

# **Primjena digitalne fotografije u reproduksijskim medijima**

Katedra za reproduksijsku fotografiju  
Grafčki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

3. predavanje

## **ULOGA SUSTAVA ZA UPRAVLJANJE BOJOM (COLOR MANAGEMENT)**

Tekst je u cijelosti preuzet iz doktorske disertacije Maje Strgar Kurečić  
"Uvođenje CGRT testne karte boja za karakterizaciju digitalnog fotografskog  
sustava", obranjenog 13. veljače 2007, na Grafičkom Fakultetu.

# SADRŽAJ

## 2.2. ULOGA SUSTAVA ZA UPRAVLJANJE BOJOM (COLOR MANAGEMENT)

2.2.1. Komponente Color Management sustava	4
2.2.1.1. Referentni prostor boja (PCS)	4
2.2.1.2. Modul sa algoritmima za usklađivanje boja (CMM)	5
2.2.1.3. ICC profili	6
2.2.1.4. Smještanje i usklađivanje boja ( <i>Rendering Intents</i> )	8
2.2.2. Princip konverzije boja u Color Management sustavu	12
2.2.3. Važnost kalibracije i karakterizacije	15
2.2.4. Kontrola kvalitete reprodukcije boja	17
2.2.4.1. Mjerni uređaji za kontrolu kvalitete reprodukcije	17
2.2.4.2. Matematički izrazi za ukupnu razliku boja	18

## 2.2. ULOGA SUSTAVA ZA UPRAVLJANJE BOJOM (*COLOR MANAGEMENT*)

Upravljanje bojom, u raznim je oblicima, postojalo još od samih početaka bavljenja reprodukcijom boje u grafičkoj industriji [Brües, 2000]. Oduvijek je postojala potreba da se osiguraju uvjeti u kojima će se vrijednosti boja dosljedno i predvidljivo prenositi kroz čitav tijek reproduksijskog procesa, a u cilju dobivanja što vjernije reprodukcije. U klasičnoj reprofotografiji, koja se bazirala na fotomehaničkim principima, rezultat reprodukcije je u najvećoj mjeri ovisio o iskustvu i vještini reprofotografa zaduženog za snimanje originala. Pojavom digitalnih tehnologija, tradicionalne metode više nisu bile dovoljne za kvalitetno upravljanje bojom, te se javlja potreba za razvojem novih strategija. Najavu digitalno potpomognute reprodukcije boje u grafičkoj industriji, označila je pojava Crosfield-ovog kolor skenera *Magnascan 450*, 1969. godine. Tri godine kasnije, na tržištu se pojavio prvi komercijalni skener *Hell DC 300 Chromagraph* [Field, 2001]. U to vrijeme, većina reproduksijskih sustava bila je definirana i kalibrirana kao zatvoreni sustav, gdje su transformacije boja bile optimizirane za točno određeni par ulazno-izlaznih uređaja. Pojavom stolnog izdavaštva kasnih 80-tih, grafička industrija dobila je nov uzlet, ali i nove probleme koje je bilo potrebno riješiti. Reprodukcijski sustavi sve su češće otvoreni sustavi, sa cijelim nizom različitih ulaznih (skeneri, digitalni fotoaparati) i izlaznih uređaja (kolor printeri, konvencionalni tisak, digitalni tisak, Internet). Glavni problem leži u činjenici da će slikovne informacije, prije završne faze reprodukcije, proći kroz niz transformacija ovisnih o karakteristikama (tj. ograničenjima) uređaja ili medija. Tako će, na primjer, isti dokument izgledati različito kad se printa na različitim printerima, gleda na različitim monitorima ili printa na printeru i uspoređuje sa slikom na monitoru, čime proces reprodukcije postaje potpuno nepredvidljiv.

Radi rješavanja tog problema i stvaranja određenih industrijskih standarada, 1993. godine osnovan je *International Color Consortium* (ICC) - udruženje tvrtki osnovano s ciljem izrade i promoviranja otvorenog, primijenjivog na različite platforme i neutralnog (neovisnog o proizvođaču) sustava za upravljanje bojom, nazvanog *ICC Color Management*. Osnivači su osam velikih svjetskih tvrtki: Adobe Systems Incorporated, Agfa-Gevaert N.V., Apple Computer, Eastman Kodak, Microsoft, Silicon Graphics, Sun Microsystems i Taligent. Danas grupu čini oko 70 članica. Najvažniji proizvod ove grupe je specifikacija ICC profila koji čine osnovu sustava za upravljanje bojom. Prvi profili pojavili su se na tržištu početkom 90-tih, a profili koji su danas u upotrebi razvijeni su na temelju Apple-ovih *ColorSync* profila. Aktualna verzija ICC specifikacije je 4.2.0.0 [ICC.1:2004-10].

Color Management podrazumijeva korištenje odgovarajućeg hardvera, softvera i metodologije za kontrolu i podešavanje boja u reproduksijskom sustavu [Giorgianni, 1998]. Drugim riječima, Color Management je programska podrška za kalibraciju i karakterizaciju svih ulaznih i izlaznih uređaja unutar reproduksijskog lanca, te za automatizaciju svih potrebnih konverzija boja među uređajima, sa ciljem standardizacije reproduksijskih procesa i postizanja željene reprodukcije boja neovisno o korištenom uređaju.

## 2.2.1. Komponente Color Management sustava

Osnovu rada Color Management sustava čine tri povezane cjeline [Fraser et al., 2005]:

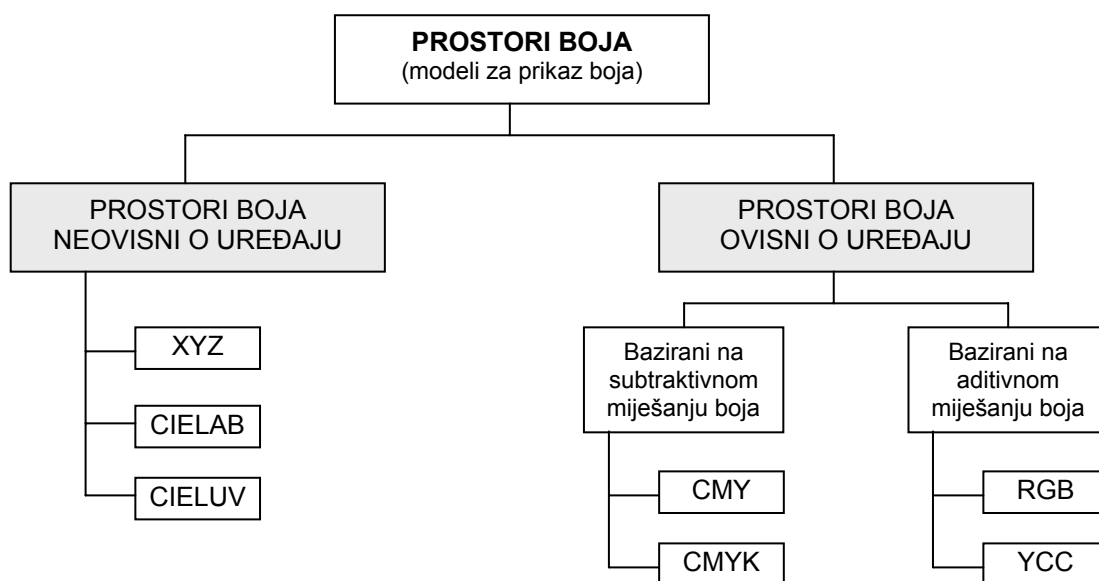
1. Referentni prostor boja (*Profile Connection Space - PCS*)
2. Modul sa algoritmima za usklađivanje boja (*Color Management Module - CMM*)
3. ICC profili

Kao dio sustava, točnije kao parametri profila, postoje i tkz. *Rendering Intents* - načini na koje Color Management sustav smješta i usklađuje boje koje se prilikom konverzije nađu izvan odredišnog opsega boja (gamuta izlaznog uređaja).

### 2.2.1.1. Referentni prostor boja (PCS)

Prostori boja, prema klasifikaciji [IFRA, Special Report 2.18, 1996.], mogu biti podijeljeni u dvije osnovne grupe (Slika 9.):

- Prostori boja ovisni o uređaju (*device dependent*)
- Prostori boja neovisni o uređaju (*device independent*).



Slika 9. Klasifikacija prostora boja

Prostori boja koji su ovisni o uređaju na kojem se primjenjuju, orijentirani su na fizičke komponente i karakteristike samog uređaja, tj. ovise o kromatskim karakteristikama seta primarnih boja koji se koristi kod procesa bojanja. Procesne boje koje se koriste u tisku uvijek se nazivaju CMYK, iako npr. magenta otisnuta na jednom uređaju može izgledati više žućkasto, a na drugom više plavkasto. Isto tako, kod uređaja koji koriste primarne boje aditivne sinteze, boja varira ovisno o korištenim RGB fosforima (kod monitora) ili korištenim RGB filterima (kod senzora skenera i digitalnih fotoaparata). Posljedica toga je da će isti niz RGB ili CMYK vrijednosti producirati različite boje na različitim uređajima, (ili na istom uređaju, ako se npr. koristi druga vrsta papira).

Prostori boja neovisni o uređaju, definiraju boju na bazi percepcije standardnog promatrača, a ne na mogućnostima uređaja. Najvažnija grupa prostora boja neovisnih o uređaju, temelji se na postavkama CIE komisije iz 1931. i 1964. godine. Zbog nedostataka XYZ prostora boja, prvenstveno zbog perceptualne neuniformiranosti, CIE komisija definirala je 1976. godine CIELAB i CIELUV prostore boja, u kojima udaljenost između bilo koje dvije boje u prostoru odgovara osjetilnoj blizini te dvije boje [Berns, 2000].

Većina Color Management sustava, kao referentni prostor boja, koristi CIELAB prostor boja, koji je prihvaćen kao standard za mjerenje i uspoređivanje boja u grafičkoj industriji [ISO13655:1996.; ICC.1:1998-09]. CIELAB je trodimenzionalni prostor boja, čije se koordinate dovode u vezu sa psihičkim karakteristikama boje, odnosno odgovaraju teoriji suprotnih boja tj. parova (*opponent color theory*), svjetlo-tamno, crveno-zeleno, žuto-plavo. Uz svoje najvažnije prednosti koje se odnose na uvođenje svjetline kao treće dimenzije, koordinata koje slijede zonsku teoriju, te formula za izračunavanje kolorimetrijske razlike koje su pridonjele širokoj primjeni u upravljanju bojama, CIELAB ima i mogućnost predviđanja prikazivanja boja (što je posljedica uvođenja kromatske adaptacije) pa se koristi i kao model za prikazivanje boja u mnogim aplikacijama [Milković, 2004]. Za CIELAB referentni prostor boja definirano je standardizirano osvjetljenje  $D_{50}$ , pa se i uzorci moraju mjeriti i kontrolirati pod istim osvjetljenjem.

Uloga referentnog prostora boja unutar Color Management sustava je da predstavlja vezu između različitih uređaja koji sudjeluju u reprodukcijском procesu. On omogućuje konverziju boja iz prostora ovisnog o uređaju u CIELAB prostor boja (uz korištenje pripadajućih profila uređaja). U praksi, do konverzije boja dolazi kad je vrijednosti originala potrebno prebaciti u vrijednosti određene izlazne jedinice. RGB vrijednostima boja koje su nastale digitalizacijom slike pomoću skenera ili digitalnog fotoaparata, pridružuju se vrijednosti kojima je ista boja opisana u referentnom prostoru. Jednom kad se RGB ili CMYK vrijednostima pridruže CIELAB vrijednosti, boje postaju neovisne o uređaju.

#### **2.2.1.2. Modul sa algoritmima za usklađivanje boja (CMM)**

Dio Color Management sustava koji doslovno vrši konverziju boja, tj. izračunava i prevodi vrijednosti boja između dva uređaja, je modul zvan *Color Management Module* (u nekoj literaturi pojavljuju se i dva sinonima: *Color Matching Engine* i *Color Matching Module*). CMM je u osnovi softver koji obavlja sve matematičke operacije potrebne za konvertiranje RGB ili CMYK vrijednosti boja, koristeći CIELAB podatke o boji koji su sadržani u profilu. Numeričke vrijednosti boja iz izvornog prostora boja preračunava u vrijednosti referentnog prostora boja (PCS), a odatle u vrijednosti boja bilo kojeg izlaznog prostora tj. uređaja. CMM može vršiti i različite simulacije prevođenja boja u različite prostore boja s ciljem predviđanja mogućih pogrešaka u procesiranju boja.

CMM radi na principu interpolacije tj. proračuna nepoznate međuvrijednosti boja pomoću dvije poznate. Proces interpolacije je neizbježan, jer profili ne mogu obuhvatiti cijeli set mogućih signala (vrijednosti boja) koje uređaji mogu proizvesti.

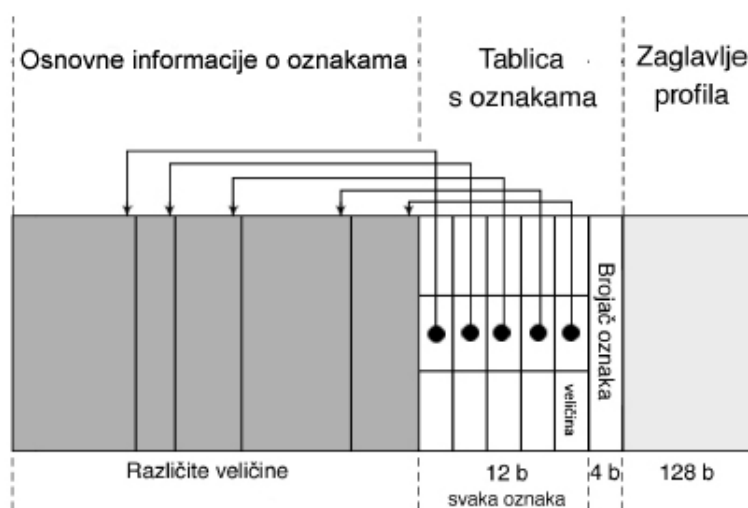
Profil uređaja može sadržavati oznaku pomoću koje može zatražiti određeni CMM, ako je dostupan. Ako nije dostupan, profil radi s bilo kojim drugim CMM-om koji odgovara ICC specifikacijama. Najčešće korišteni CMM-ovi koji se nude u većini aplikacija su: Adobe (ACE), Microsoft ICM, Apple ColorSync i Apple CMM [Fraser et al., 2005].

### 2.2.1.3. ICC profili

ICC profil je datoteka koja opisuje ponašanje uređaja, na način da povezuje vrijednosti boja koje daje uređaj (skup RGB ili CMYK vrijednosti), sa vrijednostima boja neovisnim o uređaju (CIELAB vrijednosti). Drugim riječima, profil je veza između uređaja i referentnog prostora boja, tj. veza između strojnog i ljudskog viđenja (interpretiranja) boja.

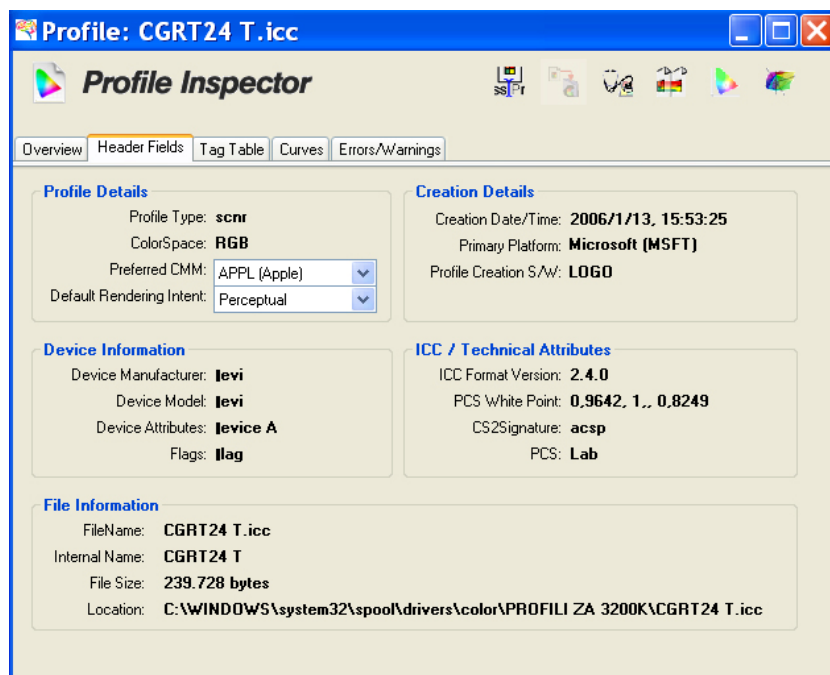
Uređaj ili dokument kojem nije dodijeljen odgovarajući profil, nije moguće uključiti u Color Management sustav. ICC profil opskrbljuje Color Management sustav podacima koji su mu potrebni za konverziju vrijednosti boja između prostora boja uređaja i referentnog prostora boja.

Profil se, kao datoteka, sastoji od tri dijela: zaglavlje (*profile header*), tablica sa oznakama (*tag table*) i osnovne informacije o oznakama (*tagged basic data*). Slika 10.

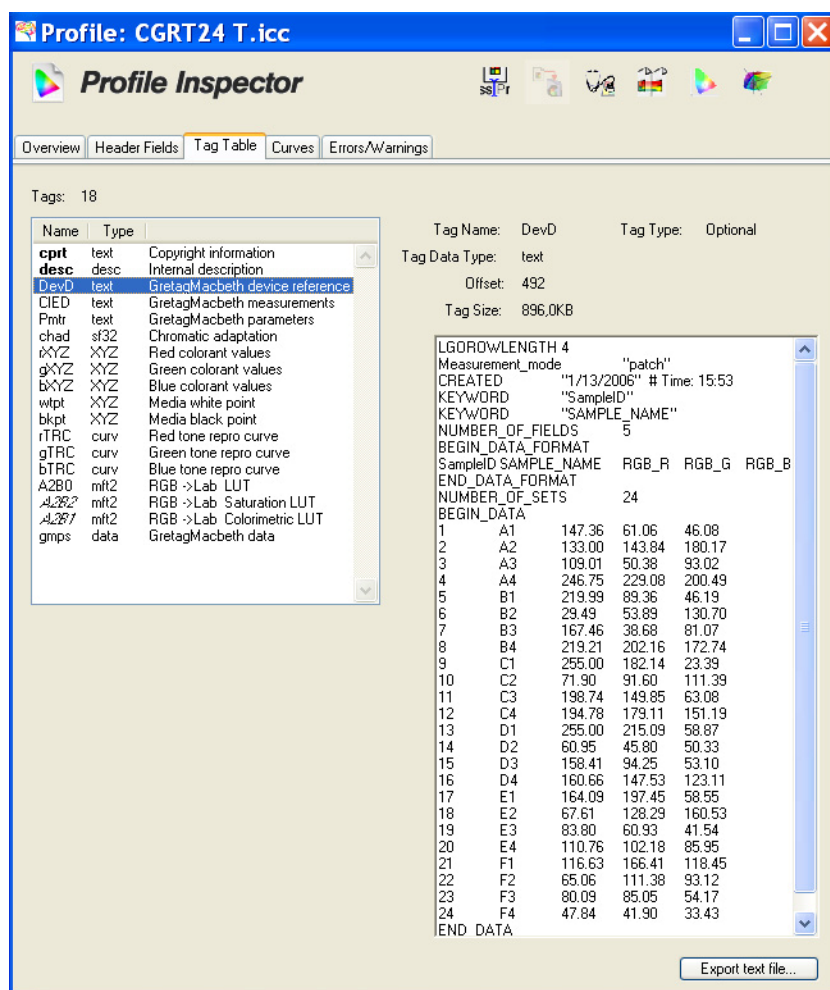


Slika 10. Struktura ICC profila

Zaglavlje sadrži informacije potrebne za pretraživanje i sortiranje ICC profila i uvijek je veličine 128 bajtova. Mora sadržavati podatke o proizvođaču, vrsti profila, oznaku referentnog prostora boja, itd. Tablica s oznakama sadrži popis svih označenih elemenata u profilu kojima je opisan uređaj (ili prostor boja) te govori Color Management sustavu gdje se što nalazi u tablici s osnovnim informacijama o oznakama. Svaka oznaka zauzima 12 bajtova. Osnovne informacije o oznakama sadrže potrebne informacije koje predstavljaju karakteristike nekog uređaja (gamut, dinamički raspon i krivulje reprodukcije tonova) i nemaju ograničenu memoriju. Bitno je da se ne pretjeruje s količinom informacija u profilu kako njegova veličina ne bi prešla optimalne razmjere. Izlazni profili obično su veći od ulaznih jer moraju sadržavati dvostruko više tablica. Na Slici 11. i Slici 12., prikazana je struktura ICC profila digitalnog fotoaparata napravljenog u eksperimentalnom dijelu ovog rada.



Slika 11. ICC profil digitalnog fotoaparata sa informacijama u zaglavlju (ColorThink aplikacija)



Slika 12. ICC profil digitalnog fotoaparata sa listom važnijih oznaka (ColorThink aplikacija)

Postoje tri osnovna tipa profila, profili ulaznih uređaja (*input profiles*), profili monitora (*display profiles*) te profili izlaznih uređaja (*output profiles*). Ulazni profili odnose se na opsege obojenja RGB ulaznih jedinica i sadrže podatke potrebne za konverziju RGB vrijednosti boja koje prikazuje uređaj u vrijednosti boja s kojima radi referentni prostor boja (dalje: PCS). Njihova uloga je prevesti cijeli raspon boja objekta prilikom njihove konverzije iz ulaznog u PCS opseg boja. Profili izlaznih jedinica odnose se na opsege obojenja CMYK izlaznih jedinica i prevode podatke o rasponu boja originala poslane iz PCS-a u vrijednosti boja koje izlazna jedinica može prikazati. Profili monitora simuliraju vrijednosti boja objekta na ekranu, također u RGB vrijednostima. Profili ulaznih jedinica najčešće su jednosmjerni (oznaka *AtoB*) što znači da podaci za konverziju vrijednosti boja putuju samo u jednom smjeru, iz profila u PCS. Profili monitora i izlaznih jedinica su dvosmjerni (oznake *AtoB* i *BtoA*). Kod monitora to znači da Color Management sustav iz PCS-a šalje RGB vrijednosti originala monitoru koji svojim rasponom boja nastoji reproducirati te vrijednosti, koje zatim šalje nazad u PCS prema profilu izlazne jedinice. Monitor istovremeno ima karakteristike i ulazne i izlazne jedinice. Izlazni profili primaju iz PCS-a informacije o bojama koje treba reproducirati, ali i omogućuju prikaz na monitoru onih dokumenata koji već imaju ugrađeni izlazni profil. Zbog toga su profili izlaznih jedinica veći, jer moraju sadržavati tablice s podacima o konverziji iz PCS-a u izlazni opseg i obratno. Profili se uvijek koriste u parovima: izvorni (*source profile*) i odredišni (*destination profile*). Tako je prilikom unosa podataka u sustav, profil skenera (ili digitalnog fotoaparata) izvorni, a profil monitora odredišni. Kad se podaci šalju na printer, profil monitora postaje izvorni, a profil printera odredišni [Fraser et al., 2005].

#### **2.2.1.4. Smještanje i usklađivanje boja (*Rendering Intents*)**

Kod reproduksijskog procesa u grafičkoj tehnologiji, opseg boja (dalje: gamut) ulaznih jedinica (skenera, digitalnih fotoaparata) koji koriste RGB model boja, u pravilu je veći od gamuta izlaznih uređaja (printera, tiskarskih strojeva) koji koriste CMYK model za prikaz boja. Osim u veličini (opsegu) gamuta, razlike između gamuta mogu biti i u obliku granica gamuta, te lokaciji tih gamuta unutar uniformiranog CIE prostora boja [Milković, 2004.].

Smještanje i usklađivanje boja koje se prilikom konverzije nađu izvan gamuta izlaznog uređaja, naziva se mapiranje gamuta. Parametri profila koji određuju način na koji će Color Management sustav te boje smjestiti i uskladiti zovu se engl. *Rendering Intents*.

Godine 2001. ICC je definirao i standardizirao četiri osnovna načina mapiranja gamuta, s obzirom na namjeru prikaza informacija o boji:

- perceptualno usklađivanje (*Perceptual Rendering Intent*),
- relativno kolorimetrijsko usklađivanje (*Relative Colorimetric Rendering Intent*),
- apsolutno kolorimetrijsko usklađivanje (*Absolute Colorimetric Rendering Intent*) i
- saturacijsko usklađivanje (*Saturation Rendering Intent*).

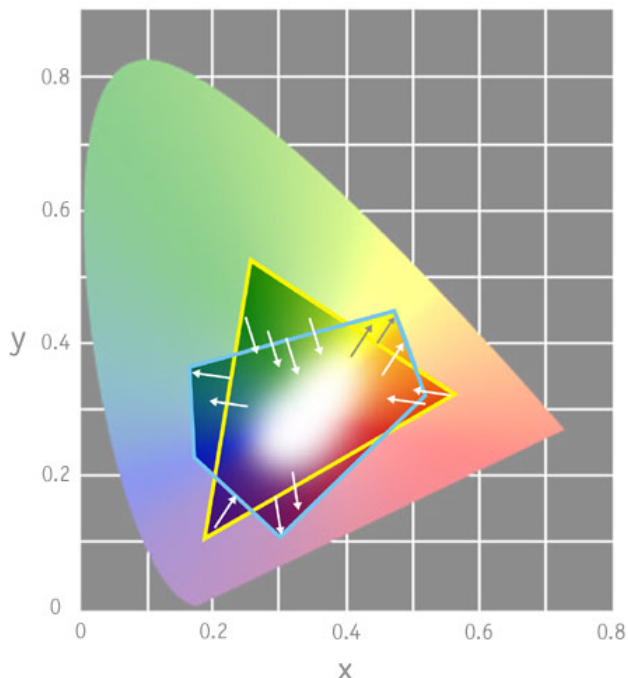
Uputstva za smještanje boja mogu biti sadržana u profilu kao predodređene vrijednosti ili se mogu odabrati u dijaloškim okvirima aplikacija prilikom ugrađivanja profila i konverzije.



**Perceptualno usklađivanje** sve boje ulaznog gamuta ravnomjerno komprimira, kako bi u potpunosti stale u gamut izlaznog uređaja. Slika 13. Takvim prevođenjem mijenjaju se sve boje originala, pa čak i one koje se mogu prevesti u izlazni gamut bez promjena. Točnost kolorimetrijskih karakteristika boje, izmijenjena je u korist ukupnog perceptualnog doživljaja, koji se temelji na zadržavanju relativnog odnosa među bojama.

Metoda je pogodna za prilagodbu i ispis skeniranih ili digitalno snimljenih fotografija (RGB) čiji je raspon boja znatno veći od raspona boja bilo kojeg standardnog CMYK printera.

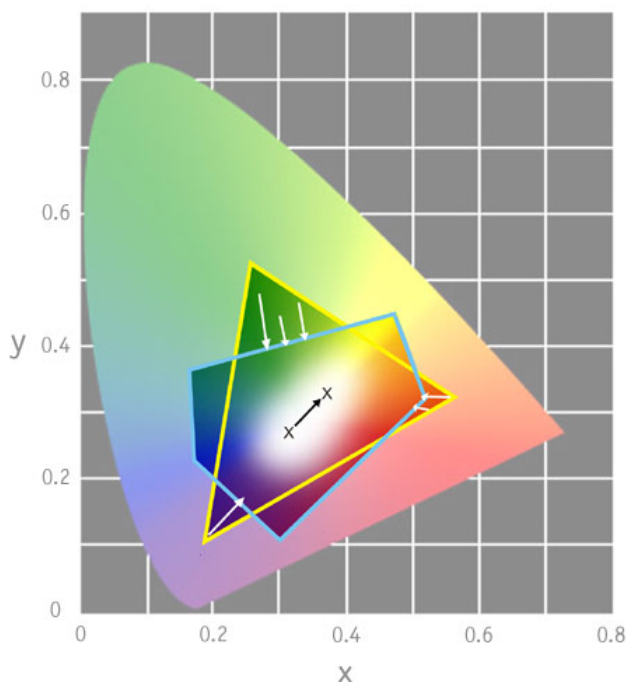
Perceptualno usklađivanje u većini je ICC profila predodređena vrijednost. Iako niti jedna izlazna jedinica ne može postići idealne CIELAB vrijednosti za bijelu i crnu boju (100,0,0 i 0,0,0), perceptualni način usklađivanja, pri izvršavanju kompresije boja uvijek koristi te idealne vrijednosti.



*Slika 13. Perceptualno usklađivanje boja*

Kod **relativnog kolorimetrijskog usklađivanja** sve boje koje pripadaju gamutima i ulaznog i izlaznog uređaja, ostaju nepromijenjene. Boje koje su izvan gamuta izlaznog uređaja, mapiraju se u najbliže boje iste svjetline (ovisno o crnoj i bijeloj točki), ali različitog zasićenja koje se nalaze na granicama gamuta izlaznog uređaja. Slika 14. Time se nastoji zadržati što više boja iz izvornog opsega i da promijenjene boje imaju što manji  $\Delta E$ . Bijela točka izvornog profila mijenja se u bijelu točku odredišnog, pa se relativno usklađivanje bazira se na brznoj prilagodbi ljudskog vida bijeloj boji medija koji promatramo. Prema tome, i boje se prilagođavaju bijeloj boji papira.

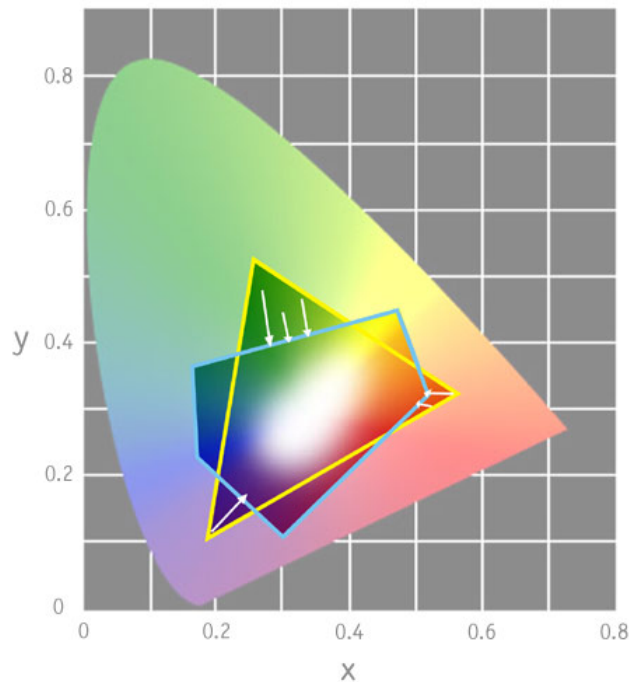
Metoda koristi se za općenite namjene, najčešće za skenirane fotografije i za konverzije boja između prostora boja koji imaju podjednake veličine, npr. CMYK u CMYK.



*Slika 14. Relativno kolorimetrijsko usklađivanje boja*

Kod **apsolutnog kolorimetrijskog usklađivanja** sve boje koje pripadaju gamutima i ulaznog i izlaznog uređaja, ostaju nepromijenjene. Boje koje su izvan gamuta izlaznog uređaja, mapiraju se u najbliže boje različitog zasićenja, koje se nalaze na granicama izlaznog gamuta. Slika 15. Na taj način nastoji se prikazati što je moguće više izvornih boja. Za većinu tonskog raspona postižu se približni rezultati, no razlika među usklađenim bojama ( $\Delta E$ ) veća je nego kod relativnog kolorimetrijskog usklađivanja.

Ako se koristi apsolutno kolorimetrijsko usklađivanje, bijela točka odredišnog profila ne uzima se u obzir, već se kopira bijela točka izvornog profila. Zbog toga se taj način usklađivanja koristi za ispis probnih otisaka. Ako se izvodi konverzija boja iz profila koji opisuje standardne uvjete npr. novinskog tiska, u profil uređaja za probni otisak, kopiranjem bijele točke izvornog profila u odredišni, na otisku će se simulirati boja papira koji se koristi u novinskom tisku. Apsolutno kolorimetrijsko usklađivanje ne smije se koristiti za konverziju boja u konačni opseg koji se šalje u tisak već samo za simulaciju bijele boje na monitoru ili probnom otisku. Metoda je prikladna i za prilagodbu spot boja.



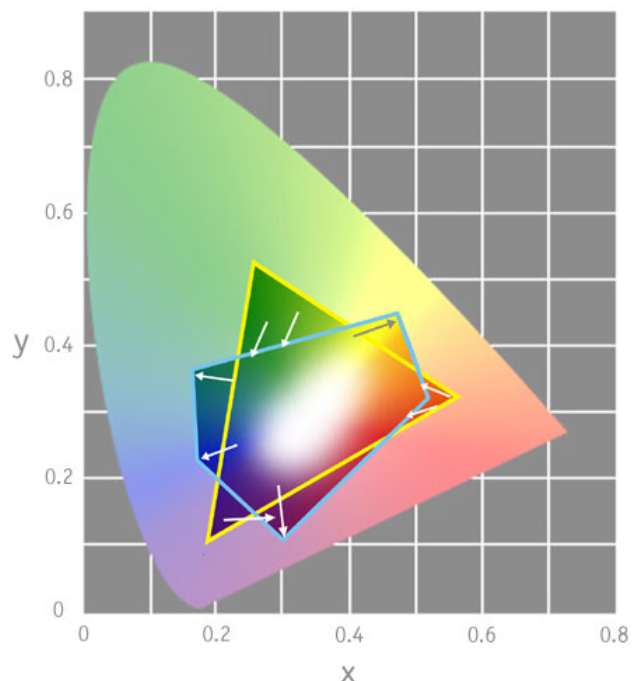
Slika 15. Apsolutno kolorimetrijsko usklađivanje boja

Kod **saturacijskog usklađivanja** sve boje koje su izvan gamuta izlaznog uređaja, obično se preslikavaju u najbliže korespondirajuće boje istog zasićenja, dok svjetlina i ton mogu biti promijenjeni.

Boje koje se nalaze unutar granica gamuta izlaznog uređaja, pomiču se prema granicama gamuta kako bi se dodatno povećalo zasićenje. Slika 16.

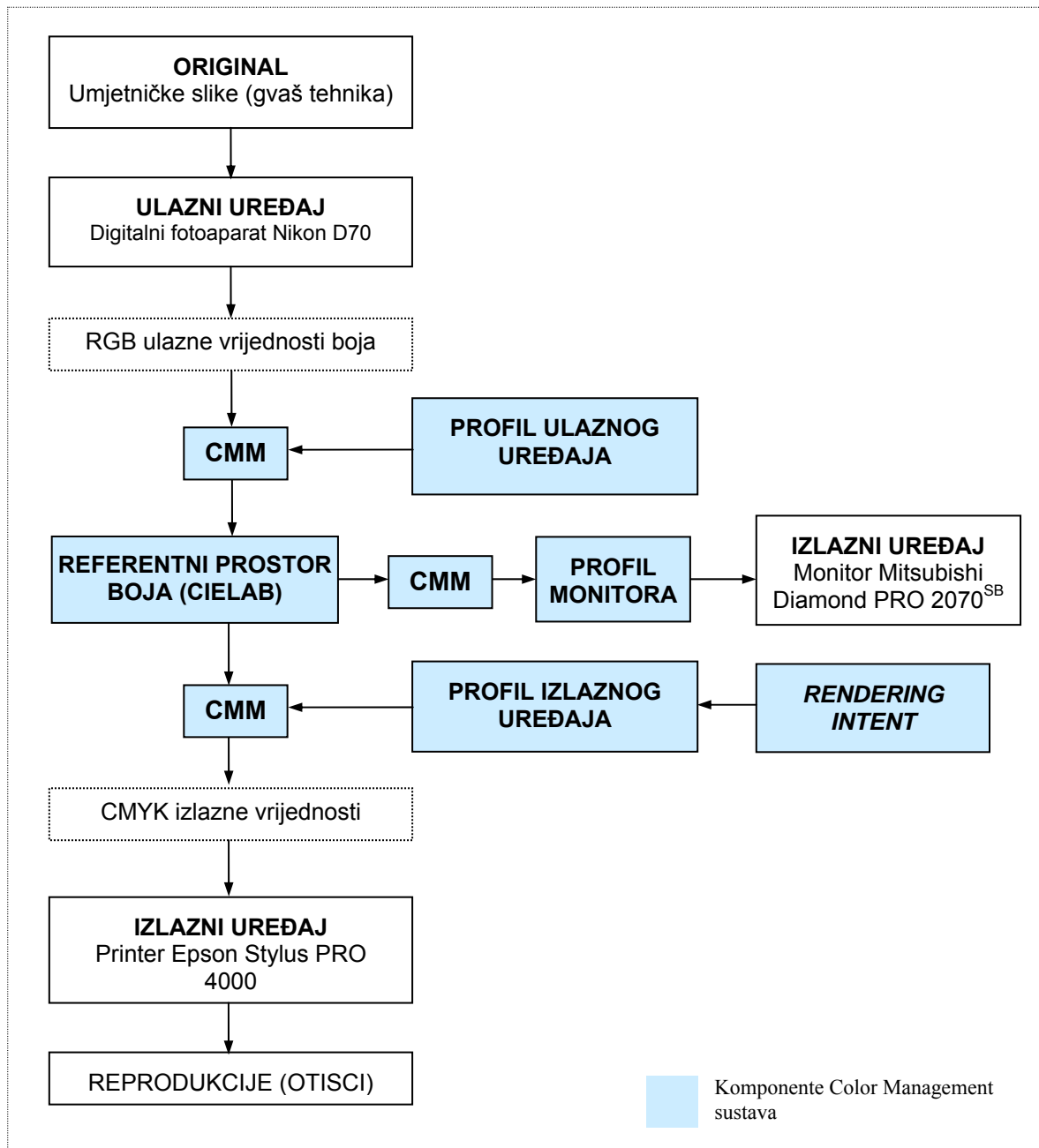
Kolorimetrijska točnost između originala i reprodukcije kod saturacijskog usklađivanja, rijetko je postignuta, jer ne predstavlja prioritet reprodukcije.

Ova metoda je prikladna za grafove, logotipe ili tablice, gdje su žive, zasićene boje bitnije nego točan odnos među bojama (kao na primjer, na fotografiji).



Slika 16. Saturacijsko usklađivanje boja

Nakon što su objašnjene glavne komponente Color Management sustava, moguće je dijagramom prikazati njihovo mjesto u tijeku grafičke reprodukcije. U diagramu na Slici 17. prikazan je stvarni tijek reproduksijskog procesa, sa svim ulaznim i izlaznim uređajima koji su korišteni u eksperimentalnom dijelu ovog rada.



Slika 17. Tijek reproduksijskog procesa uz korištenje Color Managementa

## 2.2.2. Princip konverzije vrijednosti boja u Color Management sustavu

Da bi se ostvarila točna reprodukcija boja između dva uređaja, prvo je potrebno vrijednosti boja koje daje uređaj transformirati u prostor boja neovisan o uređaju (CIELAB ili CIEXYZ), i tek onda iz tog modela boja ponovo napraviti konverziju u "o uređaju ovisan" prostor boja. Transformacije boja iz prostora boja ovisnog o uređaju u neovisni, tj. referentni prostor boja (PCS) i obratno, čine osnovu karakterizacije nekog uređaja.

PCS je u doslovnom prijevodu, prostor gdje dolazi do povezivanja profila ulaznih i izlaznih uređaja. Color Management sustav usklađuje RGB i CMYK opise boja sa perceptivno usklađenim CIE vrijednostima. Ugrađivanjem profila u dokument ne mijenjaju se ulazne RGB vrijednosti, već se na njih primjenjuje specifična interpretacija [Fraser at all, 2005]. Proračune i konverziju RGB i CMYK vrijednosti boja koristeći podatke o boji koji su sadržani u profilu, izvodi Color Management Module (CMM). Budući da profil ne može sadržavati sve definicije referentnog prostora boja za sve moguće kombinacije RGB i CMYK vrijednosti, CMM obavlja izračun međuvrijednosti boja procesom interpolacije. Interpolacija i točnost algoritma koji koristi CMM neznatno utječu na rezultat dobivene boje, pa se preporuča da se u tijeku reprodukcije uvijek koristi isti CMM. Najveći utjecaj na kvalitetu konverzije boja imaju sami profili [Fraser at all, 2005].

Konverzija vrijednosti boja, odvija se u četiri koraka (Slika 18.):

1. Color Management sustav očitava podatke u ulaznom profilu te izrađuje tablicu, koja originalne RGB vrijednosti povezuje s odgovarajućim CIELAB vrijednostima boja iz PCS-a, uz relativno kolorimetrijsko usklađivanje. Tako RGB vrijednosti ulazne jedinice postaju neovisne o uređaju (*device-independent*).
2. Color Management sustav očitava podatke u izlaznom profilu i izrađuje tablicu koja povezuje određene CMYK (ili RGB) vrijednosti s odgovarajućim CIELAB vrijednostima boja iz PCS-a, koristeći pritom neki od načina usklađivanja boja (*rendering intent*).
3. Koristeći interpolacijski algoritam definiran u CMM-u, Color Management sustav, preko zajedničkih PCS vrijednosti, međusobno spaja dvije tablice u jednu, koja direktno povezuje ulaznu i izlaznu jedinicu.
4. Color Management sustav provjerava svaki piksel iz ulazne slike preko ranije definirane tablice, prebacujući vrijednosti boja iz ulaznog u izlazni profil.

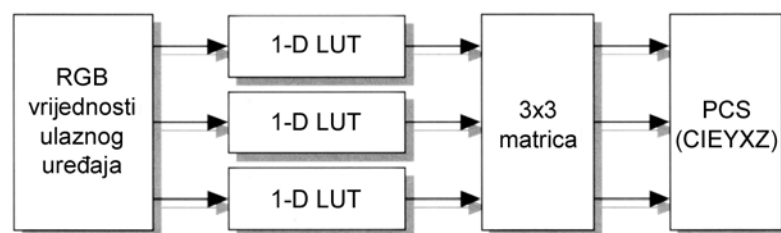


Legenda: **a** ... RGB ulazne vrijednosti, **b** ... PCS, **c** ... CMYK izlazne vrijednosti

Slika 18. Četiri koraka konverzije boja

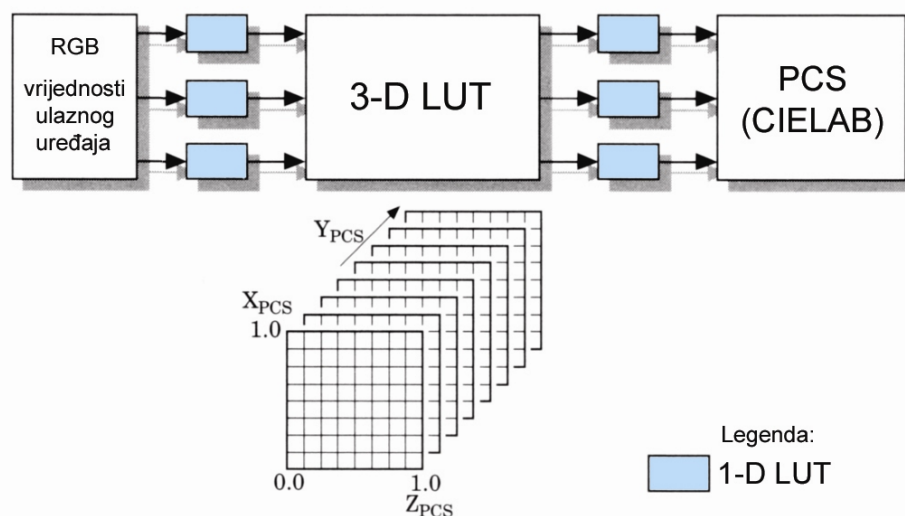
Profili različitih ulaznih i izlaznih uređaja razlikuju se po matematičkom modelu koji koriste za konverziju boja. Kao što je ranije spomenuto, ICC profili sadrže informacije o načinu konverzije vrijednosti boja iz prostora boja ovisnog o uređaju u referentni prostor boja. Ta transformacija može biti bazirana na  $3 \times 3$  matrici ili na trodimenzionalnoj tablici boja, eng. *3D Look-Up Table* (dalje: LUT).

Na Slici 19. prikazan je model transformacije boja baziran na  $3 \times 3$  matrici. Taj model koristi CIEXYZ prostor boja kao referentni prostor. Sadrži oznake (*tags*) koje opisuju CIEXYZ vrijednosti primara, koji formiraju  $3 \times 3$  matricu (niz od 9 brojeva). Osim toga, sadrži i oznake koje definiraju krivulje reprodukcije tonova (*Tone Reproduction Curve - TCR*) svakog primara. Radi toga je, za ovaj model transformacije, u praksi usvojen naziv *TCR-Matrix Model* [Rao et al., 2005]. Prednost modela je njegova jednostavna struktura, koja ne povećava znatnije ukupnu memorijsku veličinu ICC profila. Jednodimenzionalna tablica boja sadrži krivulju reprodukcije tonova za pojedini kanal, kojom je specificirana relacija, odnosno transfer funkcija, između RGB digitalnih ulaznih vrijednosti i njihovih lineariziranih RGB izlaznih vrijednosti. To je napravljeno posebno za svaki kanal ulaznog uređaja (tri 1-D LUT tablice). Nakon toga, slijedi matrica koja transformira vrijednosti dobivene linearizacijom 1-D LUT tablicama u kolorimetrijske koordinate X, Y i Z.



Slika 19. TCR Matrix Model transformacije boja

Na Slici 20. prikazana je jedna od mogućih konfiguracija modela transformacije boja baziranog na LUT tablici. Taj model kao referentni prostor boja koristi CIELAB prostor boja.



Slika 20. 3-D LUT transformacije boja

Transformacija ulaznih vrijednost započinje, kao i u *Matrix* modelu, sa 1-D LUT tablicom. Nakon linearizacije, slijedi 3-D LUT koji predstavlja tablicu sa brojevima koji omogućuju da se svakoj ulaznoj vrijednosti pronađe odgovarajuća izlazna vrijednost. Ovaj model transformacije boja pogodan je za opisivanje kompliciranih uređaja, sa više od tri kanala (kao što su CMYK printeri, ili čak printeri sa većim brojem boja). Radi velike preciznosti, koriste se i kod izrade ulaznih profila (skenera i digitalnih fotoaparata), dok se za profile monitora najčešće koristi model baziran na matrici.

Profili bazirani na matrici, memorijski su mnogo manji, od onih baziranih na LUT tablicama. Iako se u zadnje vrijeme dosta eksperimentira sa većim matricama; 3x9, 3x11 [Hong et al., 2001], najčešće se koriste 3x3 matrice, koje se sastoje samo od 9 brojeva, dok veličina LUT tablica ovisi o broju vrijednosti boja opisanih u tablici. U odabiru broja vrijednosti boja, odlučujuću ulogu ima proces karakterizacije koji se provodi aplikacijom za izradu profila. Proizvođači tih aplikacija su često primorani napraviti kompromis između kvalitete koja se može postići korištenjem većeg broja vrijednosti boja opisanih u LUT tablici, nasuprot povećanju memorijske veličine ICC profila i smanjenja njegove brzine. Osim toga, LUT tablice su jednosmjerne, potrebne su posebne tablice za svaki smjer konverzije boja. Također, posebne tablice moraju se napraviti i za svaki *Rendering Intent*. Budući da je iz relativnog kolorimetrijskog načina usklađivanja moguće prerečunati vrijednosti u apsolutno kolorimetrijski, potrebno je tri, a ne četiri LUT tablice [Brües, 2000]. Dakle, tipičan izlazni profil sastoji se od ukupno šest LUT tablica (tri za jedan smjer konverzije i tri za drugi).

### 2.2.3. Važnost kalibracije i karakterizacije uređaja

Za uspješnu provedbu Color Managementa, potrebno je izvršiti pripremne radnje koje obuhvaćaju procese kalibracije i karakterizacije uređaja koji sudjeluju u reprodukcijском procesu. Iako se provode sa drugačijim ciljem, sami postupci su vrlo slični, pa se u praksi često poistovjećuju. Jednu od razlikovnih definicija između navedenih pojmova, dao je Johnson 1996. godine:

- *Kalibracija* je postupak kojim se mijenja način rada uređaja radi postizanja željenog stanja, tj. ponašanja uređaja. Najvažniji razlog provođenja kalibracije je da se način rada uređaja učini stabilnim i konstantnim, tako da profil koji opisuje taj uređaj ostane točan. Jer, ako se način rada uređaja mijenja, onda profil tog uređaja koji je opisivao način rada prije promjene, više nije točan.
- *Karakterizacija* je postupak kojim se registrira način rada uređaja i stvara profil uređaja. Za razliku od kalibracije, karakterizacijom se ne mijenja način rada uređaja, već se stvara profil koji opisuje ponašanje uređaja. Profil uređaja je datoteka koja povezuje vrijednosti boje (RGB ili CMYK) koje daje uređaj sa vrijednostima neovisnima o uređaju (CIEXYZ ili CIELAB) koje predstavljaju boje koje vidi standardni promatrač. Profil sadrži informacije o tri osnovne varijable koje opisuju ponašanje uređaja; informacije o gamutu, dinamičkom rasponu i informacije o reprodukciji tonova koje uređaj može postići.

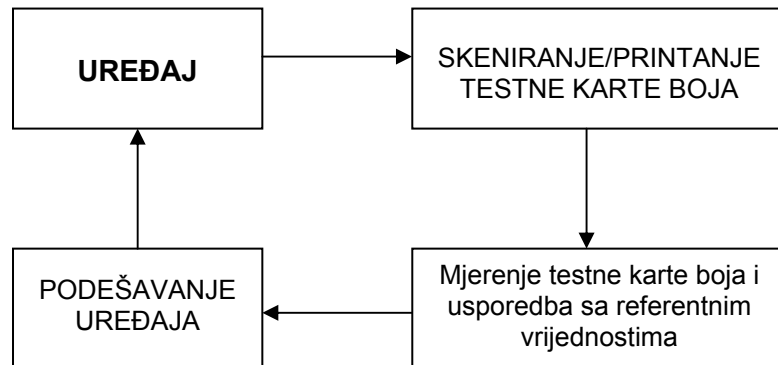
Dakle, kalibracija uređaja predstavlja neophodnu predradnju koju je potrebno izvršiti prije kolorimetrijske karakterizacije uređaja, s ciljem optimiziranja i stabiliziranja rada uređaja. Bitno je da se uređaji periodički rekalibriraju, tako da se omogući konstantno produciranje jednakih vrijednosti boja i da ponašanje uređaja bude onakvo kakvo je opisano u profilu. Učestalost kojom se uređaj treba kalibrirati ovisi o tipu uređaja, odnosno o varijablama koje se kalibracijom podešavaju. Tako na primjer, rotacioni i plošni CCD skeneri, nakon provedene inicijalne kalibracije, ne trebaju česte rekalibracije, jer su varijable o kojima ovisi njihov rad dovoljno stabilne tokom vremena. Kod CRT monitora, glavni razlog odstupanja vrijednosti boja tokom vremena je nestabilnost fosfornih elemenata. Kalibracija monitora obuhvaća podešavanje temperature bijele točke, svjetline, kontrasta i uvjeta gledanja. Najčešće kalibracije (svakodnevne) zahtijevaju izlazni uređaji sa velikim brojem podesivih varijabli. Tako na primjer, kod fotoosvjetljivača rezultat reprodukcije, između ostalg, ovisi o varijacijama u intenzitetu lasera u osvjetljivačkoj glavi, o spektralnoj osjetljivosti filma, o svježini i jačini razvijača i ostalih fotokemijskih komponenti.

Kao što je spomenuto, sam postupak kalibracije vrlo je sličan postupku karakterizacije. Postupak kalibracije obuhvaća slijedeće radnje [Green, 1999]:

1. Snimanje, skeniranje ili printanje (ovisno da li se radi o ulaznom ili izlaznom uređaju) odgovarajuće testne karte boja.
2. Procjena rezultata mjerenjem boja koje je prikazao/isprintao/otisnuo uređaj.
3. Podešavanje uređaja prema dobivenim rezultatima.

Procjena rezultata dobivenih uređajem koji se kalibrira, provodi se mjerenjem pomoću kolorimetra ili spektrofotometra, a za neke uređaje dovoljno je i mjerenje denzitometrom.

Polja prikazane/ispisane testne karte boja mjere se kako bi se procjenila sposobnost izlazne jedinice da ispravno prikaže vrijednosti boja koje zadaje softver za kalibraciju. Dobiveni rezultati se šalju nazad u softver, gdje se vrše prilagodbe naredbi koje kontroliraju vrijednosti boja koje se šalju na izlaznu jedinicu. Slika 21.



*Slika 21. Kalibracija uređaja*

Kad je uređaj kalibriran, moguće ga je karakterizirati. Procesom karakterizacije izrađuje se profil uređaja, pa se zato taj proces u literaturi često naziva profiliranje uređaja. Profil opisuje ponašanje uređaja i sadrži podatke o bojama koje uređaj može generirati, odnosno o opsegu obojenja (gamutu) koji je moguće dobiti tim uređajem, s pridruženim kolorimetrijskim vrijednostima boja.

Proces karakterizacije bazira se na slijedećem principu: na uređaj čiji se profil izrađuje, šalju se poznate RGB ili CMYK vrijednosti boje (pomoću testnih karti boja), koje se na uređaju generiraju i zatim mjere. Mjerenja se izvode kolorimetrom ili spektrofotometrom. Nakon toga, aplikacija za karakterizaciju izrađuje profil, koji povezuje RGB ili CMYK vrijednosti boja dobivenih uređajem, sa njihovim ekvivalentima u referentnom prostoru boja (CIEXYZ ili CIELAB). Pomoću kolorimetrijskih CIELAB vrijednosti, profil govori CMM-u koji su udjeli RGB ili CMYK vrijednosti boja potrebni da bi prikazali određenu boju, a Color Management sustavu govori koja će objektivna boja nastati iz danog seta RGB ili CMYK vrijednosti. Proces karakterizacije detaljno je opisan u Poglavlju 3.7.

Da li je neki profil dovoljno točan, procjenjuje se mjerenjem rezultata dobivenih izlaznom jedinicom. Ako se testira točnost nekog ulaznog profila na monitoru, pretpostavlja se da je monitor predhodno kalibriran i karakteriziran. Objektivnim testovima za procjenu profila mjeri se sposobnost profila da predvidi ili reproducira boje sa testne karte korištene pri izradi profila. Ako je potrebno, profile je moguće editirati pomoću aplikacija za editiranje profila. Pri tome je od ključne važnosti pravilno odrediti redoslijed radnji. Pravilo je da se najveći problem uvijek rješava prvi [Fraser et al., 2005]. Tipični redoslijed radnji kod editiranja ulaznih profila, jednak je kao kod korekcije slika kod tradicionalnog skeniranja:

1. Svjetlina i kontrast (globalno)
2. Krivulja tonova
3. Sivi balans
4. Zasićenje (globalno)
5. Boje (selektivno).



## 2.2.4. Kontrola kvalitete reprodukcije boja

Uključivanje Color Managementa u tijek grafičke produkcije, zahtijeva poznavanje osnova kolorimetrije, naučne discipline koja se bavi mjerenjem i uspoređivanjem boja. Potreba za instrumentalnim mjerenjem boja, prisutna je u fazi kalibracije i karakterizacije uređaja koji sudjeluju u reproduksijskom procesu, kao i u završnoj fazi kontrole kvalitete reprodukcije boja. Mjerni uređaji koji se koriste za kontrolu kvalitete u toku reproduksijskog procesa su: denzitometri, kolorimetri i spektrofotometri.

Najtočnije informacije o boji postižu se spektrofotometrijskim mjerenjima. Dobivene spektralne vrijednosti boje, mogu se određenim matematičkim postupcima (preko CIEXYZ modela) prevesti u bilo koji oblik tristimulusne informacije, koje se mogu dalje koristiti za konstrukciju tristimulusnih modela prikaza boja (kao npr. CIELAB). Iz dobivenih vrijednosti, matematičkim izrazima za ukupnu kolorimetrijsku razliku, mogu se dobiti objektivni podaci o kvaliteti reprodukcije boja.

### 2.2.4.1. Mjerni uređaji za kontrolu kvalitete reprodukcije

Pojam "mjerenje boja" je tipičan primjer *oksimorona*, spoja dviju nespojivih riječi. Boja se ne može mjeriti. Boja nije svojstvo fizičkog svijeta, već psihički doživljaj izazvan fizičkim podražajem (stimulusom). Ono što je moguće mjeriti je upravo taj stimulus, tj. svjetlo koje je ušlo u promatračevo oko i, u njegovom mozgu, proizvelo doživljaj boje. Stimulus koji izaziva doživljaj boje, u fizičkom je pogledu određen ukupnim intenzitetom zračenja, odnosno ukupnom količinom energije koju on prenosi u jedinici vremena na mrežnicu oka i raspodjelom te energije na različite valne dužine [Hunt, 1991].

U tekstu koji slijedi, kratko će biti opisana sva tri spomenuta mjerna uređaja, uz napomenu, da je za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada, korišten spektrofotometar (vidjeti Poglavlje 3.3).

**Denzitometar** je uređaj koji mjeri faktor refleksije ili transmisije, odnosno omjer između upadnog svjetla usmjerenog na uzorak i reflektiranog ili propuštenog svjetla koji dođe do fotoćelije u uređaju. Na osnovi dobivenih informacija, denzitometar izračunava optičku gustoću ( $D$ ), izraženu u obliku logaritamskih vrijednosti. Optička gustoća matematički se definira kao logaritamska vrijednost opaciteta (neprozirnosti). Dakle, optička gustoća je stupanj do kojeg materijali apsorbiraju svjetlo. Što je više svjetla apsorbirano, tj. što je manja refleksija ili transparentija površine, optička gustoća je veća. Za razliku od spektrofotometara, denzitometri nemaju definirani izvor svjetla. Pri mjerenju boja koristi filtere (definiranih karakteristika) komplementarne bojama čije se gustoće mjere. Koriste se filteri boja aditivne sinteze.

**Kolorimetar** je uređaj koji mjeri tristimulusne vrijednosti boja (na način sličan ljudskom doživljaju boja), u pravilu podešenom prema krivulji standardnog promatrača. Mjerenje boja kolorimetrom temelji se na uspoređivanju ispitivane boje s bojom nastalom u kolorimetru miješanjem osnovnih boja aditivne sinteze, prema Grassmanovim zakonima. Većina kolorimetara prikazuje vrijednosti u jednom od CIE prostora boja (XYZ, LAB ili LUV). Jedna od najvažnijih prednosti kolorimetra je da omogućava izračunavanje  $\Delta E$

razlike boja, na temelju razlika u svjetlini, tonu i kromatičnosti. Glavni nedostatak kolorimetra je nemogućnost registriranja metamernih boja. Oni su ograničeni na standardnog promatrača i na samo jedan standardni izvor svjetla (D50 ili D65), pa ne mogu provjeriti da li se dva različita uzorka boja vizualno poklapaju pod različitim izvorima svjetla.

**Spektrofotometar** je uređaj koji mjeri promjene u refleksiji, transmisiji ili zračenju, u intervalima, duž valnih dužina vidljivog dijela spektra. Kao rezultat mjerenja faktora refleksije ili transmisije u pojedinim valnim područjima (intervalima) dobiva se spektrofotometrijska krivulja. U grafičkoj industriji najčešće se koriste spektrofotometrijske krivulje u valnom području od 350 nm do 750 nm. Rad uređaja temelji se na rastavljanju bijelog svjetla na pojedinačne valne dužine (ili intervale valnih dužina) pomoću monokromatora. Kao monokromator koristi se prizma ili optička rešetka. Pojedinačnim valnim dužinama izdvojenim monokromatorom, osvjetljava se ispitivani uzorak boje i bijeli standard (najčešće magnezij-oksidi, MgO). Postupak se provodi redom s monokromatskim svjetlima duž čitavog spektra. Reflektirano svjetlo dolazi do fotoćelije, koja ih pretvara u električne impulse. Impulsi se dalje preračunavaju tako da se na skali mogu očitati faktor refleksije ili transmisije, pri određenoj valnoj dužini, u odnosu na bijeli standard. Kao grafički prikaz mjerenja dobije se spomenuta, spektrofotometrijska krivulja. Suvremeni spektrofotometri sadrže informacije o CIE standardnom promatraču, krivuljama spektralne emisije za mnoge standardne izvore svjetla i mikroracunalo za izračunavanje CIE tristimulusnih vrijednosti. Na temelju CIE koordinata koje se mogu izračunati za boje pod različitim izvorima svjetla, može se predvidjeti koji će izvori svjetla dovesti do pojave metamerije.

#### 2.2.4.2. Matematički izrazi za ukupnu razliku boja

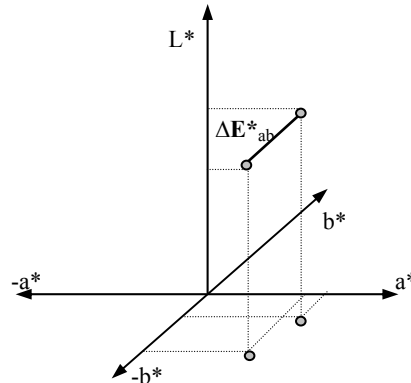
Rezultati istraživanja provedenog u eksperimentalnom dijelu ovog rada bazirani su na CIELAB prostoru boja. CIELAB je trodimenzionalni prostor boja baziran na percepciji boje standardnog promatrača. Smatra se neovisnim o uređaju (vidjeti Poglavlje 2.3.1.1.). Numeričke vrijednosti u CIELAB sustavu opisuju sve boje koje može razlikovati svako zdravo ljudsko oko. Boje su opisane pomoću tri komponente: svjetlina **L** (*luminance*) koja je akromatska komponenta i dvije kromatske komponente, **a** (crvena i zelena) i **b** (plava i žuta). Svjetlina se mjeri od 1 do 100 po vertikalnoj osi, gdje je 1 vrijednost za crnu, a 100 za bijelu [Yule, 2000].

$L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  koordinate moguće je izračunati iz standardnih CIEXYZ vrijednosti, prema slijedećim formulama:

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] \end{aligned}$$

gdje su  $X_n$ ,  $Y_n$  i  $Z_n$  tristimulusne vrijednosti bijelog standarda, a  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  vrijednosti uzorka [Berns, 2000].

Ukupna razlika boja ili kolorimetrijska razlika ( $\Delta E$ ) predstavlja razliku između dvije boje u CIE sustavu. Definira se kao euklidska razlika između koordinata za dva položaja boja (referentnog i uspoređivanog). Slika 22.



Slika 22. Kolorimetrijska razlika u CIELAB sustavu

Sa stanovišta kontrole kvalitete u grafičkoj tehnologiji, kolorimetrijska razlika opisuje kvalitetu reprodukcije, odnosno pokazuje odstupanje reprodukcije od originala. Jednostavno ocjenjivanje odstupanja boja, može se provesti na osnovi vrijednosti kolorimetrijske razlike, prema slijedećim kriterijima [Schlöpfer, 1993]:

$\Delta E < 0,2$	razlika boja se ne vidi
$\Delta E = (0,2 - 1)$	razlika boja se primjećuje
$\Delta E = (1 - 3)$	razlika boja se vidi
$\Delta E = (3 - 6)$	razlika boja se dobro vidi
$\Delta E > 6$	očigledna odstupanja boja.

Ukupna razlika boja prema CIE 1976. ( $\Delta E^*_{ab}$ ) izračunava se slijedećom formulom:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$$

gdje se veličine  $L^*_1$ ,  $a^*_1$  i  $b^*_1$  odnose na boju kojoj se mjeri odstupanje (dalje: uzorak), a veličine  $L^*_2$ ,  $a^*_2$  i  $b^*_2$  na referentnu boju (dalje: standard). Prema konvenciji, pozitivne vrijednosti pojedinih razlika ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ), znače da uzorak ima više te varijable nego standard. Na primjer, ako je razlika u svjetlini pozitivna vrijednost ( $\Delta L^* > 0$ ), to znači da je uzorak svjetliji od standarda, i obrnuto [Berns, 2000]. Ukupna razlika boja može biti definirana i razlikama u svjetlini ( $\Delta L^*$ ), zasićenju ( $\Delta C^*$ ) i tonu ( $\Delta H^*$ ). CIE LCh prostor boja koristi isti diagram kao i LAB prostor, no koristi cilindrične koordinate. Svjetlina je ista kao u LAB prostoru boja, pa se razlika u svjetlini računa se po istoj formuli. Zasićenje i ton računaju se prema slijedećim formulama:

$$\Delta C^*_{ab} = C^*_{ab,1} - C^*_{ab,2} = (a^{*2}_1 + b^{*2}_1)^{1/2} - (a^{*2}_2 + b^{*2}_2)^{1/2}$$

$$\Delta H^*_{ab} = [(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2]^{1/2}$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2]^{1/2}$$

Tijekom vremena, uočeni su nedostaci navedene formule za  $\Delta E^*_{ab}$ . Kolorimetrijske razlike računate prema toj formuli, ne koreliraju dovoljno dobro sa vizualnim procjenama. U cilju poboljšanja korelacije između vizualnih procjena i instrumentalnog mjerenja, putem prikupljanja različitih empirijskih podataka, formula je 1994. godine modificirana. Nova formula prilagođava vrijednosti svjetline, zasićenja i tona, tako što uzima u obzir faktore  $k$  i  $S$ , koji ispravljaju varijacije u percipiranoj veličini razlika boja u različitim područjima CIELAB 1976. prostora boja. Faktori  $k_L$ ,  $k_C$  i  $k_H$  su parametarski faktori koji se koriste za prilagođavanje relativnih vrijednosti svjetline, zasićenja i tona, kod uvjeta promatranja koji su različiti od onih definiranih od strane CIE komisije [CIE 116, 1995]. Ako uvjeti odgovaraju propisanim, onda je vrijednost tih faktora jednaka 1. Faktori  $S_L$ ,  $S_C$  i  $S_H$  su koeficijenti koji predstavljaju pozicione funkcije, čija je uloga da ispravljaju perceptualnu uniformiranost CIELAB prostora boja. Kolorimetrijska razlika prema CIE 1994. ( $\Delta E^*_{94}$ ) izračunava se slijedećom formulom [Berns, 2000]:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2}$$

gdje:  $k_L, k_C, k_H$  ..... su parametarski faktori čija vrijednost iznosi 1  
 $S_L = 1$   
 $S_C = 1 + k_1 C^*_{ab}$   
 $S_H = 1 + k_2 C^*_{ab}$   
 $k_1 = 0,045$ ..... za grafičku industriju, ili  $0,048$  ..... za tekstilnu ind.  
 $k_2 = 0,015$ ..... za grafičku industriju, ili  $0,014$  ..... za tekstilnu ind.

Godine 2000., matematički izraz za  $\Delta E^*_{94}$  je doraden i nazvan CIE $\Delta E$ 2000. Nova formula, osim svjetline, zasićenja i tona, uključuje različitosti između zasićenja i tona, zbog poboljšanja prikazivanja boja u plavom dijelu spektra, kao i faktor povećanja vrijednosti  $a^*$ , koji utječe na poboljšanje sivih boja. Ukupna razlika boja prema  $\Delta E^*_{00}$ , definirana je matematičkim izrazom [Luo at all, 2001]:

$$\Delta E^*_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)}$$

gdje:

$$\bar{L}' = (L_1^* + L_2^*)/2$$

$$\bar{C}^*_{ab} = (C^*_{1,ab} + C^*_{2,ab})/2$$

$$G = \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{*7}_{ab}}{\bar{C}^{*7}_{ab} + 25^7}}\right) / 2$$

$$a'_1 = a_1(1 + G)$$

$$a'_2 = a_2(1 + G)$$

$$C'_1 = \sqrt{a'^2_1 + b_1^2}$$

$$C'_2 = \sqrt{a'^2_2 + b_2^2}$$

$$\bar{C}' = (C'_1 + C'_2)/2$$

$$\begin{aligned}
h'_1 &= \begin{cases} \tan^{-1}(b_1^*/a_1') & \tan^{-1}(b_1^*/a_1') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_1^*/a_1') + 360^\circ & \tan^{-1}(b_1^*/a_1') < 0 \end{cases} \\
h'_2 &= \begin{cases} \tan^{-1}(b_2^*/a_2') & \tan^{-1}(b_2^*/a_2') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_2^*/a_2') + 360^\circ & \tan^{-1}(b_2^*/a_2') < 0 \end{cases} \\
\bar{H}' &= \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases} \\
T &= 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ) \\
\Delta h' &= \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 > h'_1 \end{cases} \\
\Delta L' &= L'_2 - L'_1 \\
\Delta C' &= C'_2 - C'_1 \\
\Delta H' &= 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2) \\
S_L &= 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \\
S_C &= 1 + 0.045\bar{C}' \\
S_H &= 1 + 0.015\bar{C}'T \\
\Delta\theta &= 30 \exp\left\{-\left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25}\right)^2\right\} \\
R_C &= \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \\
R_T &= -2R_C \sin(2\Delta\theta)
\end{aligned}$$

Za potrebe računanja kolorimetrijskih razlika u ovom radu, koristili su se izrazi  $\Delta E^*_{94}$  i  $\Delta E^*_{00}$ . Formule za izračun implementirale su se u Microsoft Excel. Za implementaciju složene  $\Delta E^*_{00}$  formule, koristila su se uputstva objavljena u članku *The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data and Mathematical Observations* [Sharma et al., 2004].