

Teknillinen korkeakoulu
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Ville Rantanen

Kamerapuhelimella otettujen kuvien laadun riittävyys aikakauslehtikäyttöön

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 1. toukokuuta 2006.

Valvoja Professori Pirkko Oittinen
Ohjaaja DI Henri Ståhl

Tekijä:	Ville Rantanen	
Työn nimi:	Kamerapuhelimella otettujen kuvien laadun riittävyys aikakauslehtikäyttöön	
Päivämäärä:	1. toukokuuta 2006	Sivuja: 65 + 6
Professori:	AS-75 (Viestintäteknikka)	
Pääaine:	Viestintäteknikka	
Sivuaine:	Kognitiivinen teknologia	
Työn valvoja:	Professori Pirkko Oittinen	
Työn ohjaaja:	DI Henri Ståhl	

Kamerapuhelimet valloittavat puhelinmarkkinoita ja niillä otettuja kuvia käytetään jo sanomalehtien uutismateriaalina. Aikakauslehdissä niitä ei juuri käytetä, sillä kuvien laatuvaatimukset ovat korkeammat. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, millaista kuvan laatua pidetään riittävänä aikakauslehtikäyttöä varten.

Kuvan laadullisia määritteitä on useita, joista valittiin sellaiset, jotka voidaan käytännössä myös mitata. Valitut laatumääreet ovat kuvan tarkkuus ja värien oikeellisuus. Kuvan tarkkuutta mitattiin erottelukyvyn avulla ja värien oikeellisuutta kuvaamalla värikenttiä. Molempia laatumääreitä käytettiin myös koehenkilötesteissä.

Tulosten mukaan 179 pikseliä tuumaa kohti on riittävä aikakauslehden kuvan tarkkuus, kun otetaan huomioon kameran kuvasysteemin tarkkuutta hävittävä ominaisuus. Eri kamerapuhelinten todettiin toistavan värejä hyvin eri tavoin ja värinoston korjaamiseksi ehdotettiin ICC-profilien käyttöä: valituista värinkorjausmenetelmistä ICC-profiileja käyttämällä saatiin oikeimmat värit.

Avainsanat: digitaaliset kuvat, aikakauslehti, kuluttaja sisällöntuottajana, ICC-profili, kuvan laatu

Kieli: suomi

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGYDepartment of Electrical and
Communication Engineering**ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS****Author:** Ville Rantanen**Title:** Sufficient print quality for camera phone images**Date:** 1st May 2006**Pages:** 65 + 6**Professorship:** AS-75 (Media Technology)**Major:** Media Technology**Minor:** Cognitive Technology**Supervisor:** Professori Pirkko Oittinen**Instructor:** Professori Pirkko Oittinen

Camera phones have become a common sight in every day life. Photographs taken with camera phones are frequently being used as news material in newspapers, but not yet in magazines. This research was about finding an acceptable quality for images in magazines.

There are many aspects of image quality to choose from. The selection was based on the quality's ability of being measurable both objectively and subjectively by testees. Image crispness and colour correctness were chosen. The crispness was measured as resolution power of the camera. Colour correctness was measured by photographing known colour plates.

Results indicate that 179 pixels per inch is an acceptable level of image printing resolution, taking account for the image worsening qualities of the camera. The different camera phones were noted to reproduce colours very differently, which led to the suggestion of the use of camera-specific ICC-profiles. The method of using ICC-profiles in colour correction was rated the highest among chosen colour correction methods.

Keywords digital image, printed magazines, end-user as content provider, ICC-profile, image quality**Language:** Finnish

Esipuhe

Tämän diplomityön rahoittajana toimi Graafisen Teollisuuden Tutkimussäätiö (GTTS). Käytännön toteutuksen mahdollisti Teknillisen korkeakoulun Viestintätekniikan laboratorio, joka tarjosi tilat ja välineet käyttööni. Haluan kiittää tutkimussäätiötä, laboratoriota, professori Pirkko Oittista, professori Hannu Saaremaa, koehenkilöitä ja kaikkia työn etenemiseen vaikuttaneita henkilöitä. Lisäksi toivotan kaikille oikein hauskaa Wappua!

Kaivopuistossa
1. toukokuuta 2006

Ville Rantanen

Sisältö

1	Johdanto	1
1.1	Taustaa	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3	Tutkimuksen rajaus	2
1.4	Tutkimuksen rakenne ja kulku	3
2	Digitaaliset valokuvat	4
2.1	Digitaalisen kuvan historia ja käyttökohteet	4
2.2	Digitaalisen kuvan perusteet	4
2.3	Kamerat	6
2.3.1	Kameran periaate	6
2.3.2	Filmikamera	6
2.3.3	Digitaalinen kamera	7
2.4	Erottelukyky	9
2.5	Värimuodostusmenetelmät	10
2.5.1	Värin esittäminen	10
2.5.2	RGB	11
2.5.3	XYZ	11
2.5.4	YCbCr	11
2.5.5	La*b*	13
2.5.6	HSV	14
2.5.7	CMYK	15
2.5.8	Värimuodostusmenetelmät digitaalikameroissa	16
2.6	Ihmisen kyky havaita digitaalista kuvaa	16
2.6.1	Terävyyden havaitseminen	16
2.6.2	Värillisyyden havaitseminen	17
3	Kuvan laatu	18
3.1	Objektiivinen laatu	18
3.1.1	Laadun objektiivinen määrittäminen	18
3.1.2	Erottelukyky	18
3.1.3	Värintoisto	20
3.1.4	Kameran kuvan laadun rajat	21
3.1.5	Aikakauslehden kuvan laadun rajat	22
3.2	Subjektiivinen laatu	22
3.2.1	Laadun subjektiivinen määrittäminen	22
3.2.2	Subjektiivisen laadun mittausmenetelmät	23
3.3	Kuvien muokkaus	24

3.3.1	Kuvien muokkauksen tarve	24
3.3.2	Kuvien entistys	25
3.3.3	Kuvien ehostus	26
4	Digitaalikameroiden suorituskyvyn mittaus	28
4.1	Mittausympäristön määrittäminen	28
4.2	Valittu mittausympäristö	29
4.3	Mittauksessa käytetyt kuvat	30
4.4	Tutkitut kamerat	30
4.5	Kokeen kulku	32
5	Kameroiden mittauksen tulokset	33
5.1	Kameroiden tarkkuus	33
5.2	Kameroiden värintoisto	35
6	Kameroiden mittaustulosten tarkastelu	37
6.1	Kameroiden tarkkuus	37
6.2	Kameroiden värintoisto	37
7	Kuvien subjektiivisen laadun arviointi	39
7.1	Kuvamateriaali	39
7.2	Kuvien käsittely	39
7.2.1	Tarkkuuden arviointi	39
7.2.2	Värillisyyden arviointi	41
7.3	Kuvien tulostaminen	41
7.3.1	Tulostuspaperi	41
7.3.2	Tulostuslaitteisto	41
7.4	Arviointiympäristö	42
7.5	Koehenkilöt	42
7.6	Kokeen kulku	43
7.6.1	Yleistä	43
7.6.2	Tarkkuuden arviointi	44
7.6.3	Värillisyyden arviointi	44
7.7	Tulosten käsittely	44
7.7.1	Tarkkuuden arviointi	44
7.7.2	Värillisyyden arviointi	45
8	Subjektiivisen arvioinnin tulokset	46
8.1	Tarkkuuden arviointi	46
8.2	Värillisyyden arviointi	50

9	Subjekttiivisen arvioinnin tulosten tarkastelu	55
9.1	Tarkkuuden arviointi	55
9.2	Värillisyyden arviointi	56
9.3	Arvioinnin luotettavuus	57
9.3.1	Tarkkuuden arvioinnin luotettavuus	57
9.3.2	Värillisyyden arvioinnin luotettavuus	58
10	Johtopäätökset	59
	Viitteet	61
	Liitteet	66
A	Kameroiden tarkkuuden laskentaan käytetyt kuvat	66
B	Kameroiden värintoiston laskentaan käytetyt kuvat	67
C	Tarkkuuden arviointiin käytetyt kuvat	68
D	Värillisyyden arviointiin käytetyt kuvat	69
E	Koehenkilöttestien tulostaulukot	70
F	Kuvien käsittelyyn käytetty Matlab-ohjelma	71

Kuvat

1	Tutkimuksen rakenne	3
2	Baudot-nauha	4
3	Kuvan digitointi	5
4	JPEG-pakkausvirheet	5
5	Kameran toimintaperiaate	6
6	CCD-kennon toimintaperiaate	8
7	CMOS-kennon toimintaperiaate	9
8	Digitaalisen kuvan resoluutio	10
9	Värikanavan alinäytteistäminen	12
10	Siniaalto ja sakara-aalto	19
11	Siemens-tähti	19
12	ICC-profilin toiminta	26
13	Loistelampun välkkyminen	28
14	Halogeenilampun spektri	29
15	Kameroiden mittaukseen käytetty ympäristö.	30
16	Kameran erottelukyvyn mittauksessa käytetty kuva.	31
17	Mittakuvan tulostustarkkuus	31
18	Kameran väriavaruuden mittauksessa käytetty kuva.	31
19	Kameroiden MTF:t vaakasuunnassa	33
20	Kameroiden MTF:t pystysuunnassa	34
21	Kameroiden kohinat	34
22	Kameroiden värintoisto	35
23	Kameroiden värintoisto värieron logaritmina	36
24	Kameroiden värierojen keskiarvot	36
25	Testikuvan viisi tarkkuusversiota	40
26	Testikuvan neljä väriversiota	42
27	Rasterikuvioita	43
28	Kuvien hyväksyttävyyssjärjestys	48
29	Värillisyyсарvioinnin järjestetyt kuvat	52

Taulukot

1	Puhelinten kuvausominaisuudet	32
2	Kuvien riittävä laatu	46
3	Tarkkuusarvioinnin painatustarkkuuksien ja normalisoitujen skaalojen yhteys.	47
4	Tarkkuusarvioinnin järjestysvertailun tulokset kaikilla kuvilla . . .	47

5	Tarkkuusarvioitujen kuvien järjestäminen	49
6	Värillisyyssarvioinnin tulokset kaikilla kuvilla	50
7	Yksittäisten värillisyyssarvioitujen tulokset	51
8	Värillisyyden arvioinnin tulokset jaoteltuna nurmi- tai lehtivihreä- kuviin ja muihin kuviin	53
9	Värillisyyssarvioinnin tulokset kuvaryhmille jaoteltuna ulkona otet- tuihin ja sisällä otettuihin kuviin	54

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Viestintävälineiden maailma on kuvallinen ja vuorovaikutteinen. Aikakauslehdet viestivät sekä kuvilla että tekstillä. Tekstiä selventämään ja ihmisen kiinnostuksen herättämiseksi lehtiin painetaan juttuihin sopivia kuvia. Aikakauslehtiin lukijoiden itsensä lähettämät kuvat ovat kiinnostavaa materiaalia sekä kustantajan että kuluttajan kannalta. Artikkelin kirjoittaja voi käyttää niitä arkistosta, ja kuluttajia kiinnostaa nähdä itseotettu kuva julkaistuna.

Vuorovaikutteisuus lisääntyy medioissa. Jo ennen sähköisiä medioita konserteissa on saattanut vaikuttaa esitykseen encorehuudoilla. Radion toivekonsertteihin on jo pitkään voinut itse soittaa ja valita haluamansa kappaleen. Digitaalinen televisio paluukanavineen ja Internet ovat nykypäivän vuorovaikutteisia medioita. Myös aikakauslehdet ovat sopiva media vuorovaikutukseen. Lukijoiden itse ottamien kuvien julkaisu lukijoiden palstoilla ja artikkeleiden kuvamateriaalina saattaa innostaa kuluttajaa ostamaan julkaisua.

Amatöörikuvaajat ovat usein läsnä, kun jotain kiinnostavaa tapahtuu. Suuresta massasta löytyy aina myös ihmisiä, jotka haluavat omat kuvansa julkisuuteen. Amatöörikuvaajien kuvausvälineet ovat tyypillisesti kuluttajatason välineitä, jolloin kuvan laatu voi olla teknisesti heikompi kuin ammattikuvaajan ottamassa kuvassa. Amatöörikuvaajallakaan ei ole aina kameraa mukana, jolloin voidaan joutua turvautumaan jopa puhelimeen integroituuun kameraan. Mobiililaitteisiin integroidut kamerat ovat yleistymässä, mutta oletettavasti niiden kuvan tekninen laatu ei tule paranemaan yhtä nopeasti kuin niiden yleisyys. Kuville alkaa olla kuitenkin kysyntää. Viime aikoina maailmalla uutisoiduista tapahtumista ensimmäiset kuvat ovat usein olleet juuri kamerapuhelimilla otettuja. Ilmaisjakelulehti Uutislehti 100 antaa 100 euron palkkion parhaasta uutisarvoisesta tai muuten mielenkiintoisesta kamerapuhelinkuvasta päivittäin [24]. On olemassa myös palveluntarjoajia, jotka hoitavat kuvien myyntiä uutistoimistoille yksittäisen kuvaajan puolesta [47].

In-Statin [52] teettämän tutkimuksen mukaan vuonna 2002 kamerapuhelimia myytiin noin 18.2 miljoonaa kappaletta ja vuoden 2003 ensimmäisellä neljänneksellä 7.8 miljoonaa. Kannettavien puhelinlaitteiden myynnistä kamerallisten versioiden määrä kasvaa vuoden 2003 arvion mukaan 53% vuosittain aina vuoteen 2007 asti. Kamerapuhelimia myytiin Helsingin Sanomien [28] mukaan vuonna 2005 300 miljoonaa kappaletta, kun tavallisia digitaalisia kameroita myytiin alle

100 miljoonaa. Myös myynnin kasvu on voimakkaampaa kamerapuhelimilla.

Kamerapuhelinten määrä lisääntyy, mutta tutkimusten mukaan kuluttajia huolestaa kameroiden heikko kuvanlaatu, pieni muisti ja kuvien jakamisen korkea hinta. Myös yksityisyyden takaaminen koetaan ongelmaksi [52]. IDC:n [50] tutkimuksen mukaan laitteen kameraominaisuus unohtuu melko nopeasti. Muutamassa kuukaudessa kolmannes kamerapuhelimen käyttäjistä lopettaa kuvaamisen kokonaan. Tutkimuksen mukaan syynä on kuvia hyödyntävien ja tukevien palveluiden puute. Helsingin Sanomien mukaan Kodak on tutkinut, että noin 60% käyttäjistä ei koskaan siirrä kuvia puhelimesta tietokoneelle [28]. Toisaalta, Taloussanomien viittaa toiseen IDC:n tutkimukseen, jonka mukaan kamerapuhelinten suosio myös nostaa tavallisten digitaalikameroiden suosiota, koska digitaalista kuvaa on opittu käyttämään kamerapuhelinten avulla [9].

Mikäli kamerapuhelinten kuvia voitaisiin käyttää myös aikakauslehdissä, kuluttajat voisivat innostua uudelleen kuvausominaisuudesta. Kamerapuhelinten kuvien lähetysominaisuuden takia myös uuden puhelimen ostajat voisivat kiinnostua niistä enemmän. Julkaisijan kannalta kuvien laajempi käyttö antaa yhden kuvälähteen lisää ja mahdollistaa paremman vuorovaikutuksen lehden lukijoiden kanssa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä tutkimuksessa tutkitaan teknisesti heikkojen digitaalikuvien käyttöä aikakauslehdissä. Tutkimus selvittää, onko yleistyvien kamerapuhelinten kuvien laatu riittävä aikakauslehtiin. Tarkoituksena on selvittää painokelpoisuus ja riittävä kuvan laatu kuluttajien kannalta. Termillä 'aikakauslehti' tarkoitetaan tässä työssä kuluttajamarkkinoille suunnattuja lehtiä. Tutkimuksessa aikakauslehtityypit rajataan elämäntapalehtiin, kohulehtiin, ilmoituslehtiin ja harrastelehtiin.

Hypoteesinä kuvanlaadun riittämiselle esitetään, että tarkkuuden puolesta nykyiset kamerapuhelimet ovat riittäviä myös aikakauslehtikäyttöön. Tarkkuuteen vaikuttaa, kuinka pienikokoisena kuvat painetaan. Värillisyyden hypoteesinä on, että kamerapuhelimet eivät toista värejä samalla lailla keskenään. Siksi tutkimus keskittyy löytämään parhaan tavan parantaa värejä.

1.3 Tutkimuksen rajaus

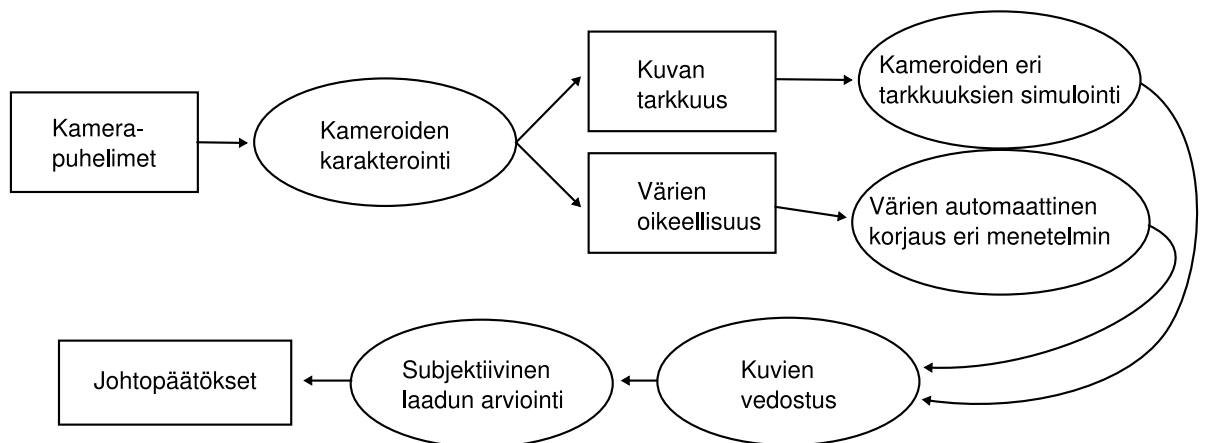
Kuluttaja, joka haluaa ottamansa kuvan lehteen, valitsee oletettavasti ottamistaan kuvista parhaimman ja lähettää sen toimitukseen. Koska kuvista valitaan

onnistunein, tutkimuksessaan ei tarvitse ottaa huomioon täysin epäonnistuneita otoksia. Pimeästä ja tärähtäneestäkin kuvasta voidaan saada informaatiota esille, mutta tulos on usein kuvanlaadun kannalta huono. Joissakin tapauksissa tällaisillakin kuvilla on paljon uutisarvoa, jolloin kuva julkaistaan heikkolaatuisena.

Painokoneiden vaikutus kuvan laatuun jätetään huomioimatta. Tutkittavat kuvat vedostetaan samalla tulostimella, käyttäen samoja asetuksia.

1.4 Tutkimuksen rakenne ja kulku

Tutkimuksen kokeellisessa osassa mitataan yleisimpiä kamerapuhelimia yksityiskohtien erottelukyvyn ja värien oikeellisuuden suhteen. Kameramittauksen tietojen perusteella suunnitellaan koeasetelma, jossa koehenkilöt arvioivat kuvien tarkkuutta ja niiden värien oikeellisuutta erilaisilla automaattisilla värinparannuksilla korjattuna. Tutkimuksen kulun kaavio on esitetty kuvassa 1.

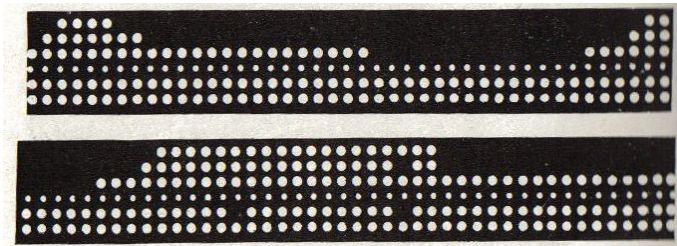


Kuva 1: Tutkimuksen rakenne

2 Digitaaliset valokuvat

2.1 Digitaalisen kuvan historia ja käyttökohteet

Lehtikuvien digitalisoinnin historian voidaan laskea alkaneeksi 1920-luvulla, kun Bartlanen kuvansiirtokaapeli otettiin käyttöön. Reikäkorttitekniikkaan perustuvan keksinnön suurin etu oli kuvan siirtoajan lyhentymisen; Lontoosta New Yorkiin siirrettävä sanomalehtikuva viipyi matkalla alle kolme tuntia, entisen viikon kestävän siirron sijaan [15]. Kuvassa 2 on esimerkki Bartlanen käyttämästä Baudot-nauhasta, eli reikäkorttiliuskasta.



Kuva 2: Bartlanen kaapelin avulla siirrettiin digitaalisia kuvia. Kuvat talletettiin tällaiselle Baudot-nauhalle [15]

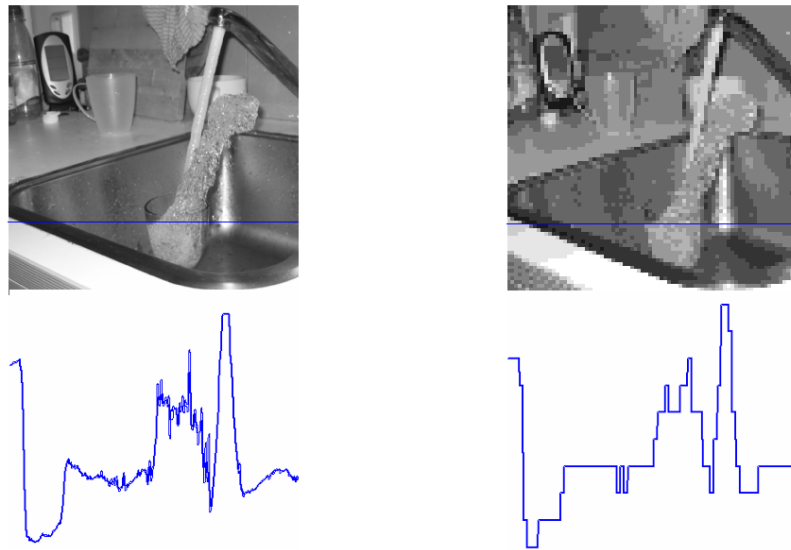
Nykyisin kuvia käyttävä teollisuus on lähes kokonaan digitalisoitu ja tekniikka on tuonut omat hyvät ja huonot puolensa. Digitaalisten kuvien analyysin avulla voidaan esimerkiksi hallita tehtaiden tuotantoa, valvoa automaattisesti turvameraoita tai etsiä satelliittien avulla kohteita. Käyttökohteita keksitään jatkuvasti lisää. Edelliset esimerkit ovat osia konenäöstä, jonka alueelle on kehitetty lukuisia algoritmeja. Niillä mahdollistetaan koneen kyky havaita esimerkiksi kirjaimia ja tekstiä [58], käden liikkeitä [8], kasvojen ilmeitä [37] tai kallonmurtumia röntgenkuvasta [48]. Kun puhutaan kuvasta, joka on tarkoitettu ihmissilmän katseltavaksi, automaattiset kuvankäsittelyt eivät ole helppoja toteuttaa. Mikäli kuvan tarkoitus on olla miellyttävä, ei ole yksiselitteistä tapaa tehdä mistä tahansa kuvasta miellyttävä. Digitaalikuvan rajallisuudet tulevat vastaan hyvin nopeasti, kun vertailukohtana on ihmisen silmän erottelukyky.

Tässä tutkimuksessa puhuttaessa kuvista tarkoitetaan aina digitaalista luonnollista valokuvaa, ellei toisin tarkenneta.

2.2 Digitaalisen kuvan perusteet

Digitaalinen valokuva on diskretoitu, rajattu kaksiulotteinen projektio jatkuvas-
ta, analogisesta kohteesta. Perinteiseen valokuvaan verrattuna, digitaalinen kuva

on tasaisin välimatkoin poimittu näytejono, jonka näytteiden väriä kuvataan numeroarvolla. Digitointia on havainnoitu kuvassa 3.



Kuva 3: Kuvan digitointi: diskretointi paikan ja väriarvon suhteen. Käyrä kuvaa intensiteettijakaumaa valitulta kuvan riviltä.



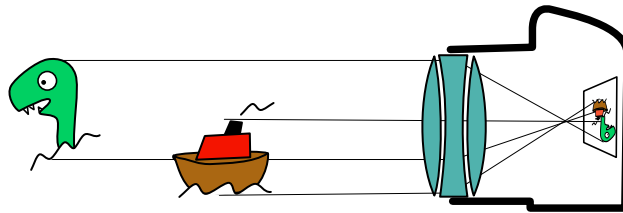
Kuva 4: JPEG-pakkausvirheen esimerkki. Oikeanpuoleinen kuva on pakattu laatuarvolla 10, maksimilaadun ollessa arvo 100.

Digitaalinen kuva on aina virheellinen versio sen kohteesta. Sen perustavaa laatua olevat virheet ovat näytteiden diskretointi paikan suhteen ja väriarvon diskretointi. Kuvien pakkaamisessa pienempään tilaan syntyy lisää virheitä: tyyppillisin esimerkki on JPEG-kuvan laatikoitumisvirheet, joita on esitelty kuvassa 4. Digitaalisten virheiden lisäksi kuvaan syntyy samoja virheitä kuin perinteisellä kameralla otetuissa kuvissa. Näitä ovat muun muassa kohinat sekä väri- ja linssivääristymät.

2.3 Kamerat

2.3.1 Kameran periaate

Kameran tarkoitus on muuttaa ihmisen näkemä valo talletettavaan ja palautettavaan muotoon. Käytännössä kamera projisoi laitteeseen tulevan valon yhdelle tasolle kameran sisällä, kuten kuvassa 5 on esitetty. Tasolla on valoherkkä filmi tai kenno, joka tallettaa valon intensiteettijakauman. Jakauma voidaan palauttaa näkyväksi valoksi eri tavoilla, riippuen kuvaustekniikasta.



Kuva 5: Kameran toimintaperiaate

2.3.2 Filmikamera [43]

Perinteisessä kamerassa valoherkkä taso on filmi. Se on valmistettu selluloosasta ja sen pinnalle on levitetty hopeahalogenidikiteitä. Kiteet reagoivat kemiallisesti näkyvään valoon. Valotetut kiteet säilyvät muuttumattomina pimeässä, esimerkiksi filmirullan sisällä.

Valottuneet kiteet voidaan muuttaa kehitysaineilla metalliseksi hopeaksi, kun reagoimattomat kiteet jäävät halogenideiksi. Halogenidit huuhdellaan pois, jolloin filmille jäävät vain metallit, jotka ovat saaneet paljon valoa. Filmistä näkyy läpi niistä kohdista, joissa oli pimeää. Tätä filmin kehitysvaihetta sanotaan negatiiviksi.

Negatiivi on muoto, jossa valokuva säilyy parhaiten, mutta sitä on vaikea katsella negatiivivärien ja kuvan pienen koon takia. Kuvan värit voidaan kääntää kun siitä tehdään paperisuurennos tai diakuva. Suurennos tehdään heijastamalla valoa negatiivin läpi tietyltä etäisyydeltä kauempana olevalle tasolle, jolloin kuva suurenee. Paperikuvan kehitysprosessi on hyvin samanlainen kuin itse filminkin; sekin perustuu hopeahalogenideihin.

2.3.3 Digitaalinen kamera

Digitaalisten kameroiden valoherkkää tasoa sanotaan kennoksi. Sen tehtävä on muuttaa valon fotonit sähköisiksi signaaleiksi ja tallettaa signaalit. Kuluttajakameroiden kennoja on valmistettu pitkään Charge-Coupled Device- eli CCD-tekniikalla, mutta Complementary Metal Oxide Semiconductor- eli CMOS-kennot kasvattavat suosiotaan vahvasti.

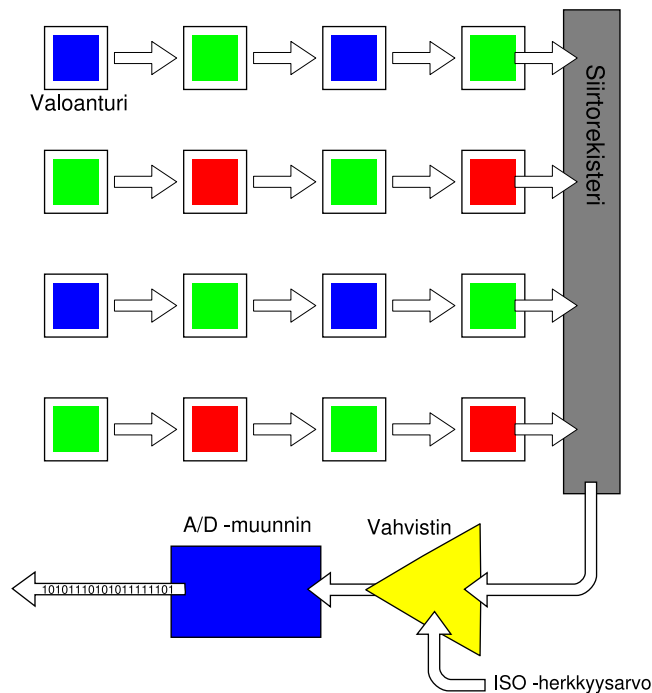
Yhteisiä ongelmia molemmille digitaalikameran kennotekniikoille ovat muunmuassa kohina, ylivuoto ja ylijäämävaraus. Kohina on kamerasysteemin eri vaiheissa signaaliin lisäytyvää satunnaista vaihtelua. Kennolla kohina johtuu pääosin termisestä kohinasta eli lämpökohinasta. Joissain kalliimmissa kamerajärjestelmissä onkin erillinen jäähdytys kennoille. Ylivuodolla¹ tarkoitetaan ilmiötä, kun jokin kenno saa liikaa valoa ja varaus vaikuttaa viereisten kennojen varauksiin lisäävästi. Kuvassa kirkkaat alueet leviävät tummemmille alueille. Ylijäämävaraus tarkoittaa kennoihin jäävää varausta, kun ne nollataan tyhjennyksen yhteydessä. Kun uutta kuvaa otetaan, vanhasta kuvasta saattaa olla jäljellä pieniä varauksia kennoissa. [40]

CCD

Vuonna 1969 Willard Boyle ja George Smith keksivät CCD:n tietokoneen muistien ja signaaliprosessoinnin käyttöön [15]. Keksinnöstä tuli suosittu kuvannuslaitteissa ja CCD-kennot ovatkin yleisin digitaalikameroissa käytetty tekniikka. Keksintö perustuu siihen, että potentiaaliuoppien avulla kuljetetaan varauksia, joita voidaan lukea kennoston reunalla. Kun varaukset kulkevat kennojen avulla, ei tarvita erillistä siirtoväylää ja kennon valoherkkä pinta-ala voidaan pitää suurena. Kenno on silloin herkempi valolle.

CCD-kennon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 6. Valo tulee linssisysteemin läpi kennoston varatulle valoanturille, jossa se purkaa varausta valomäärän mukaan. Värillisyyttä saadaan kuvaan peittämällä kennoja suotimilla, joilla päästetään yhdelle anturille vain tietyn värialueen valoa. Jännitteet siirretään riveittäin vahvistimen kautta A/D-muuntimelle, josta saadaan digitaaliset numeroarvot antureiden rekisteröimistä valomääristä. [36] Yleisin tapa järjestää eri värit kennostolle on Bayer-matriisi, kuten kuvassa 6 on esitetty. RGB-arvo, eli punaisen, vihreän ja sinisen värin määrät valolähteessä, lasketaan anturimatriisista eriväristen komponenttien painotettuna summana. RGB-arvo on siis yksittäinen pikseli, jolla on R, G ja B-arvot. [55]

¹bleeding

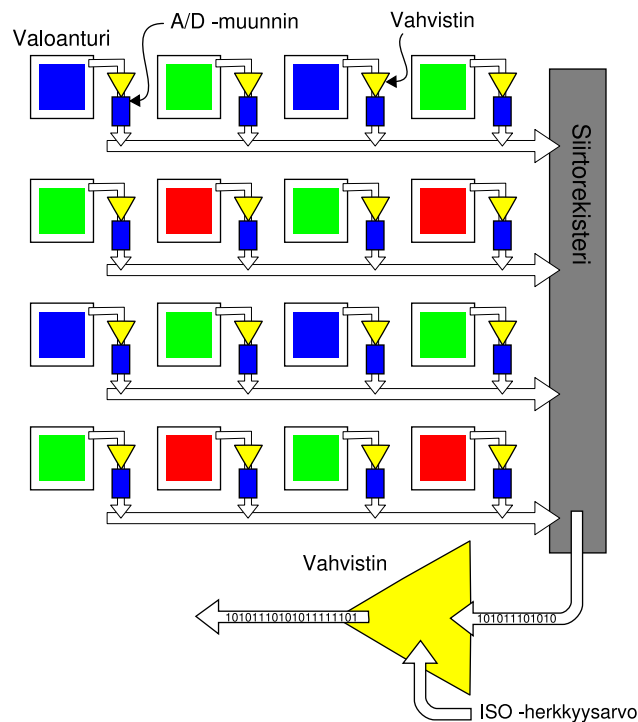


Kuva 6: CCD-kennon toimintaperiaate

CMOS

CMOS-kennot toimivat CCD-kennojen tavoin valon suodattamiseen saakka. Sen jälkeen valo varaa CMOS-kennoa ja varaus muutetaan jännitesignaalksi. Kennolta signaali vahvistetaan ja siirretään erilliseen siirtorekisteriin. Rekisteri vie tilaa kennon pinta-alasta, jolloin kennon valoherkkyys heikkenee. Valokenno on vain yksi osa, jonka CMOS-piiriin voi sisällyttää. Kamerakäytössä piiri voi sisältää myös kuvankäsittelyä suoraan kameran kennolla, sillä kameran pikseleitä voidaan ohjata yksitellen. [36] Kamerapuhelinten sensorit ovat kuitenkin massatuote, jolloin kuvankäsittelyä ei niissä suoriteta, koska käsittely pitäisi virittää kunkin valmistajan linssejä ja muuta järjestelmää vastaavaksi. CMOS-kennoja käytetään kamerapuhelimissa, suurnopeuskameroissa ja suurissa järjestelmädigitaalikalibroissa. Järjestelmädigitaalikalibroissa kennon koko saadaan kasvatettua standardiin filmikokoon, eli 35 mm leveäksi kennostoksi, jolloin yksittäisten kennojen pinta-alaa voidaan kasvattaa ja kohinasta ei tule niin suurta ongelmaa.

CCD-kennoilla saadaan laadukkaita vähäkohinaisia kuvia. Niiden valoherkkä pinta-ala on suurempi kuin CMOS-kennoilla. CCD-kennoja on valmistettu huomattavasti kauemmin kuin CMOS-kennoja, joten valmistusprosessi tunnetaan pa-



Kuva 7: CMOS-kennon toimintaperiaate

remmin. CMOS-kennot taas voidaan tuottaa lähes missä tahansa piiritehtaassa, joten niiden tuotantokustannukset ovat pienemmät. CMOS-kennot voivat kuluttaa jopa 100 kertaa vähemmän tehoa kuin CCD-kennot. [4]

2.4 Erottelukyky

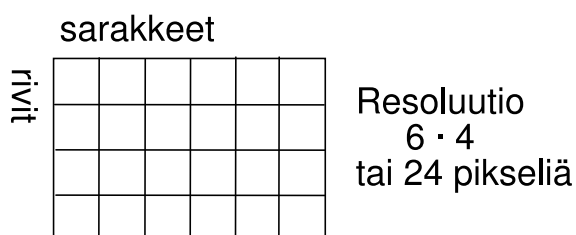
Erottelukyvylle on monta eri sanaa, jotka voivat aiheuttaa sekaannuksia. Puhuttaasti digitaalisen kuvan ominaisuutena tarkkuus, erottelukyky tai resoluutio voivat tarkoittaa ainoastaan kuvan pikseleiden lukumäärää. Se ilmoitetaan yleensä muodossa ”sarakkeet” · ”rivit” tai kertolasku valmiiksi laskettuna. Pikselimäärä on havainnollistettuna kuvassa 8. Esimerkiksi standardi VGA-tarkkuus voidaan esittää muodossa 640 · 480 kuvapistettä tai 307 200 pikseliä.

Painotekniikan ja näyttölaitteiden tarkkuutta määrittävät useammat tekijät. Painajat ovat puhuneet erottelukyvystä², osoitettavuudesta³ ja pisteen koosta.

Näyttölaitteessa resoluutiolla tarkoitetaan kuvapisteen määrää kuten digitaalisilla kuvilla. Yleensä mainitaan myös yhden kuvapisteen koko mikrometreissä. Näyttölaitteilla erottelukyvyn määrittämistä vaikeuttavat myös elektroniikan

²resolution

³addressability



Kuva 8: Digitaalisen kuvan resoluutio

rajoitteet: vierekkäisillä kuvapisteillä ei välttämättä ole täysin toisistaan riippumattomat arvot sähkövirtojen vuotamisen ja erilaisten heijastumien takia.

Vasta kuvaa painettaessa digitaaliseen kuvaan voidaan liittää kaksi eri tarkkuutta: kuvapisteiden määrä ja osoitettavuus. Osoitettavuus eli painotarkkuus tarkoittaa sitä, kuinka monta pistettä voidaan painaa tuumaa kohti. Esimerkiksi $640 \cdot 480$ pikseliä painettuna olisi $\frac{640 \text{ pikseliä}}{4 \text{ tuumaa}} = 160 \text{ PPI}^4$, jos kuva painetaan 4 tuuman levyisenä.

Tässä tutkimuksessa erottelukyvylle ja resoluutiolla tarkoitetaan digitaalisen kuvan pikseleiden määrää ja painotarkkuudella tarkoitetaan pikseleiden määrää pituusyksikköä, esimerkiksi tuumaa, kohti.

2.5 Värimuodostusmenetelmät

2.5.1 Värin esittäminen

Väri esitetään digitaalisissa kuvissa eri väriä kuvaavien osien yhdistelmänä. Ihminen voi kuvailla väriä osista koostuvana, esimerkiksi 'vaalea punainen' tai 'sinisen vihertävä'. Värin kuvaamiseen riittää kolme toisistaan riippumatonta arvoa. Sellaisia voivat olla esimerkiksi punainen-sininen-vihreä tai kirkkaus-sävykulmakylläisyys. Värin arvo voi siten liikkua kolmiulotteisessa avaruudessa. Sama väri voidaan esittää eri värimuodostusmenetelmissä. Kamerasta paperille -prosessissa kuvan värit siirretään menetelmästä toiseen useasti. Kussakin prosessin vaiheessa käytetään siihen sopivinta värimuodostusmenetelmää.

⁴pikseliä tuuma kohti

2.5.2 RGB

RGB-värinmuodostusmenetelmässä väriarvo ilmoitetaan kolmella luvulla: punaisen, vihreän ja sinisen⁵ värin arvolla. Yleensä RGB-arvo on 8-bittinen, jolloin jokaisella värillä on 256 tasoa maksimi-⁶ ja minimivärimäärän⁷ välillä. Kolmella värillä saavutetaan siten noin 16 miljoonaa⁸ eri väriarvoa.

Digitaalikamera ottaa kuvan punaisilla, vihreillä ja sinisillä suotimilla varustettujen kennojen avulla. Eri suotimien läpi tulleen valon määrä kertoo pikselin värin RGB-arvon. Ihmisen silmän tappisolut ovat myös erikoistuneet havaitsemaan näitä värejä. Ihmisen silmä toimii siis RGB-avaruuden tapaan, mutta ihminen ei kuitenkaan käsitä värejä näiden värien yhdistelmänä. RGB-värijärjestelmä on laiteriippuvainen, eli esimerkiksi valkoinen väri tarkoittaa sitä, että kaikki kolme väriarvoa ovat maksimissaan. Oikea väri riippuu siitä, kuinka paljon valotehoa eri väriset kuva-alkiot toisiinsa nähden lähettävät. Kehittyneemmät kamerat käyttävät esimerkiksi sRGB-värijärjestelmää⁹, jossa kolmen väriarvon maksimi on määrätty käyttämään tietyn spektrin mukaista valkoista väriä.

2.5.3 XYZ

Kolmivärimalli, joka kuvaa ihmissilmän aistimaa värin esitystä on nimeltään XYZ-järjestelmä. Sen on standardoinut kansainvälinen värijärjestö CIE¹⁰ vuonna 1931. Sen komponentit on valittu siten, että ne vastaavat lähes silmän tappisolujen vasteita eri valon aallonpituuksilla. Arvoja on kuitenkin muutettu siten, että ne ovat aina positiivisia ja arvo Y on valittu vastaamaan suoraan valon luminanssia. Kukin arvo voidaan laskea fyysikaalisesta valon säteilyn spektristä. [16]

2.5.4 YCbCr

Kameran havaitsema RGB-signaali pakataan yleisimmin JPEG-kuviksi. JPEG-pakkaus hyödyntää ihmisen tapaa nähdä värejä. Koska kirkkausvaihtelun erottaminen on huomattavasti herkempää kuin värin vaihtelun, väri-informaation tarkkuutta voidaan vähentää [57]. Jotta ominaisuutta voidaan hyödyntää JPEG-kuvat muutetaan YCbCr-väriarvoiksi.

YCbCr on määritelty ITU-601¹¹-standardissa digitaalisen videokuvan signaa-

⁵Red, Green, Blue

⁶esimerkiksi puhdas sininen

⁷musta

⁸ $256 \cdot 256 \cdot 256$

⁹Kansainvälinen standardi IEC 61966-2-1 [20]

¹⁰Commission Internationale de l'Éclairage

¹¹aiemmin CCIR-601

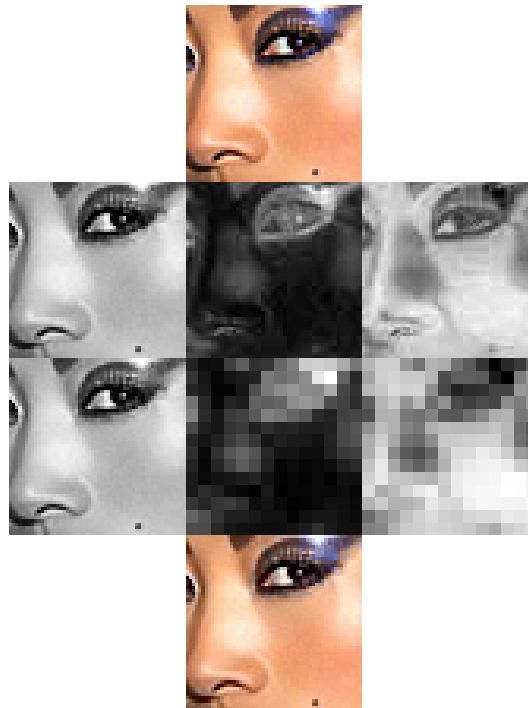
lin tallennusta varten. Lyhenteen Y-kirjain tulee suoraan XYZ tristimulusarvojen Y-komponentista, joka kuvaa värin valoisuutta. 'Cb' tulee sanoista chroma blue eli sininen kromaattisuus ja 'Cr' sanoista chroma red eli punainen kromaattisuus. [22]

JPEG-pakkauksessa värikanavat Cb ja Cr pakataan häviöllisesti: puolet Cb-signaalista ja puolet Cr-signaalista jätetään tallentamatta. Menetelmää on havainnollistettu kuvassa 9. Tapaa sanotaan YCbCr 4:2:2 -alinäytteistämiseksi. YCbCr-arvot saadaan laskettua RGB-arvoista kaavojen 1 — 3 avulla [17]. RGB-arvojen oletetaan saavan arvoja nollan ja yhden väliltä.

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

$$Cb = \frac{(B - Y)}{1.772} + 0.5 = -0.168736R - 0.331264G + 0.5B + 0.5 \quad (2)$$

$$Cr = \frac{(R - Y)}{1.402} + 0.5 = 0.5R - 0.418688G - 0.081312B + 0.5 \quad (3)$$



Kuva 9: Värikanavan alinäytteistäminen. Toisen rivin kuvat ovat Y, Cb ja Cr kanavat ylimmästä värikuvasta. Alin värikuva on rekonstruoitu yhdistämällä sen yllä olevat alinäytteistetyt värikanavat ja muuttumaton luminanssikanava. Cb-kanavassa musta edustaa keltaista ja valkoinen sinistä. Cr-kanavassa musta edustaa vihreää ja valkoinen punaista.

2.5.5 La*b*

La*b*-värinmuodostusmenetelmä toimii samoin kuin YCbCr. L vastaa valoisuutta, värikomponentti a* vastaa värin punaisuutta tai vihreyttä ja värikomponentti b* vastaa värin keltaisuutta tai sinisyyttä. Kirjain L tulee sanasta Luminosity. La*b* -arvojen laskeminen ei ole aivan suoraviivaista, eikä sitä ole määritelty yksiselitteisesti. Arvot voidaan laskea esimerkiksi XYZ-värinmuodostusmenetelmän kautta, R. Huntin [19] ja B. Lindbloomin [34] mukaan kaavojen 4 — 9 mukaisesti

$$\begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^\gamma & G^\gamma & B^\gamma \end{pmatrix} \cdot D50toD65 \cdot M \quad (4)$$

$$D50toD65 = \begin{pmatrix} 1.014470 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 1.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.757790 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{pmatrix} 0.412424 & 0.212656 & 0.0193324 \\ 0.357579 & 0.715158 & 0.119193 \\ 0.180464 & 0.0721856 & 0.950444 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$L = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (7)$$

$$a^* = 500 \left(\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right) \quad (8)$$

$$b^* = 200 \left(\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right). \quad (9)$$

Tässä laskutavassa oletetaan, että väriarvot ovat sRGB-muotoisia ja niiden valkotasapaino on säädetty CIE:n D50 valon spektriin. sRGB-arvot muutetaan ensin D65-spektriin sopivaksi valkotasapainosäädöllä (D50toD65 -kerroin) ja sen jälkeen muutosmatriisilla M, joka on säädetty toimimaan D65:n mukaisella valkoisella. Alaindeksillä n merkitään referenssivalkoista, joka on kyseinen D65:n määrittelemä valkoinen. γ arvoksi on oletettu 2.2.

CIE:n valonlähteet D50 ja D65 vastaavat samanvärisiä valoja, kuin mitä 5000 K ja 6500 K lämpötilassa hehkuvat ideaaliset mustat kappaleet säteilisivät. Standardit valonlähteet on nimetty niiden värilämpötilan mukaan.

La*b* värinmuodostusmenetelmä on laiteriippumaton, eli väriarvot ovat johdettavissa suoraan heijastuneen tai emittoidun valon spektristä. Muissa esitellyissä värinmuodostusmenetelmissä värin arvo ja ihmisen näkemä värivaikutelma voivat vaihdella.

Kun eri kameroiden samasta kohteesta antamia a*- ja b*-väriarvoja piirretään

samaan koordinaatistoon, voidaan kameroiden värintoistokykyä vertailla helposti. Tätä painoteollisuudessa usein käytettyä kuviota sanotaan laitteen väriavaruuden suuruudeksi¹².

Kamerapuhelimien kuvia tutkittaessa väriavaruuden käsittely hankaloituu, koska niiden kuvat eivät noudata mitään väristandardia. Ne ovat laiteriippuvaista RGB-muotoista väri-informaatiota. Kun La^*b^* -muunnos tehdään edellämainittujen kaavojen mukaan, La^*b^* -arvot eivät ole täsmälleen oikeita, mutta ne ovat vertailukelpoisia keskenään.

La^*b^* -väriarvoista lasketaan kahden värin välinen väriero

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}, \quad (10)$$

jossa ΔL , Δa^* ja Δb^* ovat verrattavien värien kunkin värikomponentin erotukset. Väriero on määritelty siten, että väriero $\Delta E = 1$ vastaa 50% juuri havaitun eron¹³ suuruutta. Se tarkoittaa, että koehenkilötesteissä puolet havaitsee $\Delta E = 1$ suuruisen värieron. Väriero ei kuitenkaan ole aivan tasainen yli väriavaruuden, sillä keltaisella alueella $\Delta E = 3$ väriero voi olla vaikea nähdä, kun taas sinisillä $\Delta E = 0.5$ ero saattaa olla jo näkyvä. [12]

2.5.6 HSV

Yleisistä värinmuodostusmenetelmistä HSV on ihmisläheisin. Se kuvaa väriä värikulman, värikylläisyyden ja valoisuuden avulla. Värikulma¹⁴ on edelläkuvatussa La^*b^* -avaruudessa värin a^* - ja b^* -koordinaattien ja origon muodostama kulma. Yleensä a^* -akseli merkitään nollakulmaksi¹⁵, jolloin esimerkiksi 180 astetta värikulmaa¹⁶ olisi vihertävä. Värikylläisyys¹⁷ on La^*b^* -avaruudessa värin a^* - ja b^* -koordinaattien muodostama etäisyys origosta, eli värin puhtaus. Pienillä arvoilla se on lähellä väritöntä harmaata ja suurilla arvoilla se kuvaa värikkäitä puhtaita värejä. V ¹⁸ kuvaa samaa arvoa kuin La^*b^* -avaruuden L , eli valoisuutta. HSV-värinmuodostusmenetelmä kehitettiin tietokoneella käsiteltäviä värejä varten, jolloin sen määritelmäkin on tietokoneen numeronkäsittelyä ajatellen kir-

¹²gamut

¹³JND, just noticeable difference

¹⁴Hue

¹⁵punertava

¹⁶negatiivinen a^* -akseli

¹⁷Saturation

¹⁸Value

joitettu. HSV väriarvot lasketaan RGB-arvoista, jotka ovat välillä [0,1], siten että

$$V = \max(R, G, B) \text{ ja} \quad (11)$$

$$S = \frac{V - \min(R, G, B)}{V}. \quad (12)$$

H-arvon laskemiseen soveltuu parhaiten pseudo-ohjelmakielinen esitys [51]. H lasketaan seuraavasti:

```
x = min(R,G,B);
r = (V-R)/(V-x);
g = (V-G)/(V-x);
b = (V-B)/(V-x);
jos ( R==V ) {
    jos ( G==x ) { H=5+b; } muuten { H=1-g; }
} muutenjos ( G==V ) {
    jos ( B==x ) { H=1+r; } muuten { H=3-b; }
} muuten {
    jos ( R==x ) { H=3+r; } muuten { H=5-r; }
}
H = H/6;
```

2.5.7 CMYK

CMYK -lyhenne tulee sanoista Cyan, Magenta, Yellow ja Key¹⁹. Se on käänteinen värijärjestelmä RGB:lle, eli CMYK on subtraktiivinen, vähentävä värijärjestelmä. Kun värejä lisätään, väri tummuu. Värimuodostusmenetelmä on painotuotteille ominainen ja kaikki kuvat muutetaan tähän järjestelmään neliväripainatuksessa. Jo värijärjestelmällä CMY pystytään toistamaan kaikki värisävyt, mutta kustannussyistä mustaa väriä ei kannata tehdä painamalla päällekkäin kolmea väriä, vaan pelkästään ylimääräisellä mustalla värillä. CMY-arvot lasketaan kaavoilla 13 – 15.

$$C = 1 - R \quad (13)$$

$$M = 1 - G \quad (14)$$

$$Y = 1 - B \quad (15)$$

¹⁹tai black

Mustan värin määrä K saadaan periaatteessa ottamalla pienin arvoista C , M ja Y ja vähentämällä pienin arvo kahdesta muusta. Käytännössä tämä johtaa väri-
virheisiin. Mustan värin määrä ja vähennykset muista ovat riippuvaisia muiden
värien ominaisuuksista.

CMYK-värinmuodostusmenetelmä, kuten RGB:kin edellä, on laiteriippuvai-
nen. Kun väriä ei paineta, lopputulos on paperin värinen, ei valkoinen. Kun paine-
taan pelkällä keltaisella, lopputulos on painovärin värinen, ei mikään standardien
mukainen väriarvo. Siksi painolaitteet tulee kalibroida painoväreihinsä, jolloin vä-
rien muutos tulee tehtyä oikein. [44]

2.5.8 Värinmuodostusmenetelmät digitaalikameroissa

Digitaalikameran kennot havaitsevat värit RGB-menetelmän mukaisesti. Kennos-
tolla suodatetaan valosta erikseen punaiset, vihreät ja siniset värit. Kuvat yleensä
talletetaan JPEG-muotoon jo kamerassa, jolloin käytetään YCbCr-menetelmää.
Kuvaa muokatessa kuvan värinmuodostusmenetelmä saatetaan muuttaa käytän-
nön syistä $L^*a^*b^*$ - tai HSV-muotoon ja painettaessa kuvat muutetaan painovä-
rejä vastaavaan CMYK-menetelmään. Jokaisella värinmuodostusmenetelmällä on
omat etunsa ja rajoituksensa, lisäksi muunnoksissa voi tapahtua epätarkkuusvir-
heitä. Eri värinmuodostusmenetelmiä kuitenkin käytetään, sillä käytännöllisyys
eri vaiheissa tuottaa suuremman hyödyn kuin menetelmien rajoitusten haitat.

2.6 Ihmisen kyky havaita digitaalista kuvaa

2.6.1 Terävyyden havaitseminen

Silmässä olevat tappisolut ja sauvasolut reagoivat valoon. Kirkkaassa valaistuk-
sessa sauvasolujen vasteet saturoituvat ja vain tappisolujen informaatio kulkeu-
tuu aivoihin. Tappisolujen vasteiden perusteella aivot muodostavat näköaistimuk-
sen. [14] Koska aistinsoluja on rajallinen määrä ja silmän linsijärjestelmä on
epäideaalinen, näkökyvyllä on fyysiset rajoituksensa. Pienin hyvissä olosuhteis-
sa havaittu yksityiskohta on noin $20 \mu\text{m}$ [44], jonka tulostamiseen vaadittaisiin
635 PPI painotarkkuus. Näsäsen vuonna 1985 tekemän tutkimuksen mukaan jat-
kuvaa, sinimuotoista kuviota tarkastellessa ihmisen näkökyvyn tarkkuus putoaa
hyvässä valaistuksessa arvoon 32 sinin jaksoa näkökulman astetta kohti [41]. Sini-
muotoinen kuvio tarkoittaa raidoitusta, joka vaihtelee mustan ja valkoisen välillä
sinifunktion mukaan, kuten kuvassa 10 sivulla 19. 35 cm katseluetäisyydellä ku-
vataajuus vastaa 5.2 sinin jaksoa millimetriä kohti, joka olisi tulostettavissa 132

PPI tarkkuudella. Lindbergin mukaan ihmissilmä erottaa yksityiskohtia 123 PPI tarkkuudella, kun lukuetaisyys on noin 35 cm [33]. Näkökyvyn tarkkuus laskee edelleen, kun taustan ja kuvion värit lähestyvät toisiaan.

2.6.2 Värillisyyden havaitseminen

Ihmissilmän kyky havaita värejä perustuu kolmen eri valon aallonpituuteen reagoivan tappisolutyypin vasteisiin. Värisävyn tulkinta muodostuu kolmen vastearvon keskinäisistä suhteista verrattuna arvioidun valaistuksen vastearvoihin [14]. Värinäkö on siten suhteutettu ympäröivään valaistukseen, eikä ihmissilmä näe absoluuttisia valon aallonpituusjakautumia eli värejä. Valaistuksen arvioimista kutsutaan myös adaptoitumiseksi ympäröivään valoon.

Adaptoitumisella on kuitenkin rajansa, sillä esimerkiksi moottoriteiltä tutut korkeapainenatriumlamput ovat niin keltaisia, ettei silmä adaptoitu valaistukseen ajankaan myötä. Ihmisen havaitsemien värien tarkastelussa on syytä tarkastella värien eroja, eikä absoluuttisia väriarvoja.

Muistivärit

Muistivärit ovat värejä, joista on ihmisen muistissa olemassa prototyyppiväri [11]. Sellaisia ovat esimerkiksi ihonväri, taivaan sininen ja lehtivihreä. Tutkimuksissa tällaisten värien on todettu palautuvan mieleen yleensä värikylläisempinä kuin mitä kolorimetrinen oikea väri on [1, 2, 14]. Kun vertaillaan eri värikylläisyydellä olevia saman kuvan versioita, kolorimetrisesti liian värikylläinen valitaan oikean väriseksi kuvaksi. Tämä tarkoittaa, että ihmisen mielipiteeseen värien kolorimetrisessä oikeellisuudessa ei tule aina luottaa.

Väriämpötila

Valaistuksen ja näyttöjen määrittämisen yhteydessä käytetään usein väriämpötilan käsitettä. Väriämpötila on mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila, kun musta kappale säteilee valoa, jonka väri näyttää samalta kuin tarkasteltavan värirentän väri. Tällöin värirentän väriämpötila on määritelty. Hehkulamppu on lähellä ideaalista mustaa kappaletta, sillä sen polttolämpötila vastaa suurinpiirtein myös sen väriämpötilaa. Hehkulamputille tyypillinen väriämpötila on noin 2800 K. [16] Ulkovalolle on standardoitu keskimääräisiä väriämpötiloja; esimerkiksi 5000 K aurinkoiselle säälle ja 6500 K pilviselle säälle [5]. Sinisen taivaan väriämpötila voi olla jopa 25000 K [16].

3 Kuvan laatu

3.1 Objektiivinen laatu

3.1.1 Laadun objektiivinen määrittäminen

Kuvan laadulla tarkoitetaan kuvan hyvyttä. Hyvä kuva on vaikea moniulotteinen käsite, jonka määrittelemiseen käytetään asiayhteyteen sopivaa keinoa. Kuvan objektiivinen laatu on mitattavissa kuvasta ja se voidaan ilmaista lukuarvoina. Objektiivista laatua voidaan kuvata monella mittarilla. Sellaisia ovat esimerkiksi kohinan määrä, taajuusvasteen muutokset, sumentuminen ja värien oikeellisuus. Nämä mittarit tarvitsevat kuitenkin aina vertailukohdakseen alkuperäisen, ideaalisen kuvan. Jos ideaalista kuvaa ei ole saatavilla, objektiivisten mittareiden toiminta heikkenee. On olemassa myös laatumittareita 'sokean' [32, 56] järjestelmän kuville, jotka yrittävät mitata kuvan laatua ilman täydellistä vertailukohtaa. Esimerkiksi JPEG-pakkauksen tapauksessa, voidaan etsiä pakkauksen perustana olevien 8·8 pikselin laatikoiden rajat ja laskea niiden muodostamat reunat. Jos kuvassa on paljon tällaisia reunoja, jotka toistuvat 8 pikselin välein, voidaan niiden suuruudesta laskea kuvanlaatuarvo, ilman alkuperäistä pakkaamatonta versiota.

3.1.2 Erottelukyky

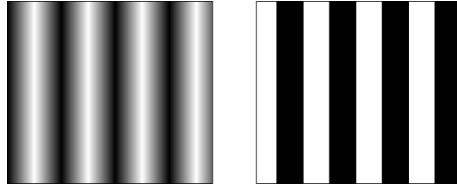
Digitaalisen kuvan erottelukyvyn mittari on kuvapisteen määrä. Digitaalisessa kuvassa vierekkäiset pisteet ovat toisistaan täysin riippumattomia. Kamerajärjestelmässä ei tällaiseen ideaalisuuteen päästä, sillä järjestelmän eri vaiheet vaikuttavat kuvan pisteiden riippumattomuuteen. Eritoten linssi ja valokenno ovat tällaisia virhelähteitä.

Kamerajärjestelmän tarkkuuden toistokykyä kuvaa modulaationsiirtofunktio²⁰ tai sen johdannainen, kontrastinsiirtofunktio²¹ [43]. Funktio kertoo, kuinka hyvin järjestelmä toistaa kunkin kuvassa esiintyvän paikkataajuuden eli väriarvon muutosnopeuden. Modulaationsiirtofunktio kertoo siniaallon toistumisen kuvassa ja kontrastinsiirtofunktio sakara-aallon toistumisen. Siniaaltoja ja sakara-aaltoja on havainnollistettu kuvassa 10. Oletuksena on, että mitä suurempi taajuus värimuutoksella on, sitä huonommin kamerajärjestelmä pystyy toistamaan muutoksen suuruuden.

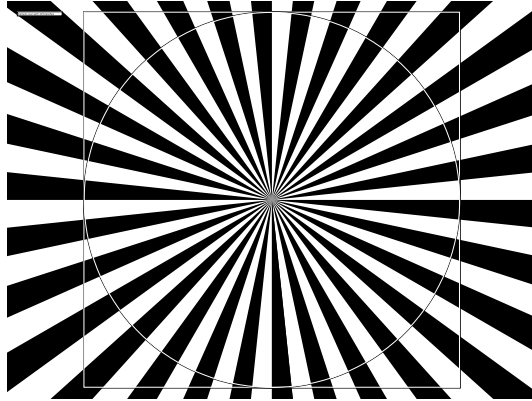
Määritelmän mukaan sakara-aallon kontrasti on yhtä suuri kuin sen amplitudi [43], jolloin siirtofunktion voisi laskea esimerkiksi seuraamalla tietyllä säteellä

²⁰MTF, Modulation Transfer Function

²¹CTF, Contrast Transfer Function



Kuva 10: Siniaalto ja sakara-aalto



Kuva 11: Siemens-tähti

Siemens-tähden keskipisteestä olevaa ympyrää. Siemens-tähti on esitetty kuvassa 11.

Tähden keskustan ympäriltä mielivaltaisella säteellä valittu ympyrä kuvaa sakara-aaltoa yhdellä taajuudella. Tämän signaalin amplitudi vastaa siis kontrastinsiirtofunktiota ympyrän säteeseen suoraan verrannollisella taajuudella. Käymällä kaikki säteet läpi saadaan koko taajuusriippuvaisen funktion arvot lasketu. [35] Hyvänä puolena menetelmässä on se, että se on suuntariippumaton. Lisäksi valitsemalla sektoreita tähdestä voidaan mitata jonkun tietyn suunnan siirtofunktiota. Tähti on myös geometrisesti vakio kuvausetäisyyden suhteen, jos voidaan olettaa, että tähden keskusta on painettu riittävän suurella tarkkuudella. Huonoja puolia ilmenee käytännön kokeiluissa. Kutakin sädettä on vaikea saada vastaamaan jotain tiettyä paikkataajuutta, esimerkiksi jaksoa/millimetri. Lisäksi korkeilla taajuuksilla, eli lähellä tähden keskustaa, pikselien määrä on hyvin pieni. Siitä syystä laskentaa tehtäessä virheitä tapahtuu väistämättä.

Siirtosysteemin kannalta modulaationsiirtofunktio yhteen kuvapinnan suuntaan vastaa impulssifunktion²² syöttämistä systeemiin ja tulossignaalin Fouriermuuntamista. Äärettömän kapeaa impulssifunktiota on kuitenkin mahdoton toteuttaa kuvauskohteena. Jos impulssin tilalle laitetaan askelfunktio²³, se voidaan

²²esimerkiksi vaakasuora viiva

²³mustan ja valkoisen reuna

huomioida Fourier-muunnetussa tulossignaalisissa, ja näin voidaan laskea askelvas-teesta systeemin modulaationsiirtofunktio [43]. ISO 12233 standardiin perustuva kameran suorituskyvyn mittausta käyttävä mustavalkoista reunaa modulaation siirron määrittämiseen [21]. Modulaationsiirtofunktion ja kontrastinsiirtofunktion välillä voidaan liikkua laskennallisesti. Syöttämällä tietyn suuntainen reuna kuva-systeemiin voidaan korvata Siemens-tähden yhden suunnan tarkastelu käytännöl-lisemmällä laskennallisella tavalla. Syöttämällä usean suuntaisia reunoja voidaan laskea koko kuvasysteemin modulaationsiirtofunktio.

Modulaationsiirtofunktio voidaan laskea myös yhdestä valkoista kohinaa sisältävästä kuvasta, sillä valkoinen kohina sisältää tasaisesti kaikkia kuvataajuuksia. Lukemalla tuloskuvan taajuusjakauma voidaan todeta eritaajuuksien komponenttien muutos ja siten selvittää siirtofunktio [10]. Mittaamalla monta vakiotaajuista palkkiriviä, joiden leveydet tunnetaan tarkasti voidaan mitata taajuus kerrallaan modulaationsiirtofunktion arvoja [7]. Jälkimmäinen tapa vastaa Siemens-tähden käyttöä, mutta on suuntariippuvainen.

3.1.3 Värintoisto

Värintoistokyvyssä on vaikea päästä absoluuttisiin mittaustuloksiin, jos kame-roiden antamat väriarvot eivät ole lukittuja mihinkään standardiin²⁴. Sen lisäksi väriarvot liikkuvat kolmiulotteisessa väriavaruudessa, minkä vuoksi usean ka-meran värien havainnollinen tarkastelu on hankalaa. Kun testikohteen väriarvot piirretään a*b*-koordinaatistoon, saadaan kameroiden välinen vertailukelpoinen kuvaaja värintoistokyvystä. Kun ei huomioida kameran antamaa kirkkausarvoa ja keskitytään pelkästään värikanaviin, väriavaruudesta saadaan redusoitua yksi dimensio ja jäljelle jää vain kaksi.

Värien eroille voidaan myös käyttää yksidimensioista arvoa eli värieroa ΔE . Väriero kertoo, kuinka kaukana värit ovat toisistaan, mutta se ei kerro mihin suuntaan ero on tapahtunut. Eri värien väliset värierot voidaan vielä keskiarvoistaa keskenään, jolloin saadaan yksi luku, joka kuvaa kameran värintoistoa valituilla väreillä. Arvolla voidaan vertailla kameroilla otettujen värien kokonaisvirheellisyyttä, mutta arvo ei ole kovin havainnollinen. Kamera saattaa toistaa värit oikein, mutta jos sen valkotasapainon säätö on epäonnistunut, värierot ovat suuria kaikilla väreillä. Tarkastelemalla väriarvoja ab-avaruudessa voidaan nähdä, ovatko jonkun kameran kaikki värit siirtyneet samaan suuntaan. Jos ovat, kyseessä on valkotasapainon säädöstä aiheutunut virhe.

²⁴esimerkiksi sRGB, katso s.11

3.1.4 Kameran kuvan laadun rajat

Kameralla otettavan kuvan laatu määrittyy kuvan ottohetkellä. Ideaalisen digitaalisen kuvan laatuun vaikuttaa Kodakin oppikeskuksen [27] mukaan kaksi tekijää: spatiaalinen erottelukyky ja kirkkauserottelukyky. Pikselin koko eli spatiaalinen erottelukyky määräytyy sen mukaan, kuinka tiheään kennosto on rakennettu. Kirkkauserottelukyky määräytyy sen mukaan, kuinka montaa bittiä voidaan käyttää kuvaamaan pikselin väriarvoa.

Pikseleiden määrä ei suoraa määrää erottelukykyä, vaan vierekkäisten pikselien tulee olla myös toisistaan riippumattomia. Usein digitaalisissa kameroissa jännitevuotojen ja linssijärjestelmän takia vierekkäiset pikselit ovat jonkin verran toisistaan riippuvia, mikä sumentaa kuvia ja heikentää siis erottelukykyä. [38]

Matkapuhelimiin integroidut kamerat käyttävät kohinalle altista CMOS-tekniikkaa ja kuvien pikselimäärät ovat pieniä. 640 pikseliä leveä kuva painettuna 10 cm leveäksi kuvaksi paperilla tuottaa yhden pikselin leveydeksi 0.156 mm, joka vastaa noin 160 PPI painatustarkkuutta. Kuvan koon pitäisi olla riittävä katseltavaksi. Juuri kuvapisteiden määrä koetaan kamerapuhelinten heikkoudeksi [28], minkä vuoksi on syytä tarkastella, millainen pistemäärä riittää hyvän kuvan toistamiseen. Kameroiden kennojen toistokyky on myös kyseenalainen. Pistemäärän lisäksi pitää selvittää, kuinka paljon vierekkäiset kennot vaikuttavat toistensa vasteisiin.

Modulaationsiirtofunktio kuvaa siniaallon toistumista kuvassa, mutta funktio voidaan laskea yhden ainoan terävän, hieman kallistetun reunan avulla, kuten luvussa 3.1.2 todettiin. ISO 12233 standardiin perustuva vinojen reunojen avulla laskettava modulaationsiirtofunktio on vertailukelpoinen mitta kameroiden kesken [21]. Reunan avulla laskettava mitta ei ole suuntariippumaton, mutta voidaan olettaa, että ISO 12233 standardin mukainen mitta on riittävä kameras kuvan yksityiskohtien tarkkuuden määrittämiseen.

Kamerapuhelimet toimivat parhaiten voimakkaassa ulkovalaistuksessa. Mitä enemmän kenno saa valoa, sitä vähemmän se tarvitsee valotusaikaa. Lyhyemmällä valotusajalla kennosto ehtii kohista vähemmän. Lisäksi ulkovalaistuksessa värit toistuvat hyvin, sillä auringon valo sisältää kaikkia näkyvän valon spektrin taajuuksia.

Julkaistavan kuvan oikeat²⁵ värit on tärkeä selvittää kuvan laadun varmistamiseksi [49]. Oikeista väreistä voi kuvan esikäsittelyssä säätää tilanteeseen sopivan, mutta oikeaa väriä on vaikea säätää, jos sitä ei ole etukäteen tiedossa.

²⁵kolorimetrisesti mitatut

Koska kamerapuhelinten värejä ei voi säätää kuvaa ottaessa, on syytä selvittää, kuinka hyvä niiden värintoistokyky on. Mittaus voidaan toteuttaa kuvaamalla tunnettuja värikenttiä ja vertaamalla kameran antamia lukuarvoja tunnettuihin.

3.1.5 Aikakauslehden kuvan laadun rajat

Painokoneiden tarkkuus vaihtelee laitteittain, mutta yleensä niillä saavutetaan noin 300 PPI tarkkuus [13, 30, 44]. Sitä tarkempia kuvia ei voida aikakauslehtiin käytettävillä painomenetelmillä painaa, jolloin kuvienkaan ei tarvitse olla sitä tarkempia. Yleensä kuvat kuitenkin lähetetään painoon tarkempina, sillä kuvankäsittely ja muutos painokoneen hyväksymään muotoon voivat heikentää kuvan tarkkuutta, jolloin ylimääräiset pikselit tulevat tarpeeseen. Kuvankäsittelyn ammattilaisen mukaan riittävä tarkkuus painetulle kuvalle on 230 PPI [49].

Painotuotteen värit muodostetaan jakamalla värillinen pinta pisteiksi, joiden koko vastaa värin määrää paperilla. Menetelmää sanotaan rasteroinniksi. Mitä enemmän erikokoisia rasteripisteitä voidaan painaa, sitä enemmän värisävyjä voidaan tuottaa. Rasteroinnin vaikutus on otettu huomioon edellämainitussa 300 PPI tarkkuusrajassa. [26]

3.2 Subjektiiivinen laatu

3.2.1 Laadun subjektiiivinen määrittäminen

Kuvan laatu subjektiiivisena käsitteenä ei ole yhtä helposti määritettävissä kuin objektiiivisessä tapauksessa. Kuvan subjektiiivinen laatu riippuu esimerkiksi koehenkilön näkökyvyn ominaisuuksista, mielipiteistä, mielentilasta tai kuvan kontekstista. Eräitä kuvan korkean kognitiivisen tason laadun mittareita ovat kuvan käytettävyyys, luonnollisuus [23] ja kiinnostavuus [46]. Muita vastaavia ovat kuvan viestin välityskyky, valaistuksen esteettinen laatu ja sommittelu [25]. Mielilyttävyyteen yhdistettäviä suureita ovat esimerkiksi värikylläisyys ja väritasapaino [25]. Kuvan teknisiin parametreihin liittyviä laatusuureita ovat terävyys, rakeisuus, punasilmäisyys ja digitaaliset kuvavirheet²⁶ [25].

Laadun lukuarvoa määritettäessä voidaan koehenkilölle esittää numeerinen skaala, esimerkiksi yhdestä viiteen, jossa yksi tarkoittaa huonoa ja viisi hyvää. Henkilö osaa suhteuttaa kuvan laadulle numeerisen arvon. [18] Arvo ei yleensä ole absoluuttinen, vaan sitä verrataan joko referenssikuvaan tai aiempiin kokemuksiin. Varsinkin aiempiin kokemuksiin verrattessa arvioinnit vaihtelevat koe-

²⁶esimerkiksi JPEG-pakkausvirhe

henkilöiden välillä. Tarpeeksi monen henkilön avulla henkilöiden vaihtelut voidaan minimoida tai tilastollisesti normalisoida ja siten kuvan laatua voidaan arvioida numeerisesti. Subjektiiivisessakin laadussa voidaan keskittyä vain johonkin tiettyyn kuvan laadun osa-alueeseen, kuten kuvan tarkkuuteen tai värien toistumiseen.

3.2.2 Subjektiiivisen laadun mittausmenetelmät

Parivertailu [1]

Yksinkertaisin menetelmä löytää haluttua ominaisuutta edustavat kuvat kuva-sarjasta on parivertailu. Siinä verrataan aina kahta kuvaa keskenään ja valitaan niistä kysyttyä ominaisuutta paremmin vastaava vaihtoehto. Siten vertailuja tulee tehtyä $N \cdot (N - 1)$ kappaletta, kun N on kuvien määrä. Tuloksena saadaan matriisi, joka kertoo kuinka monta kertaa kukin kuva on valittu paremmaksi kuin jokin toinen kuva. Summaamalla sarake, joka sisältää valituksi tulleet parin vaihtoehdot, saadaan lukuarvo yhden kuvan ominaisuuden määrälle. Mikäli kuvien eroavaisuus on kuvattavissa fysikaalisella suureella, esimerkiksi kirkkaus, voidaan tuloksista tehdä ennustuksia koehenkilöiden kokeman kirkkaustason ja oikean kirkkauden välille. Bartleson ehdottaa, että vertailutuloksista voidaan laskea arvostusindeksit jokaiselle eri kuvalle, jolloin kuvien hyvyden vertailu helpottuu. Menetelmässä jokaiselle matriisin luvulle lasketaan logaritminen skaala

$$L_{i,j} = \text{Log}_e \left(\frac{X_{i,j} + 0.5}{X_{j,i} + 0.5} \right), \quad (16)$$

jossa $X_{i,j}$ on lukumäärä, kuinka monta kertaa kuva i on valittu paremmaksi kuin kuva j . Logaritmin sisälle, jaettavaan ja jakajaan, on lisätty puolikkaat, ettei voi tapahtua nollalla jakamista. Summaamalla logaritmiset indeksit, saadaan kuville vertailukelpoinen arvostusindeksi.

Järjestysvertailu

Kun parivertailun erilaiset kombinaatiomäärät kasvavat liian suuriksi, voidaan soveltaa järjestysvertailua. Järjestysvertailu on nopeutettu versio parivertailusta [6]. Siinä erilaiset kuvat annetaan kerralla koehenkilön nähtäväksi ja tehtävänä on laittaa ne paremmuusjärjestykseen. Menetelmä toimii erityisesti hyvin pienillä kuvien eroavaisuuksilla, sillä juuri virheet kuvien järjestämisessä antavat tilastollista informaatiota. Mitä enemmän virheitä tapahtuu, sitä huomaamattomia ovat kyseisten kuvien väliset erot. [1]

Kuvan yksittäisen version järjestyslukuista syntyy jakauma. Jos koehenkilöt järjestävät saman version eri kohtiin, jakauma leviää. Jakauman leveyttä voidaan kuvata keskihajonnalla. Keskihajonta kuvaa lukuarvojen poikkeavuutta lukujoukon keskiarvosta. Ongelmaksi muodostuu tilanne, jossa kaikki järjestetyt kuvat on järjestetty hieman väärin, esimerkiksi yliarvioiden kuvissa muuttuvaa ominaisuutta, kuten kuvan tarkkuutta. Keskiarvo siirtyy pois siitä luvusta, joka olisi ollut oikea vaihtoehto ja lukujoukko saa liian pienen hajonnan. Ongelmaa voidaan korjata muuttamalla keskihajonnan laskennassa käytetty keskiarvo siksi luvuksi, joka edustaa oikeata järjestyslukua kuvan ominaisuudelle. Kutsutaan termiä järjestyshajonnaksi. Se lasketaan siten, että

$$\sigma_j = \sqrt{\Sigma(x_i - x_j)^2 / (N - 1)}, \quad (17)$$

jossa x_i on koehenkilöiden antamat järjestysluvut versiolle,
 x_j on kuvan version oikea järjestysluku ja
 N on koehenkilöiden määrä.

Hajontoja ja niiden toista potenssia eli varianssia voidaan vertailla keskenään F-testillä. Siten voidaan selvittää minkä kuvan version kohdalla on eniten sekaanusta, joka tarkoittaa, että eroja muihin versioihin ei ole havaittu yhtä hyvin kuin pienemmän hajonnan kuvaversioilla. [31]

3.3 Kuvien muokkaus

3.3.1 Kuvien muokkauksen tarve

Kuviin tulee poikkeuksetta kuvausprosessissa erilaisia virheitä. Virheet voivat olla esimerkiksi kohinaa elektronisista komponenteista, tunnettuja tai tuntemattomia linssin aiheuttamia virheitä tai valoantureiden epälinearisuuksia. Osa virhelähteistä voidaan mallintaa etukäteen ja poistaa prosessoimalla kuvaa digitaalisesti. Mikäli kuvassa on virheitä, joita ei ole voitu ennustaa etukäteen ja kuvaa halutaan muokata kohdetta vastaavaan asuunsa, puhutaan kuvan palauttamisesta tai entistyksestä²⁷.

Joissain tapauksissa kuvaa halutaan muokata vielä enemmän. Varsinkin kokeneiden sovelluksissa kuvaa pitää muokata siten, että siitä voidaan erottaa hyvin kohteita. Silloin puhutaan kuvan ehostamisesta²⁸. Kuvan ehostamiseksi kutsutaan myös laadun parantamista ihmissilmälle miellyttävämmäksi.

²⁷restoration

²⁸enhancement

3.3.2 Kuvien entistys

Kuvan entistys on prosessi, jossa pyritään rekonstruoimaan tai palauttamaan kuva, jonka laatu on heikentynyt. Jos heikentyneen kuvanlaadun aiheuttaja tunnetaan matemaattisen tarkasti, voidaan prosessi kääntää ympäri ja palauttaa alkuperäinen kuva käänteisprosessilla [15]. Epäideaalisten kameroiden tapauksessa tarkkaa matemaattista mallia ei voida rakentaa, jolloin laadun parantamisessa on turvauduttava ehostuskeinoihin tai likiarvoihin. Värintoistossa matemaattisella mallilla voidaan päästä melko lähelle totuutta [12].

Värinhallinta

Värinhallinta on osa kuvan entistystä. Siinä kohteen alkuperäiset värit pyritään säilyttämään samoina kuvan kulkuprosessin loppuun asti. Tähän prosessiin International Color Consortium (ICC) kehitti ICC-profiilit. Ne ovat käytännön värinhallinnan perusta. Kun jokainen prosessin laite on ICC-profiloitu, värit säilyvät teoriassa samoina kuvauskohteesta painopaperille saakka.

Laitteen ICC-profiili on muunnostaulukko, jolla esimerkiksi kameran havaitsema signaali muutetaan profiilien väliseen laiteriippumattomaan väriavaruuteen²⁹. Tulostuspään³⁰ ICC-profiilit kertovat, kuinka laiteriippumattomista väreistä päästään näytön RGB -signaaleihin tai painokoneen CMYK -arvoihin. Kameran ICC-profilointia varten otetaan testikuva, joka sisältää mahdollisimman monta erilaista väriä, joiden oikea väriarvo tiedetään. Oikeita värejä verrataan kameran lukemaan signaaliin ja saadaan muunnostaulukko eli ICC-profiili. Taulukon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 12. [12]

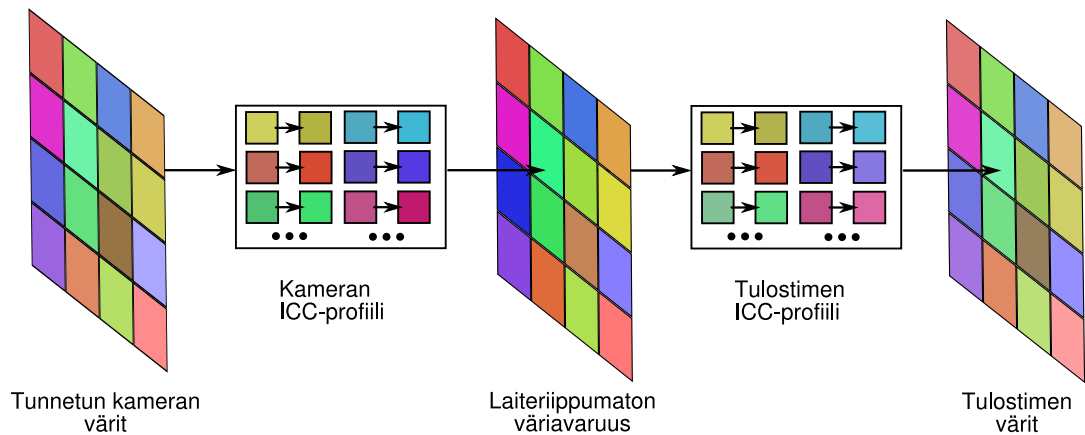
Laiteriippumattoman väriavaruuden ja laitteen väriavaruuden muutokseen on olemassa neljä päätapaa³¹, joiden suurin ero on laitteen väriavaruuden ulkopuolisten värien käsittelyssä [12].

- Absoluuttinen kolorimetrinen algoritmi pyrkii säilyttämään värien XYZ-arvot samoina. Mikäli tulostusväriavaruuden valkoinen on eri kuin lähdeavaruuden, tulostusavaruuteen lisätään värejä siten, että valkoisen XYZ-arvo säilyy. Väriavaruuden ylittävät värit siirretään lähimmäksi mahdolliseksi väriarvoksi. Ylittävät värit siis leikkautuvat.
- Suhteellinen kolorimetrinen algoritmi säilyttää tarkat väriarvot, mutta tulostusväriavaruuden valkoinen suhteutetaan väreihin. Lähdeavaruuden valkoi-

²⁹PCS, Profile Connection Space

³⁰näytöt, painokoneet

³¹muunnosalgoritmia, rendering intent



Kuva 12: ICC-profiloinnin toiminta. Kameran havaitsemat värit muunnetaan profiilin avulla laiteriippumattomaan väriavaruuteen, josta ne voidaan edelleen muuntaa näyttö- tai tulostuslaitteeseen. Kullakin laitteella on oma profiilinsa.

nen on siis tulosavaruuden valkoinen, ja muita värejä suhteutetaan saman verran. Ylittävät värit siirretään lähimmäksi mahdolliseksi.

- Kylläisyyden säilyttävä algoritmi pyrkii säilyttämään värien suurimman mahdollisen kylläisyyden värisävyn kustannuksella. Tulosavaruuden valkoinen suhteutetaan väreihin.
- Havainnollinen algoritmi puristaa lähdeväriavaruuden tulosavaruuteen, jolloin värialueen ulkopuolisia värejä ei pitäisi jäädä. Valkoinen väri suhteutetaan tulosavaruuteen.

Yleisin algoritmi kylläisiä värejä sisältäville valokuville on havainnollinen algoritmi, sillä sitä käytettäessä ei synny väriavaruuden leikkautumisia kylläisille väreille. [12]

Kameroiden profiloinnissa on myös ongelmansa. Kun kuva otetaan erilaisessa valaistuksessa, myös profiilin pitäisi muuttua, sillä lähdeavaruuden valkoinen väri muuttuu. Värihallinta toimii vain, jos profiili on tehty lähes samoissa valaistusolosuhteissa, kuin missä varsinainen kuva otetaan [54]. Kuluttajatasen digitaalika-
 meroissa on sisäisesti rakennettuja profiileja, jotka voidaan valita käyttöön, kun halutaan kuvaan oikeammat värit. Tällaisia profiileja voivat olla esimerkiksi auringon, pilvisen sään, hehkulampun ja loistelampun valo.

3.3.3 Kuvien ehostus

Kuvan ehostaminen tarkoittaa kuvan muuntamista käyttöön sopivammaksi. Kriteerinä voi olla esimerkiksi kuvan miellyttävyys. [39]

Kuvan terävöittäminen on yksi kuvan ehostustekniikka. Terävöitys perustuu reunojen korostamiseen. Kun kuvassa tapahtuu muutos jossakin suunnassa, terävöitys nopeuttaa tätä muutosta. Kamerapuhelinten optiikka sumentaa kuvaa varsinkin kuvan laidoilla, jolloin kuvan terävöittämistä voidaan pitää myös entistysprosessina. Koska tiedetään, että kamerapuhelimet sumentavat kuvaa, voidaan terävöittämällä päästä lähemmäksi alkuperäistä kohdetta.

Automaattiset värinparannusalgoritmit ovat myös kuvan ehostamista. Niillä tehdään toimenpiteitä, joiden käytön on huomattu parantavan kuvan miellyttävyyttä. Yksinkertaisimmat automaattiset värinparannusalgoritmit perustuvat esimerkiksi värikylläisyyden kasvattamiseen ja terävyyden lisäämiseen [29, 42].

4 Digitaalikameroiden suorituskyvyn mittaus

4.1 Mittausympäristön määrittäminen

Kuluttajan kuvausympäristö riippuu ympäröivästä valaistuksesta. Kamerapuhelimissa ei ole valovoimaista salamaa. Valonlähde on silloin yleensä joko sisällä loistelampun valo tai ulkona auringon valo.

Ulkovalaistuksen korkea värilämpötila on vaikea saavuttaa tavallisilla sisävalaisimilla laboratorio-olosuhteisiin. Standardi CIE D65 määrittelee pilvisen sään värilämpötilaksi 6500 K, aurinkoisella säällä voidaan käyttää CIE D50 eli 5000 K värilämpötilaa. Jotkut loistelamput voivat saavuttaa 6500 K valkoisen värin, mutta loistelamput eivät ole jatkuvaspektrisiä. Koska valo ei sisällä kaikkia mahdollisia värejä, pinnasta ei voi myöskään heijastua eli toistua mitä tahansa väriä. Hehkulankaan perustuvien valaisinten spektri on jatkuva, mutta ongelmana on matala värilämpötila eli kellertävä väri. Hehkulampun värilämpötila on noin 2700 K. Suodattamalla hehkulampun valoa saadaan värilämpötilaa keinotekoisesti nostettua ja spektri pysyy silti jatkuvana.

Loistelampujen toinen ongelma on 100 Hz välkkyminen. Kuvassa 13 on kuvattu läheltä paperissa ollutta kuvaa voimakkaan loistevalaisimen valossa. Raidat syntyvät, kun kamera siirtää kuvaa kennoilta riveittäin muistiin, eikä kamerassa ole mekaanista suljinta [45]. Valaisin ehtii välkkyä monta kertaa ennen kuin kuva on kokonaan siirretty talteen. Välke aiheuttaa valaistuseroja eri pikseliriveille. Välkkeen ja värintoiston takia mittausympäristö valaistiin suodatetulla hehkulankaan perustuvalla valonlähteellä.



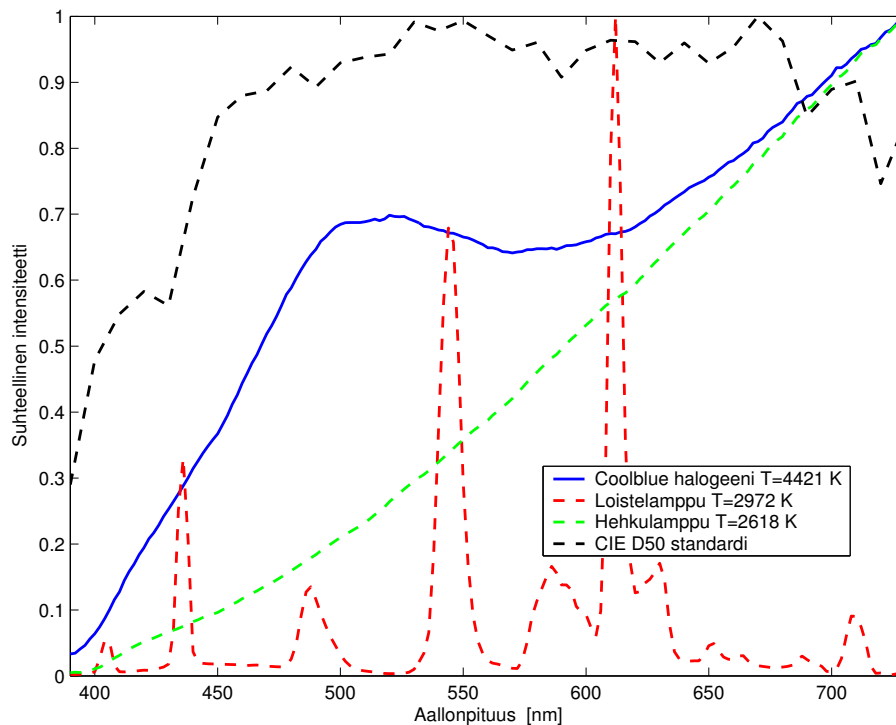
Kuva 13: Loistelampun välkkyminen kamerapuhelimella kuvattuna

Jos matkapuhelimeen integroituja kameroita käytetään yleensä loistelampun valossa tai ulkovalaistuksessa, on värien toiston kannalta mittauksissa järkevämpää käyttää ulkovalaistuksen mukaista valoa. Silloin värit saadaan toistumaan paremmin. Valon värin kannalta loistelampun valo olisi helpompi toteuttaa, mutta silloin kohteen värit eivät toistuisi niin hyvin.

4.2 Valittu mittausympäristö

Mittaushuoneena käytettiin Viestintätekniikan laboratorion täysin pimennettävää huonetta hallittavuuden vuoksi. Mittaustilanteessa valonlähteinä olivat ainoastaan valitut ja mitatut valaisimet. Valaisinten spektrit mitattiin PhotoResearch PR-703 spektrometrillä, jotka ovat esitettynä kuvassa 14.

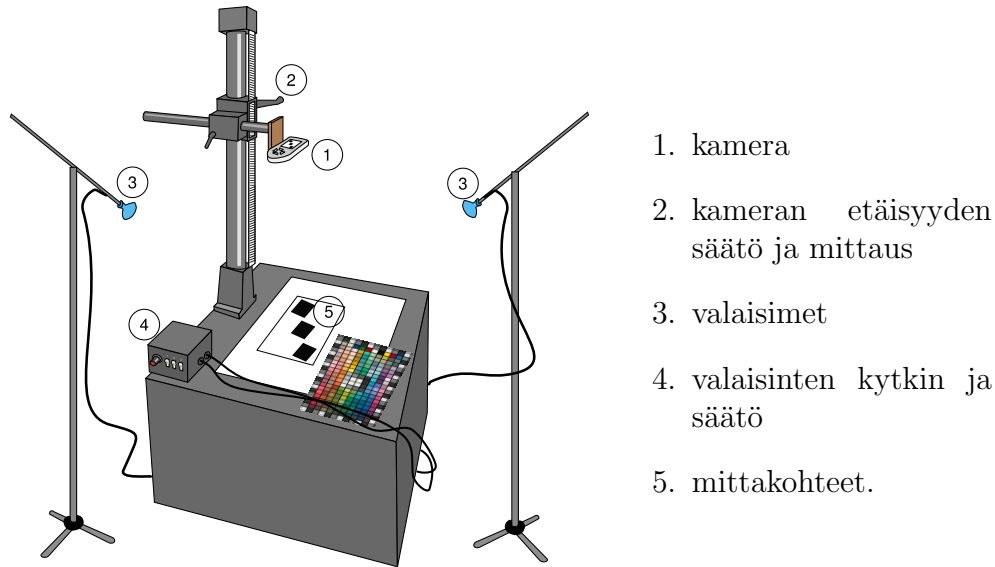
Kameroiden karakteroinnissa käytetty ISO12233 -mukainen erottelukyvyn mitaus ei määrittele valaistusta. Mittaushuoneen valaistukseksi valittiin ulkovalaistuksen mukainen spektri eli CIE D50 -spektri [5], sillä se on jatkuva ja silti mahdollinen toteuttaa laboratorio-olosuhteisiin.



Kuva 14: Osram Coolblue 50W Halogeenilampun spektri verrattuna kahteen yleiseen lamppuun ja D50 standardivalaisimeen

Mittaushuoneen valaisimeksi valittiin Osram CoolBlue suodatettu halogeenilamppu, jonka värilämpötila on valmistajan mukaan 4500 K. Kuvaajasta 14 nähdään kyseisen halogeenilampun mitattu spektri ja värilämpötila. Jos optimispektri on kuvaajassa näkyvä CIE D50-spektri, on käytetty CoolBlue -valaisin kahdesta muusta vaihtoehdosta lähimpänä sitä. Hehkulamppun spektri on liian matala pienillä taajuuksilla, eli siinä on suhteessa paljon enemmän keltaisia ja punaisia värejä. Loistelampun spektri taas on katkonainen, jolloin värit eivät toistu oikein.

Kuvan 15 mukaista mittauspöytää käytettiin kameroiden kiinnittämiseen paikalleen ja etäisyyden määrittämiseen kohdekuvasta. Valkoisen paperin heijasta-



Kuva 15: Kameroiden mittaukseen käytetty ympäristö.

ma luminanssi oli $142 \frac{cd}{m^2}$. Valaistusvoimakkuus vastaa toimistopöydän valaistusta, joka on hieman heikko hyvien kuvien ottamiseen. Valaistusvoimakkuuden pienuus johtuu siitä, että fyysisesti pienillä valonlähteillä pitää valot sijoittaa kauas kuvattavasta tasosta, jotta saadaan tarpeeksi tasainen valaistus. Valaistusarvot pysyivät 10% päässä keskimääräisen luminanssin arvosta koko alueella.

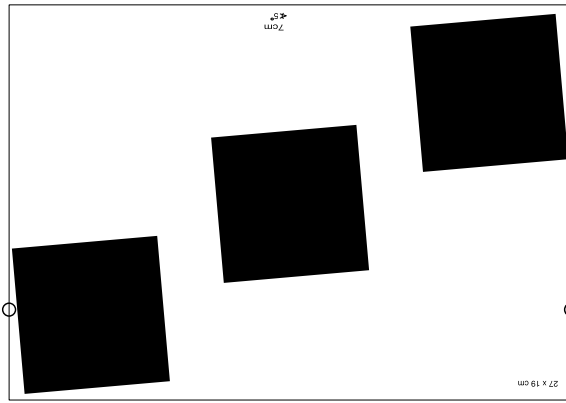
4.3 Mittauksessa käytetyt kuvat

Kameran erottelukyvyn mittaukseen käytettiin kuvan 16 vinoneliökuviota, jollainen määritellään standardissa ISO 12233 [21]. Modulaationsiirtofunktion laskentaan käytettiin Slant Edge Analysis Tool sformat versio 2.1 -ohjelmaa, jonka on kirjoittanut Peter Burns [3]. Kuvio tulostettiin HP deskjet 5850 -tulostimella. Tulostuksen tarkkuus ei aiheuta ongelmaa, koska jopa yhden megapikselin kame-roilla pikselin leveys ei riitä kuvaamaan tulostimen aiheuttamaa epätarkkuutta. Pikselin kokoa on havainnollistettu kuvassa 17.

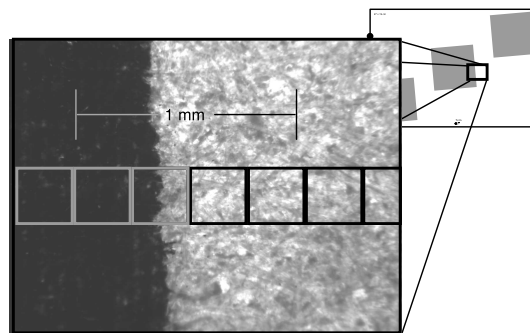
Värien mittaamiseen käytettiin värikarttaa GretagMachbeth ColorChecker DC, jollainen on esitelty kuvassa 18. Kaikkien värikartan värien La^*b^* -arvot ovat ennalta määritetty.

4.4 Tutkitut kamerat

Tutkimuksessa käytetyt kamerapuhelimet valittiin saatavuuden ja suosion perusteella. Vuoden 2004 maailman markkinajohtajalta, Nokialta [28] oli saatavilla



Kuva 16: Kameran erottelukyvyn mittauksessa käytetty kuva.



Kuva 17: Tulostusjälki on riittävää. Pikselit keskiarvoistavat epätarkan alueen.



Kuva 18: Kameran väriavaruuden mittauksessa käytetty kuva.

mallit 3650, 6670, 7610, 7650 ja 9500. Toiseksi merkiksi valittiin Sony Ericsson, jonka P800 malli Tekniikan Maailman 2003 teettämän vertailun [59] mukaan oli yhtä hyvä Nokia 3650:n kanssa. Sony Ericsson on myös hyvin suosittu Suomessa. Tutkimukseen saatiin mitattavaksi mallit P800 ja P900. Kolmas valmistaja oli Samsung, jonka mallia E710 käytettiin mittauksissa. Myös Samsung on suosittu puhelinvalmistaja Suomessa. Puhelinten kuvaamisominaisuuksiin liittyviä arvoja on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1: Puhelinten kuvausominaisuudet

Malli	Tarkkuus	Muita huomioita
Nokia 3650	640 · 480	
Nokia 6670	1152 · 864	
Nokia 7610	1152 · 864	
Nokia 7650	640 · 480	
Nokia 9500	640 · 480	
Sony Ericsson P800	640 · 480	Valkotasapaino säädettävissä. Käytettiin automaattia.
Sony Ericsson P900	640 · 480	Sama kuin edellä.
Samsung E710	640 · 480	

4.5 Kokeen kulku

Kamerat aseteltiin yksi kerrallaan mittapöytään, kuten kuvassa 15. Kameran kiinnittäminen paikoilleen esti tärähdyksien aiheuttamat kuvavirheet, ja samalla voitiin mitata kuvausetäisyys.

Kuvista irroitettiin vinoja reunoja sisältävät kohdat ja ne syötettiin Slant Edge Analysis Tool -ohjelmaan 2.0:aan. Pystysuoria ja vaakasuoria reunoja esittävät kuvat syötettiin ohjelmaan ja niistä laskettiin erilliset arvot.

Värikartta kuvattiin samalla kertaa. Kuvasta irroitettiin kuusi värialueita, jotka edustavat väriavaruuden kylläisiä äärilaitoja. Väriarvot muutettiin $L^*a^*b^*$ -väriavaruuteen MATLAB®-ohjelmalla. Ohjelma oletti, että RGB-muotoinen värien lähtöarvo on sRGB -standardoitua ja D50 valkotasapainoitettua. Kumpikaan näistä oletuksista ei toteudu, mutta voidaan olettaa, että tulospäriarvot ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia, vaikkeivät olekaan absoluuttisesti oikeita väriarvoja.

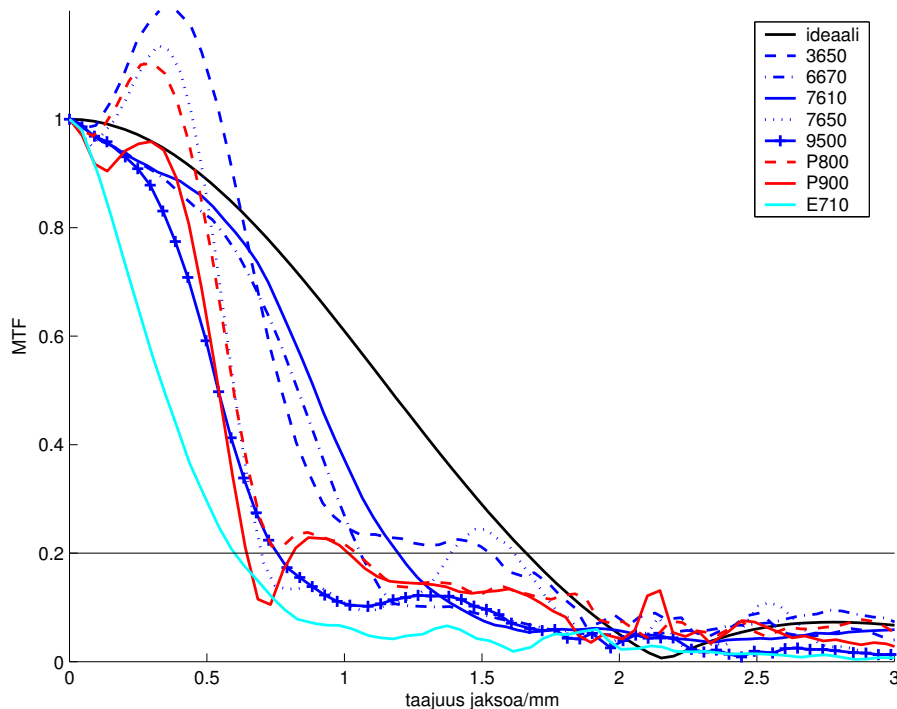
5 Kameroiden mittauksen tulokset

5.1 Kameroiden tarkkuus

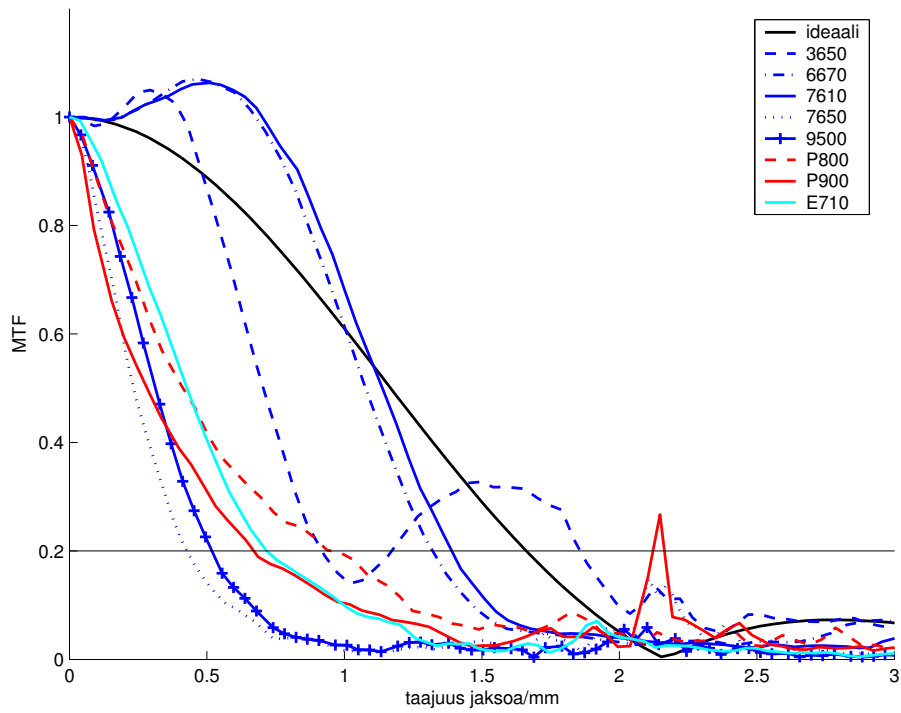
Vaakasuuntainen modulaationsiirtofunktio kuvaa kameran tarkkuutta vaakasuunnassa. Kuva 19 sisältää kameroiden modulaationsiirtofunktiot vaakasuunnassa kuvan keskellä. Kuvaajan vaaka-akselin yksikkö on siniaallon jaksoa millimetrimillä ja pysty akseli on modulaationsiirtofunktion arvo kyseisellä taajuudella. Pystysuuntaisen modulaationsiirtofunktion tulokset ovat kuvassa 20. Modulaationsiirtofunktiot laskettiin liitteen A kuvien avulla käyttäen sfrmat-ohjelmaa [3]. Kuvaajiin on piirretty vaakasuora viiva modulaation 0.2 kohdalle, jonka avulla voidaan vertailla eri kameroiden erottelun raja-arvoa. Usein arvona käytetään pienempää 0.1 tai 0.05 modulaatiotasoa, mutta tässä tapauksessa niin pienellä arvolla tuloksista olisi tullut vaikeita vertailla.

Kuvaajissa on esitettyä myös ideaalinen tapaus, joka on saatu mittaamalla tietokoneella tuotettu $640 \cdot 480$ pikselin kuva täysin virheettömästä mittauskuvasta. Se on ideaalinen vain kyseisellä kuvan tarkkuudella, ja käyrän kaarevuus olisi huomattavasti loivempi megapikselitarkkuudella.

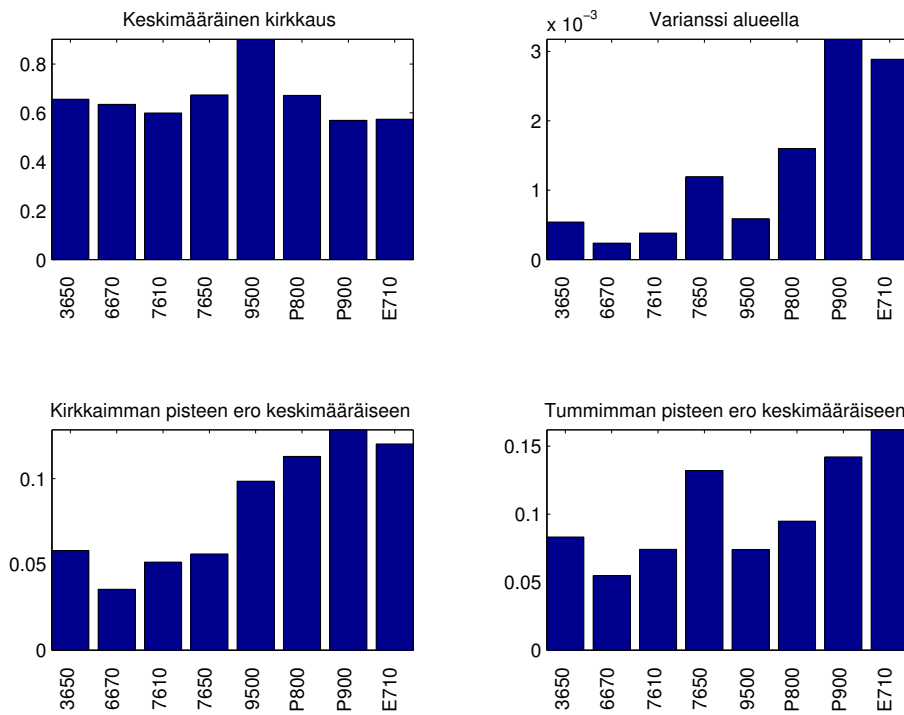
Kameroista laskettiin myös kohina-arvot, mitattuna kohdekuvan valkoiselta pinnalta. Valkoisen alueen keskimääräinen kirkkaus ja kohinan arvo eli kirkkausarvojen varianssi on esitetty kuvaajassa 21.



Kuva 19: Kameroiden MTF:t vaakasuunnassa



Kuva 20: Kameroiden MTF:t pystysuunnassa

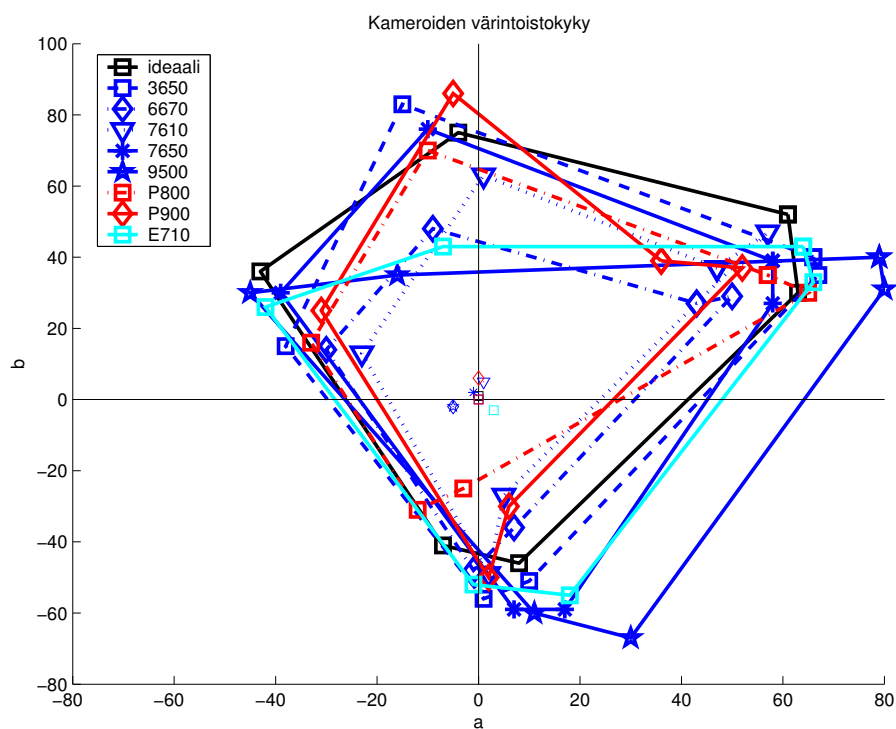


Kuva 21: Kameroiden kohinat

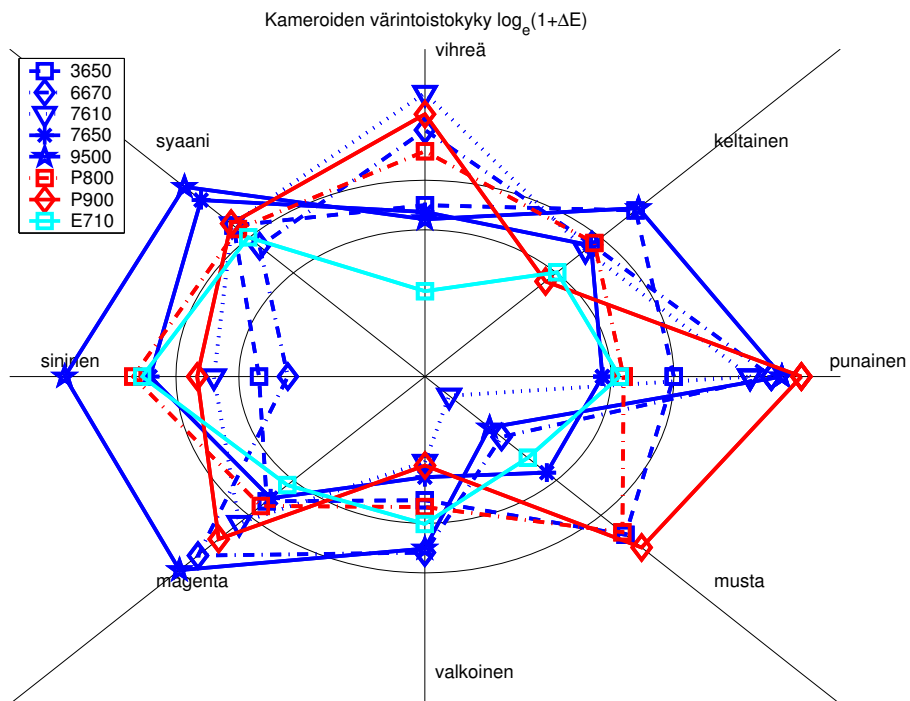
5.2 Kameroiden värintoisto

Kameroiden RGB-arvot eri testikentissä on muutettu a^*b^* -koordinaatistoon kaavojen 8 ja 9 mukaisesti. Kuvaaja 22 on siten painoteollisuudessa käytetyn gamutkartan vastine digitaalimaailmassa. Origin läheisyydessä on kameroiden antamat arvot valkoiselle värille. Väriarvot laskettiin liitteen B kuvista.

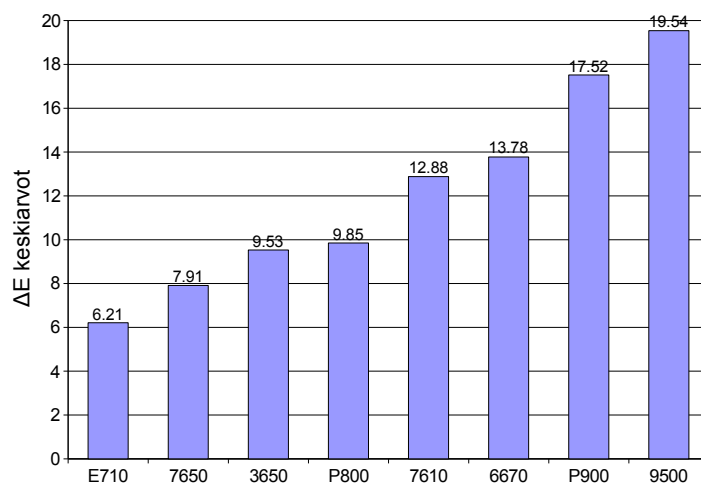
Kuvaajassa 23 on laskettu väriero kameran ilmoittaman värin ja oikean värin välille kaavan 10 mukaisesti. Lukuarvoista on otettu logaritmi pienien etäisyyksien erojen kasvattamiseksi. Kuvaajaan on merkitty renkailla etäisyydet $\Delta E = 5$ ja $\Delta E = 10$. Keskiarvo kaikista värieroista kullakin kameralla on esitetty kuvaajassa 24.



Kuva 22: Kameroiden värintoisto



Kuva 23: Kameroiden värintoisto värieron logaritmina



Kuva 24: Kameroiden värieröjen keskiarvot

6 Kameroiden mittaustulosten tarkastelu

6.1 Kameroiden tarkkuus

Tulosten mukaan, kuten kuvaajasta 19 voidaan päätellä, huonoimmat kamerat saavuttavat modulaationsiirtofunktion arvon 0.2 noin kuvataajuudella 0.7 sinin jaksoa millimetriä kohti. Toinen keskittymä on noin taajuudella 1.15 jaksoa/mm.

Ideaalissa tapauksessa nähdään, että arvo 0.2 saavutetaan vasta taajuudella 1.66 jaksoa/mm. Tämän perusteella kamerapuhelimet säilyttävät kuvainformaation tarkkuudesta noin 47% — 70%. Parhaimmankin mitatun $640 \cdot 480$ pikselin tarkkuuksisen kameras kuvan informaation voi siis esittää $3/4$ pikselimäärällä, eli 480 pikseliä vaakasuunnassa. 480 pikselin kuvan leveyttä voidaan pitää huonoimman mahdollisen kamerapuhelimen kuvan tarkkuuden arvona.

Käyristä nähdään myös, että muutamissa kameroissa on ohjelmallista terävyyden korostusta, joka ilmenee käyrän arvon yksi ylityksenä. Terävöitys aiheuttaa korostusta pääosin matalilla taajuuksilla, jolloin korkeammilla taajuuksilla olevat modulaation 0.2 raja-arvot ovat vaikutusalueen ulkopuolella.

Mittakuvan valkoiselta alueelta mitatut kohina-arvot osoittavat, että kuvat ovat lähes yhtä kirkkaimiksi valottuneita, lukuunottamatta Nokian 9500 -mallia. Kuvan ylivalotus pienentää kohinaa valkoisella alueella ja heikentää reunan tarkkuutta. Kyseisen kameras modulaationsiirtofunktio ei siis ole luotettavaa tarkkuutta. Kameroiden kohinat ovat hyvin erilaisia voimakkuuksiltaan. Variansseja tarkastelemalla kohinoiden ero on suurimmillaan noin kuusinkertainen, joka on merkittävä ero.

6.2 Kameroiden värintoisto

Kuvaajien 22 ja 23 mukaan kameroiden värintoistokyky on epätarkkaa. Yli viiden ΔE värieroarvoja voidaan pitää ihmissilmin hyvin havaittavina [12]. Kuvaajasta ei voida todeta, että kameroilla olisi taipumusta siirtää värejä tiettyyn suuntaan, vaan kameroiden värit hajaantuvat eri suuntiin satunnaisesti. Pientä tendenssiä sinisen suuntaan³² on kuitenkin havaittavaisissa punaisissa ja vihertävissä väreissä. Kameroiden väriavaruuksien kokokin vaihtelee paljon: pienin on Nokian 6670:lla ja suurin on Nokian 9500:lla. Jälkimmäinen ei kuitenkaan toistanut kylläisiä keltaisia yhtä hyvin kuin muut kamerat. Valkoinen väri toistuu hyvin kaikilla kameroilla, eli niiden valkotasapainon säätö toimi käytetyssä valaistuksessa. Valkoiset

³²negatiivinen b-akseli

värit eivät eronneet yli $\Delta E = 10$ oikeasta valkoisesta.

Kameroiden väreistä voidaan yleisellä tasolla sanoa, että ne ovat vääristyneitä. Värien säätäminen oikeiksi vaatii esimerkiksi ICC-profilin käyttöä, ja näiden tulosten perusteella jokaiselle kameralle pitäisi tehdä oma profiilinsa. Saman profiilin käyttäminen kaikilla kameroilla ei toimi, sillä värit muuttuvat eri kameroilla eri suuntiin.

7 Kuvien subjektiivisen laadun arviointi

7.1 Kuvamateriaali

Kuvia valittiin sellaisista kategorioista, joiden edustamia aikakauslehtiä kuluttajien lähettämät kuvat voisivat kiinnostaa. Kuvia haettiin seuraaviin kategorioihin: harraste & vinkki-, kattaus-, loma-, myynti-, paparazzi- ja tilannekuva.

Tarkkuuden arvioinnissa käytettiin 19 kuvaa Photos.com³³ kuva-arkistosta. Ne valittiin pseudosatunnaisesti siten, että joka kategoriaan tuli lähes yhtä monta kuvaa ja kuvat eivät olleet keskenään saman näköisiä. Kuvien alkuperäistarkkuus oli 2400 kuvapistettä pidemmän akselin suuntaan. Kuvat on esitetty liitteessä C. Kuvat otettiin arkistosta siksi, että tarkoituksena oli nähdä huomataanko tarkkuuden kasvu kuvissa. Lähtötasona pidettiin kamerapuhelinten nykytarkkuutta, ja vertailukuvat olivat sitä tarkempia. Tarkempia kuvia ei olisi voitu ottaa nykyisillä kamerapuhelimilla. Lisäksi, Viestintäteknikan laboratoriolta oli voimassa oleva lisenssi Photos.com-arkiston kuviin.

Värillisyyden arvioinnissa käytettiin 17 kamerapuhelimella otettua kuvaa. Kuvia otettiin alunperin 76 ja niistä valikoitiin kategorioihin sopivat kuvat. Kuvien tarkkuus oli 640 kuvapistettä pidemmän akselin suunnassa. Kuvat on esitetty liitteessä D. Kuvat otettiin Nokian 3650 ja 7650 kamerapuhelimilla.

7.2 Kuvien käsittely

7.2.1 Tarkkuuden arviointi

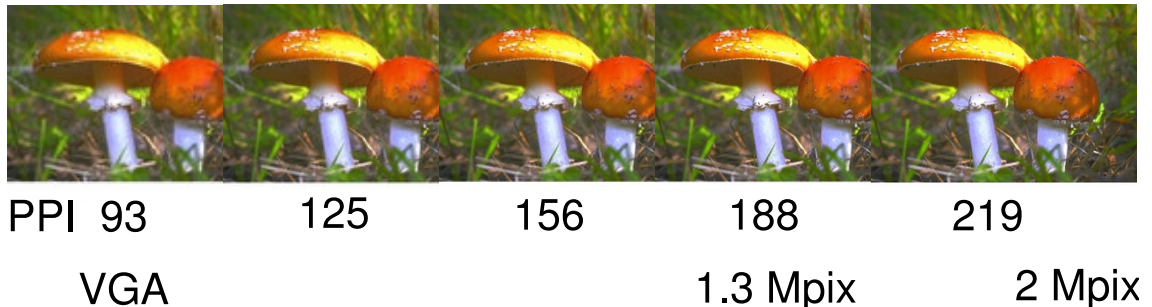
Alkuperäiset kuvat olivat arkistosta otettuja 2400 pikselin levyisiä kuvia. Kuvat pienennettiin viiteen eri tarkkuuteen siten, että kuvien leveyksiksi tuli 480, 640, 800, 960 ja 1120 pikseliä. Alin tarkkuus valittiin kameramittausten perusteella ja ylin reprodusioammattilaisen suosituksen mukaisen riittävän tarkkuuden perusteella [49]. Kun kuvat tulostettiin $13\text{ cm} \cdot 9.75\text{ cm}$ kokoon, ne olivat painotarkkuudeltaan 93, 125, 156, 188 ja 219 PPI. Tarkin kuva voi sisältää enimmillään 4.3 sinisignaalin jaksoa millimetriä kohti. Ihmisen näkökyvyn maksimierottelukyky 35 cm katseluetäisyydellä on 5.2 jaksoa millimetriä kohti, mutta kohina ja valaistusolot heikentävät erottelukykyä merkittävästi [41].

Kuvia käsiteltiin muistuttamaan enemmän kamerapuhelinten kuvan ominaisuuksia [45]:

³³<http://www.photos.com/>

- Kontrastia pienennettiin ja väriarvoihin lisättiin vakio ylivalottumisen tekemiseksi.
- Kuvan reunoja tummennettiin ympyräsymmetrisesti, millä mukailtiin vignettiefektiä.
- Kuvaan lisättiin laikullisuuskohinaa³⁴.
- Kuvaa ylivalotettiin arcus sin -funktiolla.
- Erittäin valoisten alueitten läheisyyteen lisättiin sinisten värien arvoa.
- Kasvatettiin värien saturaatiota HSV-väriavaruudessa (kaava 12).
- Kuvaa alipäästettiin³⁵ siten, että kuvan reunoilla sumennus on voimakkaampaa.
- Kuvat talletettiin JPEG -tiedostoiksi laadulla 65/100.

Liite F sisältää käsittelyyn käytetyn Matlab-ohjelman. Kuvassa 25 on yhdestä kuvasta edellä kuvatulla tavalla luotu viisi eri tarkkuuksista versiota. Kuvat on pienennetty vastaamaan todellista painotarkkuutta, sillä oikeat kuvat ovat 13 cm leveitä, kun taas kuvassa 25 ne ovat 3.52 cm leveitä. Versiot ovat hieman lomittain.



Kuva 25: Yhden kuvan viisi eri tarkkuusversiota. Kuvat on pienennetty vastaamaan oikeaa painotarkkuutta eli PPI-lukua. Alla on lueteltu kameroiden pikselimääriä, joilla pitäisi kameramittausten mukaan saada kuvia kyseisillä tarkkuuksilla.

³⁴speckle

³⁵sumennettiin

7.2.2 Värillisyyden arviointi

Värinkorjausta varten kolmeen olosuhteeseen tehtiin ICC-profiilit. Olosuhteet olivat: loistelamppu, aurinkoinen sää ja pilvinen sää. Profili tehtiin GretagMacbeth Eye-One 1.2-ohjelmistolla³⁶ käyttäen värikarttana Eye-One Scan Target 1.4. Profili liitettiin kuvaan käyttämällä Little CMS 1.13 ohjelmaa³⁷. Kuvan värit konvertoitiin sRGB-profiiliin käyttäen havainnollista ICC-muunnosalgoritmia, koska kuvat sisälsivät paljon kirkkaita värejä. Alkuperäisiin ja profiloituihin kuviin käytettiin automaattista värienparannusohjelmaa AutoFX Autoeye 1.0³⁸. Ohjelmalla muutettiin automaattisesti vain väriarvoja. Terävöitystä tai muita parannustoimenpiteitä ei tehty, vaikka ohjelma mahdollistaakin niiden tekemisen. Kuvat yhdistettiin tulostusta varten Inkscape 0.41:llä³⁹ SVG-muotoisena, jolloin itse kuviin ei koskettu, mutta kuvat voitiin silti tulostaa yhdelle paperille. Ennen varsinaista tulostusta kuvat muutettiin PDF-muotoon GhostScript 8.01⁴⁰ versiolla, PDF-asetuksilla ”/prepress”, jolloin kuvia ei pakata uudestaan, eikä niiden väriavaruuksiin kosketa.

Kuvassa 26 on esimerkki yhdestä kuvasta, jonka värejä on säädetty edellä kuvatulla tavalla, jolloin saadaan yhteensä neljä versiota samasta kuvasta. Testin kuvat olivat 10 cm leveitä. Tulostusleveys valittiin hieman pienemmäksi tarkkuuden tarkasteluun verrattuna, sillä kuvat otettiin kamerapuhelimilla, joiden tarkkuus on vaatimaton. Pienempi koko sopi myös siksi, että saatiin tulostettua kaikki 4 eri versiota samalle paperille.

7.3 Kuvien tulostaminen

7.3.1 Tulostuspaperi

Paperiksi valittiin kiiltävän aikakauslehden pintaa muistuttava Stora Enson Art 4CC. Paperi on neliömassaltaan 130 g/m^2 ja se on päällystetty ja kalanteroitu.

7.3.2 Tulostuslaitteisto

Kuvien tulostuksessa käytetty tulostin oli HP Color LaserJet 5550 PS. Tulostin profiloitiin GretagMacbeth Eye-One 1.3 -ohjelmistolla käyttäen värikarttaa i1 RGB 1.5. Tulostimen tarkkuus oli 600 DPI, ja sen katsottiin vastaavan hy-

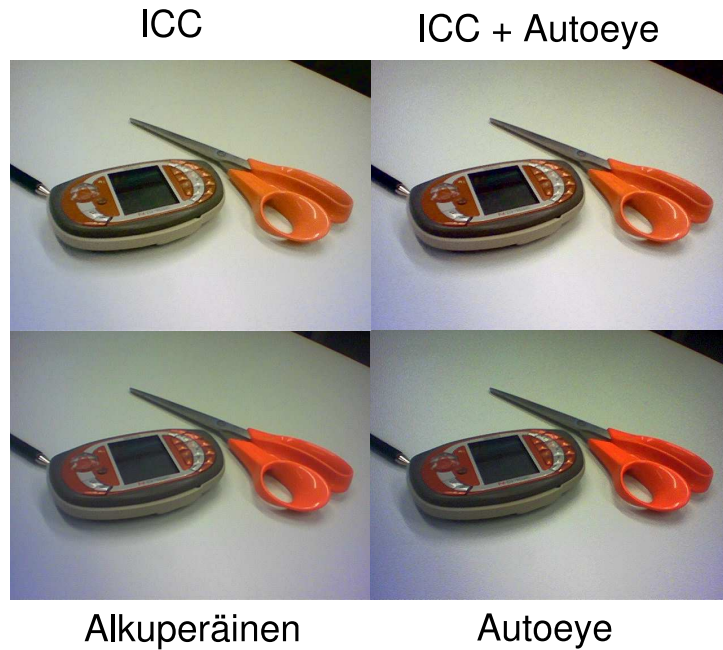
³⁶<http://intl.ilcolor.com/>

³⁷<http://www.littlecms.com>

³⁸<http://autofx.com>, osia kehitetty Viestintäteknikan laboratoriossa

³⁹<http://www.inkscape.org/>

⁴⁰<http://www.cs.wisc.edu/~ghost/>



Kuva 26: Yhden kuvan neljä eri väriversiota. ICC tarkoittaa profiloitua ja Autoeye automaattisen värinparannusalgoritmin muuttamaa kuvaa.

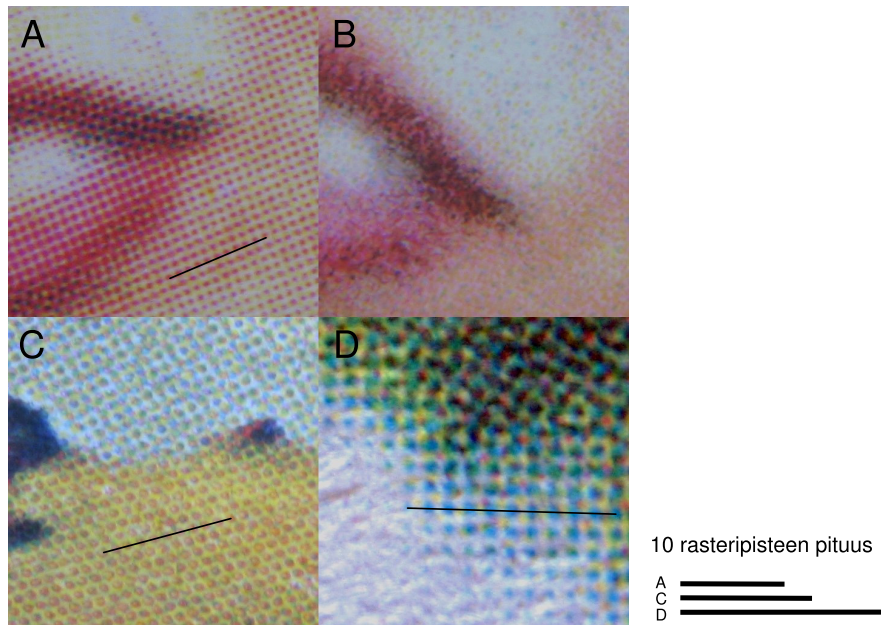
vän aikakauslehden tarkkuutta. Rasterikuviointia verrattiin kahden mahdollisen tulostimen sekä aikakauslehden ja sanomalehden välillä. Valitun tulostimen rasterointi oli samantyyppistä kuin esimerkkinä käytetyssä aikakauslehden painatuksessa. Rasterikuvioita on esitelty kuvassa 27. Valitun tulostimen rasterien välinen etäisyys on hieman lyhyempi kuin esimerkin aikakauslehden, mikä tarkoittaa, että tulostimen painotarkkuus on vähän suurempi kuin aikakauslehden.

7.4 Arviointiympäristö

Kuvia arvioitiin Viestintäteknikan laboratorion tiloissa. Huone oli äänieristetty ulkoisilta häiriöiltä. Pöytätaaso, jolta koehenkilöt katsoivat kuvia, oli valaistu $200 \frac{cd}{m^2}$ luminanssilla. Valaistus vastaa normaalia työpöydän valaistustasoa [53]. Kuvia ympäröivän alueen väritys oli tasainen ja vaalean harmaa. Ympäristön valaisu tehtiin 3000 K värisillä loistelampuilla, joiden värinvalaistusindeksi $R > 80$.

7.5 Koehenkilöt

Arviointiin osallistui yhdeksän aikakauslehtien tavalliseksi kuluttajiksi luonnehdittavaa henkilöä. Koehenkilöiden taustojen selvittämiseksi tehtiin kysely. Heidän ikänsä keskiarvo oli 30.3 vuotta ja keskihajonta 9.6. Kellään ei ollut havaittu värinäön heikentymiä. Kahden näköä oli korjattu normaaliksi silmälaseilla. Koe-



A - HP LJ 5550, B - Epson Stylus 2100
C - Katso -lehti, D - Etelä-Suomen sanomat

Kuva 27: Esimerkkirasterikuvioita. Kokeessa käytetty tulostin A riittää tarkkuutensa puolesta aikakauslehden painotarkkuuden mallintamiseen. Toisena vaihtoehtona olisi voitu käyttää tulostinta B, jonka rasterikuvio on stokastinen ja siten tuottaisi visuaalisesti liian eri näköisen kuvan verrattuna aikakauslehtiin.

henkilöistä puolet lukivat kyselyn perusteella yhden kokonaisen aikakauslehden viikossa ja toinen puoli kahdesta kolmeen lehteä viikossa. Kun koehenkilöiltä kysyttiin: “Kiinnitättekö kuvanlaatuun huomioita lukiessanne lehteä?”, yhtä lukuunottamatta he kaikki vastasivat kyllä. Yleisimmin luetut lehdet olivat: Tieteen kuvalehti(2), Kodin kuvalehti(2), Helsingin sanomien kuukausiliite(3), Anna(2), Mikrobitti(2), Tiede(2) ja Avotakka(2).

7.6 Kokeen kulku

7.6.1 Yleistä

Koehenkilöt kutsuttiin yksitellen koetilaan. Heille annettiin tehtäväksi arvioida kuvien laatua tarkkuuden ja värien oikeellisuuden suhteen. Kaksi erillistä koetta suoritettiin peräjälkeen. Ohjeet tehtäviin annettiin juuri ennen kyseisen tehtävän aloittamista.

7.6.2 Tarkkuuden arviointi

Koehenkilölle kerrottiin taustatarinaksi, että hän on toimittaja aikakauslehdessä ja on liittämässä kirjoittamaansa juttuun sopivaa kuvaa. Lehti on siihen sopivan kuvan alan ammattilaisjulkaisu. Koehenkilöille kerrottiin: ”Edessäsi on viisi lähes samalta näyttävää kuvaa. Niihin on liitetty satunnainen numero ja jokaiselle kuvalle satunnainen kirjain. Tehtävänä on arvioida kuvan tarkkuutta. Järjestä viisi kuvaa tarkkuusjärjestykseen epätarkimmasta tarkimpaan, luettele sitten kuvien kirjaimet samassa järjestyksessä sekä sen kuvan kirjain, joka on mielestäsi riittävän tarkka aikakauslehtikäyttöön.”

Koehenkilö järjesti kuvan viisi eri versiota edessään olevalle pöydälle tarkkuusjärjestykseen, ilmoitti järjestyksen ja riittävän tarkan kuvan kirjaimen kokeenpitäjälle. Koe suoritettiin kaikilla 19 eri kuvalla. Kuvien esitysjärjestys sekoitettiin koehenkilöiden välillä.

7.6.3 Värillisyyden arviointi

Koehenkilölle kerrottiin ohjeeksi: ”Annan nähtäväksi kaksi kuvaa kerrallaan. Valitse kuvaparista se, jonka värit näyttävät oikeammilta väreiltä ja sano sen kirjain. Kirjaimet on annettu kuville satunnaisesti.”

Koetilanteessa kokeenpitäjä antoi kuvista 2 versiota kerrallaan koehenkilölle vertailtavaksi. Koska yhdestä kuvasta oli 4 versiota, oli vertailtavana 6 paria yhdestä alkuperäisestä kuvasta. Koe suoritettiin 17 kuvalle, joiden esitysjärjestys oli satunnainen. Myös yhden kuvan eri versioiden järjestystä varioitiin.

7.7 Tulosten käsittely

7.7.1 Tarkkuuden arviointi

Järjestetyistä kuvista laskettiin Bartlesonin esittämällä tavalla niiden tarkkuuksien sijaluvut. Menetelmä on esitelty kappaleessa 3.2.2. Lisäksi laskettiin eri koehenkilöiden järjestämien versioiden otoshajonta ja järjestyshajonta, jotka kertovat, kuinka yksimielisiä koehenkilöt olivat version sijoituksesta.

Sijalukujen ja kuvien oikeiden tarkkuusjärjestysten osuminen yhteen kertoo, että koehenkilöt osasivat järjestää kuvat oikein. Oikein järjestettyjen kuvien määrä kertoo siis, kuinka hyvin tietty kuvantarkkuus erotettiin muista.

Koehenkilöt ilmoittivat aikakauslehden riittävän laadun tarkkuuden, mutta he eivät itse tienneet, olivatko järjestäneet kuvat oikeaan järjestykseen. Siten riittävälle tarkkuudelle saatiin kaksi eri arvoa: version oikea tarkkuus ja sijaluku, mo-

nenneksiko koehenkilö merkitsi kyseisen version. Koehenkilön antamaa sijalukua käsiteltiin tarkkuutena, johon oikea sijaluku viittaa. Jos siis koehenkilö ilmoitti toiseksi tarkimman kuvan olevan riittävä, vaikka kuvan oikea tarkkuus onkin tarkin versioista, merkittiin riittäväksi painatustarkkuudeksi 219 PPI ja riittäväksi järjestystarkkuudeksi 188 PPI. Painatustarkkuuksista ja järjestystarkkuuksista laskettiin keskiarvot ja otoshajonnat. Edelleen niistä laskettiin normalisoidut skaalat siten, että koehenkilöiden omien vastausten keskiarvo on 0 ja otoshajonta 1. Normalisoinnilla pyrittiin poistamaan koehenkilöiden väliset erot tarkkuuden havaitsemisessa. Normalisoidussa skaalassa arvo 0 vastaa tarkkuuksien keskiarvoa.

7.7.2 Värillisyyden arviointi

Parivertailun tulokset käsiteltiin Bartlesonin ehdottamalla tavalla, joka on esitelty kappaleessa 3.2.2. Vertailutiedoista laskettiin kullekin värinkorjausmenetelmälle arvostuskaala, joka kuvaa, kuinka konsistentisti koehenkilöt olivat tietyn menetelmän kannalla.

Arvostuskaala laskettiin myös yksittäisille kuville. Tuloksissa havaittiin tietyn säännön mukaista ryhmitystä, joten arvostuskaalat laskettiin vielä erikseen kyseisille ryhmille. Laskentatapa oli sama kuin kaikille kuville, mutta joukkoon otettiin vain tiettyä ominaisuutta sisältäneet kuvat.

8 Subjekttiivisen arvioinnin tulokset

8.1 Tarkkuuden arviointi

Koehenkilöiden antamat arvioit kuvanlaadun riittämisestä on listattu taulukossa 2. Arvot ovat keskiarvoja kaikkien koehenkilöiden vastauksista. Normalisoiduissa sarakkeissa jokaisen henkilön vastaukset on normalisoitu keskiarvoon 0 ja varianssiin 1, jotta päästään eroon henkilöiden välisistä eroavaisuuksista. Painatustarkkuuksia vastaavat skaalat on lueteltu taulukossa 3. Riittävässä kuvanlaadussa S -sarake kertoo painatustarkkuudeksi riittävien arvojen keskiarvon. J -sarake kertoo koehenkilöiden tekemän järjestyksen mukaisesta valinnasta, eli järjestystarkkuudesta. Painatustarkkuuksien ja järjestystarkkuuksien välinen korrelaatiokerroin $R = 0.50$ (heikko korrelaatio).

Taulukko 2: Riittävä kuvanlaatu eri kuville. S -sarakkeet ovat kuvien painatustarkkuuksia ja J -sarakkeet koehenkilöiden tekemiä järjestyksiä. Alaindeksi ka tarkoittaa keskiarvoa, kh keskihajontaa ja $norm$ koehenkilön oman keskiarvon perusteella normalisoitua skaalaa.

Kuva	S_{ka}	S_{kh}	S_{norm}	J_{ka}	J_{kh}	J_{norm}
1	170	35.6	-0.308	170	47.5	-0.0212
2	174	35.6	-0.0543	149	43.9	-0.733
3	180	43.7	0.205	172	41.2	0.261
4	180	37.9	-0.0187	156	44.5	-0.337
5	156	38.6	-0.652	146	35.2	-0.839
6	184	29.2	0.233	177	27.3	0.135
7	177	31.5	-0.107	174	42	-0.0332
8	170	47.5	-0.154	177	41.7	0.23
9	191	36.8	0.429	194	30.6	0.864
10	191	36.8	0.323	170	52.5	0.28
11	191	29.2	0.305	163	41	-0.123
12	170	44.9	-0.475	160	55.6	-0.1
13	177	54.6	-0.108	163	58.5	0.063
14	194	26.2	0.553	188	27.3	0.472
15	191	33.2	0.515	188	31.5	0.416
16	199	28.9	0.557	168	50.3	0.103
17	160	40	-0.626	163	41	-0.252
18	166	22.3	-0.369	177	22.3	-0.0135
19	184	45.9	-0.183	160	48.9	-0.376
Kaikki	179	37.4	0	169	41.9	0

Taulukon 2 normalisoiduista skaaloista piirrettiin kuva 28. Kuvan pystyakseli kertoo miten tarkka kuvan pitää olla, jotta se hyväksytään aikakauslehtikäyttöön.

Taulukko 3: Tarkkuusarvioinnin painatustarkkuuksien ja normalisoidujen skaalojen yhteys.

PPI	93	125	156	188	219
Skaala	-2.3	-1.46	-0.62	0.23	1.07

Keltataustaisella alueella on valitun kuvan painatustarkkuuden mukaan järjestetyt kuvat ja vihertaustaisella on koehenkilön antaman sijaluvun mukaan järjestetyt kuvat. Kuvien sijoituksella vaakasuunnassa ei ole merkitystä.

Taulukon 4 järjestysmatriisista on laskettu keskiarvosijoitus jokaiselle painatustarkkuusnäytteelle eli PPI:lle. Otoshajonta kertoo kuinka yksimielisesti järjestys on pysynyt samana koehenkilöiden ja koekuvien välillä. Pieni hajonta tarkoittaa, että koehenkilöt ovat olleet samaa mieltä. Järjestyshajonta on hajonta oikean valinnan suhteen, eikä otoksen keskiarvon suhteen, kuten otoshajonnassa. Järjestyshajonnat on laskettu kaavalla 17. Lisäksi taulukkoon on laskettu oikein järjestettyjen painatustarkkuuksien osuudet. Yksittäisten kuvien oikein järjestämisen osuudet on lueteltu taulukossa 5. Järjestysmatriisia luetaan siten, että ensimmäisen tulossarakkeen luvut tarkoittavat kuinka monta kertaa 93 PPI kuvat järjestettiin ensimmäiseksi eli tarkimmaksi (1 kerta), toiseksi (4 kertaa), kolmanneksi (12 kertaa) ja niin edelleen. Toisen sarakkeen tulokset ovat vastaavasti 125 PPI kuvien järjestyksiä.

Taulukko 4: Tarkkuusarvioinnin järjestysvertailun tulokset kaikilla kuvilla

Sijanro	PPI				
	93	125	156	188	219
1	1	4	7	34	122
2	4	17	30	84	33
3	12	35	81	33	7
4	15	95	36	17	5
5	136	17	14	0	1
Keskiarvo	4.67	3.62	3.12	2.2	1.39
Otoshajonta	0.76	0.89	0.94	0.88	0.76
Järjestyshajonta	0.83	0.97	0.95	0.9	0.85
Oikein	0.81	0.57	0.49	0.5	0.73

Taulukko 5: Tarkkusarvioitujen kuvien järjestäminen. Prosenttiosuus kuvaa, kuinka monta kertaa kukin painatustarkkuus järjestettiin oikealle paikalleen.

Kuvanro	PPI [% oikein]				
	93	125	156	188	219
1	67	22	33	44	78
2	44	44	56	56	78
3	88	100	75	50	63
4	100	67	56	44	44
5	89	44	33	67	89
6	67	33	44	67	78
7	78	44	44	67	100
8	67	67	22	44	78
9	89	44	44	67	78
10	78	67	44	56	89
11	89	44	44	56	67
12	89	67	67	33	78
13	89	56	44	33	56
14	67	67	44	33	44
15	89	44	22	44	67
16	88	88	63	63	88
17	78	44	56	56	89
18	100	78	67	44	67
19	88	63	63	25	50

8.2 Värillisyyden arviointi

Tulostaulukon 6 lukuarvot kertovat, kuinka monta kertaa koehenkilö valitsi kahdesta kuvasta toisen värien perusteella oikeammaksi. Siten valittuun kuvaan käytetty värinparannusmenetelmä saa pisteen. Menetelmissä 3650 tarkoittaa alkuperäistä kuvaa, ICC tarkoittaa valaistukseen sopivan ICC-profiilin käyttöä, AE tarkoittaa automaattisen värinparannusohjelman Autoeyen käyttöä ja I+A tarkoittaa ICC-profiilin ja automaattisen värinparannusohjelman käyttöä. Otsikkorivi kertoo oikeamman värin saavuttaneen menetelmän nimen ja vasen otsikkosarake poikkeavamman värin aiheuttaneen menetelmän nimen. Log-matriisin arvot on laskettu kaavalla 16.

Taulukko 6: Värillisyyden arvioinnin tulokset kaikilla kuvilla. Log-skaalan summa kuvaa menetelmän hyvyttä suhteellisenä laadun numeerisena arvona.

	3650	ICC	AE	I+A
3650	0	93	50	71
ICC	38	0	35	37
AE	81	96	0	92
I+A	60	94	39	0
Log-matriisi				
3650	0	0.89	-0.48	0.17
ICC	-0.89	0	-1.00	-0.92
AE	0.48	1.00	0	0.85
I+A	-0.17	0.92	-0.85	0
Log-skaala				
	3650	ICC	AE	I+A
Summa	-0.58	2.81	-2.33	0.09
Sija	3	1	4	2

Yksittäisten kuvien värien oikeellisuuksien arvioinnit ovat taulukossa 7. Lukuarvon suuruus kuvaa koehenkilöiden yksimielisyyttä jonkin menetelmän paremmuuden suhteen. Negatiivinen suuri luku kertoo, että koehenkilöt kokivat yksimielisesti menetelmän huonommaksi. Mikäli kaikki luvut ovat lähellä nollaa, koehenkilöt eivät nähneet eroja kuvien välillä ja he valitsivat kuvat satunnaisesti parivertailussa.

Kuvan 29 tarkastelussa huomattiin, että tietyn tyyppiset kuvat sijoittuvat eri kohtiin eri menetelmillä. Esimerkiksi lehtivihreää sisältävät kuvat ovat lähestulkoon omana ryhmänään. Kuvat ryhmiteltiin lehtivihreää sisältäviin kuviin (numerot 4,5,6,7,11,12) ja kuviin joissa ei ole lehtivihreää. Jaottelu tehtiin visuaalisesti siten, että kuvat, joissa on näkyvillä vähänkin lehtiä tai nurmea valittiin lehtivih-

Taulukko 7: Yksittäisten kuvien värien oikeellisuus Log-skaaloina. Suurempi skaala kertoo vastaajien yksimielisyydestä jonkin menetelmän paremmuuden suhteen. Negatiivinen skaala tarkoittaa yksimielisyyttä menetelmän huonommuuden suhteen.

Kuva	3650	ICC	AE	I+A
1	-2.70805	6.20456	-8.12415	4.62764
2	-0.78846	3.04325	-2.14422	-0.11058
3	-2.56495	2.06142	-1.60944	2.11296
4	2.32969	4.74424	-4.74424	-2.32969
5	2.56495	-0.95551	2.56495	-4.17439
6	-4.44265	4.89464	-5.66643	5.21444
7	2.56495	1.40750	-2.06142	-1.91102
8	-0.00000	0.90397	0.95551	-1.85948
9	-0.95551	2.86653	-2.36301	0.45199
10	1.60944	1.60944	-4.17439	0.95551
11	-1.29109	1.82823	-0.78846	0.25131
12	3.21068	0.28583	0.25131	-3.74782
13	-0.95551	4.24071	-0.45199	-2.83321
14	1.15745	3.01693	-4.17439	0.00000
15	-3.92307	6.88244	-4.42570	1.46634
16	-4.05699	5.21444	-7.27586	6.11841
17	-3.01693	3.52046	-0.95551	0.45199

reiden ryhmään. Näiden kahden ryhmän parivertailun tulokset ovat taulukossa 8. Myös ulkona otettujen kuvien havaittiin muodostavan ryhmiä. Ulkokuvia olivat kuvat numero 2, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14 ja 17. Ulko ja sisäkuvien erillinen parivertailun tulos on esitetty taulukossa 9.



Kuva 29: Värillisyyssarviointin kuvat järjestettynä taulukon 7 mukaiseen järjestykseen pystysuunnassa. Vaakasunnalla ei ole informatiivista merkitystä. Taustan värit tarkoittavat värinparannusmenetelmiä: punainen-alkuperäinen, vihreä-ICC, tummansininen-Autoeye ja vaaleansininen-ICC+Autoeye

Taulukko 8: Värillisyyden arvioinnin tulokset jaoteltuna nurmi- tai lehtivihreäkuviin ja muihin kuviin

Lehtivihreää				
	3650	ICC	AE	I+A
3650	0	27	16	18
ICC	19	0	18	11
AE	30	28	0	27
I+A	28	35	19	0
Log-matriisi				
3650	0	0.34	-0.61	-0.43
ICC	-0.34	0	-0.43	-1.13
AE	0.61	0.43	0	0.34
I+A	0.43	1.13	-0.34	0
Log-skaala				
	3650	ICC	AE	I+A
Summa	0.7	1.9	-1.39	-1.22
Sija	2	1	4	3

Ei lehtivihreää				
	3650	ICC	AE	I+A
3650	0	66	34	53
ICC	19	0	17	26
AE	51	68	0	65
I+A	32	59	20	0
Log-matriisi				
3650	0	1.23	-0.4	0.5
ICC	-1.23	0	-1.36	-0.81
AE	0.4	1.36	0	1.16
I+A	-0.5	0.81	-1.16	0
Log-skaala				
	3650	ICC	AE	I+A
Summa	-1.32	3.4	-2.93	0.85
Sija	3	1	4	2

Taulukko 9: Värillisyyssarviointin tulokset kuvaryhmille jaoteltuna ulkona otettuihin ja sisällä otettuihin kuviin

Ulkokuvat				
	3650	ICC	AE	I+A
3650	0	54	38	35
ICC	31	0	28	20
AE	47	57	0	52
I+A	50	65	33	0
Log-matriisi				
3650	0	0.55	-0.21	-0.35
ICC	-0.55	0	-0.7	-1.16
AE	0.21	0.7	0	0.45
I+A	0.35	1.16	-0.45	0
Log-skaala				
	3650	ICC	AE	I+A
Summa	0.01	2.41	-1.36	-1.06
Sija	2	1	4	3

Sisäkuvat				
	3650	ICC	AE	I+A
3650	0	39	12	36
ICC	7	0	7	17
AE	34	39	0	40
I+A	10	29	6	0
Log-matriisi				
3650	0	1.66	-1.02	1.25
ICC	-1.66	0	-1.66	-0.52
AE	1.02	1.66	0	1.83
I+A	-1.25	0.52	-1.83	0
Log-skaala				
	3650	ICC	AE	I+A
Summa	-1.89	3.84	-4.51	2.55
Sija	3	1	4	2

9 Subjekttiivisen arvionnin tulosten tarkastelu

9.1 Tarkkuuden arviointi

Kuvien järjestämisellä tarkkuusjärjestykseen pyrittiin selvittämään hyväksyttävä rajatarkkuus kamerapuhelinten kuville. Menetelmänä järjestysvertailua käytettiin siten, että oletettiin kuvien muuttuvan niin tarkoiksi, ettei niitä enää erota toisistaan. Tällöin niiden järjestäminen vaikeutuu ja syntyy enemmän virheitä. Lisäksi koehenkilöiltä kysyttiin, mikä on riittävä kuvanlaatu aikakauslehteen painettavaksi.

9 koehenkilön ja 19 kuvan yli keskiarvoistettuna riittävä kuvan painatustarkkuus on 179 PPI ($\sigma = 37.4$) taulukon 2 mukaisesti. Koehenkilöiden tekemien tarkkuusjärjestysten perusteella he kuitenkin valitsivat riittäväksi tarkkuudeksi hieman pienemmän, eli 169 PPI ($\sigma = 41.9$). 13 cm kuvanleveydellä tehtyihin kameramittauksiin suhteutettuna painatustarkkuudet vastaavat hieman alle 1.3 megapikselin kameroiden kuvan tarkkuutta.

Tarkkuusarviointista lasketuista taulukoista selvitettiin, millä painatustarkkuudella tapahtuu eniten virheitä, milloin eroja muihin tarkkuuksiin ei enää nähdä. Koska oletuksena on, että suurin osa kuvista järjestetään oikein ja loput jakautuvat oikean vaihtoehdon ympärille, voidaan tutkia jakaumien leveyksiä. Mikäli jakauma oikean vaihtoehdon ympärillä on leveä eli hajonta on suuri, on tapahtunut paljon virheitä.

Taulukosta 4 voidaan lukea, että suurin otoshajonta $\sigma_{156PPI} = 0.94$ saavutettiin keskimmaisella painatustarkkuudella eli 156 PPI:tä. Järjestyshajonta samalla tarkkuudella oli $\sigma_{j156PPI} = 0.95$, joka ei kuitenkaan eroa suurimmasta ja kolmanneksi suurimmasta järjestyshajonnasta $\sigma_{j125PPI} = 0.97$ ja $\sigma_{j188PPI} = 0.9$ tilastollisesti ($F_{j125vs156} = 1.043, p_{j125vs156} = 0.61; F_{j156vs188} = 1.114, p_{j156vs188} = 0.76; N_1 = N_2 = 168$). Oletusten vastaisesti hajonta ei kasvanut tarkempiin painatustarkkuuksiin siirryttäessä, vaan tarkin ja epätarkin pääty pystyttiin järjestämään suurimmalla varmuudella. Eniten virheitä oikeasta järjestyksestä tehtiin 156 PPI tarkkuudella, jolla vain 49% järjestysnumeroista osui oikealle sijalle. Ei ole selvää, miksi tarkimman ja epätarkimman järjestämisessä onnistuttiin hyvin, mutta se saattaa johtua järjestysvertailun sopimattomuudesta tämän tyyppiseen tutkimukseen.

Sijoittamalla kuvat koordinaatistoon, hyväksyttävän tarkkuuden mukaiseen järjestykseen, kuten kuvassa 28, ei synny selkeää kuvien välistä ryhmittelyä. Kuvat, joissa on suuria sinertäviä alueita tai muuten yksivärisiä pintoja, kuten tai-

vasta, ovat sijoittuneet koordinaatistossa suuriin arvoihin. Suuret arvot tarkoittavat, että kuvat pitää painaa suurella tarkkuudella, jotta ne hyväksyttäisiin. Koordinaatiston toisesta päästä löytyy kuvia, joissa on ruskeita ja vihreitä sävyjä, eikä paljonkaan teräviä reunoja. Poikkeuksia kuitenkin molempiin tapauksiin löytyy.

9.2 Värillisyyden arviointi

Kaikkien kuvien yli otetuilla keskiarvoilla ICC-profilin läpi viedyt kuvat tuottivat oikeimmat värit. Toisella sijalla olivat ICC-profiloinnin ja automaattisen värinparannuksen läpikäyneet kuvat. Toiseksi huonoimmaksi jäivät alkuperäiset kuvat ja pelkästään automaattisen värinparannuksen läpikäyneet kuvat saivat huonoimmat arvosanat. Taulukon 6 mukaan ICC-profilin avulla korjatut kuvat voittivat muut melko yksimielisesti. 393 parivertailusta ne voittivat 283 vertailua, eli noin 72%.

Kun jokainen kuva järjestettiin kunkin menetelmän suosion mukaiseen järjestykseen, kuten kuvassa 29, huomattiin, että sisällä otetut kuvat muodostavat jokaisella menetelmällä oman ryhmänsä. Poikkeuksen muodosti kuva numero 3, jossa on keltainen kananmunan muotoinen kynttilä, sillä se ei sijoittunut samaan ryhmään muiden sisäkuvien kanssa. Esimerkiksi alkuperäisissä kuvissa sisällä otetut kuvat ovat kaikki arvostuksessa viimeisinä ja ICC-profililla korjattuina ne ovat huipulla. Kaikkien sisällä otettujen kuvien värien oikeellisuus kasvaa kummallakin ICC-profilointiin perustuvalla menetelmällä. Sisäkuvien väriääritymät johtunevat kameran säädöistä. Kamera on voitu säätää toistamaan värit paremmin ulkotilanteissa.

Kuvat, joissa on lehtivihreää, muodostivat oman ryhmänsä. Alkuperäisissä kuvissa ne valittiin oikeimman värisiksi, poislukien kuvat numero 6 ja 11. ICC-profilin avulla säädettynä värien oikeellisuus ei laske paljon, jotkut kuvat jopa nousevat asteikossa. Kuva numero 5 on ainoa paljon vihreää sisältävä kuva, jonka värien oikeellisuus laski huomattavasti ICC-profiiliin siirryttäessä. Sen sijaan automaattinen värinparannus ei paranna vihreää sisältäviä kuvia.

Lehtivihreän oikean värin muistamiseen liittyy todennäköisesti muistivärit. Taivaan sininen, ihon väri ja lehtivihreä ovat vahvoja muistivärejä. Ne kaikki muistetaan värikylläisempinä kuin ne on oikeasti ovat [1, 2, 14]. Tästä saattaa johtua alkuperäisten vihreää sisältävien kuvien valitseminen oikeammaksi väriksi. ICC-profilin avulla korjatut kuvat olivat selkeästi väriltömämpiä kuin alkuperäiset. ICC-profilin tarkoitus on luoda värintoisto, joka spektrofotometrillä mit-

taamalla vastaa tulostusmediaan suhteutettuna alkuperäistä valon spektriä. Korjatut kuvat voivat siten olla lähempänä oikeaa väriä, minkä muissa tapauksissa koehenkilöiden valinnat osoittivat. Vihreän tapauksessa koehenkilöt kuitenkin muistivat, että värikylläisempi olisi oikeampi väri.

Taulukoihin 8 ja 9 on laskettu kuvien saamat värien oikeellisuudet edellä esiteltyihin kuvaryhmiin jaettuna. Kaikilla menetelmillä ICC-profiilin käyttäminen pysyy keskiarvoisesti parhaana vaihtoehtona. Kuvilla, joissa ei ollut lehtivihreää tai jotka oli otettu sisällä, menetelmien järjestys säilyi samana kuin kaikkien kuvien kanssa laskettuna. ICC-profiilin käytön hyöty korostui lehtivihreättömissä sekä sisällä otetuissa kuvissa. Sen sijaan vihreää sisältävät ja ulkona otetut kuvat muuttivat menetelmien järjestystä. Alkuperäiset kuvat nousivat värien oikeellisuudessa toiselle sijalle: tämä tukee muistivärien osuutta värien oikeellisuuden havaitsemisessa.

9.3 Arvioinnin luotettavuus

9.3.1 Tarkkuuden arvioinnin luotettavuus

Tuloksista poistettiin kolmen kuvan arvioinnit näppäilyvirheiden takia. Arvioinniteja jäi kuitenkin 168 kappaletta, joten poistamiset eivät vaikuttaneet tuloksiin merkittävästi.

Kun otetaan keskiarvo kaikista kuvista, kuten taulukossa 4, huomataan, että keskimäärin koehenkilöiden asettama järjestys säilyy samana kuin kuvien tarkkuusjärjestys. Jos keskiarvot otetaan jokaisesta kuvasta erikseen, joukosta erottuu viisi kuvaa, joilla järjestys ei pysy samana. Kuvat ovat numeroiltaan 1, 2, 8, 15 ja 17. Virhe syntyy pääosin painatustarkkuuksien 125 PPI ja 156 PPI välillä. Koehenkilöistä vain yksi järjesti keskiarvoisesti koko koetilanteen läpi 125 PPI ja 156 PPI tarkkuudet ristiin. Järjestämisissä ei syntynyt systemaattista tai muuta niin suurta virhettä, että kuvia tai koehenkilöitä olisi pitänyt jättää pois tuloksista.

Vaikka koehenkilöiden välillä ei syntynyt epäjärjestelmällisyyttä, tarkkuuden arvioinnin tulokset on syytä ottaa varauksella. Saatu 179 PPI keskiarvotarkkuus riittäväksi painatustarkkuudeksi on hajonnaltaan niin suuri ($\sigma = 37.4$), ettei sitä voi pitää täysin luotettavana raja-arvona. Tarkkuuden arvioinnin subjektiivisen kokeen kaikkiin mitattaviin suureisiin tuli huomattavan paljon hajontaa, aina $\max(\sigma) = 54.6$ saakka. Jos valinnat ovat normaalijakautuneita, tarkoittaa kyseinen hajonta, että 68% valituista tarkkuuksista on 124 ja 234 PPI välillä. Koska kyseessä on valinta viidestä tarkkuudesta, eikä jatkuvasta lukujoukosta,

eivät normaalijakautuneeseen tilastollisuuteen perustuvat menetelmät anna varmoja tuloksia.

Lisää varmuutta olisi voinut saada lisäämällä painatustarkkuusvaihtoehtojen määrää, mutta samalla koehenkilötestien työmäärä lisääntyy ja koehenkilöiden kannalta testitilanteesta tulisi liian raskas. Valitut PPI-tasot olisi voinut myös valita siten, että pikselin koko muuttuu lineaarisesti. Tehdyllä koejärjestelyllä, jossa PPI-tasot kasvavat lineaarisesti, yksittäisen pikselin koko pienenee $\frac{1}{PPI}$ mukaisesti, eli koon muutos pienenee, mitä suuremmilla PPI-tasoilla liikutaan. Lineaarisella pikselin koon muutoksella olisi saatu suurempia eroja tarkimpien painatustarkkuuksien välille.

9.3.2 Värillisyyden arvioinnin luotettavuus

Parivertailun tuloksista jouduttiin poistamaan 24 vertailua näppäilyvirheiden takia. Yksi koehenkilöistä ei osallistunut värillisyyden arviointiin. Kaikkiaan vertailuja saatiin 786.

Sisällä otetuista kuvista saavutettiin parempia arvoja ICC-profiloituna kuin ulkona otetuista. Tulos voi johtua siitä, että kamera itsessään toimii paremmin ulkona, jolloin säätämättömät sisäkuvat vaativat enemmän korjauksia. Toinen mahdollisuus on, että sisävalaistusolosuhteet ovat vakioimmat, eli yleinen ICC-profiili sisätilaan mahdollistaa tarkemman värintoiston. Ulko-ICC-profililit oli tehty aurinkoiselle säälle ja pilviselle. Todellisuudessa näiden välimuotoja ja eri olosuhteita on lukemattomasti: yleinen profiili ulkovalaistukseen ei ole yhtä sopiva kuin sisävalaistukseen.

Värillisyyсарvioinnissa koehenkilöiden valinnat olivat samansuuntaiset. Jotkut heistä olivat koherentimpia valinnoissaan, eli kuvien saamat laatuarvot saivat suurempia eroja. Keskiarvoisesti jokaisen koehenkilön tuloksista lasketut menetelmien saamat värien oikeellisuusarviot ovat kuitenkin samat.

Koetilanteessa kysyttiin, kumpi kuvista sisältää oikeampia värejä. Se on eri asia kuin värien miellyttävyys. Joillekin koehenkilöille on saattanut olla vaikeaa pitää nämä käsitteet erillään, ja paremmaksi on saatettu ilmoittaa miellyttävämpi kuva. Tämä on saattanut johtaa esimerkiksi vihersävyisten kuvien menestykseen suoraan kamerasta otetuilla kuvilla ja automaattisen väriparannusohjelman läpikäyneillä kuvilla, joissa värien kylläisyys on suurempi. Toistaalta tulokset voivat vääristyä myös muistivärien takia, sillä ihmiset muistavat lehtivihreän kylläisempänä värinä, kuin mitä se oikeasti on.

10 Johtopäätökset

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, ovatko nykypäivän kamerapuhelimet riittäviä aikakauslehtikäyttöön kuvan laadun kannalta. Taustatyönä selvitettiin, mitä kuvan laadulla tarkoitetaan ja valittiin sopiva määritelmä. Lopulliset laatumääreet olivat kuvan terävyys ja väritasapaino. Kuvan terävyys ilmenee kuvan tarkkuutena, eli pienimpänä yksityiskohtana, jonka kuva voi toistaa. Väritasapaino ilmenee kuvan värien oikeellisuutena. Objektivisena arvona kuvan tarkkuus mitattiin modulaatiosiirtofunktion avulla ja värien oikeellisuus mitattiin testivärien a^*b^* -arvojen avulla.

Kuvan tarkkuuden riittävyyden tutkimuksissa selvitettiin, että mittausten mukaan kamerapuhelinten optiikka vie parhaimmillaan noin 25% pikselimäärän tarkkuussisällöstä. 13 cm levyiseksi painettuna 179 pikseliä tuumalle on riittävä painotarkkuus. Tarkkuus vastaa 1.3 megapikselisen kameran kuvaa. Mitä pienempi kuva on painettuna, sitä pienempi pikselimäärä vaaditaan samaan tarkkuuteen. 7.5 cm levyinen kuva vaatii vain VGA-tarkkuuden, eli 640 pikseliä päästäkseen samaan painotarkkuuteen. Kuvan fyysisen koon vaikutus hyväksyttävään kuvan tarkkuuteen ei välttämättä kulje lineaarisesti ja vaatisi siten lisätutkimuksia.

Koehenkilöiden arvioissa oli paljon hajontaa. Kuvan tarkkuuksien osalta saatiin tuloksena numeerinen arvo 179 PPI, mutta se ei ole kovin luotettava. Osasyynä luotettavuuden heikkouteen oli menetelmävalinta. Järjestysvertailu ei soveltunut suoraan parivertailun korvaajaksi, kuten kirjallisuuden mukaan olisi voinut päätellä [6].

Ammattilaisen mielipiteen mukaan riittävä tarkkuus oli 230 PPI [49]. Koska puhelimeen integroitujen kameroiden linssisysteemi ja muu tekniikka huonontaa kuvan tarkkuutta, pitää painatustarkkuutta lisätä. Kameroiden mittaustulosten mukaan noin 75% kameran resoluutiosta on efektiivistä, eli ammattilaismielipiteeseen suhteutettuna kamerapuhelimen kuvien painatustarkkuus pitäisi nostaa 307 PPI asti. Luku eroaa huomattavasti koehenkilötesteissä saadun 179 PPI:n riittävästä tarkkuudesta.

Kamerapuhelinten värintoisto on heikkoa, ja eri kamerat näyttävät toistavan värejä hyvin eri tavalla. Värintoisto vaatii kamera- ja valaistusolo kohtaista ICC-profilointia, ja koehenkilöt olivat vahvasti samaa mieltä ICC-profiilien paremmuudesta muihin valittuihin menetelmiin verrattuna. Kokeiltu värinparannusohjelma ei auttanut värien oikeellisuuden saavuttamisessa. Koehenkilötestien mukaan ulkokuvauksessa käytetty kamera pärjäsikin hyvin. Sisällä kuvatessa ICC-profiilien positiivinen vaikutus oli huomattavasti suurempi.

Koska ICC-profilin käyttäminen näyttäisi kaikissa tapauksessa olevan paras ratkaisu, kannattaa tuoda esiin tosiasia, että kussakin kuvassa käytettiin valaistukseen sopivaa ICC-profilia. Kuvasta itsestään ei voida automaattisesti selvittää, mikä valaistus on ollut kyseessä. Tarvittaisiin ihminen tai semantiikkaa ymmärtävä tietokone, joka päättäisi kuvan sisällön perusteella minkätyyppinen valaistus on vallinnut kuvaustilanteessa. Vaihtoehtoisesti ongelman ratkaisisi henkilö, joka valitsee esimerkiksi valmiiksi erilaisten profiilien muuttamista kuvista oikeimmalta näyttävän. Koehenkilötesteissä ei otettu huomioon, kuinka oikeat värit saisi väärällä profiililla korjattu kuva suhteessa muokkaamattomaan, alkuperäiseen kameran kuvaan. Lisäksi kameramittausten mukaan näyttäisi, että eri kameramalleille pitäisi tehdä eri profiilit. Profiilit voitaisiin tehdä valmistajien toimesta, jolloin valmistajan nimi voitaisiin lukea profiilin liittämisen yhteydessä automaattisesti kuvan EXIF-otsikkotiedoista.

Käytettyä automaattista värinparannusohjelmaa ei tule tulosten pohjalta käyttää värien oikeaksimuuttamiseen. Ohjelman tarkoitus on parantaa värejä ihmissilmälle miellyttävämmäksi, eikä yrittää luoda kolorimetristä arvausta kuvan oikeista väreistä. Oikeista väreistä voi säätää miellyttävät värit, mutta miellyttävistä väreistä ei voi päätellä, mitkä ovat olleet oikeat värit.

Viitteet

- [1] C.J. Bartleson ja F. Grum, *Optical radiation measurements*, Academic Press inc. Orlando, Florida, 1984.
- [2] P. Bodrogi ja T. Tarczali, *Investigation of colour memory in colour image science*, John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- [3] P. Burns, *Slant edge analysis tool sfrmat 2.0*, Maaliskuu 2005, <http://www.i3a.org/downloads.html>.
- [4] T. Chen, *Digital camera system simulator and applications*, Ph.D. thesis, Stanford University, 2003.
- [5] CIE, *Recommendations on colorimetry 15.2*, Commission Internationale de L'Eclairage, 1986.
- [6] C. Cui, *Comparison of two psychophysical methods for image color quality measurement: Paired comparison and rank order*, IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference, 2000.
- [7] J. S. Goddard D. N. Sitter ja R. K. Ferrel, *Method for the measurement of the modulation transfer function for sampled imaging systems from bar-target patterns*, Applied Optics **Vol 34** (1995), sivut 746–751.
- [8] James W. Davis ja Mubarak Shah, *Recognizing hand gestures.*, ECCV **1** (1994), sivut 331–340.
- [9] Taloussanomien Digitoday, *Kamerapuhelinten suosio nosta digikameramyyntiä*, Taloussanomien (1.9.2005), sivu 7.
- [10] M. Opher-Lipson E. Levy, D. Peles ja S. G. Lipson, *Random target method of measuring modulation transfer function*, Applied Optics **Vol 38** (1999), sivut 679–683.
- [11] Mark D. Fairchild, *Color appearance models*, 2nd ed., Wiley, 2005.
- [12] B. Fraser, C. Murphy ja F. Bunting, *Värin hallinta*, IT Press, 2003.
- [13] W. Fulton, *A few scanning tips*, 6th ed., Omakustanne, 2005, <http://www.scantips.com/>.
- [14] E. B. Goldstein, *Sensation and perception*, 6th ed., Wadsworth, 2002.

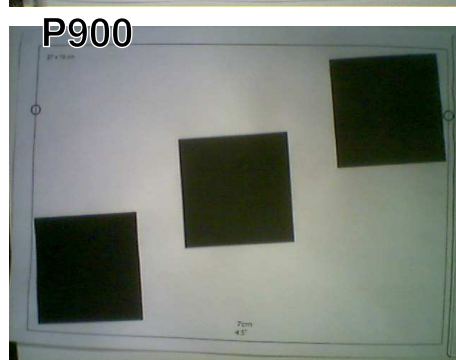
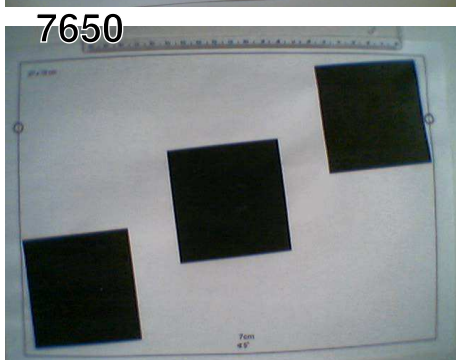
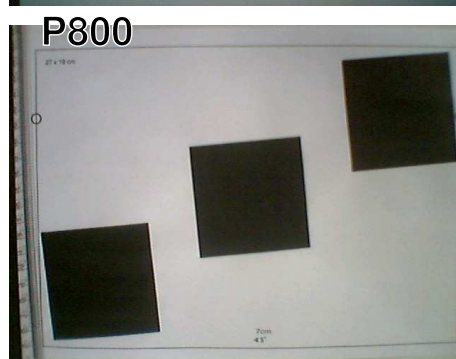
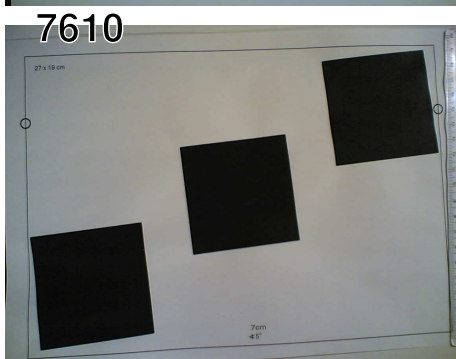
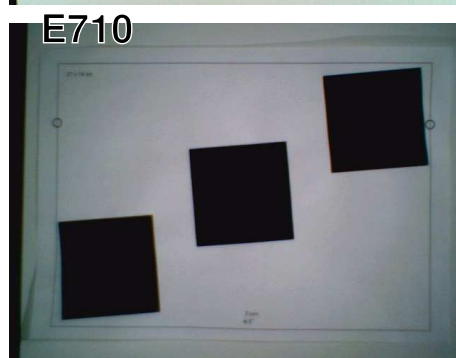
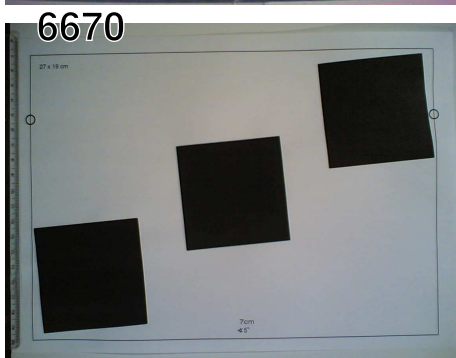
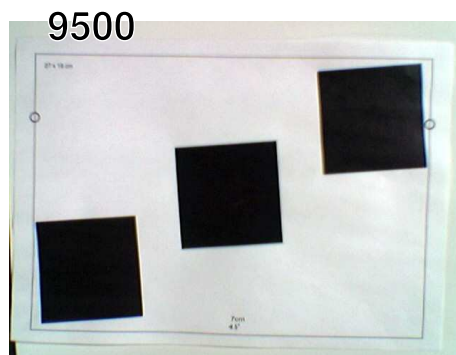
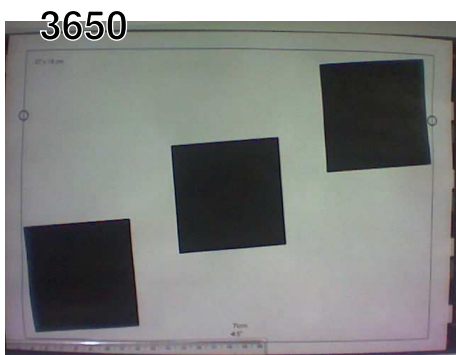
- [15] R. Gonzales ja R. Woods, *Digital image processing*, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [16] L. Halonen ja J. Lehtovaara, *Valaistustekniikka*, Otatieto, 1992.
- [17] E. Hamilton, *Jpeg file interchange format*, 1992, <http://www.w3.org/Graphics/JPEG/jfif.txt>.
- [18] Jannick P. Polland Harrision H. Barrett, Jie Yao ja Kyle J. Myers, *Model observers for assessment of image quality*, Images of Science: Science of Images **90** (1993), sivut 9758–9765.
- [19] R. W. G. Hunt, *Measuring colour*, 3rd ed., Fountain Press, 1998.
- [20] IEC, *Iec 61966-2-1 1999. multimedia systems and equipment - colour measurement and management - part 2-1: Colour management - default rgb colour space -srgb*, International Electrotechnical Commission, 1999.
- [21] ISO/FDIS, *12233:1999(e)*, International Organization for Standardization, New York, 1999.
- [22] ITU, *Itu-r bt.601 studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*, International Telecommunication Union, 1995.
- [23] T. W. M. Janssen, *Computational image quality*, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1999.
- [24] J. Kaijärvi, *Mitä näit tänään?*, Uutislehti 100 (22.8.2005), sivu 2.
- [25] B. Keelan, *Handbook of image quality: Characterization and prediction*, Marcel Dekker, 2002.
- [26] Pekka Kekolahti, *Digitaalinen rasterointi*, Report, Helsingin teknillinen korkeakoulu, 1983.
- [27] Kodak, *Kodak courses*, Kesäkuu 2004, Saatavilla <http://www.kodak.com/US/en/digital/dlc/book3/index.shtml>.
- [28] O. Koistinen, *Kamerapuhelinten suosio ei pelota digitaalikameroiden valmistajia*, Helsingin sanomat (13.5.2005), sivu B1.
- [29] J. Korpi-Anttila, *Automatic colour enhancement and scene change detection*, (2003).

- [30] P. Koskinen, *Hyvä painotuote*, Inforviestintä OY, 2001.
- [31] P. Laininen, *Tilastollisen analyysin perusteet, otatieto 597*, Otatieto, 2000.
- [32] X. Li, *Blind image quality assesment*, International Conference on Image Processing **1** (2002), sivut 449 – 452.
- [33] S. Lindberg, *Perceptual determinants of print quality*, Stockholm University, Department of Psychology, 2004.
- [34] B. Lindbloom, *Useful colour equations*, Maaliskuu 2005, <http://www.brucelindbloom.com/>.
- [35] M. Luxen ja W. Förstner, *Characterizing image quality: Blind estimation of the point spread function from a single image*, PCV02, 2002, p. A: 205.
- [36] Pierre Magnan, *Detection of visible photons in ccd and cmos: A comparative view*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A** (2003), sivut 199–212.
- [37] K. Matsuno ja S. Tsuji, *Recognizing human facial expressions in a potential field*, Proceedings of the 12th IAPR International. Conference on Pattern Recognition **2** (1994), sivut 44–49.
- [38] J.C. Mullikin, L.J. van Vliet, H. Netten, F.R. Boddeke, G. van der Feltz ja I.T. Young, *Methods for ccd camera characterization*, Image Acquisition and Scientific Imaging Systems **SPIE 2173** (1994), sivut 73–84.
- [39] Sarif Kumar Naik ja C. A. Murthy, *Hue-preserving color image enhancement without gamut problem*, IEEE Trans. on Image Processing **12** (2003), no. 12, sivut 1591–1598.
- [40] H. N. Nair ja C.V. Stewart, *Robust focus ranging*, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (1992), sivut 309–314.
- [41] Risto Näsänen, *Näköaistin suorituskykytiedon soveltaminen digitaaliseen painokuvatekniikkaan*, Report, Helsingin teknillinen korkeakoulu, 1985.
- [42] H. Ridder, *Image processing and the problem of quantifying image quality*, International Conference on Image Processing **2** (2001), sivut 3–6.
- [43] H. Saarelma, *Kuvatekniikan perusteet*, Otatieto, 2003.

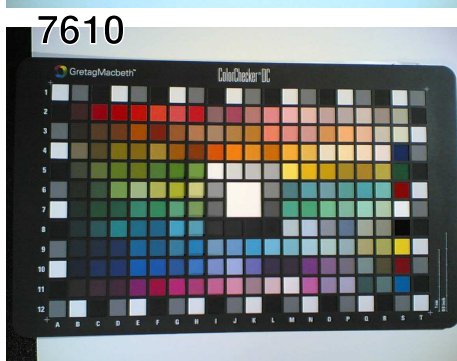
- [44] H. Saarelma ja P. Oittinen, *Basics of printing technology*, Otatieto, 1995.
- [45] J. Salmio, *Imaging quality of first generation camera phones*, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2003.
- [46] A. E. Savakis, S. P. Etz ja A. C. Loui, *Evaluation of image appeal in consumer photography*, SPIE Human Vision and Electronic Imaging, vol. V Jan, 2000.
- [47] Scoopt, *Sell your photos to the press*, Elokuu 2005, <http://www.scoopt.com/>.
- [48] H. Shao ja H. Zhao, *Automatic analysis of a skull fracture based on image content*, Third International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. (2003), sivut 741–746.
- [49] O. Sirkiä ja M. Suni, *Haastattelu sävypuristamo orangen kuvankäsittelijöiden kanssa*, Elokuu 2005, <http://www.puristamo.com/>.
- [50] A. Slawsby ja C. Chute, *Moving pictures 2003: Worldwide camera phone survey, forecast, and analysis, 2003-2007*, Report, IDC, 2003, Abstrakti saatavissa <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=30157>.
- [51] A. R. Smith, *Color gamut transform pairs*, 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH (1978), sivut 12–19.
- [52] N. Strother, *Market for smartphones and camera phones heats up*, Report, In-Stat/MDR, 2003, Abstrakti saatavissa <http://www.instat.com/press.asp?ID=753&sku=IN030942WH>.
- [53] SVS, *Suomen valaistusteknillinen seura ry:n julkaisuja no 9, valaistussuosituksset, sisävalaistus*, 1986, Helsinki.
- [54] T. Torvinen, *Suomalaisten sanomalehtien icc-profiilit*, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto, 2003.
- [55] Mejdi Trimeche, Dmitry Paliy, Markku Vehvilainen ja Vladimir Katkovnic, *Multichannel image deblurring of raw color components*, Computational Imaging III vol 5674 (2005), sivut 169–178.
- [56] Z. Wang, H. R. Sheikh ja A. C. Bovik, *No-reference perceptual quality assessment of jpeg compressed images*, icip02 (2002), sivu 4.

- [57] A. B. Watson, *Digital images and human vision*, 1st ed., The MIT Press, 1993.
- [58] Yihong Xu ja George Nagy, *Prototype extraction and adaptive ocr*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. **21** (1999), no. 12, sivut 1280–1296.
- [59] R. Ylönen ja I. Herttua, *Enemmän iloa väreistä*, Tekniikan maailma **11** (2003), sivut 39–47.

Liite A Kameroiden tarkkuuden laskentaan käytetyt kuvat



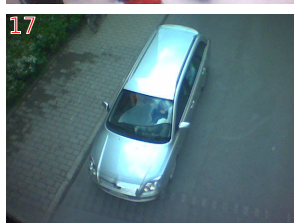
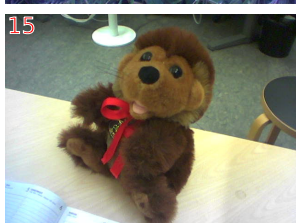
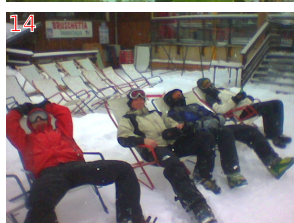
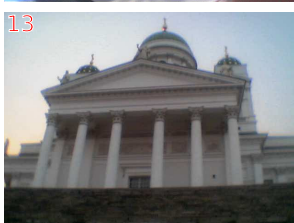
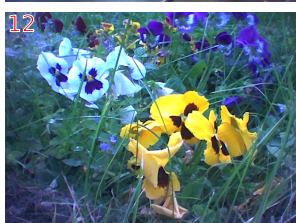
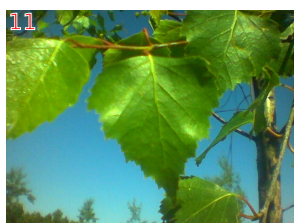
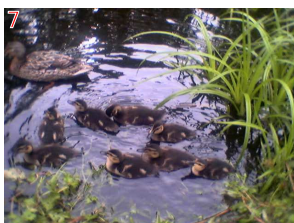
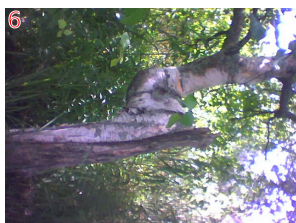
Liite B Kameroiden värintoiston laskentaan käytetyt kuvat



Liite C Tarkkuuden arviointiin käytetyt kuvat



Liite D Värillisyden arviointiin käytetyt kuvat



Liite E Koehenkilötestien tulostaulukot

Tarkkuuden arvionnin tulostaulukko

Taulukko noudattaa muotoa:

aikaleima : koehenkilön tunnus : kuvan numero : 5 alkiota, josta selviää asetettu laatusjärjestys. 1=epätarkin kuva : kuvannumero, jolla on riittävä laatu : järjestysluku, joka ilmoittaa monesko kuva itsejärjestetyistä kuvista on riittävä.

Esimerkiksi jos järjestys on 1 2 3 5 4 ja riittävä laatu on kuvalla 5, niin järjestysluku on silloin 4, koska neljänneksi huonoin kuva valittiin riittäväksi. Taulukko on saatavilla osoitteesta <http://users.tkk.fi/vrantane/DI/rawdata.ordertest.edited>

Värillisyyden arvionnin tulostaulukko

Taulukko noudattaa muotoa:

koehenkilön tunnus : kuvan numero : eri versioiden tunnuskirjaimet

aikaleima : koehenkilön tunnus : kuvan numero : värinparannusmenetelmän numero : 4x4-taulukko, joka kertoo sarakkeen ärsykkeen paremmuudesta rivin ärsykkeeseen

Jos sarake 2, rivi 1 saa arvon yksi, niin ärsyke 2 on arvosteltu paremmaksi kuin ärsyke 1. Ärsykkeet ovat: 1=alkuperäinen kuva, 2=ICC-profiloitu, 3=Autoeye:llä parannettu ja 4=ICC-profiloitu ja Autoeye-parannettu. Taulukko on saatavilla osoitteesta <http://users.tkk.fi/vrantane/DI/rawdata.edited>

Liite F Kuvien käsittelyyn käytetty Matlab-ohjelma

Ohjelma on saatavilla osoitteesta

<http://users.tkk.fi/vrantane/DI/huononnusalgoritmi.m>

```
function tulos=huon2(kuva)

a75=imread(['poto/' kuva '.jpg']);
a75=double(a75)/255;
a75=imresize(a75, [size(a75,1)*1600/size(a75,2) 1600], 'bicubic'); % Kuvan koon muutos peruskokoon.

tulos=a75.*0.87 +0.14; % kontrasti ja ylipoltto
clear a75; % muistin vapautus

maski=mat2gray(fspecial('gaussian',[size(tulos,1) size(tulos,2)],2*size(tulos,2) ));
maski=repmat(maski,[1 1 3]);
suhde=0.6;
tulos=suhde.*tulos + (1-suhde).*maski.*tulos; % Vignetti

maski=imresize(imnoise(ones(floor([size(tulos,1)/3 size(tulos,2)/3 3])), 'speckle',0.005),[size(tulos,1) size(tulos,2)] )-1;
tulos=tulos+(maski./2.1); % speckle -kohinaa
imtool(tulos);disp('2 speckle');

tulos=asin(tulos); % ylipoltto
tulos(find(tulos > 1))=1; % yli 1 leikkaus (RGB-arvot pitää olla 0-1)

gray=rgb2gray(tulos);
H=fspecial('laplacian',1); % Sinisten reunojen ylipoltto ->
H2=fspecial('disk',6);
edge=imfilter(gray,H,'replicate');
edge(find(edge < 0))=0; % valitaan vain reunan tumma puoli
edge=imfilter(edge,H2,'replicate');
edge=mat2gray(edge);
edge(find(edge < 0.3))=0; % Muutetaan vain isoja reunoja
fun=@(x) max(x(:));
maxes=blkproc(gray,[3 3],[3 3],fun);
maxes=imresize(maxes,size(edge));
maxes(find(maxes<0.8))=0;
maxes=imfilter(maxes,H2,'replicate');

tulos(:,:,3)=tulos(:,:,3)+0.4*(maxes.*edge); %% reunojen ylipoltto valmis <-

tulos(find(tulos > 1))=1; % yli 1 leikkaus

clear lista blue gray maxes;

tuloshsv=rgb2hsv(tulos); % HSV-avaruuteen muunnos
tuloshsv(:,:,2)=tuloshsv(:,:,2).*1.4; % saturaation kasvatus
tulos=hsv2rgb(tuloshsv); clear tuloshsv;

H=fspecial('disk',3.5);
H2=fspecial('disk',4.5); % ulkokehälle suurempi sumennus
tulos=imfilter(tulos,H,'replicate'); % alipäästö 1
tulos2=imfilter(tulos,H2,'replicate'); % alipäästö 2
maski=mat2gray(fspecial('gaussian',[size(tulos,1) size(tulos,2)],2*size(tulos,2) ));
maski=repmat(maski,[1 1 3]);
tulos=tulos.*maski + tulos2.*(1-maski); % Lopullinen alipäästö ulkokehälle eri kuin sisäkehälle
clear tulos2

H=fspecial('unsharp',0.2);
tulos=imfilter(tulos,H,'replicate'); % Terävöitys

tuloswr=imresize(tulos,[floor(size(tulos,1)*640/size(tulos,2)) 640], 'bicubic');
imwrite(tuloswr,['huono/h_' kuva '_640.jpg'],'Quality',65); % kuvatiedoston kirjoitus

tulos=double(imread(['huono/h_' kuva '_640.jpg']))/255;
imtool(tulos); disp('lopullinen');
```