävyä pystytään pakkaamaan tiiviimmin, koska silmä ei huomaa yhtä herkästi eroja värisävyssä kuin kirkkaudessa.

Kolme tappisolutyyppeä aistii siis eri aallonpituuskaistaa. Näiden solujen aistimusten yhdistelmänä silmä pystyy erottamaan noin seitsemän miljoonaa eri värisävyä, mutta nämä värit eivät ole jakautuneet tasaisesti näkyvän valon spektrille. Tietyillä spektrin osilla ihmisen erottelukyky on suurempi kuin toisaalla. Tämä epätasainen jakauma johtuu pääasiassa siitä, että aivojen tapa koodata värejä on epälineaarinen, joten vaikka värit aistitaan lineaarisesti, niitä käsitellään ja ne mielletään epälineaarisesti. Tämän takia tietokoneissa käytetään 16 miljoonaa väriä: niissä värit ovat jakautuneet tasaisesti koko spektrille.

1.3 Värien teoriaa

Väri ei siis ole kappaleiden ominaisuus vaan ihmisen hermoston signaaleja. Tämän vuoksi värien teoria pohjautuu kiinteästi ihmisen näköaistimuksen fysiologiaan ja

on lähtökohdiltaankin hiukan häilyvä ja henkilökohtainen. Näiden lähtökohtaisten vaikeuksien poistamiseksi on tehty paljon työtä.

Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) eli kansainvälinen valaistuskomissio on vuosikymmenien ajan tutkinut ja määritellyt ihmisen värinäköä. Poistaakseen valaistuksesta ja havainnoijasta aiheutuvat vaihtelut, CIE on määritellyt standardivalaisimet ja standardihavainnoijat, joiden avulla värit määritellään. Standardivalaisimet perustuvat tietyn lämpöisen täydellisen mustan kappaleen lähettämään säteilyyn. D50 tarkoittaa 5000 Kelvinin lämpöisen kappaleen lähettämää valoa, joka on kellertävän valkoinen, ja D65 6500 Kelvinin lämpöisen kappaleen lähettämää valoa, joka vastaavasti on sinertävän valkoinen. Värien lämpötilalla tarkoitetaan sen mustan kappaleen lämpötilaa, jonka hehkun valaisemana värien voidaan ajatella syntyneen. Standardihavainnoijia on kahdenlaisia, jotka vastaavat ihmisen näköä 2 asteen ja 10 asteen näkökentällä. Näistä jatkossa enemmän.

Edellä selvitettiin, kuinka väri on sähkömagneettista säteilyä tietyllä aallonpituusalueella. Väri voidaan pelkistää spektrijakaumafunktioksi (spectral power distribution, SPD), joka kertoo säteilyn aallonpituuksien jakauman valossa. Värien mittaamiseen voidaan käyttää erityistä laitetta, spektrofotometriä. Se mittaa näytteen heijastaman spektrijakauman, näytteistäen sen esimerkiksi 5, 2 tai 1 nanometrin välein. On huomattava, että jakauma riippuu valaistusolosuhteista. Siksi näytteen valaisuun pitää käyttää jotakin standardivalaisinta, yleensä D50 tai D65.

Kuten edellä todettiin, ihmisen värinäkö pohjautuu tappisoluihin. Tappioiden toiminta voidaan pelkistää todennäköisyysfunktiksi fotonien aallonpituuden suhteen; tietyllä tappityypillä on tietty todennäköisyys absorboida fotoni, jolla on tietty energia ja siten aallonpituus. Väriäistimuksen kannalta fotonin energialla ei ole merkitystä: väriäistimus syntyy sen perusteella, kuinka monta fotonia erilaiset tappisolutyypit absorboivat aikayksikössä. Tämä kertoo osaltaan siitä, kuinka abstrakti käsite värinäkö on, ja että värit eivät tosiaankaan ole muuta kuin aivoissa syntyvä vaste tietynlaiseen säteilyyn. Edellä väri määriteltiin spektrijakaumafunktioksi sähkömagneettisesta säteilystä, mutta tarkkaan ottaen väri on aivoissa syntyvä vaste kyseiseen jakaumaan. Tämä on kuitenkin henkilökohtainen asia, joten puhutaan väristä spektrijakaumana. Standardihavainnoija näkee jakauman kuitenkin aina samalla tavalla.

Ihmisen silmässä on siis kolmenlaisia tappeja. Tästä juontuu niin kutsuttu tristimulus-teoria. Sen mukaan kaikki värit voidaan esittää kolmen komponentin eli stimuluksen avulla. Nämä kolme komponenttia vastaavat vektoria kolmiulotteisessa avaruudessa, jota sanotaan tristimulus-avaruudeksi. Tällainen vektori voidaan tietysti esittää hyvin monella eri tavalla, ja niinpä onkin olemassa monia erilaisia viittaustapoja (references) tristimulus-avaruuteen. Näitä viittaustapoja kutsutaan värimalleiksi tai väriavaruuksiksi, ja niistä kerrotaan myöhemmin lisää.

1.3.1 Tristimulus-viittaukset

Edellä esitetyn pohjalta määritellään väri seuraavasti. Olkoon VS (Visual Spectrum) ihmissilmän aistima sähkömagneettisen spektrin osa (380nm - 780nm). $S(\lambda)$ olkoon tällöin spektrijakauma, joka kertoo valon intensiteetin aallonpituudella λ , joka kuuluu VS :ään. Olkoot sitten A , B ja C kolme komponenttia, joita käytetään viittaamaan tristimulus-avaruuteen. Määritellään $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ ja $c(\lambda)$ siten, että ne

kertovat kyseisen komponentin arvon aallonpituudella λ . Tällaisia funktioita kutsutaan värin sovitusfunktioiksi (color matching function).

Nyt kolmen viittauskomponentin arvot spektrillä S saadaan integroimalla näkyvän spektrin yli:

$$A = \int_{\check{v}S} a(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

$$B = \int_{\check{v}S} b(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

$$C = \int_{\check{v}S} c(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

Tristimulus-viittaus on vektori $(A \ B \ C)$. Kutsutaan tätä viittausvektoriksi. Tällainen vektori kuvaa värin tiettyssä värimallissa, tai viittauksessa tristimulus-avaruuteen.

1.3.2 Metamerismi

Periaatteessa todellinen spektrijakauma muodostaa ääretönulotteisen vektoriavaruuden; jakauma sisältää säteilyn intensiteetin kaikilla mahdollisilla aallonpituuksilla, joita on ylinumeroituva määrä. Kun tämä tieto esitetään kolmiulotteisessa tristimulus-avaruudessa, joka on siis lineaarialgebran termein aliavaruus, tietoa luonnollisesti häviää. Tämä tarkoittaa, että yksi viittausvektori saattaa vastata useita todellisia spektrijakaumia.

Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä metamerismi, ja kaksi väriä eli spektrijakaumaa joilla on sama viittausvektori, kutsutaan metameeriseksi pariiksi. Tämä ilmiö on varsin merkittävä ongelma. Käytännön tilanteissa tämän huomaa usein silloin, jos esimerkiksi kaksi vaatekappaletta, jotka näyttävät tiettyssä valaistuksessa samanvärisiltä, näyttävätkin jossakin toisessa valaistuksessa erivärisiltä. Tämä johtuu tietysti siitä, että valaistus vaikuttaa merkittävästi spektrijakaumaan. Metamerismistä johtuen silmä ei erota kahta aistimusta eri väreiksi toisessa valaistuksessa, mutta toisessa erottaa.

Nyt voidaan siis määritellä yhtäsuuruus väreille: $C_1 \equiv C_2$, missä C_1 ja C_2 ovat edellisessä luvussa määritellyn kaltaisten viittausvektorien mukaisia värejä, esim. $(C_{11} \ C_{12} \ C_{13})$. Tämä yhtäsuuruus pätee, jos värit ovat metameerisia pareja.

1.3.3 Grassmanin lait

Grassmanin lait määrittelevät joitakin värien ominaisuuksia. Ne kuuluvat seuraavasti:

- G1. $C_1 \equiv C_2 \Leftrightarrow C_2 \equiv C_1$ (Symmetrialaki)
- G2. $C_1 \equiv C_2, C_2 \equiv C_3 \Leftrightarrow C_1 \equiv C_3$ (Transitiivisuuslaki)
- G3. $C_1 \equiv C_2 \Leftrightarrow aC_1 \equiv aC_2 \forall a \in \mathbb{R}$
- G4. $C_1 \equiv C_2, C_3 \equiv C_4 \Leftrightarrow (C_1 + C_2) \equiv (C_3 + C_4)$

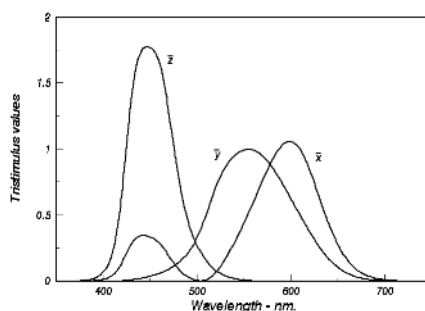
C_1, C_2, C_3 ja C_4 ovat vektoreita jossakin tristimulus-vektoriavaruudessa. Nämä lait vahvistavat niille samat vertailu- yhteenlasku- ja skalaarilla kertomisominaisuudet kuin normaaleille vektoreille. On huomattava, että lain G3 skalaari a saa olla myös negatiivinen, vaikkakaan tällaiselle operaatiolle ei ole suoranaista vastaavuutta reaali maailmassa.

1.3.4 Perusviittaus

Viittausmenetelmää, joka vastaa ihmisen näköaistia, kutsutaan perusviittaukseksi (fundamental reference). Siinä kolme komponenttia ovat S, M ja L (Short, Medium, Long) tappisolujen aistimien aallonpituusalueiden mukaisesti. Tässä värimallissa komponenttien arvo tarkoittaa kyseisen tappisolun absorboimaa osuutta verkkokalvolle tulevasta valokvanteista eli fotoneista. Tappisolut absorboivat säteilyn sisältämiä fotoneita tietyllä todennäköisyydellä, joka riippuu kyseisten tappien herkkyydestä kyseisille aallonpituuksille. $\bar{s}(\lambda), \bar{m}(\lambda)$ ja $\bar{l}(\lambda)$ olkoot herkkyyshanktiot, jotka ilmaisevat tappisolun todennäköisyyden absorboida tietyn aallonpituuden kvantti. Näistä saadaan muodostettua värin sovituskotiot $s(\lambda), m(\lambda)$ ja $l(\lambda)$ lineaarisesti kertomalla joillakin kertoimilla k_s, k_m ja k_l . Kertoimet riippuvat muun muassa silmän optisista ominaisuuksista ja käytetyistä mittayksiköistä; kertoimet vain skaalaavat arvot oikein. Tätä viittausa kutsutaan myös SML-viittaukseksi. SML - menetelmällä on nykyään lähinnä teoreettista merkitystä, ja seuraavassa esitettävä XYZ-viittaus eli XYZ-värimalli on huomionarvoisempi.

1.3.5 XYZ - värimalli

Nykyään standardiviittauksena käytetään CIE:n kehittämää XYZ-viittausa. Tämä saadaan lineaarisella muunnoksella edellä esitetystä SML-mallista, mutta XYZ on hyödyllisempi, koska sen käyttämällä värin sovituskotiolla on muutamia hyödyllisiä ominaisuuksia. Muun muassa Y-komponentti sisältää pelkkää luminenssi- eli kirkkausinformaatiota. Myös, joissakin viittauksissa komponentit saattavat saada negatiivisia arvoja, mutta näin ei käy XYZ:ssa. Toisaalta XYZ-viittaus on ekvivalentti ihmisen näköaistimuksen kanssa.



Kuva 3: XYZ-sovituskotiot.

XYZ on siis ekvivalentti SML:n kanssa. XYZ-värit saadaan samanlaisella integroinnilla kuin tristimulus-viittauksien yhteydessä kerrottiin. Värin sovituskotiina käytetään kuvan 3 kaltaisia funktioita, jotka ovat siis todennäköisyysjakaumafunktioita. On huomattava, että Y-komponentin sovituskotiio vastaa ihmisen vaste-

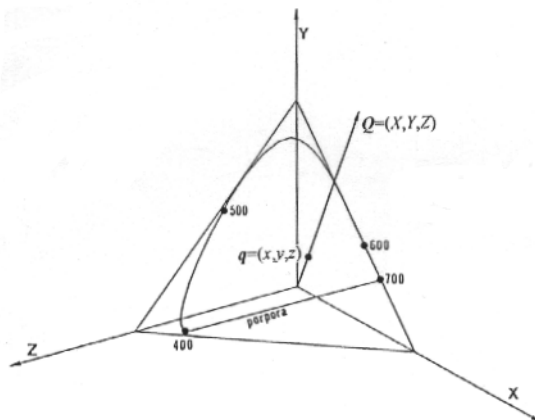
käyrää valon kirkkaudelle. Juuri tästä johtuu se, että Y- komponentti sisältää kirkkausinformaation.

XYZ-värimallia käytetään värien mittausräätelöissä, kuten edellä mainituissa spektrofotometreissä.

1.3.6 CIE:n xy-väridiagrammi

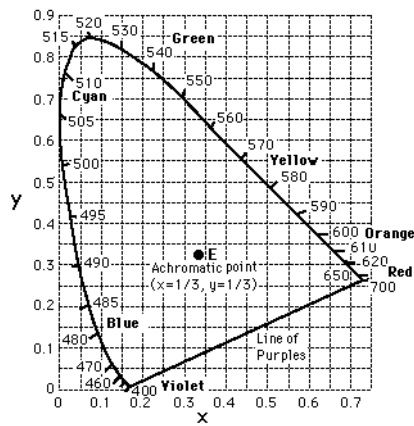
Ihmisen näkemä värialue esitetään tavallisesti ns. xy-väridiagrammina ja värisävyn esittämiseen käytetään puolestaan ns. värikkyysskoordinaatteja, jotka tarkoittavat x- ja y-koordinaatteja edellä mainituissa diagrammeissa. Tämä diagrammi on CIE:n määrittämä, ja sitä kutsutaan myös CIE:n standardihavainnoijaksi. Diagrammi siis esittää ”standardoidun” ihmishavainnoijan näkemää värialuetta.

Diagrammi muodostuu siten, että XYZ-väriavaruudessa tutkitaan näkyvän spektrin monokromaattisen eli vain yhtä aallonpituutta sisältävän valon projisoitumista tasoon $X + Y + Z = 1$. Koska X , Y ja Z ovat positiivisia, tämä taso on kolmio jota rajoittavat koordinaattiakselit ja jonka kärkipisteet ovat akseleilla ykkösen kohdalla. Jos ajatellaan näkyvä spektri $(X \ Y \ Z)$ -vektoriarvoisena funktiona yksittäisen aallonpituuden sisältävistä monokromaattisista valonäytteistä, funktion käyrän projektiio edellämainittuun tasoon on kuvan 4 kaltainen.



Kuva 4: Spektrin projisointi XYZ-avaruudessa.

Muistamme, että XYZ-koordinaateissa Y-koordinaatti sisältää pelkkää valoisuustietoa. Yleensä edellä kuvattu käyrä projisoidaan kahteen ulottuvuuteen ns. xy-väridiagrammiksi siten, että $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ ja $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$. Voidaan määrittellä myös $z = \frac{Z}{X+Y+Z}$, mutta tämä on redundantti tekijä, sillä se saadaan esitettyä x:n ja y:n avulla: $z = 1 - x - y$. Kun käyrä projisoidaan tähän xy-tasoon, siitä tulee hieman hevosenkengän näköinen kuvio, jota siis sanotaan CIE:n xy-väridiagrammiksi (chromaticity diagram) tai CIE:n kolorimetriseksi havainnoijaksi (colorimetric observer), kuva 5. Luminanssikomponentti Y on kohtisuorassa tätä xy-tasoa vasten.



Kuva 5: CIE:n xy-värikkyysdiagrammi.

Diagrammilla on seuraavanlaisia ominaisuuksia. Reunakäyrällä ovat puhtaat spektrin värit ja kuvion sisällä ovat kaikki mahdolliset ihmisen näkemät värisävyt, ottamatta huomioon kirkkauden vaikutusta, joka siis on eliminoitu kaaviosta. Kun kuvasta poimitaan kaksi väriä, niitä yhdistävällä suoralla ovat kaikki värit, jotka saadaan muodostettua näiden kahden värin avulla. Samaan tapaan voidaan ottaa useampia värejä, ja näiden rajoittama monikulmio sisältää värit, jotka saadaan yhdistelemällä näitä värejä.

Kyseessä on siis tavallaan lineaariavaruus, jossa kahdella eri värillä saadaan viritettyä jana ja kolmella värillä, jotka eivät ole samalla suoralla, saadaan viritettyä kolmio. Tavallaan siis "lineaarisesti riippumattomilla" väreillä saadaan viritettyä "aliavaruus" Miksei saada viritettyä suoraa ja koko väriavaruutta, kuten lineaariavaruuksissa? Tämä johtuu siitä, että värejä ei voida ottaa "negatiivista" määrää, joten väriavaruus ei täysin vastaa lineaariavaruutta.

Kuvion keskellä on niin sanottu valkoinen eli epäkromaattinen piste. Tästä pisteestä kuvion reunalle värin saturaatio eli värikylläisyys lisääntyy. Värikylläisyys tarkoittaa sitä, kuinka hallitseva värisävy on kyseisessä värissä. Värikylläisyyden vähentyessä harmaasävyjen osuus lisääntyy. Värien vastavärit löytyvät piirtämällä suora valkoisen pisteen kautta.

Tästä kuviosta päästään käsitteeseen gamut, joka karkeasti tarkoittaa sitä värien kirjoa, joka pystytään esittämään jollakin laitteella tai värimallilla, eli siis periaatteessa gamut on jokin osa edellä esitetystä kaarevasta värialueesta. Käytännössä kuitenkin diagrammi ei esitä koko väriavaruutta, vaan vain kaksiulotteista projektiota siitä, joten tämä ei aivan pidä paikkaansa. Erilaisilla laitteilla on erilainen gamut, ja tämä aiheuttaa ongelmia. Tästä puhutaan lisää seuraavassa kappaleessa. Esimerkkinä näistä ongelmista voidaan sanoa, että itse xy-väridiagrammia ei pystytä esittämään täsmällisesti, koska näytöt ja tulostimet eivät pysty tuottamaan oikein kaikkia kuviossa esiintyviä värejä.

1.3.7 Luminanssi

Luminanssi (luminance) on valoisuuden yksikkö. Se tarkoittaa valovuon suuruutta, joka tulee jostakin pinnan pisteestä, nähtynä tietystä suunnasta. Valovuo taas joh-

detaan säteilyn sisältämästä kokonaistehosta/energiasta. Luminanssi tarkoittaa siis pinnasta heijastuvan säteilyenergian määrää jostakin pisteestä tarkasteltuna, ja se on fysikaalinen suure. Luminanssia merkitään yleensä kirjaimella Y.

1.3.8 Kirkkaus

Kirkkaudella (brightness) ymmärretään ihmisen aistimusta siitä, mikä alue sisältää enemmän ja mikä vähemmän valoa.

1.3.9 Valoisuus

Valoisuus (lightness) tarkoittaa aistimusta alueen kirkkaudesta suhteessa näkymässä olevaan valkoiseen viitekohteeseen.

1.3.10 Luma

Luma tarkoittaa gamma-korjattua luminanssia ja sitä merkitään usein Y'.

1.3.11 Kroma

Kroma (chroma) tarkoittaa alueen värikyyttä verrattuna valkoisen viitekohteen kirkkauteen.

1.3.12 Värikylläisyys

Värikylläisyys (saturation) tarkoittaa alueen värikyyttä suhteessa sen itsensä kirkkauteen.

1.4 Värien ongelmia

Värit on monessa suhteessa ongelmallinen käsite. Ongelmia on monia. Ensinnäkin värit on henkilökohtainen asia; jokainen näkee ja mieltää värit omalla tavallaan. Toiseksi, valaistus ja ympärillä olevat värit vaikuttavat siihen, miten miellämme värit. Tämä selvitys keskittyy ongelmiin tietokonegrafikan maailmassa, ja näihin perustavanlaatuisin syy on se, että ihmissilmä ja erilaiset laitteet näkevät ja tuottavat värejä eri lailla. Tietokoneiden näytöt pystyvät tuottamaan tietyn väriskaalan, samoin tulostimet. Kuten edellä todettiin, tässä yhteydessä sanotaan, että näillä laitteilla on erilainen gamut.

Ongelmia syntyy siitä, että näyttöjen tuottama väriskaala on eri kuin tulostimilla; tulostimet eivät yksinkertaisesti pysty tuottamaan joitakin näytöllä näkyviä värejä, samoin kuin näytöt eivät pysty esittämään kaikkia tulostimen tuottamia värejä. Samoin skannerien ja kameroiden tallentama väriskaala on erilainen kuin mitä näytöt ja tulostimet pystyvät tuottamaan. Yleisesti mitkään laitteet eivät pysty käsittelemään koko ihmisen näkemää värien kirjoa, vaan vain osan siitä. Ongelmana on siis muuntaa värejä siten, että ne poikkeavat oikeista mahdollisimman vähän.

Ongelmia tuottaa myös värien esitys: värit pitäisi pystyä kuvaamaan tietokoneelle jollakin diskreetillä tavalla, jotta se pystyisi käsittelemään niitä. Eri laitteet käyttävät erilaisia tapoja kuvata värejä, ja näiden välinen muuntaminen on ongelmallista. Seuraavassa luvussa käsitellään näitä asioita tarkemmin.

2 Värimallit

Värimallit pyrkivät nimensä mukaisesti mallintamaan ja approksimoimaan luonnossa esiintyviä värejä tietokoneella. Värimallit ovat ikäänkuin matemaattisia malleja, jotka pyrkivät kuvaamaan värejä. Malleja on useita erilaisia. Valikoiman laajuus selittyy osittain sillä, että eri mallit soveltuvat eri käyttötarkoituksiin. Pääosa harvinaisemmista malleista on kuitenkin syntynyt vain siksi, että kaikki ovat halunneet luoda oman standardinsa, tai siksi, että vanhoja malleja on vähän paranneltu.

Värimallit perustuvat edellä kuvattuun tristimulus-teoriaan. Sen pääsisältö oli siis se, että värit on kolmiulotteinen avaruus; usein puhutaankin väriavaruuksista. Tämän takia värit saadaan esitettyä kolmen komponentin, nk. stimuluksen avulla. Kaikki nykyiset värimallit perustuvat enemmän tai vähemmän tähän teoriaan. Puhutaan myös kolmesta pääväristä, vaikka kaikki kolme komponenttia eivät tarkkaan ottaen olekaan värejä kaikissa värimalleissa.

Värimallit ovat tavallaan määritelmiä. Ne määrittelevät värit jollakin tavalla. Määritelmiä on sekä laiteriippuvia että laiteriippumattomia. Laiteriippuvissa määritelmässä tulos eli näytettävä väri riippuu käytettävästä laitteesta. Laiteriippumattomat määritelmät ovat tarkkoja ja käytettävät laitteet kalibroidaan jotta niiden antamat tulokset olisivat oikeita.

2.1 Erilaisia värimalleja

Värimalleja on varsin suurilukuinen joukko. Suuri määrä johtuu monista syistä. Jotkin laitteet asettavat rajoituksia väritiedon koolle. Osa väriavaruuksista on lineaarisia, eli tietty värin esityksen muutos aiheuttaa vastaavan muutoksen värihavainnossa. Jotkin värimallit ovat helppokäyttöisiä. Jotkin ovat laiteriippuvaisia, eli soveltuvat vain tietylle laitteelle, kun taas toiset ovat laiteriippumattomia. Seuraavassa esitellään yleisimpiä värimalleja. Suurin osa käytetyistä värimalleista on näiden muunnelmia.

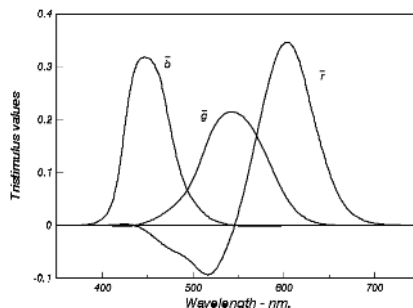
2.1.1 RGB

RGB on ehkä tunnetuin ja yleisimmin käytetty värimalli valon sekoittamiseen perustuvissa laitteissa, kuten näytöt ja skannerit. Se perustuu valon päävärien käyttöön, jotka, kuten edellä kerrottiin, ovat punainen, vihreä ja sininen. Näistä väreistä tulee myös värimallin nimi (Red, Green, Blue). Erilaisia RGB-värimalleja on itse asiassa äärettömän paljon. Tämä johtuu siitä, että kolme pääväriä voidaan valita hyvin monella tavalla. Eri näyttöjen esittämät värit poikkeavat toisistaan aavistuksen siitä riippuen, millaisia fosforeita niissä on käytetty; eri sävyiset punaiset, vihreät ja siniset tuottavat erilaisen väriskaalan. Värisävyjen valinnasta riippuu myös näytön gamut; käytettyjen päävärien ”virittämän” kolmion sisällä ovat kaikki värit jotka voidaan esittää. Tyypillisesti näytöt eivät kuitenkaan pysty esittämään kovinkaan värikylläisiä sävyjä.

Periaatteessa pääväreiksi ei tarvitse ottaa juuri punaista, vihreää ja sinistä. Mitkä tahansa kolme värisävyä kelpaavat, tosin niiden sijainnista CIE:n kaaviossa riippuu, mitä värejä niillä pystytään esittämään. Tilanne on vähän kuin lineaariavaruuksissa. Jos kolme väriä ovat samalla suoralla CIE:n kaaviossa, ne ”virittävät” vain kyseisen suoran, eli jokin väreistä pystytään esittämään kahden muun avulla. ”Lineaarisesti

riippumattomat” värit, eli sellaiset, joita ei voi esittää toistensa avulla, eivät kuitenkaan viritä koko väriavaruutta, vaan ainoastaan ”värivektorien” kattaman alan, kuten edellä todettiin. Osin tämän takia, osin vanhasta tottumuksesta pääväreiksi valitaan ”jokin” punaisen, vihreän ja sinisen sävy. Kolmas tärkeä syy on se, että koska nämä ovat valon päävärit, valkoinen saadaan ottamalla kaikkia kolmea osapuileen saman verran. Sekoitussuhteista tulee siis käytännöllisemmät kuin käytettäessä satunnaisia värejä. Nämä värit virittävät myös melko säännöllisen kolmikulmion.

RGB-värit saadaan myös laskettua tristimulus-viittauksen yhteydessä kuvatun kaltaisina integraaleina. Värien sovitusfunktiot ovat kuvassa 6 olevan kaltaiset. On huomattava, että punaisen värin sovitusfunktio saa negatiivisia arvoja. Siis, jotta kaikki värit saataisiin esitettyä, punaista pitäisi pystyä ottamaan negatiivinen määrä, mutta tämä ei onnistu. Tästä johtuu se, että RGB-väreillä ei saada esitettyä kaikkia samoja värejä kuin XYZ-väreillä.



Kuva 6: RGB-sovitusfunktiot.

RGB:ssä siis komponentteina on kolme pääväriä, joiden sekoitussuhde ratkaisee esitettävän värin. Periaatteessa tällä tavalla pitäisi saada aikaan kaikki värit, mikä pitää paikkansa vain osittain. Kaikki värisävyt saadaan kyllä aikaan, mutta värikylläisyys jää kauas luonnollisesta. Käytettävät päävärisävyt kun eivät ole kovin hyviä. RGB:n ongelma on myös epäkäytännöllisyys. värisävyä valittaessa pitää asettaa lähinnä arvaukseen perustuen kolmen värikomponentin arvo.

RGB on laiteriippuvainen ja epälineaarinen värimalli, epäintuitiivinen käyttää, mutta yleinen.

2.1.2 CMY

CMY on sukua RGB:lle, ja on toinen nykyisistä pääasiallisesti käytetyistä värimalleista. Se perustuu pigmenttien pääväreihin, nk. sekundäärisiin pääväreihin tai vähennysväreihin. Ne ovat syaani, magenta ja keltainen. Näistä tulee myös värimallin nimi (Cyan, Magenta, Yellow). Näitä sanotaan vähennysväreiksi sen takia, että kukin pigmentti poistaa heijastuvasta spektristä jonkin värin. Kaikista kolmesta saadaan siis mustaa kun kaikkia otetaan saman verran; mustassa tavallaan kaikki väri on otettu pois.

Usein musta väri laitetaan erikseen, jolloin puhutaan CMYK-värimallista (K tulee sanasta black). Tämä johtuu siitä, että kun kolmea pääväriä sekoittamalla ei tarvitse tulla puhdasta mustaa, gamut saadaan paremmaksi; päävärisävyt voidaan valita vapaammin. Usein kolmea pääväriä yhdistämällä saadaankin vain likaisen ruskea värisävy.

CMY-värimallia käytetään lähinnä pigmenttien sekoittamiseen perustuvissa laitteissa, kuten tulostimissa. Tässä mallissa ”virittäviä” värejä on usein itse asiassa kuusi. Tämä johtuu siitä, että monet tulostimet tekevät paitsi syaanin, magentan ja keltaisen värisiä mustepisaroihin, myös näiden sekoituksia, eli sinisiä, punaisia ja vihreitä mustepisaroihin. Siksi monien CMY-laitteiden gamut on kuusikulmainen.

CMY-värimallin pääasialliset heikkoudet ovat samat kuin RGB-mallissakin. Väriskaala ja värisävyjen kylläisyys riippuvat käytettyjen pigmenttien laadusta. CMY on myös yhtä epäkäytännöllinen ja epähavainnollinen kuin RGB. Kaikkein merkittävin ongelma syntyy RGB- ja CMY-värimallien yhteistoiminnasta: koska näytöt käyttävät RGB:tä ja tulostimet CMY:tä käytännön pakon sanelemana, konversio näiden välillä on merkittävä asia. Itse konversio ei aiheuta ongelmia, vaan se, että RGB-mallien ja CMY-mallien gamut on usein aivan erilainen, riippuen käytetyistä päävärisävyistä. Siis, vaikka mallien välinen konversio on lineaarinen, monia näytöllä olevia värejä on mahdoton esittää tulostimella, ja päinvastoin.

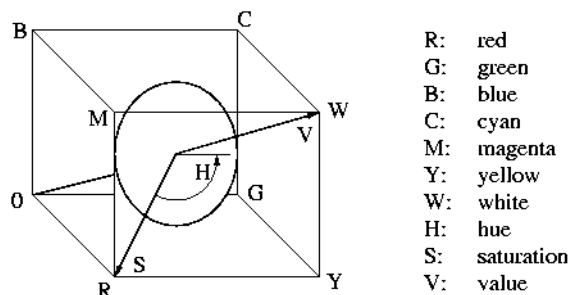
CMY on, kuten RGB, laiteriippuvainen, epälineaarinen ja epäntuutiivinen käyttä.

2.1.3 HSB ja sen muunnelmät

RGB:ssä ja CMY:ssä värit eivät ole kovin havainnollisessa muodossa. Kolmas suosittu värimalli, HSB muunnelmiseen, helpottaa värien hahmottamista. HSB tulee sanoista Hue, Saturation, Brightness eli värisävy, värikylläisyys ja kirkkaus. Tämä värimalli hahmottaa värit samalla lailla kuin ihmisetkin: värillä on ensinnäkin jokin sävy, kuten sininen, punainen, keltainen. Toiseksi väri voi olla pastellisävyinen tai puhdas. Tätä kuvaa värikylläisyys, joka periaatteessa tarkoittaa harmaasävyjen osuutta värisävyssä, tai värisävyn hallitsevuutta harmaan suhteen. Kolmanneksi värin kirkkaus voi vaihdella. Kirkkaus tarkoittaa periaatteessa sitä, kuinka paljon valoa väristä heijastuu. Mitä suurempi kirkkaus, sitä valoisammalta väri näyttää.

HSB-värimallissa ja sen sukulaisissa värisävy tyypillisesti valitaan ympyrän kehältä, ja se saa arvoja väliltä 0-359. Saturaatio ja kirkkaus ilmaistaan prosenttilukuna 0-100. HSB-värimalli käyttää siis sylinterikoordinaatteja, eli muunnos RGB:n ja HSB:n välillä ei ole lineaarinen.

RGB, CMY ja HSB sijaitsevat periaatteessa samassa väriavaruudessa, joka voidaan ajatella kuutioksi. Kuution kulmissa ovat punainen, vihreä, sininen, syaani, magenta, keltainen, valkoinen ja musta. Kirkkaus kasvaa kuution päädiagonaalia pitkin ja saturaatio on kohtisuorassa tätä vasten, samoin kuin ympyrä, jolta värisävyt valitaan. Nämä suhteet on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7: RGB-, CMY- ja HSB-avaruuksien suhteet.

HSB-värimallista on useita muunnelmia, jotka poikkeavat toisistaan hieman. Näitä ovat muun muassa HLS (Hue, Lightness, Saturation), HSV (Hue, Saturation, Value) ja HSI (Hue, Saturation, Intensity); pääasiallinen ero on siinä, miten kirkkaus määritellään. Tähän on useita tapoja, seuraavassa tärkeimmät.

$$\begin{aligned} \text{Brightness} &= \frac{R + G + B}{3} \\ \text{Lightness} &= \frac{\max\{R, G, B\} + \min\{R, G, B\}}{2} \\ \text{Value} &= \max\{R, G, B\} \end{aligned}$$

Intensity on sama asia kuin Brightness.

Kaksi vähän samantyyppistä värimallia ovat LCH (Luminance, Chroma, Hue) ja LSH (Luminance, Saturation, Hue) mutta ne eivät toimi aivan samalla tavalla kuin edellä mainitut. Niitä käsitellään erikseen jäljempänä.

HSB ja sen sukulaiset ovat vain tapa viitata RGB-avaruuteen, joten ne ovat yhtä laiteriippuvaisia ja epälineaarisia kuin RGB:kin. Niitä on kuitenkin suhteellisen intuitiivista käyttää, sillä tämä malli vastaa ihmisen käsitystä väreistä.

2.1.4 CIE XYZ

XYZ-värimallista olikin jo puhetta. Siinä värit kuvataan kolmen kuvitteellisen päävärin X , Y , Z avulla, jotka saavat arvoja väliltä $[0, 1]$. XYZ:n etu on se, että se on täysin laitteistoriippumaton, samoin kuin kaikki värimallit jotka on johdettu siitä. XYZ ei kuitenkaan ole lineaarinen, ja tähän asiaan puututaan seuraavassa luvussa.

XYZ-värejä käytetään harvoin sellaisenaan. Yleensä käytetään sen sijaan väridiagrammin värikkyysskoordinaatteja ja lisäksi luminanssikomponenttia Y ; puhutaan xyY-väreistä. Edellä on kerrottu kuinka x ja y lasketaan X :n, Y :n ja Z :n avulla. Tämän menetelmän avulla on helppo verrata kahta väriä keskenään, mikä tietysti on tarkoituskin. XYZ on standardivärimalli ammattilaislaitteissa, koska se kuvaa kaikki mahdolliset värit yksikäsitteisesti. Tavallisen ihmisen kannalta se on hiukan abstrakti, sillä kaikkia värimallilla kuvattavia värejä ei pystytä esittämään nykyisin laittein.

Seuraavissa jaksoissa käsitellään joitakin XYZ-mallin johdannaisia.

2.1.5 CIE L*a*b*

Eräs värimallien ongelmista on se, että ne eivät ole "lineaarisia"; nykyisin puhutaan mieluummin havainnon tasaisuudesta (perceptual uniformness) sillä lineaarisuuden käsite ei täysin vastaa tilannetta. Tämä tarkoitti siis sitä, että muutos värissä aiheuttaa eri suuruisen muutoksen värihavainnossa. CIE yritti ratkaista tätä ongelmaa hyvin pitkään, ja valmisti kaksi ehdotusta värimalliksi, jossa tämä ongelma on ratkaistu. Tämä ei ole täysin onnistunut, vaikka ero värin ja havainnon välillä onkin huomattavasti pienempi kuin varhemmissa värimalleissa. L*a*b*, joskus kutsuttu myös LABiksi, on toinen näistä malleista.

$L^*a^*b^*$ on niin sanottu vastavärimalli. Se perustuu havaintoon, että jossakin näköjärjestelmän sisällä värit koodataan vastaväreinä siten, että muodostetaan sini-keltainen ja puna-vihreä kanava. a^* sisältää tiedon puna-vihreästä ja b^* sini-keltaisesta; L sisältää valoisuustiedon, se on siis tavallaan musta-valkoinen kanava. Se ei ole sama asia kuin XYZ:n Y-komponentti, vaikka Y on myös melko lineaarinen. L on muodostettu siten, että se kuvaisi paremmin valoisuuden eroja.

$L^*a^*b^*$ on varsin suosittu värimalli, tosin sitä käyttävät lähinnä ammattilaiset. Se on laitteistoriippumaton, ja lineaarisuus tekee siitä käyttökelpoisen monissa yhteyksissä. Sitä käytetään ICC:n (International Color Consortium) laiteprofileissa ja Adoben postscriptissa se on perusvärimalli. $L^*a^*b^*$ on suora johdannainen XYZ:sta, ja tämä konversio kuvataan jäljempänä.

2.1.6 CIE $L^*u^*v^*$

$L^*u^*v^*$ on toinen lineaarisista värimalleista, jotka CIE kehitti, ja sitä kutsutaan joskus myös nimellä LUV. Sen L-komponentti on sama kuin LABissa, mutta u^* ja v^* ovat periaatessa muunnos xy-värikkyydiagrammin x- ja y-koordinaateista. Muunnos on tehty siten, että mahdollisimman hyvä lineaarisuus saavutettaisiin. $L^*u^*v^*$:n arvo on paitsi lineaarisuudessa, myös siinä, että se tarjoaa samanlaisen värikkyydiagrammin kuin xyY, mutta sitä käytetään ehkä hiukan vähemmän kuin LABia.

Seuraavat kuvat havainnollistavat lineaarisuusasioita. Kuvissa on viivalla yhdistetty aina väripareja, joiden välinen havaittu ero on suunnilleen samanlainen. Kuvista kuitenkin nähdään, että värejä yhdistävät viivat ovat paikoin hyvinkin eri pituisia. Kuvassa 8 on tilanne xy-diagrammissa, Kuvassa 9 vastaava tilanne uv-diagrammissa. Ero on huomattavasti pienempi.

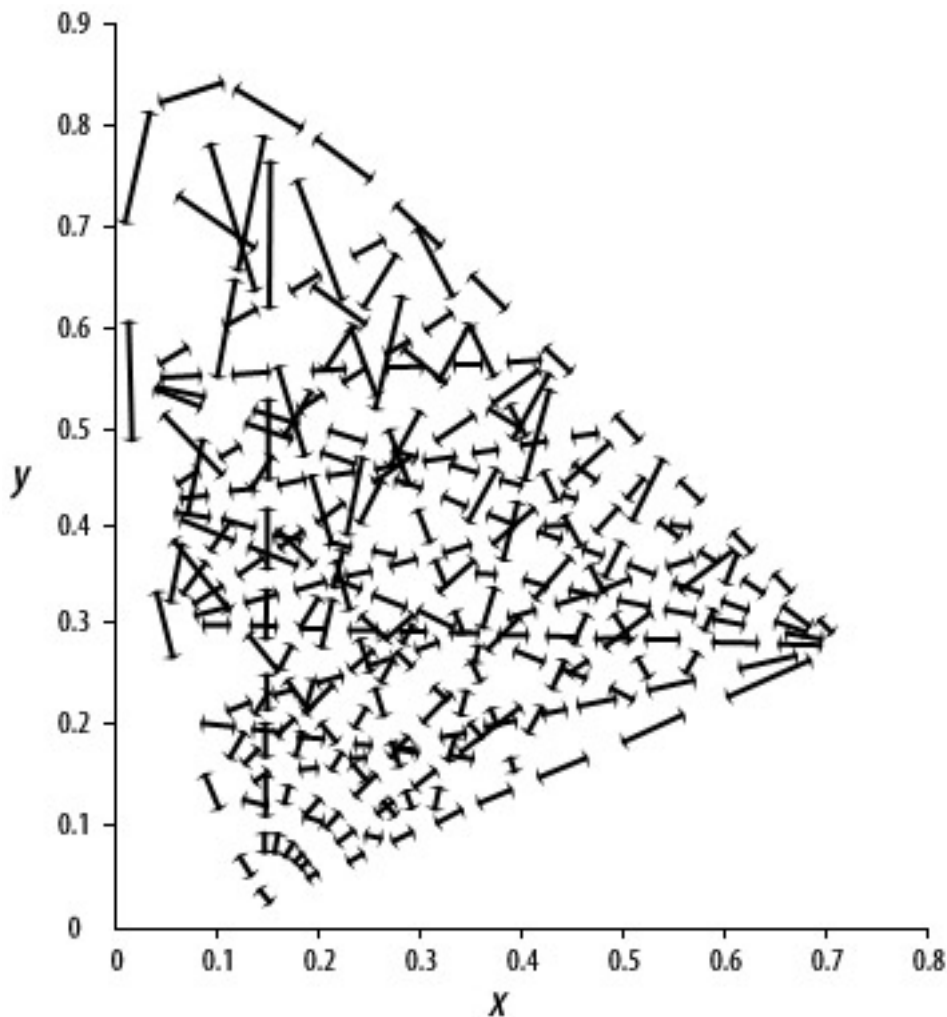
2.1.7 LCH ja LSH

Toisinaan näkee mainittavan värimallit LCH ja LSH. Kuten edellä mainittiin, ne ovat HSB:n sukulaisia, mutta ne muodostetaan suoraan XYZ-värimallista tai sen johdannaisista. LCH tulee sanoista Luminance, Chroma, Hue ja LSH sanoista Luminance, Saturation, Hue. Ne toimivat aivan samoin kuin HSB. Ne tarjoavat intuitiivisen lähestymistavan XYZ-, $L^*a^*b^*$ - ja $L^*u^*v^*$ -värimalleihin, mutta niiden käyttö on melko marginaalista. Ne eivät alun perin ole CIE:n määrittelemiä, ja arvostetuimmat asiantuntijat suhtautuvat niihin hieman nuivasti.

2.1.8 YCC ja sen muunnelmät

Televisiomaailmassa käytetään monenlaisia värimalleja, joille on yhteistä se, että ne erottavat luminanssin krominanssista, eli värikkyyden kirkkaudesta. Yleensä vielä värikkyyden pakataan tiiviimmin kuin kirkkaus; kuten edellä mainittiin, ihminen huomaa herkemmin erot kirkkaudessa kuin värisävyssä, ja tätä hyödynnetään TV-tekniikassa.

Tähän ryhmään kuuluvat YCC (Luminance Y, ja kaksi Chrominance-komponenttia) ja suuret standardit YIQ, jota käytetään amerikkalaisessa NTSC-televisiostandardissa ja YUV, jota käytetään eurooppalaisessa PAL-standardissa. I tulee sanasta Inphase ja Q sanasta Quadrature. Lisäksi YCbCr on digitaalitelevision standardi, kun taas NTSC ja PAL ovat analogisia.



Kuva 8: xy-avaruuden skaala.

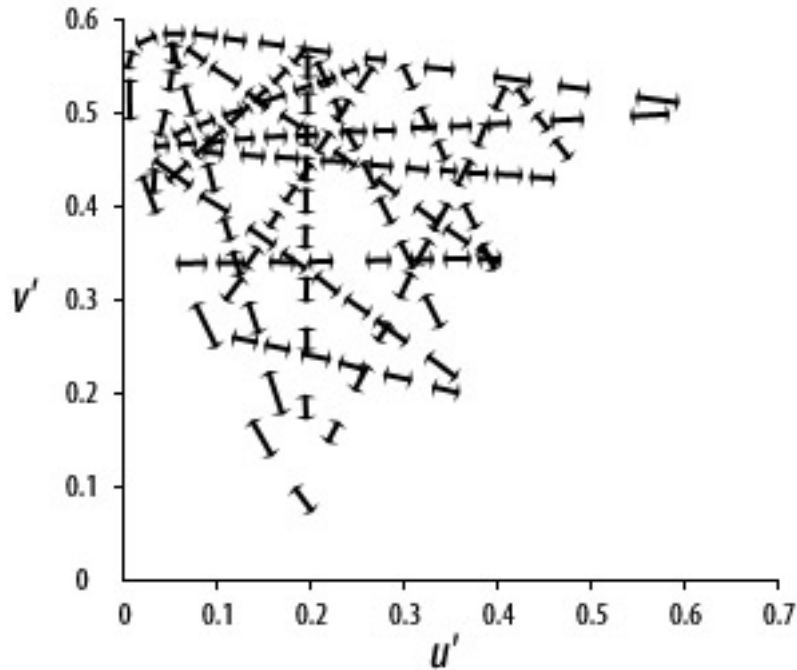
YIQ ja YIV ovat lineaarisia, ja kaikki ovat laiteriippuvaisia ja epäintuitiivisia, mutta tietenkin laajalti käytössä.

2.2 Konversiot värimallien välillä

2.2.1 XYZ↔RGB

Muunnokset standardiviittauksen XYZ ja muiden värimallien välillä ovat tärkeitä. Koska RGB on käytetyin värimalli, muunnos RGB:n ja XYZ:n välillä on hyvin merkittävä. Sen takia tämä muunnos käydään nyt läpi huolellisesti.

Ongelma muunnoksessa on tietysti se, että joka näyttömallissa on hiukan erilaiset päävärisävyt; jopa samanmerkkisten, yksittäisten näyttöjen välillä voi olla pieniä eroja. Periaatteessa muunnosmatriisi pitäisi siis muodostaa jokaiselle näytölle erikseen. Tässä törmätään käytännön ongelmiin.



Kuva 9: uv-avaruuden skaala.

Muunnos RGB→XYZ tapahtuu kertomalla ns. muunnosmatriisilla:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Muunnos XYZ→RGB taas tapahtuu kertomalla käänteismatriisilla:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Matriisi muodostetaan siten, että näyttö asetetaan esittämään kutakin pääväreistä puhtaana, siis sytyttämällä vuorollaan pelkästään kaikki näytön punaiset, vihreät ja siniset forforit, ja mittaamalla spektrofotometrilla päävärien XYZ-koordinaatit. X_r on näytön punaisen värin X-koordinaatti, Y_g vihreän värin Y-koordinaatti ja niin edelleen.

Seuraavassa esitetään esimerkkinä ITU:n (International Telecommunications Union) suosituksen mukaisen näytön muunnosmatriisi.

$$\begin{pmatrix} X_{itu} \\ Y_{itu} \\ Z_{itu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.430574 & 0.341550 & 0.178325 \\ 0.222015 & 0.706655 & 0.071330 \\ 0.020183 & 0.129553 & 0.939180 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Tätä matriisia soveltamalla saadaan seuraavankaltaiset muunnosoperaatiot:

$$X_{itu} = 0.431R + 0.342G + 0.178B$$

$$Y_{itu} = 0.222R + 0.707G + 0.071B$$

$$Z_{itu} = 0.020R + 0.130G + 0.939B$$

$$R = 3.063X_{itu} - 1.393Y_{itu} - 0.476Z_{itu}$$

$$G = -0.969X_{itu} + 1.876Y_{itu} + 0.042Z_{itu}$$

$$B = 0.068X_{itu} - 0.229Y_{itu} + 1.069Z_{itu}$$

2.2.2 RGB↔CMY

Kuten edellä on todettu, konversio RGB:n ja CMY:n välillä on ongelmallinen. Teoriassa konversio on hyvin suoraviivainen:

RGB ↔ CMY

$C, M, Y, R, G, B \in [0, 1]$

$$C = 1 - R$$

$$M = 1 - G$$

$$Y = 1 - B$$

$$R = 1 - C$$

$$G = 1 - M$$

$$B = 1 - Y$$

CMY ↔ CMYK

$C, M, Y, K \in [0, 1]$

$$K = \min \{C, M, Y\}$$

$$C = \frac{C - K}{1 - K}$$

$$M = \frac{M - K}{1 - K}$$

$$Y = \frac{Y - K}{1 - K}$$

$$C = \min \{1, C(1 - K) + B\}$$

$$M = \min \{1, M(1 - K) + K\}$$

$$Y = \min \{1, Y(1 - K) + K\}$$

RGB \leftrightarrow CMYK

$R, G, B, C, M, Y, K \in [0, 1]$

$$K = \min \{1 - R, 1 - G, 1 - B\}$$

$$C = \frac{1 - R - K}{1 - K}$$

$$M = \frac{1 - G - K}{1 - K}$$

$$Y = \frac{1 - B - K}{1 - K}$$

$$R = 1 - \min \{1, C(1 - K) + B\}$$

$$G = 1 - \min \{1, M(1 - K) + K\}$$

$$B = 1 - \min \{1, Y(1 - K) + K\}$$

Mutta koska todellisissa laitteissa käytetyt päävärisävyt poikkeavat teoreettisista "oikeista" punaisesta, sinisestä, vihreästä, magentasta, syaanista ja keltaisesta tämän muunnoksen tulokset ovat yleensä katastrofaalisen virheellisiä. Esimerkiksi, näytön sinistä ja vihreää yhdistämällä pitäisi saada tulostimen syaania, mutta tämä pitää harvoin paikkansa. Jotta muunnos saataisiin tehtyä oikein, pitäisi ensin mitata spektrofotometrillä tulostimen puhtaat päävärit XYZ-värimallissa. Tämän jälkeen voitaisiin tehdä samankaltainen muunnosmatriisi CMY:stä XYZ:aan kuin edellä RGB-muunnoksen kohdalla esitettiin. Tämän jälkeen pitäisi suorittaa muunnos $CMY \rightarrow XYZ \rightarrow RGB$ ja $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow CMY$, jolloin RGB-XYZ-muunnoksissa käytettäisiin kyseessä olevan näytön aiemmin muodostettuja muunnosmatriiseja. Tämä on vaikeaa, ja pitäisi tehdä jokaiselle tulostimelle ja näytölle erikseen jotta muunnos olisi oikea.

2.2.3 RGB ↔ HSB

Koska HSB kuvaa värit sylinterikoordinaatteina, muunnos RGB:stä HSB:hen ei ole lineaarinen. Muunnos voidaan suorittaa seuraavilla kaavoilla:

RGB → HSI

$R, G, B, H, S, I \in [0, 1]$

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$

$$S = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - RG - RB - BG}$$

$$H = \frac{\alpha - \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(R-I)}{G-B}\right)}{2\pi}$$

missä

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ jos } G > B$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{2} \text{ jos } G < B$$

$$H = 1 \text{ jos } G = B$$

Kaavassa käytetään I = intensity B = brightness tilalla, jottei sotketa B = blue kanssa. I pitää laskea ensin, koska sitä tarvitaan H :n laskemiseen. Toinen vaihtoehto jota näkee esitettävän:

RGB → HSI

$R, G, B, H, S, I \in [0, 1]$

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min\{R, G, B\}$$

$$H = \arccos\left(\frac{\frac{1}{2}(R - G) + (R - B)}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}\right)$$

Jos $S = 0$, H on merkityksetön.

Jos $\frac{B}{I} > \frac{G}{I}$ niin $H = 360 - H$ ja $H = \frac{H}{360}$

Monia muitakin muunnoskaavoja näkee, ja eri kaavat vaihtelevat muunnostarkkuudeltaan. Edellistä sanotaan yleensä tarkimmaksi, tosin jälkimmäinen näyttää esiintyvän useammin. Vähänkään vakavamman käyttötarkoituksen ollessa kyseessä kannattaa ottaa tarkemmin selvää eri vaihtoehtoista, koska ne soveltuvat eri tilanteisiin.

HSI \rightarrow RGB

$R, G, B, H, S, I \in [0, 1]$

Muunnetaan aluksi H asteiksi: $H = 360H$

Jos $0 < H \leq 120$ niin

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{3(1-S)} \\ R &= \frac{\frac{1}{3(1+(S \cos H))}}{\cos(60-H)} \\ G &= 1 - (B + R) \end{aligned}$$

Jos $120 < H \leq 240$ niin

$$\begin{aligned} H &= H - 120 \\ R &= \frac{1}{3(1-S)} \\ G &= \frac{\frac{1}{3(1+(S \cos H))}}{\cos(60-H)} \\ B &= 1 - (R + G) \end{aligned}$$

Jos $240 < H \leq 360$ niin

$$\begin{aligned} H &= H - 240 \\ G &= \frac{1}{3(1-S)} \\ B &= \frac{\frac{1}{3(1+(S \cos H))}}{\cos(60-H)} \\ R &= 1 - (G + B) \end{aligned}$$

2.2.4 XYZ \rightarrow L*u*v*

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ L^* &= 903.3 \frac{Y}{Y_n}, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \\ u^* &= 13L^* (\hat{u} - \hat{u}_n) \\ v^* &= 13L^* (\hat{v} - \hat{v}_n) \end{aligned}$$

missä

$$\begin{aligned}\hat{u} &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ \hat{v} &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \\ \hat{u}_n &= \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \\ \hat{v}_n &= \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}\end{aligned}$$

X_n, Y_n ja Z_n ovat kuhunkin tilanteeseen soveltuvan valkoisen pisteen koordinaatit.

2.2.5 $L^*u^*v^* \rightarrow LCH$

$$\begin{aligned}L &= L^* \\ C &= \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \text{ tai } C = Ls \\ H &= \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) \\ H &= 0, \text{ jos } u = 0 \\ H &= \frac{\arctan\left(\frac{v^*}{u^*} + \frac{k\pi}{2}\right)}{2\pi}, \text{ jos } u \neq 0, \text{ missä}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k &= 0, \text{ jos } u^* \geq 0 \text{ ja } v^* \geq 0 \\ k &= 1, \text{ jos } u^* > 0 \text{ ja } v^* < 0 \\ k &= 2, \text{ jos } u^* < 0 \text{ ja } v^* < 0 \\ k &= 3, \text{ jos } u^* < 0 \text{ ja } v^* > 0\end{aligned}$$

2.2.6 $L^*u^*v^* \rightarrow LSH$

$$\begin{aligned}L &= L^* \\ s &= 13(\hat{u} - \hat{u}_n)^2 + \text{sqrt}(\hat{v} - \hat{v}_n)^2 \\ H &= \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) \\ H &= 0, \text{ jos } u = 0 \\ H &= \frac{\arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) + \frac{k\pi}{2}}{2\pi}, \text{ jos } u \neq 0, \text{ missä}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H &= H + \frac{\pi}{2}, \text{ jos } H < 0 \\ k &= 0, \text{ jos } u^* \geq 0 \text{ ja } v^* \geq 0 \\ k &= 1, \text{ jos } u^* > 0 \text{ ja } v^* < 0 \\ k &= 2, \text{ jos } u^* < 0 \text{ ja } v^* < 0 \\ k &= 3, \text{ jos } u^* < 0 \text{ ja } v^* > 0\end{aligned}$$

2.2.7 XYZ→L*a*b*

$$L = 116\sqrt{\frac{Y}{Y_n}} - 16, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856$$

$$L = 903.3\frac{Y}{Y_n}, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856$$

$$a = 500 \left(f \left(\frac{X}{X_n} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \right)$$

$$b = 200 \left(f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right), \text{ missä}$$

$$f(t) = \sqrt[3]{t}, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856$$

$$f(t) = 7.787t + \frac{16}{116}, \text{ jos } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856$$

2.2.8 L*a*b*→LCH

$$L = L^*$$

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$H = 0, \text{ jos } a = 0$$

$$H = \frac{\arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) + \frac{k\pi}{2}}{2\pi}, \text{ jos } a \neq 0, \text{ missä}$$

$$k = 0, \text{ jos } a^* \geq 0 \text{ ja } b^* \geq 0$$

$$k = 1, \text{ jos } a^* > 0 \text{ ja } b^* < 0$$

$$k = 2, \text{ jos } a^* < 0 \text{ ja } b^* < 0$$

$$k = 3, \text{ jos } a^* < 0 \text{ ja } b^* > 0$$

2.2.9 RGB↔YUV

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.000 & 1.140 \\ 1.000 & -0.396 & -0.581 \\ 1.000 & 2.029 & 0.000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

2.2.10 RGB↔YIQ

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.621 \\ 1.000 & -0.272 & -0.647 \\ 1.000 & -1.105 & 1.702 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

2.2.11 YUV↔YIQ

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -1.1270 & 1.8050 \\ 0.0000 & 0.9489 & 0.6561 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.2676 & 0.7361 \\ 0.0000 & 0.3869 & 0.4596 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

3 Lähteet

Tämä artikkeli on koottu lukuisista internetistä kaivetuista lähteistä. Esitetyt faktat on pyritty varmistamaan useista lähteistä. Ongelmana on ollut se, että on vaikea löytää kattavaa esitystä värien teoriasta. Useimmilla sivuilla on käsitelty aihetta vain joltakin osin. Myöskään yhtään tunnustettua kirjaa en onnistunut saamaan käsiini, mutta esityksestä on pyritty tekemään paikkansa pitävä ja tosiasioihin nojautuva. Tämä luettelo ei sisällä kaikkia käytettyjä lähteitä, vain parhaat ja eniten käytetyt.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

http://www.accessexcellence.org/AE/AEC/CC/vision_background.html

<http://www.extremetech.com/article/0,3396,s=1009&a=1683,00.asp>

http://www.fis.unipr.it/fermi/PagInternet_English/GCA_Color_Theory.html

http://www.research.ibm.com/image_apps/colorsci.html

<http://vision.psych.umn.edu/www/people/bosco/colorspace/color.html>

<http://eleceng.ukc.ac.uk/rls3/ColorModels/CompGraphics/RGB/Frame.htm>

<http://www.cg.tuwien.ac.at/research/theses/matkovic/node14.html>

<http://www.adobe.com/support/techguides/color/colormodels/cie.html>

Artikkeleita, FAQ:ta ja muita viimeistellympiä lähteitä:

<http://www.inforamp.net/poynton/Poynton-color.html>

http://www.scarse.org/docs/color_faq.html

Jos lukija kaipaa lisätietoa aiheesta, useissa lähteissä tuli esille seuraavat kirjat, joista löytynee asiantuntevaa tietoa. Itse en ole niitä lukenut, eikä niitä ole käytetty lähteinä, mutta ne ovat esiintyneet niin monien sivustojen lähdeluettelossa, että niihin tutustumista uskaltaa suositella.

Color Science: Concepts and Methods, G. Wyszecki & W. S. Styles, Wiley 1982

Color in Business, Science and Industry, G. Wyszecki & D. B. Judd, Wiley 1975

The Reproduction of Color, R. W. G. Hunt, Fountain, 1995

Myös CIE on tuottanut lukuisia julkaisuja aiheeseen liittyen, ja niihin kannattaa tutustua.