

Janne Kotka

**VIRHEMETRIIKAT AUTOMAATTISTEN  
VALKOTASAPAINOALGORITMIEN  
ARVIOINNISSA**

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Kandidaattitutkielma

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastajat: Prof. Matti Haavisto  
Joulukuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Janne Kotka: Virhemetriikat automaattisten valkotasapainoalgoritmien arvioinnissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Ohjelmistotekniikka  
Joulukuu 2021

---

Automaattiset valkotasapainon säätöalgoritmit ovat oleellinen osa nykyaikaista digitaalista kamerajärjestelmää. Niiden avulla kuvan värit saadaan erilaisissa valaistusolosuhteissa vastaamaan käyttäjän subjektiivista kokemusta kohteen väreistä kuvanoton hetkellä. Valkotasapainon arviointi pulmana on luonteeltaan vaikea ja sitä ratkaisemaan on kehitetty joukko erilaisia algoritmeja. Näiden algoritmien suoriutumista mitataan erilaisilla metriikoilla, jotka pyrkivät numeerisella arvolla kuvaamaan algoritmin onnistumista kyseiselle syötekuvalle, ja jota käytetään myös algoritmien keskinäiseen vertailuun. Työn tavoite on selvittää, kuinka hyvin näiden metriikoiden antamat tulokset vastaavat ihmisen subjektiivista kokemusta kuvan värintoiston onnistumisesta.

Työssä käydään läpi valkotasapainon arvioinnin perusteet ja selvitetään, mikä tekee arviointitehtävästä haastavan. Työssä tutkitaan valkotasapainon arviointi algoritmien julkaisuissa käytetyjä virhemetriikoita, joiden joukosta poimitaan yleisimmin käytetyt metriikat, joiden toimintaperiaatteisiin perehdytään, sekä testataan niiden antamien tulosten korreloimista lopullisen kuvan värintoiston onnistumiseen.

Metriikoiden korrelaatiota subjektiiviseen kokemukseen kuvan väreistä testataan luomalla systemaattisia virheitä kuvien valkotasapainoon ja mittaamalla luotujen virheiden vaikutuksia eri valonlähteiden alla eri kameroilla kuvattujen kuvien väreihin käyttäen subjektiivisesti kalibroitua värierottelumetriikkaa. Metriikoiden antamia tuloksia verrataan pohjatotuutena käytettyyn värierottelumetriikan antamiin tuloksiin kuvan eri väreistä ja tilastollisten menetelmien avulla tarkastellaan korrelaatiota tulosten väleillä.

Tutkimuksessa todetaan, että saatuun korrelaatiokertoimeen pohjautuen, yleisimmin käytössä oleva metriikka ei vastaa kovinkaan hyvin subjektiivista kokemusta virheestä kuvan väreissä, jos otetaan huomioon kuvan lopullinen värintoisto. Osan työssä tutkituista metriikoista huomattiin otettavan paremmin huomioon ihmisen näköjärjestelmän ominaispiirteet värintoistossa, mutta niiden käyttö julkaisuissa on harvinaisempaa.

Avainsanat: valkotasapaino, väri, värivirhe, värioppi, värimalli, algoritmi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto . . . . .	1
2.	Automaattinen valkotasapainon säätöalgoritmi . . . . .	3
2.1	Digitaalinen kuvantamisputki . . . . .	3
2.2	Valkotasapainon arvioinnin ongelma . . . . .	4
2.3	Kuvien valkotasapainon säätö . . . . .	6
3.	Valkotasapainovirheiden mittaaminen . . . . .	9
3.1	Yleiset käytetyt virhemetriikat . . . . .	9
3.1.1	Kulmavirhe - Recovery angular error . . . . .	9
3.1.2	RAE reproduction angular error . . . . .	10
3.1.3	CIE $\Delta E_{2000}$ . . . . .	11
4.	Koejärjestely . . . . .	14
4.1	Pohjatotuuden määrittely . . . . .	14
4.2	Virheen generointi . . . . .	14
4.3	Virhemetriikoiden arviointi . . . . .	15
5.	Tulokset . . . . .	16
6.	Yhteenveto . . . . .	18
	Lähteet . . . . .	19
	Liite A: Tulostaulukko . . . . .	21

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\Delta E_{00}$	CIE $\Delta E_{2000}$ värieron mittari
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage, kansainvälinen valaistuskomissio
DSRL	Digital Single Reflect Lens, digitaalinen järjestelmäkamera
LED	Light Emiting Diode, hohtodiodi
RAE	Reproduction Angular Error, parannettu kulmavirhemetriikka
RGB	Red, Green, Blue kolmikomponenttinen väriavaruus
sRGB	standardi RGB avaruus

# 1. JOHDANTO

Automaattiset valkotasapainon säätöalgoritmit ovat olennainen osa digitaalista kamerajärjestelmää, niiden avulla saadaan sensorin tuottaman kuvan värit vastaamaan ihmisten subjektiivista kokemusta kuvauksen kohteen väreistä. Valkotasapainoalgoritmit, kuten ihmisen näköjärjestelmäkin, pyrkivät poistamaan valon krominanssin (värin) vaikutuksen kuvadatasta. Valkotasapainoalgoritmin tuottaman arvion mukaan korjatussa kuvassa pitäisi yleisesti ottaen akromaattisten pintojen toistua akromaattisina sekä värien saman kaltaisena mitä ne olisivat ihmisen havainnoimana näyttäneet, esimerkiksi: valkoisen paperin hehkulampun valossa tulisi näyttää edelleen valkoiselta ja vastaavasti sama paperi sinertävän ledivalon alla tulisi edelleen näyttää valkoiselta ja vastaavasti vihreä ruoho tulisi toistua vihreänä riippumatta siitä, kuvataanko sitä suorassa auringonvalossa vai sinisen taivaan valaisemana varjoisassa kohdassa.

Valkotasapainon arviointi sensorin tuottamasta digitaalisesta kuvadatasta on haastava pulma. Luvussa 2 tutustutaan digitaaliseen kamerajärjestelmään ja käyn läpi missä kohdassa kuvantamisputkea valkotasapaino arvioidaan, mitä algoritmi saa sisäänsä, mitä se tuottaa ulos ja miten tätä käytetään poistamaan valon krominanssin vaikutus kuvadatasta. Käyn myös läpi, mistä signaali muodostuu, jota kamerasensori mittaa sekä mitkä asiat vaikuttavat järjestelmästä ulostulevaan signaaliin. Tarkastelen myös, mitkä muut asiat voivat vaikuttaa kuvantamisputkessa värien toistamiseen ja pitäisikö nämä asiat huomioida jotenkin virheitä arvioidessa.

Automaattisten valkotasapainon säätöalgoritmien suorituskykyä mittaamaan on kehitetty erilaisia virhemetriikoita. Nämä metriikat pyrkivät mittaamaan algoritmin ulostulon tuottamaa virhettä ennalta määriteltyyn pohjatotuuteen. Tutustun luvussa 3 näihin metriikoihin ja tutkin mihin, niiden toiminta perustuu ja mitä ne tarvitsevat toimiakseen. Tutkin myös, mitä metriikoita on yleisimmin käytetty julkaisuissa esiteltyjen algoritmien mittaamiseen, käyn läpi muutaman yleisesti käytetyimmän metriikan toimintaperiaatteen ja vertailen toimintaperiaatteita metriikoiden välillä.

Käytetyt virhemetriikat ohjaavat valkotasapainon säätöalgoritmien kehitystä, sillä niillä mitataan algoritmin onnistumista tehtävässään. Tässä tutkielmassa pyrin tutkimaan näiden metriikoiden paikkansapitävyyttä valkotasapainon säätöalgoritmien mittaamiseen, kuvan värien toiston kannalta. Tutkimusta varten tuotan synteettisen virheen kuvan valkopis-

teen pohjatotuuteen, jonka perusteella kuvan valkotasapainoa muokataan. Vertailen eri metriikoiden ilmoittamaa virhelukemaa sekä kuvasta löytyviä värejä värierottelukaavoja hyväksikäyttäen.

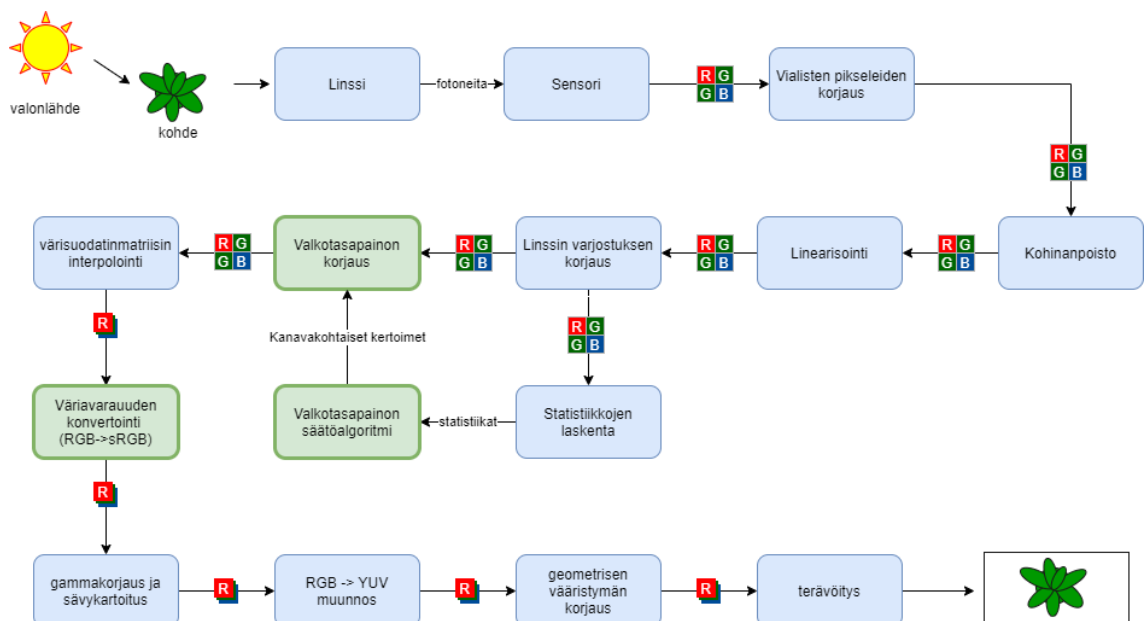
Totean tämän pohjalta, että virhemetriikat toimivat jokseenkin hyvin harmaan pinnan toistamisen mittaamiseen, mutta eivät välttämättä vastaa kysymykseen siitä, että kokeeko ihminen tuloksen onnistuneeksi, esimerkiksi muiden kuvan värien osalta. Menetelmät jotka eivät ota huomioon väriavaruusmuutoksia tai kuvasisällön värejä, eivät täysin onnistu tehtävässään, jos tarkoituksena on mitata valkotasapainonsäädön onnistumista ihmisen kokeman värien toiston kannalta.

## 2. AUTOMAATTINEN VALKOTASAPAINON SÄÄTÖALGORITMI

Automaattinen valkotasapainon säätöalgoritmi pyrkii sisään tulevasta signaalista arvioimaan valonlähteen krominanssin. Tätä tietoa käyttäen voidaan kuvadataa muokata niin että valonlähteen krominanssin vaikutus kuvan väri-informaatioon saadaan poistettua. Valkotasapainon säätöalgoritmi on osana digitaalista kuvantamisputkea. Algoritmin toiminnan ymmärtämiseksi on hyvä tarkastella ympäristöä, jossa algoritmi toimii.

### 2.1 Digitaalinen kuvantamisputki

Digitaalinen kuvantamisputki on joukko algoritmeja, joiden avulla lopullinen kuva saadaan muodostettua sensorin tuottamasta raakadatasta. Kuvanmuokkausalgoritmien lisäksi putki sisältää algoritmeja, joiden tehtävänä on tuottaa statistiikkaa sekä algoritmeja, jotka tuotettua statistiikkaa käyttäen analysoivat kuvaa ja tuottavat kuvantamisputken muille algoritmeille toimintaparametrejä. Esimerkki digitaalisesta kuvantamisputkesta on esitelty kuvassa 2.1.



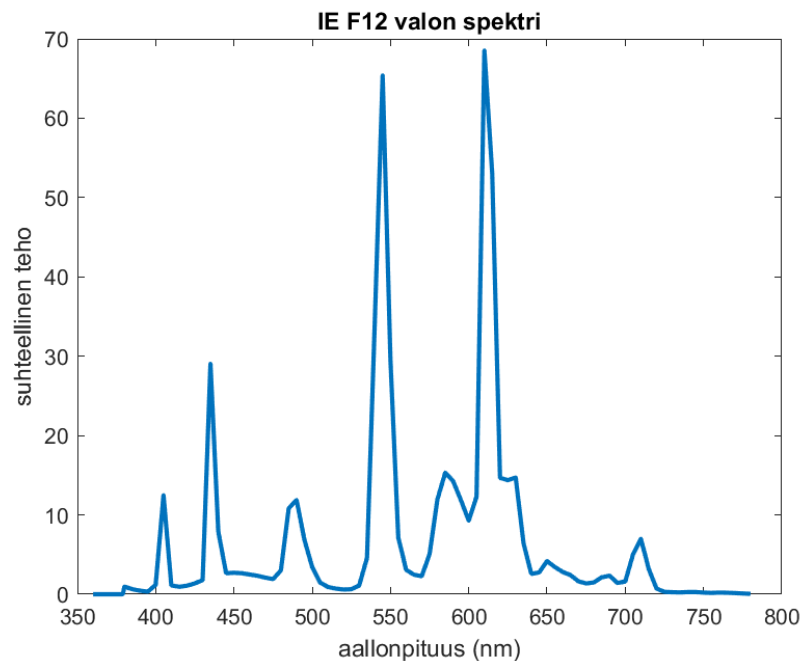
**Kuva 2.1.** Esimerkki digitaalisesta kuvantamisputkesta. Kuva: Janne Kotka

Värien toistoon vaikuttavat komponentit on merkitty vihreällä värillä kuvassa. Valkotasapainon säätöön käytetään siis kuvadatasta laskettua статистиikka, itse valkotasapainon säätöalgoritmiä, sekä kuvadatan muokkaukseen käytetään valkotasapainon korjausalgoritmiä. Lisäksi kuvassa on vihreänä merkitty vielä konversio sensorikohtaisesta RGB-väriavaruudesta standardiin sRGB-avaruuteen (Michael Stokes (Hewlett-Packard) ja (Hewlett-Packard) 1996), koska tämä konversio myös muuttaa kuvan värejä.

## 2.2 Valkotasapainon arvioinnin ongelma

Digitaalisessa kuvauksessa järjestelmään tulevaa signaalia voidaan määrittellä kahden ominaisuuden avulla: valon ominaisuuksien sekä kuvattavien pintojen ominaisuuksien avulla. Järjestelmään sisään tuleva signaali muodostuu näiden kahden suureen yhteisvaikutuksena, järjestelmän sisään tuleva valo koostuu valosta, joka on peräisin valonlähteestä, joko suoraan tai heijastuneena pintojen kautta.

Valoa voidaan määrittellä sen mukaan, miten sen energia jakautuu eri aallonpituuksille. Tätä kutsutaan valon spektriksi. Ihmisen silmälle näkyvä valo on osa sähkömagneettista spektriä noin aallonpituuksien 380nm-780nm väillä. Valonlähteet, pois lukien erikoistapakukset kuten monokromaattorit, tuottavat valoa usealla aallonpituudella. Valonlähdettä voidaankin kuvailla sen suhteellisen spektrivasteen  $E(\gamma)$  avulla. Tämä energiajakauma eri aallonpituuksien yli määrittelee värin kromaattisuuden. Esimerkki valonlähteen spektristä kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2.** F12 valonlähteen spektri. Mukailten (Laakom, Raitoharju et al. 2021).

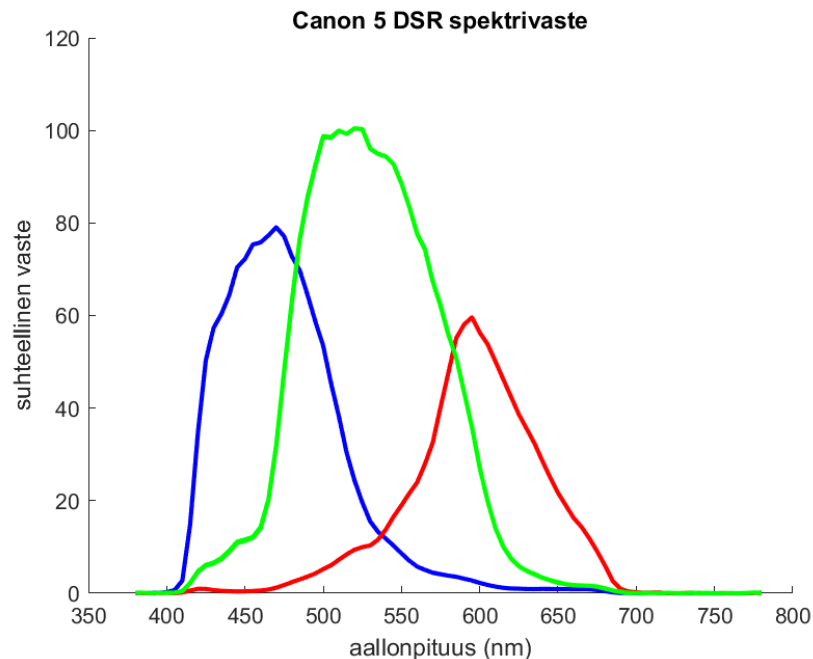
Kohteen pinnan kohdatessaan valo joko imeytyy, läpäisee tai heijastaa sen. Tämä määrit-



telee kohteen pinnan väriin. Tätä ominaisuutta voidaan määrittellä kohteen heijastuspekt-rin  $S(\gamma)$  avulla. Kuvattavaan kohteeseen tuleva valo siis osuu kohteen pintoihin ja heijas-tuu niistä lopulta päätyen sisään kuvausjärjestelmään, muodostaen järjestelmään sisään tulevan signaalin.

Järjestelmään sisään tullessaan signaali vastetta  $R(\gamma)$  eri valon aallonpituuksille kutsu-taan spektrivasteeksi. Spektrivaste on viimeinen tekiä ketjusta, jonka tuloksena muodos-tuu kuvantamisjärjestelmästä tuleva signaali. Silmän spektrivaste  $R(\gamma)$  määräytyy kolmen erityyppisen tappisolun vasteesta (Buchsbaum 1980). Siis silmään sisään tuleva signaa-li voi myös olla tilanteesta toiseen todella erilainen samankaltaisesta materiaaleista, silti ihmisen aivot poistavat valonlähteen vaikutuksen kuvan väri-informaatiosta. Tätä askelta automaattiset valkotasapainon säätöalgoritmit koettavat kopioida digitaalisessa järjestel-mässä.

Digitaalisessa järjestelmässä sisään tuleva valo kulkee yleensä linssijärjestelmän läpi lo-pulta päätyen kuvasensorille. Kuvasensoreilla on oma spektrivasteensa  $R_k(\gamma)$  joka mää-rittää sen, minkälaisen signaalin sensori tuottaa sisään tulevasta valosta. Sensorin spekt-rivaste muodostuu yhdistelmästä sensorin fyysisiä ominaisuuksia kuten: mikrolinssien ra-kenteesta, värifilttereiden vasteesta ja muista sensorin rakenteeseen liittyvistä ominai-suuksista. Kuvassa 2.3 on Canon 5 DSR järjestelmäkameran spektrivaste.



**Kuva 2.3.** Canon 5 DSR kameran spektrivaste. Mukailten (Laakom, Raitoharju et al. 2021).

Kuvan muodostusmalli digitaalisessa järjestelmässä voidaan siis määrittellä kolmen yllä-

mainitun suureen avulla 2.1

$$I_k = \int R_k(\gamma)S(\gamma)E(\gamma) \quad (2.1)$$

Valkotasapainon arvioinnin ongelma muodostuukin yllä olevasta yhtälöstä, kolmesta tuntemattomasta suureesta voimme tietää vain yhden: sensorin spektrivasteen. Yhtälön voi siis ratkaista useammalla tavalla, sama signaali saadaan aikaan kahdesta eri pinnasta kahden eri valon avulla, esimerkiksi: vihreä nurmi led valon alla voi tuottaa saman värivasteen kuin harmaa betoni loisteputken alla, kuitenkin kuvaa katsovalle ihmiselle olisi tärkeää, että betoni toistetaan harmaana ja nurmikko vihreänä, eikä esimerkiksi päin vastoin.

### 2.3 Kuvien valkotasapainon säätö

Jotta kuvattavaa kohdetta esittävä kuva saataisiin muistuttamaan kuvaajan mielikuvaa kohteesta, pitää valonlähteen krominanssin vaikutus kuvan väreistä poistaa. Tätä operaatiota kutsutaan kuvan valkotasapainottamiseksi.

Sensorilta tuleva raaka signaali, jaettuna eri värikomponentteihin käytetyn värisuodatinmatriisiin mukaan, voidaan havainnoida kuvassa 2.4. Kuva on poimittu (Laakom, Raitoharju et al. 2021) julkaisun Intel-TAU kuvatietokannasta. Kuvassa on studiossa kuvattu sommitelma D65(CIE Standard Colorimetric System 2005) valonlähteen alla, kuva on otettu Canon 5 DSLR kameralla.

Digitaalisissa kamerajärjestelmissä käytetään valkotasapainon korjaamiseen lähes poikkeuksetta diagonaalista mallia, sen on todettu toimivan riittävän hyvin tehtävässään ja se on suhteellisen vaivaton toteuttaa (Finlayson, Drew et al. 1994). Malli on kuvattu yhtälössä 2.2

$$\vec{x}' = G \cdot \vec{x}, G = \begin{bmatrix} W'_R/W_R & 0 & 0 \\ 0 & W'_G/W_G & 0 \\ 0 & 0 & W'_B/W_B \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Kaavassa  $G$  on diagonaalinen 3x3 matriisi  $\vec{w} = [W_R, W_G, W_B]$  on sensorin linearisoitu vaste tietyn valonlähteen alla, ja  $\vec{w}' = [W'_R, W'_G, W'_B]$  sensorin vaste eri valonlähteen alla. Matriisin  $G$  diagonaalisia elementtejä voidaan kutsua valkotasapainokertoimiksi. Näitä kertoimia valkotasapainon säätöalgoritmi pyrkii ennustamaan sisään tulevasta kuvadatasta generoiduista statistiikoista.

Kuvassa 2.5 kuvan valkotasapaino on korjattu käyttämällä kuvan mukana toimitettua pohjatotuutta. Kuvasta voimme todeta, että akromaattiset pinnat, kuten GretagMacbeth värikortin alin rivi, toistuvat nyt akromaattisina. Kuvasta kuitenkin puuttuu värisaturaatiota ja



**Kuva 2.4.** Raakaa sensoridataa (Laakom, Raitoharju et al. 2021).



**Kuva 2.5.** Valkotasapainoitettu kuva. Mukailten (Laakom, Raitoharju et al. 2021).

voimme todeta, että se ei näytä vielä luonnolliselta. Tarkastelemme kuvaa näyttölaitteella jonka vaste on kalibroitu eri väriavaruuden mukaan missä kuva tällä hetkellä sijaitsee.

Kuva on edelleen sensorin RGB väriavaruudessa. Voimme konvertoida kuvan standardiin sRGB (Michael Stokes (Hewlett-Packard) ja (Hewlett-Packard) 1996) väriavaruuteen käyttämällä kuvan mukana toimitettua sRGB konversiomatriisia. sRGB väriavaruuteen siirretty kuva 2.6 toistaa värit luonnollisempana ja saturaatio on miellyttävämpi.



**Kuva 2.6.** Valkotasapainoitettu kuva sRGB väriavaruudessa. Mukailen (Laakom, Raitoharju et al. 2021).

Tämä on tulos mihin valkotasapainonsäätö algoritmeja käyttäen kuvadataa muokkaamalla pyritään. Valkotasapainoalgoritmi yrittää arvioida kaavan 2.2  $G$  matriisin kertoimia mitä apuna käyttäen tehdään kuvan valkotasapainon korjaus, eli valkotasapainotus.

### 3. VALKOTASAPAINOVIRHEIDEN MITTAAMINEN

Tässä kappaleessa listataan yleisimmin käytössä olevia tapoihin mitata valkotasapainovirhettä. Valkotasapainon virheen mittaaminen on tärkeä aspekti valkotasapainon säätöalgoritmien kehityksessä, sillä se määrittelee mittarin mitä vasten algoritmia arvioidaan ja näin ohjaa algoritmin kehitystä tiettyyn suuntaan.

Virhemetriikoita käytetään myös vertailemaan algoritmeja keskenään ja asettamaan niitä paremmuusjärjestykseen. On tärkeää, että käytetty virhemetriikka vastaa kysymykseen: miten hyvin algoritmi suoriutuu tehtävästään. On myös tärkeä ottaa huomioon mitkä asiat kuvantamisputkessa vaikuttavat lopulliseen värintoistoon kuvassa, jotta voitaisiin arvioida kaikkea, joka vaikuttaa lopullisen kuvan värintoistoon. Nikkanen et al. (2008) artikkelissaan osoittaa, että sensorin spektrivasteella on huomattava vaikutus valkotasapainovirheestä aiheutuviin värivihreisiin kuvassa. Sensorin spektrivasteesta siirryttäessä standardiin väriavaruuteen, mitä kauempana sensorin vasteesta aiheutuvat kertoimet ovat yksikömatrisista, sitä isompi vaikutus lopulliseen värintoistoon on väriavaruusmuunnoksella.

Yhteistä tässä työssä tarkastelluiden metriikoiden välillä on se, että ne pyrkivät molemmat mittaamaan valkoisen pinnan ja valitulla valkopisteellä korjatun valkoisen pinnan välistä virhettä.

#### 3.1 Yleiset käytetyt virhemetriikat

Tässä työssä tutkin seuraavassa taulukossa 3.1 esitellyjä julkaisuja ja tarkastelen mitä virhemetriikkaa niissä on käytetty virheen arvioimiseen. Julkaisut koostuvat valkotasapainoalgoritmijulkaisuista tai valkotasapainoon liittyvistä tutkimuksista.

##### 3.1.1 Kulmavirhe - Recovery angular error

Recovery angular error, (Hordley ja Finlayson 2006) (Gijssen et al. 2009) on yleisesti käytetty vertailumetriikka. se perustuu kaavaan 3.1

$$err_{recovery} = \cos^{-1} \left( \frac{(\rho^E \cdot \rho^{Est})}{\|\rho^E\| \|\rho^{Est}\|} \right) \quad (3.1)$$

Julkaisu	kulmavirhe	RAE	De2000
Barron ja Tsai (2017), Fast Fourier Color Constancy	x		
Hu et al. (2017), $FC^4$ : Fully Convolutional Color Constancy with Confidence-Weighted Pooling	x		
Yu et al. (2020), Cascading Convolutional Color Constancy	x		
Nikkanen et al. (2008), Subjective effects of white-balancing errors in digital photography			x
Laakom, Passalis et al. (2020), Bag of Color Features for Color Constancy	x		
Laakom, Raitoharju et al. (2021), INTEL-TAU: A Color Constancy Dataset	x	x	

**Taulukko 3.1.** Lista julkaisuista ja niissä käytetyistä virhemetriikoista.

Kaavassa  $\rho^E$  kuvaa mitattua RGB pohjatotuutta ja  $\rho^{Est}$  arvioitua valon RGB arvoa. Tämä metriikka on yleisesti käytössä, mutta sen antamat tulokset eivät välttämättä vastaa kovin hyvin subjektiivista, tai edes objektiivista, analyysiä lopullisista kuvan väreistä kuten Finlayson, Zakizadeh et al. (2017) toteaa. Kulmavirheellä mitattuna samaan valkotasapainotettuun lopputulokseen päätyvät algoritmit voivat valon lähteestä riippuen saada hyvin erilaisia arvoja. Esimerkki tästä on kuvassa 3.1. Kuvan kohdan a) ensimmäisessä rivissä on sama kohde kolmen eri valonlähteen valaisemana. Toinen rivi on sama kuva korjattuna valkotasapainoalgoritmilla, lopputulos on identtinen. Kohta b) esittää kulmavirhettä algoritmin arvion ja pohjatotuuden välillä (valkoiset pallot). Kulmavirheen suuruus eri valonlähteiden välillä vaihtelee suuresti, vaikka lopputulos valkotasapainotuksen jälkeen on identtinen.

### 3.1.2 RAE reproduction angular error

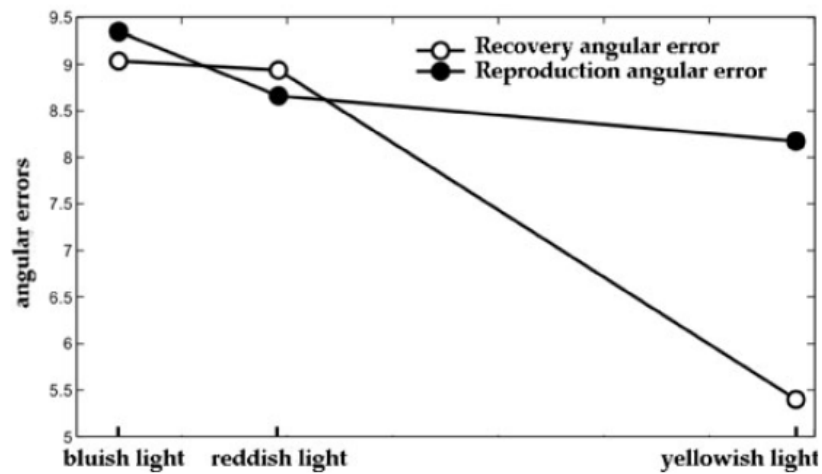
Finlayson, Zakizadeh et al. (2017) artikkelissaan esittelee korvaavan menetelmän edellisessä kappaleessa esitellylle ja yleisesti käytössä olevalle kulmavirheelle perustuvalla metriikalla (recovery angular error), esitellen kyseisen metrikan heikkoudet ja ehdottaen niihin vaihtoehtoa nimeltä Reproduction Angular Error (RAE tästä eteenpäin). RAE voidaan kuvata seuraavalla kaavalla 3.2

$$err_{reproduction} = \cos^{-1} \left( \frac{(\rho^{E,W} / \rho^{Est}) \cdot \underline{U}}{|(\rho^{E,W} / \rho^{Est})| \sqrt{(3)}} \right) \quad (3.2)$$

Tässä kaavassa  $\rho^{Est}$  on arvioitu valonlähteen väri,  $\rho^{E,W}$  on todellinen valon väri ja  $\underline{U}$  on valkoisen pinnan väri todellisen valonlähteen alla.



(a)



(b)

**Kuva 3.1.** Kulmavirheen virheellisyys (Finlayson, Zakizadeh et al. 2017).

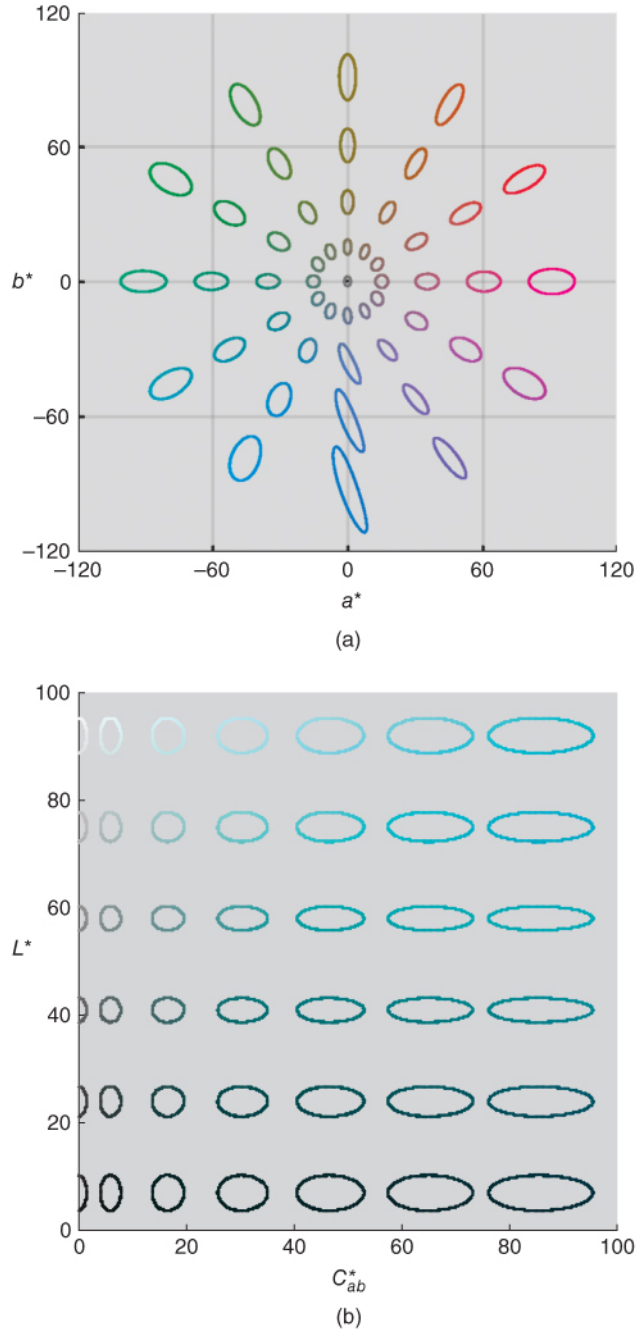
Tämä menetelmä antaa johdonmukaisempia tuloksia valonlähteestä riippumatta, kuten kuvasta 3.1 voidaan todeta. Molempien edellä esitellyiden menetelmien hyvänä puolena on se, että sen laskeminen on suhteellisen yksinkertaista ja nopeaa, joten niitä voi käyttää esimerkiksi virhemetriikkana koneoppimisen algoritmeille, laskemiseen tarvitaan vain valkopisteen pohjatotuus ja estimaatti, jonka hyvyyttä olemme tarkastelemassa.

### 3.1.3 CIE $\Delta E_{2000}$

CIE  $\Delta E_{2000}$  (Berns 2019, luku 5) ( $\Delta E_{00}$  tästä eteenpäin) ei varsinaisesti ole valkotasapainovirhettä mittaamaan kehitetty järjestelmä, järjestelmä on kehitetty antamaan numeerinen vastaus värejen eroavuudelle.  $\Delta E_{00}$  luodessa on otettu huomioon ihmisen näköjärjestelmä ja järjestelmä on kalibroitu niin että eroavuusarvo 1.0 vastaa värieroa minkä keskimääräinen havainnoitsija erottaa.

$\Delta E_{00}$  pyrkii ottamaan huomioon ihmisen näköjärjestelmän asettamat erityisvaatimukset, esimerkiksi ihonvärissä voidaan samansuuruinen virhe punaiseen suuntaan vielä hyväk-

syä, mutta vihreään suuntaan se olisi jo hylätty. Tätä toleranssia kuvaavia ellipsoideja lab-avaruudessa voidaan havainnoida kuvasta 3.2. Kohdassa (a) on esitelty sävykulman vaikutus ellipsoideihin ja kohdassa (b) kirkkauden vaikutus ellipsoidin muotoon.



**Kuva 3.2.** Väritoleranssi ellipsoidit. (Berns 2019).

Valkotasapainovirheelle  $\Delta E_{00}$  on julkaisuissa (Nikkanen et al. 2008) käytetty vertailemaan akromaattisen pinnan värieroa pohjatotuuteen. Tästä käytän tässä työssä nimeä  $\Delta E_{00g}$

$\Delta E_{00}$  hyvänä puolena on, että se vastaa hyvin subjektiiviseen tuntemukseen väreistä,



sekä edellisistä menetelmistä poiketen, ottaa huomioon myös kuvan lopullisen väritoiston. Huonona puolena voidaan mainita, että laskut sisältävät väriavaruusmuunnoksia ja ovat edellisiin esiteltyihin metriikoihin hankalampia toteuttaa.

## 4. KOEJÄRJESTELY

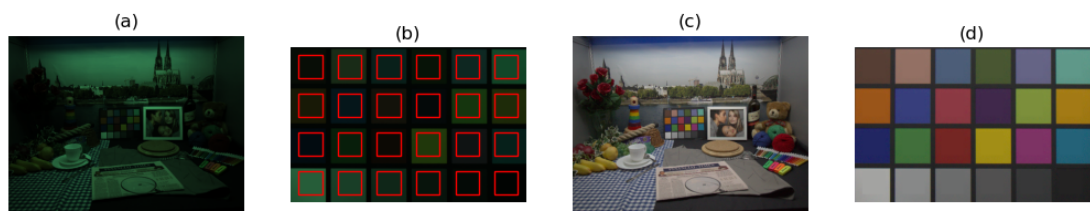
Koejärjestelyllä mitataan eri metriikoiden antamaa tulosta synteettisesti valkopisteeseen luotuun virheeseen. Mittaan virheen vaikutusta kuvan väreihin käyttäen  $\Delta E_{00}$  metriikkaa. Vertaan eri metriikoiden antamia tuloksia  $\Delta E_{00}$  metriikan antamaan väri virheeseen ja tarkastelen kuinka hyvin metriikat korreloivat subjektiivisesti kalibroituun värierottelumetriikkaan nähden.

Käytän kuvia, jotka on otettu neljän eri valonlähteen alla kahdella eri kameralla kuvattuna, luoden jokaiseen kuvaan neljä erisuuntaista valkopistevirhettä.

Pyrin näin selvittämään kuinka hyvin käytetty metriikka korreloi ihmisen näköjärjestelmää vastaavan metriikan kanssa myös kuvan eri värikomponenteille, eikä vain akromaattiselle pinnalle.

### 4.1 Pohjatotuuden määrittely

Määritän kuvassa olevan valkotasapainon pohjatotuuden käyttäen kuvassa olevaa GretagMacbeth korttia. Käytän määritettyä valkotasapainon pohjatotuutta korjaamaan kuvan valkotasapainon ja muutan kuvan sRGB avaruuteen. Tämän jälkeen poimin kuvasta värikorttien värit värien pohjatotuudeksi. Valkotasapainotus ja pohjatotuuksien irrotus on kuvattuna kuvassa 4.1, Canon 5DSR kameran kuvalla D65 valonlähteen alla.



**Kuva 4.1.** Pohjatotuuden määrittely. (a) alkuperäinen kuva, (b) poimittu macbeth värikortti. (c) valkotasapainotettu kuva srgb avaruudessa. (d) värien pohjatotuudet

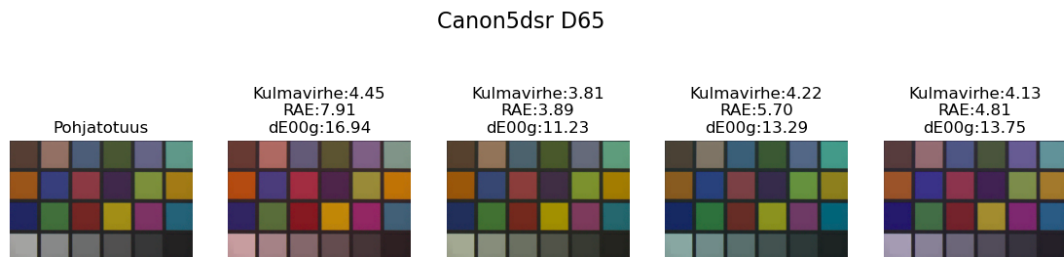
### 4.2 Virheen generointi

Tuotan  $[R/G, B/G]$  avaruudessa synteettisen virheen valkopisteeseen liikuttaen pistettä tässä avaruudessa saman euklidisen etäisyyden verran eri suuntiin. Tässä työssä käytin

seuraavia virheitä:  $\{(-0.1, 0), (0, 0.1), (0.1, 0), (0, 0.1)\}$ .

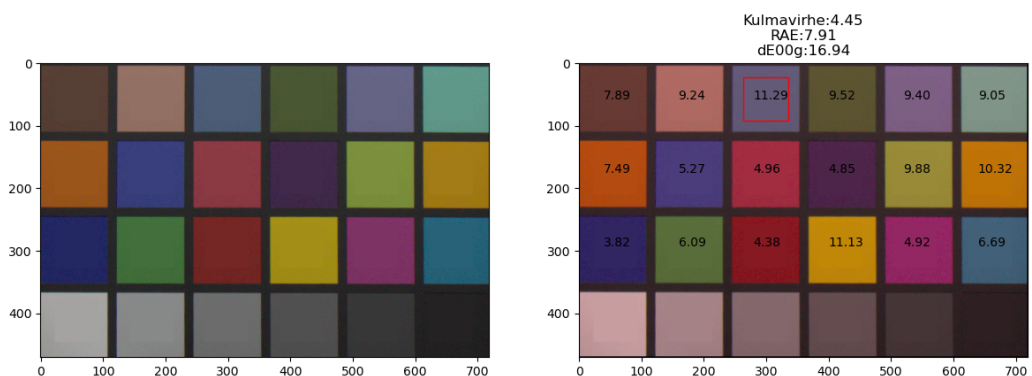
### 4.3 Virhemetriikoiden arviointi

Käytän generoituja virheellisiä valkopisteitä laskemaan kuville virhemetriikoiden arvot. Esimerkki virhemetriikoiden arvoista Canonin 5DSR kameran kuvalle D65 valonlähteen alla, eri valkopistevirheille on esitelty kuvassa 4.2



**Kuva 4.2.** Pohjatotuus, neljä eri virheellistä valkotasapainoa ja niille lasketut virheet

Värivirheen arvioimiseksi käytän tätä uutta pistettä valkotasapainottamaan kuvan. Tämän jälkeen muutan kuvan sRGB väriavaruuteen ja poimin kuvasta GretagMacbeth kortin avulla värit ja mittaan  $\Delta E_{00}$  arvon testattavien värejen ja pohjatototuuuskuvan värien välillä. Poimin joukosta suurimman  $\Delta E_{00}$  eron, jota käytän myöhemmin korrelaation testaamiseen. Esimerkki  $\Delta E_{00}$  laskemisesta testerin eri väreille kuvassa 4.3. Kuvassa suurin virhe on kehystetty punaisella.



**Kuva 4.3.** Testikortin jokaiselle värille laskettu  $\Delta E_{00}$  väriero.

Tämän jälkeen vertaan  $\Delta E_{00}$  antamia arvoja metriikoiden tuottamiin tuloksiin, laskien arvon korrelaation verrattuna metriikan arvoon.

## 5. TULOKSET

Koejärjestelyllä mittasin neljää eri valkopistevirhettä kahden eri kameran kuvissa neljän eri valonlähteen alla.

Metriikoiden korrelaatiota  $\Delta E_{00}$  pohjaiseen pohjatotuuteen voidaan mitata laskemalla tuloksesta otoskorrelaatio pohjatotuutta vastaan. Otokorrelaation laskentatapa on esitelty kaavassa 5.1. Korrelaatioiden merkitsevyys taso on merkitty tulosluetteloon notaatiolla:  $p \leq 0.001=***$ , ja  $p \leq 0.05=*$ .

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

Korrelaatiot pohjatotuuteen löyvät taulukosta 5.1

Tulosten perusteella voin todeta, että yleisimmin käytössä oleva kulmavirhe soveltuu huonoiten mittaamaan valkotasapainoalgorimin onnistumista, jos onnistumista arvioidaan kuvan värien perusteella. Yleisesti käytetyissä kaavoissa on heikkoutena se, että ne eivät ota kantaa kuvan sisältöön millään tapaa, sekä eivät ota väriavaruusmuutoksesta johtuvaa värien muutosta huomioon. Valkotasapainoalgoritmin tarkoituksena on saada kuvan värit näyttämään oikealta ihmisen subjektiivisesti arvioimana. Algoritmeja kuitenkin mitataan järjestelmällä, joka vain vertaa valkopisteitä keskenään, kameran omassa väriavaruudessa, ottamatta kantaa kuvan sisältöön tai kuvan väreihin. Värivirheen hyväksymiskokemus riippuu kyseessä olevasta väristä, joten kuvan sisältö vaikuttaa subjektiiviseen kokemukseen siitä onko valkotasapainottaminen onnistunut.

Asetin kuvat järjestykseen  $\Delta E_{00}$  maksimi värivirheen mukaan pohjatotuudeksi ja mittasin

Metriikka	korrelaatiokerroin	järjestysvirheen keskiarvo
Kulmakerroin	<b>0,4129*</b>	7,25
RAE	<b>0,7166***</b>	5,5
$\Delta E_{00,g}$	<b>0,9038***</b>	3,625

\*= $p \leq 0,05$ , \*\*= $p \leq 0,01$ , \*\*\*= $p \leq 0,001$

n=32

**Taulukko 5.1.** Metriikoiden otoskorrelaatio ja järjestysvirhe.

keskimääräisen erotuksen järjestysten välillä eri virhemetriikoille. Tällä pyrin osoittamaan sen, että kyseinen metriikka vääristää myös järjestystä, jos algoritmeja asetetaan paremmuusjärjestykseen. Erotuksen keskiarvo on taulukossa 5.1 sarakkeessa "järjestysvirheen keskiarvo". Erotuksen keskiarvo on laskettu kaavalla 5.2. Mitä isompi arvo, sitä enemmän metriikan antama järjestys poikkeaa valitusta pohjatotuudesta.

$$\Delta R_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n (|R(x_i) - R(y_i)|)}{n} \quad (5.2)$$

Koska käytän kuvainformaatiota koemenettelyssäni, riippuu tutkimukseni lopputulos kuvasisällöstä. Jos kuva olisi pääosin harmaa, esimerkiksi Kouvola otettu, voisi lopputulos olla erilainen. Kouvola-hypoteesia testatakseni, ajoin myös koejärjestelyn niin että otin myös harmaat testikohdat mukaan testiin, korrelaatio virhemetriikoiden ja testidatan välillä parani hieman, ja lähes joka testikuvassa  $\Delta E_{00}$  merkitsemä näkyvin virhe osui harmaaseen testikortin kohteeseen numero 20. Myös virheet, jotka keinotekoisesti luon kuviin ovat valittu mielivaltaisesti, eivätkä välttämättä edusta virheitä, joita valkotasapainoalgoritmit tuottavat.

Tulokset eri kuville taulukoituna löytyvät liitteestä A.

## 6. YHTEENVETO

Tällä koejärjestelyllä mitattuna, tulin siihen lopputulokseen, että yleisimmin käytetty virhemetriikka ei vastaa kovinkaan hyvin kysymykseen, miten kuvaa katsova ihminen kokee valkotasapainotuksen onnistuneen.

Lopputuloksen kannalta tämänkaltaisen virhemetriikan käyttäminen algoritmien kehityksessä on ongelmallista, sillä se voi ohjata algoritmin kehitystä väärään suuntaan, koska algoritmin hyvyttä mitataan ja algoritmeja asetetaan paremmuusjärjestykseen metriikan perusteella.

Ongelma on kuitenkin jo tiedostettu ja ratkaisua on ehdotettu RAE muodossa (Finlayson, Zakizadeh et al. 2017). Harmillisesti katsauksessani uusimpiin julkaistuihin algoritmeihin, kuitenkin kulmavirhe on edelleen suurimmassa osassa käytetty virhemetriikka.

Lukemissani tutkimuksissa yleisesti raportoidaan tilastollisia muuttujia tuloksista, jotka on testattu jollain tietyllä testiaineistolla, kuten: keskiarvo, mediaani sekä kolmeen luokkaan jaettua keskiarvoa (tri mean). Usein vertailukohtana käytetään mediaania tai keskiarvoa, jonka perusteella paremmuusjärjestys valitaan. Vertailtaville arvoille ei määritellä mitään subjektiivisia rajoja, joten on vaikea sanoa käytännössä, onko algoritmi a algoritmia b miten paljon parempi subjektiivisella tasolla. Jos kulmavirheen keskiarvo on 0.2 pienempi, onko muutos ihmisen havaittavissa? Ehkä olisi mielekästä vertailla esimerkiksi, miten suuri osa kuvista olisi käyttäjien mielestä epäonnistuneita valkotasapainon osalta. Nikkanen et al. (2008) tutkimuksessaan tulivat siihen tulokseen, että hyvin todennäköisesti havaitun virheen raja on 9 astetta  $\Delta E_{00}$ . Käytännön kannalta, jos mitattaisiin kuvan värien muutosta tätä rajaa vastaan ja luokiteltaisiin lopputulokset sen kautta, voitaisiin päästä lopputulokseen, jossa algoritmien vertailu vastaisi loppukäyttäjien subjektiivista kokemusta nykyistä paremmin.

## LÄHTEET

- Barron, J. T. ja Tsai, Y.-T. (2017). Fast Fourier Color Constancy. eng, s. 6950–6958. ISSN: 1063-6919.
- Berns, R. S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. eng. Hoboken, NJ.
- Buchsbaum, G. (1980). A spatial processor model for object colour perception. eng. *Journal of the Franklin Institute* 310.1, s. 1–26. ISSN: 0016-0032.
- CIE Standard Colorimetric System (2005). eng. *Colorimetry*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, s. 63–114. ISBN: 0470094729.
- Finlayson, G. D., Drew, M. S. ja Funt, B. V. (1994). Color constancy: generalized diagonal transforms suffice. eng. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision* 11.11, s. 3011–. ISSN: 1084-7529.
- Finlayson, G. D., Zakizadeh, R. ja Gijsenij, A. (2017). The Reproduction Angular Error for Evaluating the Performance of Illuminant Estimation Algorithms. eng. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 39.7, s. 1482–1488. ISSN: 0162-8828.
- Gijsenij, A., Gevers, T. ja Lucassen, M. (2009). Perceptual analysis of distance measures for color constancy algorithms. eng. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision* 26.10, s. 2243–2256. ISSN: 1084-7529.
- Hordley, S. D. ja Finlayson, G. D. (2006). Reevaluation of color constancy algorithm performance. eng. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision* 23.5, s. 1008–1020. ISSN: 1084-7529.
- Hu, Y., Wang, B. ja Lin, S. (2017).  $FC^4$ : Fully Convolutional Color Constancy with Confidence-Weighted Pooling. eng. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, s. 330–339. ISBN: 1538604574.
- Laakom, F., Passalis, N., Raitoharju, J., Nikkanen, J., Tefas, A., Iosifidis, A. ja Gabbouj, M. (2020). Bag of Color Features for Color Constancy. eng. *IEEE transactions on image processing* 29, s. 7722–7734. ISSN: 1057-7149.
- Laakom, F., Raitoharju, J., Nikkanen, J., Iosifidis, A. ja Gabbouj, M. (2021). INTEL-TAU: A Color Constancy Dataset. eng. *IEEE access* 9, s. 39560–39567. ISSN: 2169-3536.
- Michael Stokes (Hewlett-Packard) Matthew Anderson (Microsoft), S. C. ( and (Hewlett-Packard), R. M. (1996). *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB*. Version 1.10. URL: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>.
- Nikkanen, J., Gerasimow, T. ja Kong, L. (2008). Subjective effects of white-balancing errors in digital photography. eng. *Optical Engineering* 47.11, s. 113201–1132015. ISSN: 0091-3286.

Yu, H., Chen, K., Wang, K., Qian, Y., Zhang, Z. ja Jia, K. (2020). Cascading Convolutional Color Constancy. eng. *Proceedings of the ... AAAI Conference on Artificial Intelligence* 34.7, s. 12725–12732. ISSN: 2159-5399.



## LIITE A: TULOSTAULUKKO

Kuva	variaatio	kulmavirhe	RAE	$\Delta E_{00g}$	max $\Delta E_{00}$	max $\Delta E_{00}$ väri
Canon5dsr D65	0	4.45	7.91	16.94	11.29	3
Canon5dsr D65	1	3.81	3.89	11.23	8.75	3
Canon5dsr D65	2	4.22	5.70	13.29	11.56	2
Canon5dsr D65	3	4.13	4.81	13.75	9.96	6
Canon5dsr D50	0	4.42	6.98	15.33	10.09	16
Canon5dsr D50	1	3.92	4.15	12.71	10.59	3
Canon5dsr D50	2	4.17	5.20	12.08	10.33	2
Canon5dsr D50	3	4.22	5.21	15.68	13.02	6
Canon5dsr F11	0	4.35	5.82	13.81	8.52	16
Canon5dsr F11	1	4.15	4.93	13.23	10.48	3
Canon5dsr F11	2	4.06	4.52	11.22	8.14	2
Canon5dsr F11	3	4.43	6.52	16.50	14.33	6
Canon5dsr A	0	3.86	4.12	10.72	5.80	16
Canon5dsr A	1	4.20	6.43	16.94	12.83	3
Canon5dsr A	2	3.54	3.42	9.05	5.06	12
Canon5dsr A	3	4.38	9.40	21.04	19.51	6
SonyIMX135 D65	0	4.15	5.97	14.18	9.36	3
SonyIMX135 D65	1	3.64	3.71	11.39	9.23	3

<b>Kuva</b>	<b>variaatio</b>	<b>kulmavirhe</b>	<b>RAE</b>	$\Delta E_{00g}$	<b>max <math>\Delta E_{00}</math></b>	<b>max <math>\Delta E_{00}</math> väri</b>
SonyIMX135 D65	2	3.90	4.61	11.23	10.12	2
SonyIMX135 D65	3	3.93	4.54	13.75	11.19	6
SonyIMX135 D50	0	4.05	5.21	12.26	7.92	12
SonyIMX135 D50	1	3.73	3.97	13.03	11.46	3
SonyIMX135 D50	2	3.78	4.15	9.71	8.94	2
SonyIMX135 D50	3	4.01	4.94	15.87	14.75	6
SonyIMX135 F11	0	3.92	4.50	11.69	7.49	12
SonyIMX135 F11	1	3.91	4.64	14.13	12.23	3
SonyIMX135 F11	2	3.63	3.68	9.55	7.96	2
SonyIMX135 F11	3	4.15	6.01	17.20	16.72	6
SonyIMX135 A	0	3.25	3.20	8.52	5.32	16
SonyIMX135 A	1	3.81	5.75	18.25	19.61	9
SonyIMX135 A	2	2.97	2.77	7.20	4.66	16
SonyIMX135 A	3	3.97	8.01	21.38	26.45	7

Sarakkeiden selitykset ovat seuraavat:

- **Kuva**, Kamera ja käytetty valonlähde.
- **Variaatio**, käytetty valkopistevirhe joukosta  $\{(-0.1, 0), (0, 0.1), (0.1, 0), (0, 0.1)\}$ .
- **Kulmavirhe**, Kulmavirhemetriikan tulos.
- **RAE**, RAE metriikan tulos.
- $\Delta E_{00g}$ ,  $\Delta E_{00g}$  metriikan tulos.
- **max  $\Delta E_{00}$** , suurin mitattu  $\Delta E_{00}$  ero kortin väreissä.
- **max  $\Delta E_{00}$  väri**, Missä GretagMacbeth kortin väreistä suurin ero oli.