

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknistaloudellinen tiedekunta
Tietotekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

Markku Painomaa

**VÄRIAVARUUDEN RAKENTEEN MUOKKAAMINEN
YHTENÄISYYDEN PARANTAMISEKSI**

Kandidaatintyön aihe on hyväksytty 4.6.2012

Työn tarkastaja ja ohjaaja: Tutkijaopettaja Arto Kaarna

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknistaloudellinen tiedekunta
Tietotekniikan koulutusohjelma

Markku Painomaa

Väriavaruuden rakenteen muokkaaminen yhtenäisyyden parantamiseksi

Kandidaatintyö

2012

31 sivua, 11 kuvaa, 5 taulukkoa, 1 liite

Työn tarkastajat: Tutkijaopettaja Arto Kaarna

Hakusanat: värierot, väriavaruus, spektriavaruus, diskriminaatioellipsit

Keywords: color differences, color space, spectral space, discrimination ellipses

Pienien värierojen mittaamiseen käytetään CIE:n (The International Commission on Illumination) kehittämää ja standardoitua CIELAB – väriavaruutta ja sille suunniteltua CIEDE2000 – värieromittaria. CIELAB ei kuitenkaan ole täysin yhtenäinen ja siksi mittareita joudutaan virittämään sopivammiksi tähän väriavaruuteen. Työssä tutkitaan millä tavoin CIELAB - väriavaruutta voitaisiin korjata, jotta siitä saataisiin yhtenäisempi ja yksinkertainen ja virittämättömämpi värieromittari toimisi siinä paremmin. Työn tuloksena saatu muokattu väriavaruus paransi yhtenäisyyttä keskimäärin kymmenen prosenttia, mikä on liian vähän kun tavoitteena oli 30 - 50 prosenttia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology Management
Degree Program in Information Technology

Markku Painomaa

Modifying the structure of a color space for better uniformity

Bachelor's Thesis

2012

31 pages, 11 illustrations, 5 tables, 1 appendix

Examiners : Associate Professor Arto Kaarna

Keywords: color differences, color space, spectral space, discrimination ellipse

The small color differences are measured using the standardized CIELAB - color space developed by the CIE (The International Commission on Illumination) and the CIEDE2000 – color difference meter. CIELAB is not perfectly uniform and, therefore, the metrics need to be tuned for this color space. We examine the ways to fix the existing CIELAB color space to gain more uniform space so that a simpler meter can be used without laborious tuning. As a result of this work the new optimized color space refined uniformity approximately ten percent which was too little since the pursued amount was 30 – 50 percent.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	3
1.1 TAUSTA.....	3
1.2 TAVOITTEET JA RAJAUKSET	4
1.3 TYÖN RAKENNE.....	4
2 VÄRIAVARUUDEN RAKENTUMISEN TAUSTA.....	5
2.1 CIE 1931 XYZ.....	5
2.2 CIELAB - VÄRIAVARUUS.....	8
2.3 KROMAATTINEN SOPEUTUMINEN.....	10
2.4 MACADAMIN ELLIPSIT.....	12
3 TUTKIMUSONGELMA.....	14
3.1 PARAMETRISOITU CIELAB OPTIMOINTIMALLI.....	14
3.2 PARAMETRISOITU CIELAB OPTIMOINTIMALLI VON KRIES - TRANSFORMAATIOLLA.....	16
4 OPTIMOINTIMALLIEN TOTEUTUS KÄYTÄNNÖSSÄ JA TULOKSET.....	17
4.1 OPTIMOIDUN MALLIN HYVYYSMITTARIT.....	17
4.2 MALLIN 1 TULOKSET.....	19
4.3 MALLIN 2 TULOKSET.....	22
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	25
LÄHTEET.....	26
LIITE 1 : BFD-RIT DATA.....	28

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ΔE_{ab}	CIE standardoima värieron mittausyksikkö
λ	Aallonpituus
A	Ellipsin isoakseli
a^*	Lab - väriavaruuden vihreä-punainen-akseli
B	Ellipsin pikkuakseli
b^*	Lab - väriavaruuden sininen-keltainen-akseli
D_{65}	Standardivalaisin, päivänvalo
CIE	Comission Internationale de l'Éclairage
CIELAB	CIE 1976 väriavaruus
CIEXYZ	CIE 1931 väriavaruus
M_H	HPE – muunnosmatriisi $XYZ \rightarrow LMS$
L^*	Lab – väriavaruuden valoisuusakseli
L, M, S	Pitkä, keskipitkä ja lyhyt tappivaste
X, Y, Z	Kolmivärikomponentit

1 JOHDANTO

Väriavaruudella tarkoitetaan matemaattista mallia, jossa jokainen väri on kuvattu kolmikomponenttivektorina. Värit on kartoitettu numeeriseksi avaruudeksi, jolloin tietyn värin uudelleentuottaminen ja värierojen mittaaminen on mahdollista.

1.1 Tausta

Väriavaruuksia ja värieroja on tutkittu ja kehitetty 1930 – luvulta asti ja molemmat liittyvät tiiviisti toisiinsa, sillä yleensä ottaen värieromittari on suunniteltu käytettäväksi tietylle avaruudelle. CIE (The International Commission on Illumination) kehitti ensimmäisen matemaattisen väriavaruusmallin CIEXYZ:n vuonna 1931, johon myös useimmat uudemmat mallit pohjautuvat. Vuonna 1976 CIE esitteli nimenomaan värieromittauksiin tarkoitetut CIELAB – ja CIELUV – väriavaruudet sekä kahden värin etäisyyden laskevan CIE76 – mittarin. Myöhemmin uusia mittareita kehitettiin ja tällä hetkellä CIEDE2000 [Luo01] on yleisesti käytetyin ja toimivaksi havaittu, mutta vielä vedosvaiheessa viralliseksi standardiksi [CIE12].

Fairchild esittää, että ideaalinen väriavaruus olisi täysin yhtenäinen, jolloin mittaustulokset olisivat vertailtavissa riippumatta miltä sävyalueelta mittausta on tehty [Fai97]. CIELAB ei ole täysin yhtenäinen ja siksi esimerkiksi vihreillä sävyillä havaittu sama väriero ei vastaa yhtä suurta Euklidista etäisyyttä kuin sinisillä sävyalueilla havaittu. Siksi CIE76 – mittaria on seuraavissa versioissa CIE94 ja CIEDE2000 paranneltu kompensoimaan edellä mainittuja epäyhteneväisyyksiä. Lisäksi olisi hyvä, jos eri valaistuksella mitatut väriarvot olisivat vertailukelpoiset, mikä sekään ei toteudu CIELAB:lla ja siksi mittaukset tehdäänkin käyttäen vakiovalaistusta. Tällöin valoisuus L^* on vakio, käyttäen esimerkiksi standardi D_{65} - valaistusta, ja a^* ja b^* ovat muuttujia.

CIE on kehittänyt uudempiakin väriavaruuksia, kuten CIECAM97 ja sen seuraajan CIECAM02:en. CIECAM02– ja CIELAB– mallin yhtenäisyyttä on vertailtu ja tuloksissa ei ollut merkittäviä eroja [Jin09]. CIECAM02 – mallille on olemassa myös värieromittarit CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS, jotka toimivat

kokonaisuudessaan paremmin, kuin CIEDE2000, mutta niissäkin on korjauksille tarvetta [Wan09].

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tässä työssä on tavoitteena tutkia, miten väriavaruutta muuttamalla voidaan saavuttaa parempi yhtenäisyys ja samalla yksinkertaistaa värierojen laskentaa. Tarkoituksena on muokata lähinnä $L^*a^*b^*$ – väriavaruutta yhtenäisemmäksi, jolloin siihen sopivan värieromittarin erillistä virittämistä ei tarvita, vaan voidaan käyttää yksinkertaisempaa mittaria. Uutta versiota esimerkiksi CIEDE2000 – värieromittarista ei aiota tehdä. Tavoitteeseen pyritään optimoimalla $L^*a^*b^*$ – avaruuden parametreja Matlab – ympäristössä ja kokeilemalla eri kohdefunktioita löytämään sellaiset parametrit, jotka parantavat yhtenäisyyttä.

1.3 Työn rakenne

Johdannossa käytiin läpi väriavaruuksiin ja värieromittauksiin liittyen taustoja sekä työn tavoitteet ja rajaukset. Toisessa luvussa ja sen aliluvuissa on taustateoriaa väriavaruuksien historiasta ja käydään tiivistäen läpi CIEXYZ– ja CIELAB – väriavaruuden rakentuminen, von Kries transformaation ja MacAdamin ellipsien merkitys. Kolmannessa luvussa esitellään tutkimuskysymyksen ratkaisuun tarvittavaa teoriaa ja taustoja sekä esitellään kaksi optimointimallia. Neljännessä luvussa toteutetaan käytännön osuus laskemalla optimointitehtävä Matlab – ympäristössä ja taulukoimalla tuloksia. Viidennessä luvussa on johtopäätökset ja mittaustuloksien arviointia.

2 VÄRIAVARUUDEN RAKENTUMISEN TAUSTA

Tässä kappaleessa esitetään työn kannalta tärkeimpien väriavaruuksien teoreettinen tausta. Aluksi selvitetään ihmisen värinäön periaate, miten CIE 1931 XYZ väriavaruus rakentuu ja kuinka siitä on johdettu myöhemmin CIELAB. Sitten tarkastellaan kromaattista sopeutumista von Kries - transformaatiolla. Lopuksi kerrotaan, mitä ovat MacAdamin ellipsit ja niiden merkitys väriavaruuksien kannalta. Myöhemmin käytännön vaiheessa tullaan käyttämään CIE – ellipsejä, joilla on samat periaate kuin MacAdamin ellipseillä.

2.1 CIE 1931 XYZ

Väriä sanotaan psykofysikaaliseksi ilmiöksi, koska näkyvä valo on fyysinen ärsyke ja ihminen aistii sen erilaisina väreinä aivojen näkökeskuksessa. Värin havaitsemiseen tarvitaan valon lisäksi heijastava kohde, jonka sävy riippuu kohteen pinnan ominaisuuksista, kylläisyys valoisuuden määrästä ja värikokemus loppujen lopuksi havainnoitsijan värinäkökyvystä [Ber00].

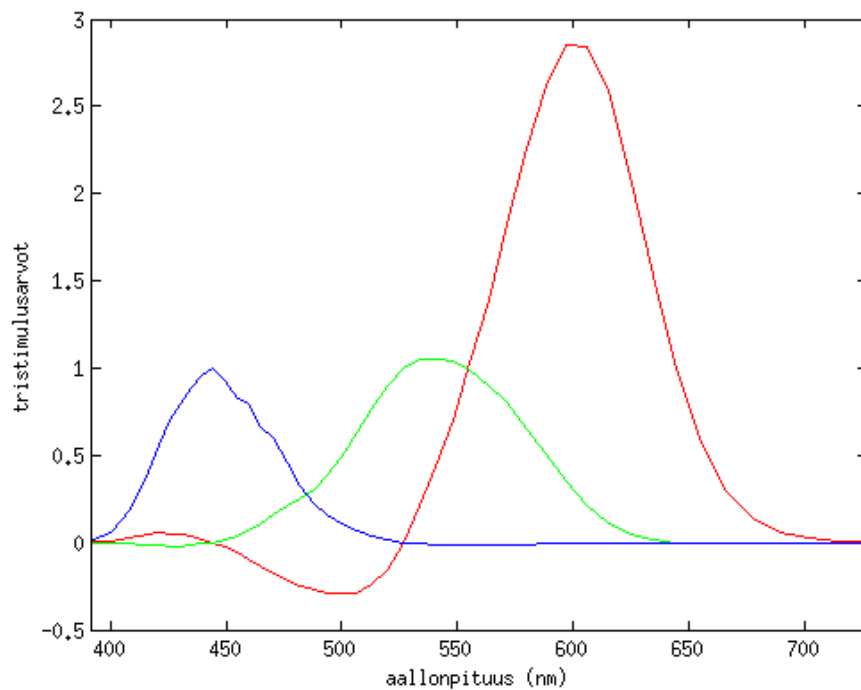
Ihmisen näkökyky perustuu silmässä oleviin fotoreseptoreihin, joista tappisoluiksi kutsutut ovat herkkiä valon eri aallonpituuksille. Tappisolut lajitellaan kolmeen luokkaan: siniherkät lyhyet (*Short*, 420–440 nm), keskipitkät viherherkät (*Medium*, 530–540 nm) ja pitkät punaherkät (*Long*, 560–580 nm). Grassmanin ensimmäinen lain mukaan mikä tahansa väri saadaan kolmen primäärivärin lineaarikombinaatiosta [Fai97]

$$C = R + G + B \quad (2.1).$$

Erilaiset värihavainnot muodostuvat siis kolmen tappisolun vasteiden yhdistelmästä ja puhutaan yleisemmin tristimulusarvoista. Kokeellisesti mittaamalla voidaan tällä värinäön periaatteella tehdä värinsovitusfunktiot, jotka kuvaavat primäärivärien suhteellista sekoitusmäärä valon aallonpituuden funktiona. Värivertailukokeessa koehenkilö käyttää värinsovitukseen suunniteltua laitetta ja katsoo annettua referenssiväriä vakiovalaistuksella ja yrittää kolmen eri aallonpituisen valon voimakkuutta säätämällä saada valojen tuottaman

värin vastaamaan referenssiä. Sovittamalla tällä tavoin eri aallonpituuksien värejä 360 nm – 830 nm aallonpituuden jakaumalta esimerkiksi 10 nm välein, saadaan koehenkilön asettamista tristimulusarvoista muodostettua värinsovituskäyrät. Koska eri ihmisten värinäkö ei ole samanlainen, mittaustulokset voivat vaihdella suuresti ja samoin värinsovituskäyrät [Ber00].

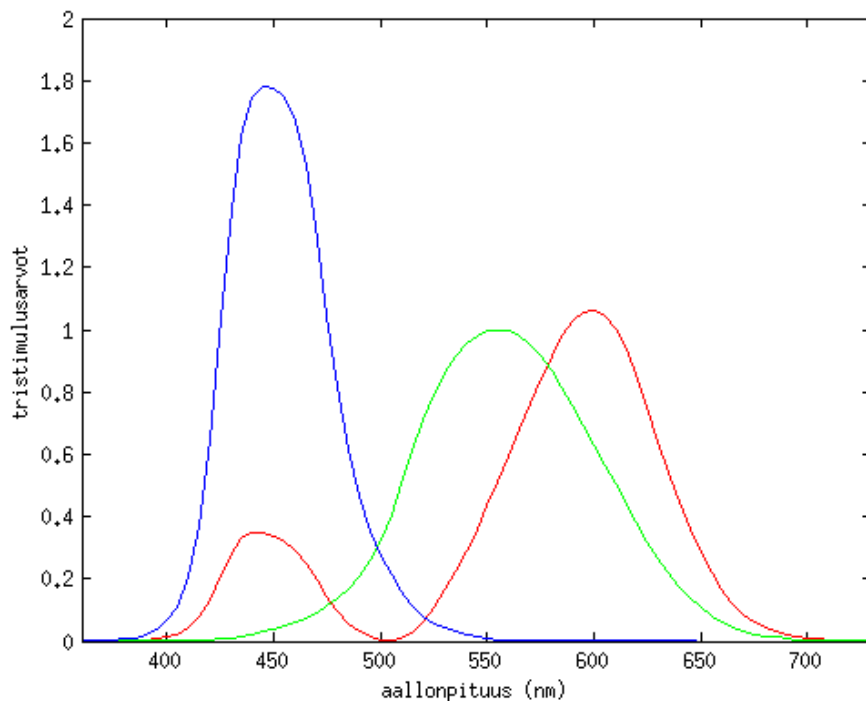
W. David Wright ja John Guild tekivät kumpikin vuosina 1928 – 1931 värivertailukokeita usealla koehenkilöllä käyttämällä 458.8 nm, 546.1 nm ja 700 nm aallonpituuden valoja. Värivertailukokeessa käytettiin kahdeksi 2° alueeksi jaettua näkökenttää, jollainen näkyy kuvassa 3 oikealla. Vuonna 1931 CIE kehitti näiden mittaustulosten keskiarvosta $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ – värinsovituskäyrät [Ber00], jotka näkyvät kuvassa 1.



Kuva 1: Wright ja Guildin datasta lasketut r, g, b – värinsovituskäyrät [CVRL]

$R(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ – värinsovituskäyrät saivat kuitenkin sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja kustannussyiden ja yksinkertaisuuden takia haluttiin, että arvot olisivat nolasta ylöspäin. Kuvassa 2 näkyy $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ – värinsovituskäyristä

lineaaritransformaatiolla johdetut $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ – värinsovitusfunktiot [CVRL], joita käyttämällä voidaan laskea kohteen värin X , Y ja Z kolmivärikomponenttien arvot CIE XYZ – väriavaruuteen. Uudet värinsovitusfunktiot määrittelevät CIE 1931 XYZ 2° keskimääräisen standardihavainnoijan, joka simuloi ihmisen normaalia värinäköä. Myöhemmin vuonna 1964 määriteltiin standardi CIE XYZ 10° havainnoitsija, josta jätettiin kokonaan pois 2° kenttä.



Kuva 2: CIE 1931 XYZ 2° standardihavainnoijan x, y, z – värinsovitusfunktiot

Tristimulusarvot X , Y ja Z lasketaan valonlähteen tehospektrijakauman $S(\lambda)$, kohteen heijastussuhteen $R(\lambda)$ ja värinsovitusfunktioiden integraaleina

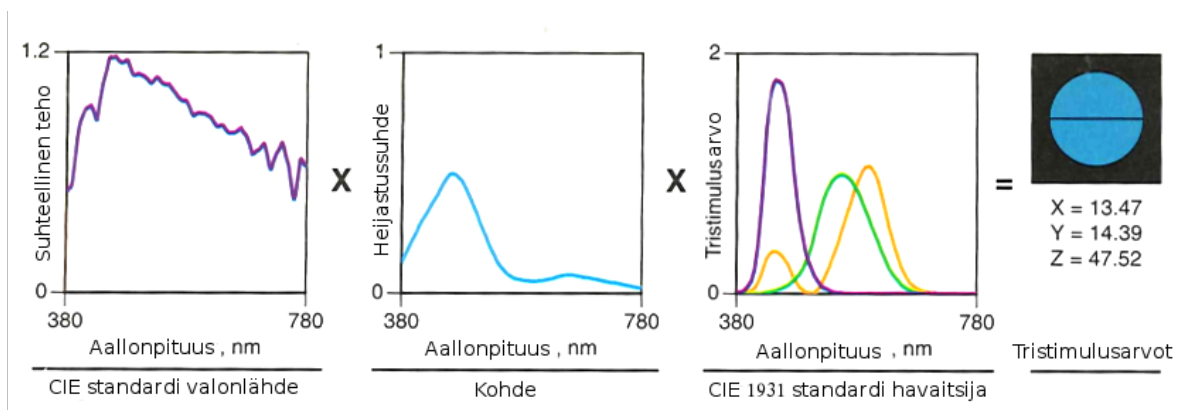
$$X = k \int S(\lambda) R(\lambda) x(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

$$Y = k \int S(\lambda) R(\lambda) y(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int S(\lambda) R(\lambda) z(\lambda) d\lambda$$

$$k = 100 / \int S(\lambda) y(\lambda) d\lambda \quad (2.3).$$

Parhaiten laskukaavan ymmärtämistä havainnollistaa kuva 3, jossa näkyy esimerkkikuvaajat. Oikeassa reunassa näkyy myös, millainen on jaettu kenttä, jollaista värinsovituskokeessa voitaisiin käyttää [Ber00].



Kuva 3: XYZ - kolmivärikomponenttien laskeminen [Bern00]

Koska valonlähteitäkin on monia erilaisia, CIE on standardoinut sarjan valonlähteitä, joita merkitään A, B, C, D, E ja F – kirjaimin. Valonlähteiden tehospektrijakauma eli valon suhteellinen teho aallonpituuden funktiona ja lämpötila Kelvineissä on määritelty tarkasti. Esimerkiksi A - valaisin vastaa hehkulamppua värilämpötilalla 2856 K ja D₆₅ - valaisin päivänvaloa 6504 K. Kuvassa 3 ensimmäisenä näkyy D₆₅ - valaisimen spektrin tehojakauma.

2.2 CIELAB - väriavaruus

CIE 1931 XYZ väriavaruuden avulla voidaan määrittää värille numeeriset tristimulusarvot, mistä on hyötyä teollisuudelle esimerkiksi värieromittauksissa tai värin uudelleentuottamisessa. Pääongelmana oli kuitenkin CIEXYZ – väriavaruuden epäyhtenäisyys ja sitä voidaan havainnollistaa x,y – kromaattisuusdiagrammin avulla.

Samansuuruinen x, y – arvojen muutos diagrammin eri osissa on epäsuhteessa silmillä havaittavaan eroon. Kromaattisuusarvot x ja y ovat

$$x = X / (X + Y + Z) \quad (2.4)$$

$$y = Y / (X + Y + Z) \quad (2.5).$$

Monia uusia väriavaruuksia, kuten HunterLab ja ANLAB, johdettiin CIEXYZ -väriavaruudesta tavoitteena luoda havainnoitavasti yhtenäisempi väriavaruus [Ber00]. Vuonna 1976 CIE esitteli kaksi tällaista väriavaruutta CIELUV ja CIELAB, joita se suositteli käytettäväksi jatkossa värierojen mittauksiin. Uudet väriavaruudet olivat havainnoitavasti yhtenäisempiä kuin CIEXYZ, mutta eivät silti täydellisesti. Tämän työn kannalta tärkein on CIELAB, jonka kolme akselia L^* (valoisuus), a^* (vihreä-punainen) ja b^* (sininen-keltainen) ovat värien koordinaattisuunnat ja lasketaan XYZ – arvoista kaavoilla

$$L^* = 116 / f(Y/Y_n) - 16 \quad (2.6)$$

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

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

$$f(\omega) = \omega^{1/3}, \quad \omega > 0.008856 \quad (2.7)$$

$$f(\omega) = 7.787 \omega + 16/116, \quad \omega \leq 0.008856.$$

Värierojen mittaaminen kolmiulotteisessa CIELAB – väriavaruudessa on mahdollista laskemalla kahden väripisteen koordinaattien välinen Euklidinen etäisyys. CIE76 värieromittari on tällainen yksinkertainen mittari, jonka kaava lasketaan

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (2.8).$$

Nykyaikana värieromittauksiin käytetään huomattavasti monipuolisempaa CIEDE2000 – värieromittaria [Luo01].

2.3 Kromaattinen sopeutuminen

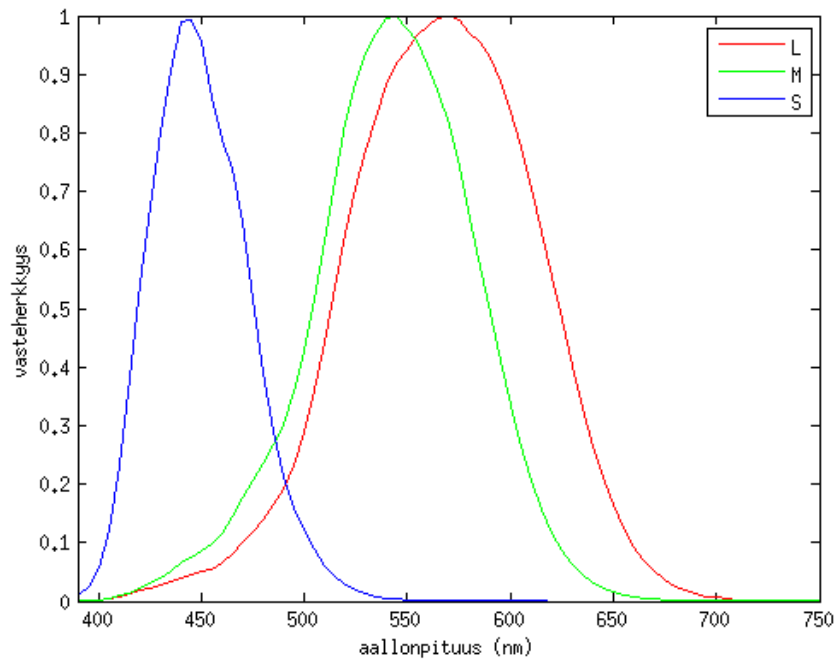
Ihmissilmällä on kyky sopeutua eri valaistusolosuhteiden mukaan ja nähdä kohteen värisävyt suurin piirtein samannäköisinä, vaikka valaistus vaihtuisi yhtäkkiä esimerkiksi päivänvalosta hehkulamppuun. Johannes von Kries muotoili kromaattisen sopeutumisen matemaattiseksi malliksi eli von Kries – transformaatioksi [Fai97]

$$\begin{aligned}
 L_a &= k_L L & (2.8) & & k_L &= 1/L_{\text{valkoinen}} & (2.9) \\
 M_a &= k_M M & & & k_M &= 1/M_{\text{valkoinen}} \\
 S_a &= k_S S & & & k_S &= 1/S_{\text{valkoinen}}
 \end{aligned}$$

Mallin oletuksena oli, että sopeutuminen tapahtuu painottamalla jokaisen tappisolun vastetta erikseen. Kaavoissa (2.8) L , M ja S tarkoittavat tappisolujen alkuperäisiä vasteita, L_a , M_a ja S_a on sopeutetut tappivasteet ja kaavoissa (2.9) on painokertoimet. CIELAB kaavoissa (2.5) on vastaavanlainen transformaatio, jossa XYZ - tristimulusarvot normalisoidaan jakamalla ne kohteen valkoisella arvolla Y_n ja tätä kutsutaan useimmiten vääräksi von Kries transformaatioksi, koska oikeaoppinen muunnos tehtäisiin LMS – avaruudessa [Fai97]. Kuvasta 4 näkee [CVLR], että tappisolujen spektriherkkyys ei vastaa kuvassa 2 esitettyjä koehenkilöiltä värinsovitustesteillä saatuja värinsovitusfunktioita. Kuitenkin lineaaritransformaatio $XYZ \rightarrow LMS$ voidaan tehdä matriisikertolaskulla (2.10), jossa \mathbf{M}_H (2.11) on Hunt-Pointer-Estevez muunnosmatriisi [Wes04].

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{M}_H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{M}_H = \begin{bmatrix} 0.390 & 0.689 & -0.079 \\ -0.230 & 1.183 & 0.046 \\ 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$



Kuva 4: LMS - tappivasteet aallonpituuden funktiona

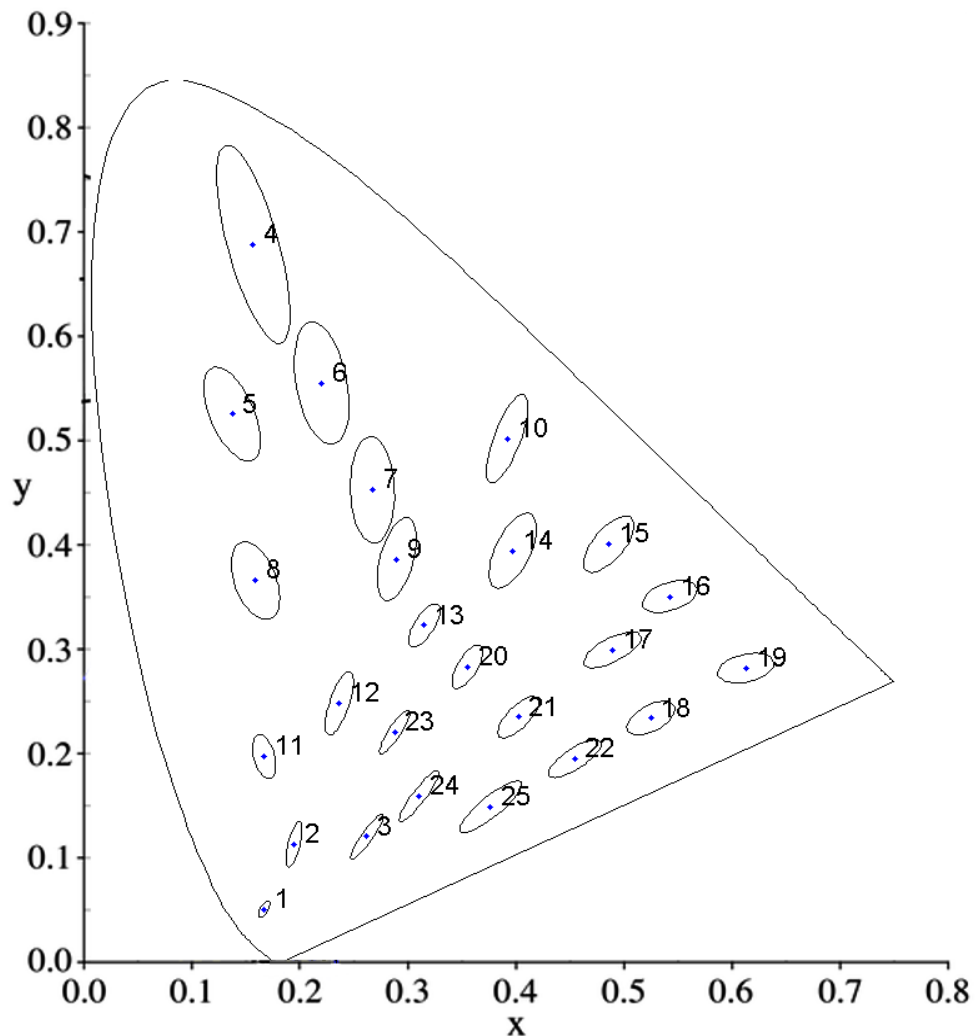
Kaavaa (2.10) hyödyntämällä voidaan CIELAB – kaavojen XYZ – arvojen normalisointi oikealla von Kries - transformaatiolla tehdä kaavoilla [Fai97]

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{k} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.13).$$

2.4 MacAdamin ellipsit

David MacAdam suoritti vuonna 1942 sarjan värivertailukokeita yhden koehenkilön avulla samaan tapaan kuin Wright ja Guild aiemmin. Koehenkilölle annettiin vakiovalaistuksessa referenssiväri, jolle hänen piti kolmea monokromaattista valoa säätämällä löytää samanlainen väri. MacAdam huomasi arvioitujen väriarvojen koordinaattipisteiden sijoittuvan likimäärin ellipsin muotoon referenssivärin ympärille x,y – kromaattisuusdiagrammissa. Kokeen tuloksena saatiin 25 erimuotoista ja eri puolille diagrammia sijoittunutta ellipsiä, on esitetty kuvassa 5 [Wyz82].



Kuva 5: MacAdamin ellipsit x,y – koordinaatistossa. Ellipsien kokoja on skaalattu noin kymmenkertaisiksi alkuperäisistä.

Käytännössä ellipsi kuvaa aluetta, joka näyttää ihmissilmälle samanlaiselta, eikä värieroa huomaa. Samalla ellipsit kuvastavat väriavaruuden yhtenäisyyttä ja x,y – kromaattisuusdiagrammista näkee kuinka ellipsit ovat täysin erimuotoisia ja kokoisia eri kohdissa diagrammia. Yhtenäisessä väriavaruudessa ellipsit olisivat vakiokokoisia ympyröitä. Tämän työn käytännön osuudessa optimoitavan väriavaruuden yhtenäisyyttä arvioidaan käyttäen CIE - ellipsejä, jotka on saatu BFD-RIT väridatajoukosta [Luo86]. Kappaleessa 4 kuvassa 7 CIE – ellipsit on piirretty a^*,b^* – koordinaatistoon. Liitteessä 1 on listattu käytettyjen ellipsien tarkemmat tiedot.

3 TUTKIMUSONGELMA

On tunnettua, että CIELAB ei ole täysin yhtenäinen väriavaruus ja siksi sitä hyödyntäviä värierojen mittaustapoja, jotka yleensä perustuvat CIE76:seen, on erikseen viritetty kompensoimaan CIELAB -väriavaruuden eri sävyjen epäyhtenäisiä välimatkoja verrattuna värin havaittuun eroon. Alkuperäinen CIE76 on hyvin yksinkertainen, mutta uudemmissa CIE94, ja CIE:n tällä hetkellä suosittelimassa CIEDE2000 – mittarissa on paljon korjauksia, jotka parantavat värieromittauksen tuloksia verrattuna vanhempiin versioihin [Luo01]. Esimerkiksi siniselle värialueelle on olemassa rotaatiotermi ja korjaustermit valoisuudelle, värikylläisyydelle ja sävyille. Työn tarkoituksena on CIELAB – parametreja optimoimalla löytää yhtenäisempi väriavaruus.

3.1 Parametrisoitu CIELAB - optimointimalli

Valmis optimointimalli on otettu käyttöön edellisestä tutkimuksesta [Kaa12] pienillä muutoksilla. Tutkimuksessa käytettiin optimoinnin kohteina kuutta ellipsiä, kun taas tässä otetaan käyttöön suurempi joukko. Väriavaruuden muodostavat a^* ja b^* parametrisoidaan ja lasketaan tristimulusarvoista kaavoilla (3.1), kun taas L^* - arvo annetaan olla muuttumattomana. Muutoksena edelliseen tutkimukseen, kaava (3.2) vastaa alkuperäistä kaavaa (2.6).

$$a = x_5 * (f(X/Y_n) - f(Y/Y_n)) \quad (3.1)$$

$$b = x_6 * (f(Y/Y_n) - f(Z/Y_n))$$

$$f(\omega) = \omega^{x_4}, \quad \omega > 0.008856 \quad (3.2)$$

$$f(\omega) = x_1 \omega + x_2 / x_3, \quad \omega \leq 0.008856$$

Matlabin fminsearch – funktiolla yritetään löytää sellaiset arvot paramereille $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_6\}$, että niitä käyttämällä ellipsit saavuttavat optimaalisen muodon ja pinta-alan.

Alkuarvoina syötetään alkuperäiset $a*b^*$ – parametrit $\mathbf{x} = \{7.787, 16, 116, 1/3, 500, 200\}$, jotka olivat kaavoissa (2.1). Kohdefunktiona on

$$\varphi = 8*\varphi_1 + \varphi_2 + 4*\varphi_3 \quad (3.3),$$

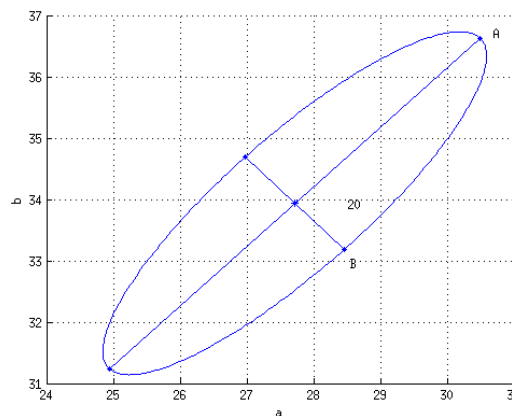
jossa

$$\varphi_1 = \frac{\max([A \ B])}{\min([A \ B])} \quad (3.4)$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi - \pi * A * B}{\pi - \pi * A * B} \quad (3.5)$$

$$\varphi_3 = \left(\frac{\max(\pi * A * B)}{\min(\pi * A * B)} \right) \quad (3.6).$$

Kuten aiemmin mainittu, ellipsien pyöreys ja samankokoisuus kuvastavat väriavaruuden havaittavaa yhtenäisyyttä ja ovat haluttuja ominaisuuksia. Minimoitavaan kohdefunktion on sisällytetty ensimmäiseksi pisimmän ja lyhimmän akselin suhde (3.4), jossa A on ellipsin isoakseli ja B pikkuakseli, kuten kuvassa 6. Toisena on keskimääräinen ero ympyrän pinta-alasta ja viimeisenä on keskinäinen ero pinta-aloissa, jonka halutaan myös olevan lähellä nollaa. Kohdefunktion (3.3) eri arvoille on annettu painokertoimet, jotka oli alkuperäisessä tutkimuksessa valittu kokeilemalla [Kaa12]. Käytännössä tarkoittaa sitä, että kohdefunktiossa painotetaan eniten akselisuhdetta (3.4) ja vähiten (3.5) eroa ympyrän pinta-alasta. Kaavoissa yliviiva merkitsee keskiarvoa.



Kuva 6: Diskriminaatioellipsi 20, A on isoakseli ja B pikkuakseli

3.2 Parametrisoitu CIELAB optimointimalli von Kries - transformaatiolla

Toisessa optimointimallissa edetään samalla periaatteella kuin mallissa 1, mutta tärkeimpänä erona on normalisointi, joka tehdään von Kries transformaatiolla *LMS* – avaruudessa. Nykyaikaiset väriavaruudet, kuten CIECAM97 ja CIECAM02, käyttävät kromaattista sopeuttamista laskettaessa väripisteiden koordinaatteja *XYZ* - arvoista. Edelliseen optimointimalliin liittyen ja tämän työn kannalta tärkein on CIELAB – väriavaruuteen suoraan perustuva on RLAB [Fai96,98]. Uuden väriavaruuden arvot lasketaan RLAB – väriavaruuteen pohjautuvilla parametrisoiduilla kaavoilla (3.7) ja (3.8). Suurimpana erona on kuitenkin kaavan (2.12) **k** – matriisi, joka vastaisi RLAB – mallin **A** – matriisia. Nyt parametrisoitu malli on

$$a = x_5 * (f(X_a) - f(Y_a)) \quad (3.7)$$

$$b = x_6 * (f(Y_a) - f(Z_a))$$

$$f(\omega) = \omega^{x_4} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 k_L & 0 & 0 \\ 0 & x_2 k_M & 0 \\ 0 & 0 & x_3 k_S \end{bmatrix} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.9).$$

Ensimmäisessä kokeessa X_a , Y_a ja Z_a lasketaan kaavalla (2.13), jonka kertoimet k_L , k_M ja k_S saadaan kaavoilla (2.9). Toisessa kokeessa lisätään **k** - matriisiin optimoitavat parametrit x_1 , x_2 ja x_3 , jolloin X_a , Y_a ja Z_a lasketaan kaavalla (3.9). Kummassakin tapauksessa alkuarvoina annetaan $\mathbf{x} = \{1, 1, 1, 1/3, 430, 170\}$, josta x_5 ja x_6 ovat samat kuin RLAB - mallissa.

4 OPTIMOINTIMALLIEN TOTEUTUS KÄYTÄNNÖSSÄ JA TULOKSET

Tässä osuudessa toteutetaan edellisen luvun kaksi erilaista optimointimallia käyttäen Matlab – ympäristöä. Aluksi optimoidaan alkuperäisen CIELAB – mallin parametreja jonka jälkeen sovelletaan samaa tekniikkaa uudelleen käyttäen von Kries – transformaatiota. Tulosten arviointia varten on laskettu suhteellisia alkuarvoja alkuperäisistä CIE Lab - ellipseistä, kuten keskinäinen akselisuhde, pinta-ala ja pinta-alojen eroavaisuus. Näin koetuloksia voidaan verrata laskemalla muutosprosentti alkuperäisen ja uuden suhdeluvun välillä. Negatiivinen muutosprosentti tarkoittaa, että kyseinen ominaisuus parani.

4.1 Optimoidun mallin hyvyysmittarit

BFD-RIT datajoukosta valittiin tiedot 28:alle värikeskipisteelle ja sitä ympäröivälle ellipsille. Kaikista ellipseistä laskettiin tarvittavat alkuperäiset ominaisarvot. Akselisuhde on saatu laskemalla jokaisen ellipsin akselien suhde ja vähentämällä se ykkösestä. Jos lukema olisi nolla, ellipsit olisivat ympyröitä. Saadun lukeman itseisarvot on summattu, jolloin saadaan keskinäinen akselien pituuden suhdeluku

$$\text{Keskinäinen akselisuhde} = \sum \left| 1 - \frac{A}{B} \right| \quad (3.1).$$

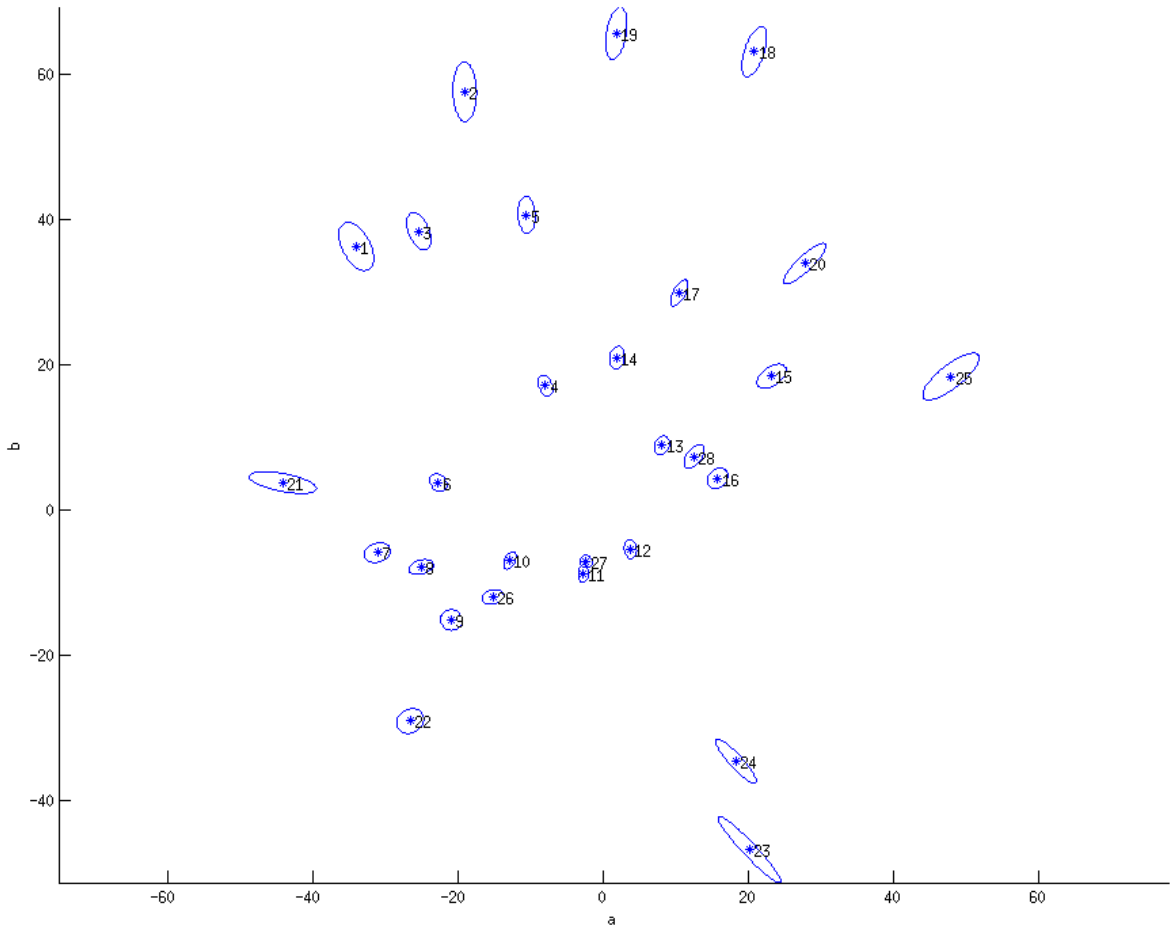
Huomaa, että keskinäistä akselisuhdetta ei käytetä optimoinnin kohdefunktiossa, vaan ilmaisemaan muutosta keskinäisissä akselisuhteissa. Kokeiluissa huomattiin, että tulokset olivat huonompia, jos keskinäistä akselisuhdetta käytettiin optimoinnin ehtona. Pinta-alasuhde on sama, kuin kohdefunktiossa ja joukon suurimman ja pienimmän ellipsin pinta-alan suhde lasketaan

$$\text{Pinta-alasuhde} = \frac{\max(\pi * A * B)}{\min(\pi * A * B)} \quad (3.2).$$

Alkuperäisestä datajoukosta muodostettujen ellipsien ominaisarvot ovat esitettyinä taulukossa 1 ja tarkoituksena on siis saada nämä luvut minimoitua. Lisäksi kuvassa 7 esitetään kuinka ellipsit ovat asettautuneet a^* , b^* – koordinaatistoon.

Taulukko 1: Alkuperäiset suhdeluvut

Keskinäinen akselisuhde	34.3595
Suurin-pienin akselisuhde	5.3963
Pinta-alasuhde	10.6640



Kuva 7: BFD - RIT-ellipsit a^ , b^* -tasossa*

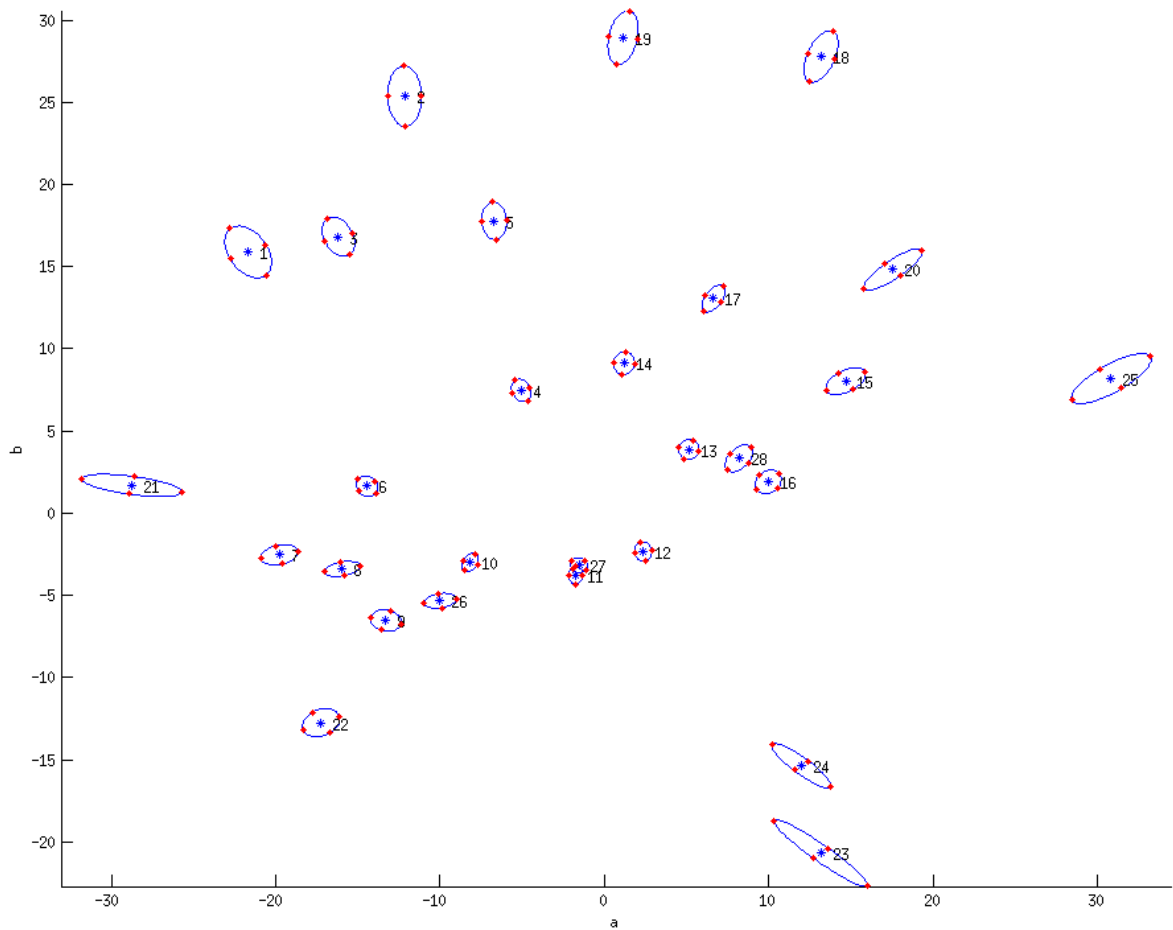
4.2 Mallin 1 tulokset

Ensimmäisessä ajossa sekä keskinäinen akselisuhde että pinta-alasuhde parantuivat, mutta ei kuitenkaan huomattavasti. Paloittain määritellyn Lab - funktion liitoskohdan arvo oli alkuperäinen $\omega = 0.008856$. Taulukossa 2 näkyy muutokset prosentteina ja kuvaan 8 on piirretty likimääräiset ellipsit keskipisteineen ja akselien leikkauspisteet. Uuden väriavaruuden parametrit olivat $\mathbf{x} = \{7.606, 22.480, 145.280, 0.317, 327.360, 89.580\}$.

Kannattaa huomata, että koska ellipsit piirretään kuvissa vain keskipisteen, akselien pituuden ja kulman arvoilla, tärkeämpää on tarkastella ellipsien neljän kärkipisteen sijainteja. Ellipsien muoto on vain arvio, mutta keski- ja kärkipisteet ovat tarkasti kohdillaan.

Taulukko 2: Mallin 1 ensimmäisen optimoinnin tuloksia

	Arvo	Muutos
Keskinäinen akselisuhde	32.033	-7.3 %
Suurin-pienin akselisuhde	8.1172	33.5%
Pinta-alasuhde	10.323	-3.3 %

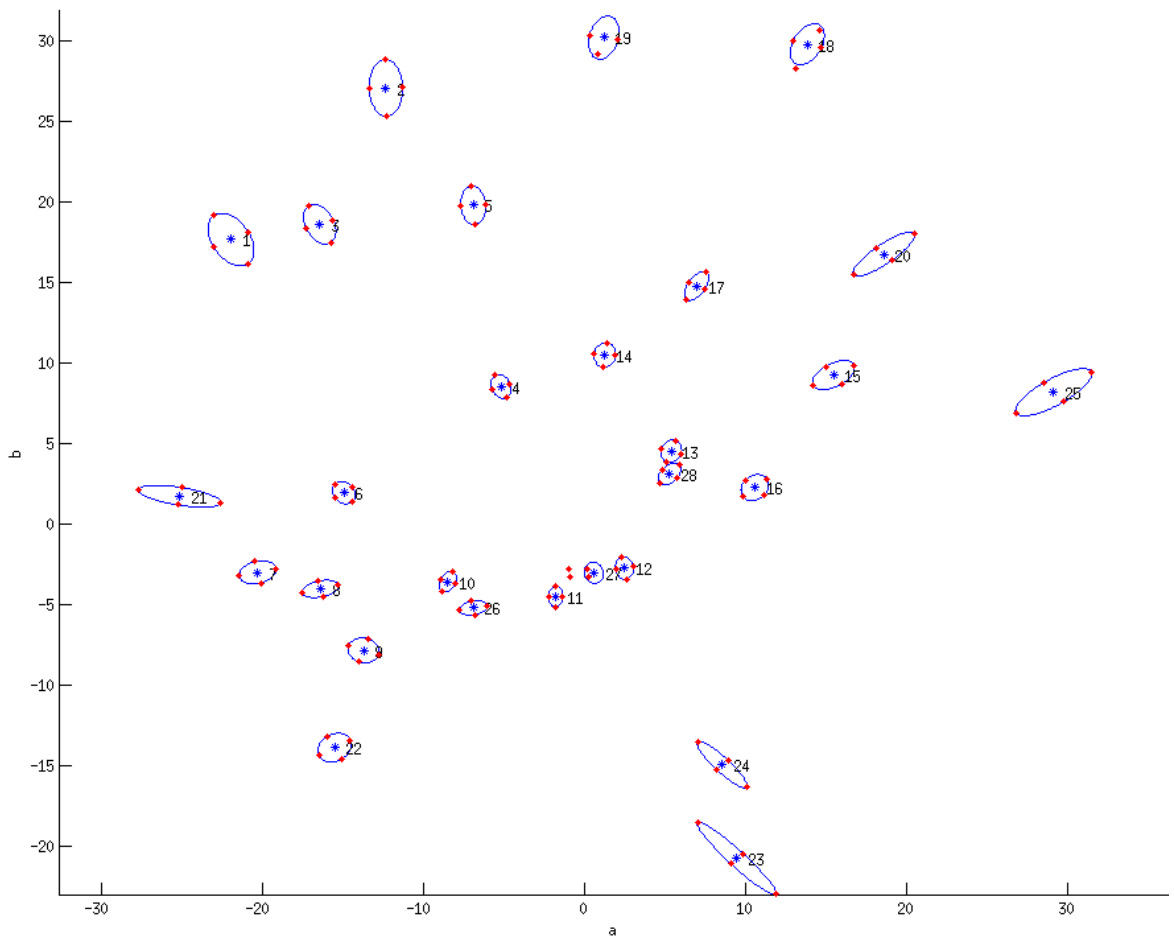


Kuva 8: Mallin 1 ensimmäisen optimoinnin tuottamat ellipsit a^*, b^* - tasossa

Seuraavissa ajoissa muutettiin Lab – funktion liitoskohdan arvo vaihtelevaksi välillä $[0.008856, 0.12]$. Taulukon 3 tulokset saatiin arvolla $\omega = 0.0389$ ja näyttävät huomattavaa parannusta sekä muodoissa että pinta-aloissa. Lab - parametreiksi muodostuivat $\mathbf{x} = \{ 3.197, 42.649, 317.894, 0.425, 288.886, 89.369 \}$. Kuvassa 9 paljastuu, että ellipsin 27 keskipiste ja ympäröivät pisteet ovat siirtyneet epämääräisesti. Tähän vaikutti todennäköisesti juuri liitoskohdan arvon muuttaminen. Lab – funktion kaava (2.7) on jaettu kahteen osaan ja XYZ – arvot normalisoidaan jakamalla kohteen valkoisella tristimulusarvolla. Normalisoinnin tuloksena arvoista, jotka ovat suurempia kuin 0.008856 otetaan kuutiojuuri, kun taas pienemmät arvot kerrotaan ja vain erittäin tummat sävyt saavat näin pieniä arvoja. Alkuperäisellä liitoskohdalla funktio oli jatkuva, mutta optimoinnista saaduilla arvoilla on mahdollista että näin ei enää ole, mistä aiheutuu tiettyjen väripisteiden hajaantuminen.

Taulukko 3: Mallin 1 toisen optimoinnin tuloksia

	Arvo	Muutos
Keskinäinen akselisuhde	29.917	-14.8 %
Suurin-pienin akselisuhde	7.401	27.1%
Pinta-alasuhde	7.714	-38.2 %



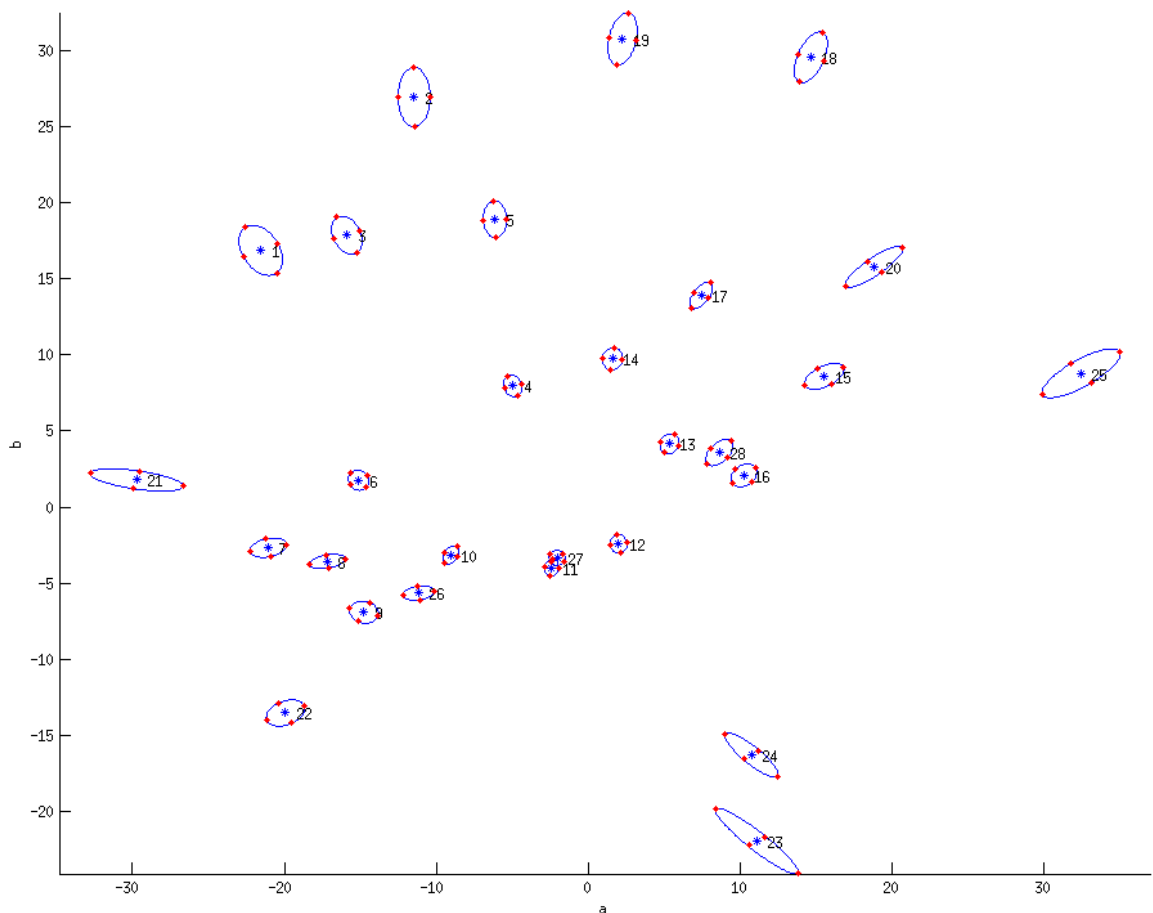
Kuva 9: Mallin 1 toisen optimoinnin hajaantuneet pisteet ellipsissä 27

4.3 Mallin 2 tulokset

Ensimmäisessä ajossa väripisteet ja ellipsit näyttävät luotettavilta, eikä väripisteissä esiintynyt hajaantumista. Parannusta alkuperäiseen väriavaruuteen tuli vähän, mutta kuitenkin enemmän kuin mallissa 1, kuten näkyy taulukosta 4. Parametreiksi saatiin $\mathbf{x} = \{x_4, x_5, x_6\} = \{343.880, 92.215, 0.316\}$, ja \mathbf{k} – matriisin kertoimet, tai osoittajat, pidettiin vakioina $x_1 = x_2 = x_3 = 1.0$.

Taulukko 4: Mallin 2 ensimmäisen optimoinnin tuloksia

	Arvo	Muutos
Keskinäinen akselisuhde	30.959	-11.0%
Suurin-pienin akselisuhde	4.872	-10.8%
Pinta-alasuhde	10.212	-4.4%

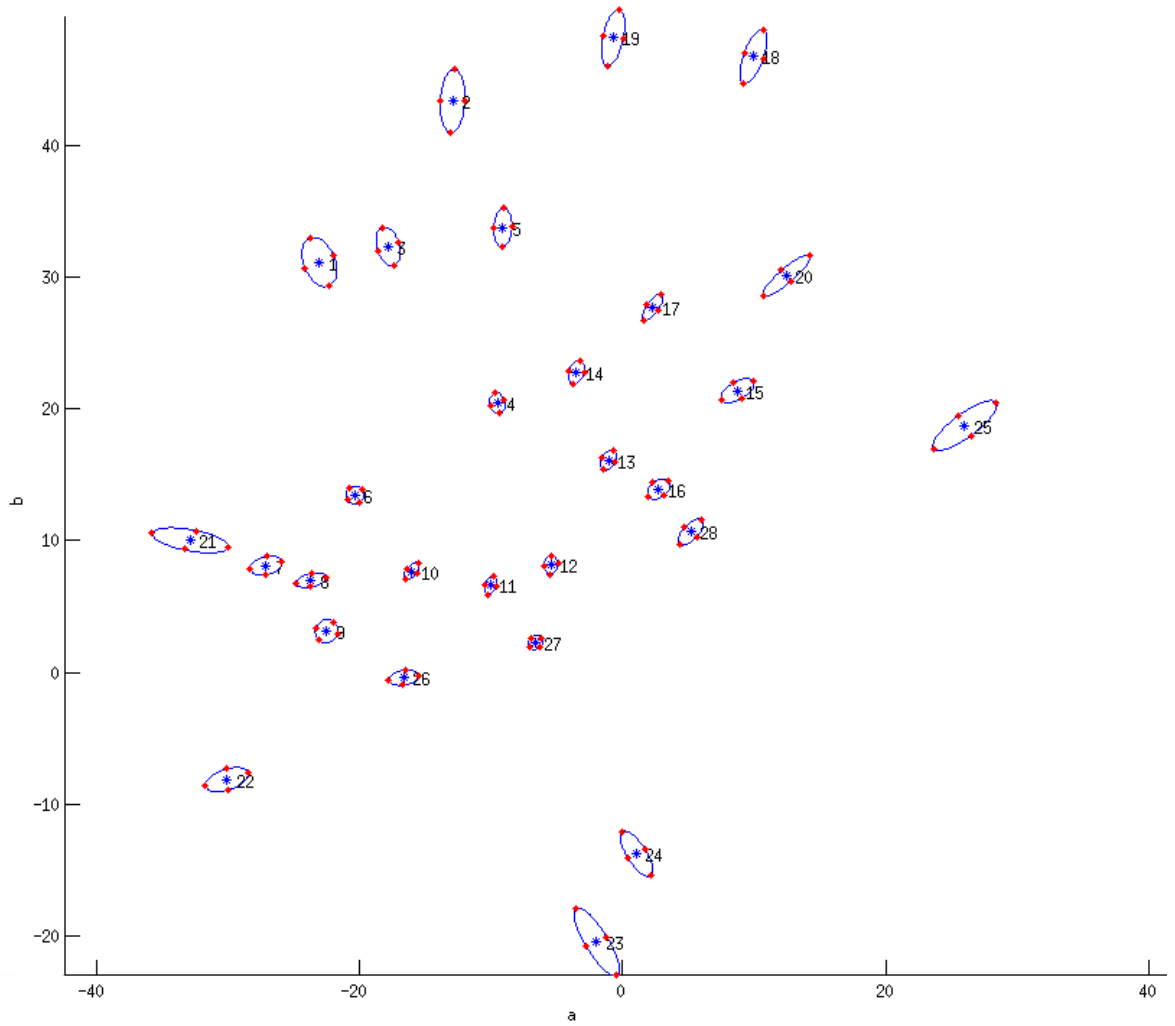


Kuva 10: Mallin 2 ensimmäinen optimointi, jossa käytetty von Kries – transformaatiota normalisointiin

Toisessa ajossa käytettiin lisäparametreja \mathbf{k} - matriisissa ja tulokset olivat taulukon 5 numeroarvojen puolesta paremmat kuin mallissa 1. Parametreiksi saatiin $\mathbf{x} = \{1.0820 \ 1.1032 \ 0.7287 \ 308.0191 \ 129.4838 \ 0.2939\}$. Mutta kuten mallin 1 toisessa ajossa, myös tässä esiintyi epäilyttäviä muutoksia tietyissä väripisteissä, kuten kuvassa 11 voi nähdä, ellipsit 16 ja 28 ovat vaihtaneet sijaintia keskenään; samoin ellipsit 11 ja 27. Aluksi tämä vaikutti epä johdonmukaiselta, koska periaatteessa sävyt eivät voi tällä tavoin vaihtaa paikkaa. Myöhemmin huomattiin, että koska ellipsejä oli tarkasteltu a^*, b^* - tasossa, niin sijoittuminen L^* - akselilla ei käy ilmi. Siirtymän tapahtuminen voi siis olla mahdollista, koska paikkaa vaihtaneet ellipsit sijaitsivat eri tasoilla suhteessa toisiinsa.

Taulukko 5: Mallin 2 toisen optimoinnin tuloksia

	Arvo	Muutos
Keskinäinen akselisuhde	31.977	-7.4%
Suurin-pienin akselisuhde	4.725	-14.2%
Pinta-alasuhde	9.375	-13.7%



Kuva 11: Mallin 2 Lab – väriavaruus von Kries – transformaatiolla, jossa on käytetty lisäkertoimia k-matriisissa

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutkia kuinka CIELAB – väriavaruuden rakenne voitaisiin muuttaa yhtenäisyyden parantamiseksi. Pohjana oli aiempi vastaava tutkimus [Kaa12], jonka lähtökohtana oli parametrisoida ja optimoida $a*b*$ – koordinaattien laskukaavat käyttäen Matlab – ohjelmistoa. Tämä työ rakentui kahdesta eri vaiheesta, joissa optimoitiin kahta erityyppistä väriavaruusmallia. Ensimmäinen malli oli käytännössä sama, kuin edellisessä tutkimuksessa, mutta suuremmalla ellipsijoukolla. Toinen malli hyödynsi von Kries - transformatiota ja osittain RLAB – väriavaruuden kaavoja.

Ensimmäisestä mallista huomattiin, että yhtenäisyyttä ei saada parannettua kovinkaan paljon optimoitaessa pelkästään kertoimia. Selkeästi parempia tuloksia syntyi, kun myös paloittain määritellyn funktion (3.2) liitoskohdan arvoa muutettiin. Tällä tavoin saadut tulokset tosin vaikuttivat epäluotettavilta, koska tiettyjen väripisteiden sijainti ellipsin 27 alueella eivät olleet suhteessa verrattuna muihin väripisteisiin.

Toisessa mallissa saatiin suurin piirtein saman verran parannusta aikaiseksi, kuin ensimmäisessä mallissa, muttei huomattavasti. Parempia tuloksia ja parannusta yhtenäisyyteen saatiin optimoimalla vielä \mathbf{k} - matriisin kertoimia, jolloin varsinkin sinisen alueen ellipsit 23 ja 24 näyttävät pyöristyneet jonkin verran ja kääntyneet enemmän neutraalia aluetta kohti.

Käytännössä havaittiin, että CIELAB – väriavaruutta voidaan parametreja optimoimalla parantaa jonkin verran, muttei huomattavasti. Tästä voi päätellä, että CIELAB – väriavaruus on alunperinkin hyvin suunniteltu. Koska väriavaruus muunnetaan yleensä aina XYZ – avaruudesta, parempia tuloksia saataisiin todennäköisesti x,y,z - värinsovitusfunktioiden muuttamalla tai kokonaan uusia värinsovitusfunktioita käyttämällä.

LÄHTEET

- [Ber00] Berns, Roys S., "Principles of Color Technology", 3rd Edition. John Wiley & Sons, Canada, 2000.
- [CIE12] CIE Draft Standard DS 014-6/E:2012,
http://www.cie.co.at/index.php/index.php?i_ca_id=886. Viitattu 31.7.2012.
- [CVRL] Colour and vision and research laboratory database,
<http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>, Viitattu 31.7.2012.
- [Fai96] Fairchild, Mark. D., "Refinement of RLAB Color Space", Color Research and Application Volume 21, Number 5, 1996, pp. 338-346.
- [Fai97] Fairchild, Mark .D., "Color Appearance Models", Addison-Wesley Longman, Inc., Englanti, 1997.
- [Kaa12] Kaarna, A., "Modifying the LAB Color Space in search for uniformity", Proceedings of the VII International Conference "International Cooperation in Engineering Education", Distributed Intelligent Systems and Technologies 2-4 July 2012, St. Petersburg, Russia pp. 5-12.
- [Kue08] Kuehni, Rolf G., "Color Difference Formulas: An Unsatisfactory State of Affairs", Color Research and Application Volume 33, Number 4, August 2008, pp. 324-326.
- [Jin09] Jin, H. et al., "Testing of the Uniformity of Color Appearance Space", World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009, pp. 307-311.
- [Luo86] Luo, M. R., Rigg, B., "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours", Color Research and Application Volume 11, Number 1, 1986, pp. 25-42.
- [Luo01] Luo, M.R. et al., "The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula: CIEDE2000", Color Research and Application, Volume 26, Number 5, October 2001, pp. 340-350.

- [Wan09] Wang, L. et al., "Evaluation of Color-Difference Formulae Based on Small Color Difference Data by Printed Sample", *Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress on* , 17-19 Oct. 2009, pp.1-4.
- [Wes04] Westland, S., Ripamonti, C., "Computational Colour Science using Matlab", John Wiley & Sons, 2004.
- [Wyz82] Wyszecki, G., W.S. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 1982.

LIITE 1 : BFD-RIT DATA

Taulukko 1: BFD-RIT ellipsien arvoja. Ellipsin järjestysnumero, nimilyhenne tietojoukossa, Lab – arvot, isoakseli, akselisuhte, pinta-ala ja kallistuskulma asteina.

N	Ellipsi	L*	a*	b*	A	A/B	pinta-ala	theta
1	RCK 1	60.2574	-34.0192	36.2901	3.6297	1.9044	21.7337	118.18
2	RCK 2	59.1774	-19.0894	57.5680	4.1022	2.5380	20.8301	91.55
3	RCK 3	60.1229	-25.4117	38.3829	2.7204	1.9405	11.9812	113.04
4	RCK 4	60.5159	-7.9605	17.1384	1.5267	1.6967	4.3157	112.80
5	RCK 5	61.9293	-10.5697	40.6217	2.5737	2.1786	9.5519	94.00
6	RCK 7	64.1366	-22.7308	3.7886	1.3492	1.3240	4.3193	129.76
7	RCK 8	63.0109	-31.1059	-5.8328	1.8244	1.3849	7.5504	14.70
8	RCK 9	62.7181	-25.0990	-7.8113	1.7757	1.8420	5.3777	13.08
9	RCK 10	63.1689	-20.9303	-15.0953	1.5363	1.1005	6.7377	160.69
10	RCK 11	64.2256	-12.8819	-6.9156	1.2758	1.7148	2.9820	66.31
11	RCK 12	63.3098	-2.7462	-8.7297	1.2395	1.8511	2.6074	88.68
12	RCK 13	61.2901	3.7090	-5.3574	1.3421	1.6159	3.5019	100.62
13	RCK 14	62.4316	8.0764	8.9149	1.3500	1.3693	4.1814	72.68
14	RCK 15	62.6004	1.8713	20.9778	1.5757	1.5627	4.9914	84.18
15	RCK 16	62.3808	23.1614	18.4443	2.2583	1.7176	9.3281	34.01
16	RCK 17	64.7397	15.7376	4.4034	1.5180	1.2080	5.9928	44.71
17	RCK 18	62.1685	10.4529	29.9046	1.9829	2.3071	5.3541	62.71
18	RCK 19	61.6715	20.7762	63.0845	3.6034	2.6624	15.3215	72.01
19	RCK 20	60.8522	1.7778	65.5979	3.6548	2.6680	15.7286	80.82
20	RCK 21	63.0858	27.7165	33.9367	3.8677	3.6544	12.8600	44.09
21	KPC 22	35.0831	-44.1220	3.8132	4.7221	3.8878	18.0184	168.79
22	KPC 23	37.4447	-26.5754	-29.0086	1.9136	1.1642	9.8815	28.73
23	KPC 24	22.7233	20.0845	-46.6672	6.2573	6.8995	17.8281	133.64
24	KPC 25	22.1600	18.2700	-34.5473	4.0126	4.6802	10.8078	132.71
25	KPC 26	36.4612	47.8493	18.4022	4.7616	2.9385	24.2399	38.37
26	TFC 28	24.9086	-15.2230	-11.9207	1.5149	1.5424	4.6743	10.10
27	TFC 29	23.7243	-2.3704	-7.0551	0.9323	1.2013	2.2731	138.89
28	TFC 30	22.383	12.4683	7.3987	1.8856	1.8047	6.1893	54.59