

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Mitja Placer

**Ugotavljanje barvnega odstopanja izdelkov s
slikovnim spektrografom**

MAGISTRSKO DELO

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec
Somentor: prof. dr. Stanislav Kovačič

Ljubljana, 2007

Zahvala

Mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu se iz vsega srca zahvaljujem za vse koristne pripombe, napotke, prijateljsko besedo in prepotrebne spodbude ob izdelavi magistrskega dela ter nenazadnje za neprestano priganjanje naj nalogo končno zaključim. Res hvala, Boštjan!

Prof. dr. Stanislav Kovačič je bil pobudnik za temo naloge, me usmerjal, zaupal vame, me spodbujal in mi omogočil delo v svojem Laboratoriju za slikovne tehnologije (LST). Profesor, najlepša hvala!

Asistentu dr. Janezu Peršu (LST) se iskreno zahvaljujem za vso nesebično pomoč pri premagovanju ovir in za vse konstruktivne napotke.

Klemen Polanec (LST) mi je marsikdaj postavil rešilni smerokaz, ko sem se izgubljal v C-jevskem in Linuxovem gozdu. Hvala ti, Klemen!

Hvala tudi Andreji, Petru in obema Matejema iz LST-ja za vse lepe laboratorijske ure!

Direktorju podjetja Harpha sea d.o.o., Aljoši Žerjalu, sem neznansko hvaležen za konstantno spodbujanje k dokončanju naloge in za vse skoraj vsiljene študijsko-dopustniške ure in dni ☺

En mega hvala gre seveda mojemu PiXiću.... kar je prav, je pač prav! :x

Hvala seveda tudi vsem mojim prijateljem... ker brez vas niti magisterij nima nobenega smisla! :>

In za konec – en velikanski **hvala** gre mojim **staršem** in **bratu**..... ker:

zaradi vas sem bil to, kar sem bil, sem to, kar sem, in bom to, kar pač bom!

Mitja Placer

Našemu malemu Marku in njegovi noni Mileni

Kazalo

Seznam uporabljenih simbolov	1
Povzetek	3
Abstract	5
1. Uvod	7
2. Barve	11
2.1. Kaj so barve in kako jih zaznamo?	11
2.2. Na kakšen način so barve in spekter povezani?	13
3. Od zapisa barve s spektrom do v praksi uporabnejšega zapisa barv	15
3.1. Prehod iz spektra v CIE XYZ barvni prostor	15
3.1.1. Opazovalec	15
3.1.2. Osvetlitev	21
3.1.3. Predmet	23
3.1.4. Izračun tristimulus vrednosti CIE XYZ barvnega prostora	24
3.2. Prehod v CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor	25
3.3. Prehod v CIE $L^*C^*h^*$ barvni prostor	26
4. Ugotavljanje barvnega odstopanja	29
4.1. MacAdamove elipse	29
4.2. Model barvne razlike CIE 1994	30
5. Implementacija sistema za ugotavljanje barvnega odstopanja	33
5.1. Predpriprava: omejitev najvplivnejših motenj sistema	33
5.1.1. Motilna okoliška svetloba	33
5.1.2. Motnja ob uporabi analogne video kamere	34
5.2. Opis merilnega sistema	36
5.2.1. Razmislek, na kateri napravi naj sloni postopek natančne zaznave barve vzorca	36
5.2.2. Slikovni spektrograf: osnova našega sistema	37
5.2.2.1. Poravnava in kalibracija slikovnega spektrografa	39

5.2.3.	Optični objektiv _____	42
5.2.4.	Video kamera _____	42
5.2.5.	Procesni računalnik _____	43
5.2.6.	Osvetlitev _____	44
5.2.6.1.	Reševanje problema časovne spremenljivosti osvetlitve _____	45
5.2.6.2.	Reševanje problema spektralne nehomogenosti osvetlitve _____	47
5.2.7.	(Ne)upoštevanje občutljivosti v merilnem postopku _____	49
6.	Opazovanja in meritve _____	51
7.	Sklepne ugotovitve _____	55
Viri	_____	57
PRILOGA:	paleta testnih barvnih odtenkov _____	63
Izjava	_____	73

Seznam uporabljenih simbolov

λ _____	Valovna dolžina elektromagnetnega valovanja (svetlobe)
m _____	Red uklonitve vpadne svetlobe
d _____	Širina uklonske reže
α _____	Vpadni kot svetlobe v uklonsko režo
β _____	Uklonski kot svetlobe iz uklonske reže
OBF _____	<i>Order blocking filter</i> – frekvenčno odvisno svetlobno sito
f _____	Svetlobna jakost objektiva ali slikovnega spektrografa
CIE _____	<i>Commission Internationale d'Eclairage</i> – Mednarodna komisija za razsvetljavo
R, G, B _____	Rdeča, zelena in modra komponenta
$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ in $\bar{b}(\lambda)$ _____	CIE RGB krivulje barvnega ujemanja
$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ in $\bar{z}(\lambda)$ _____	CIE 1931 krivulje barvnega ujemanja
X, Y, Z _____	Tristimulus komponente CIE 1931 barvnega prostora
L^* _____	Svetlostni vod
a^* _____	Rdeče-zeleni vod CIE $L^*a^*b^*$ barvnega prostora
b^* _____	Rumeno-modri vod CIE $L^*a^*b^*$ barvnega prostora
X_n , Y_n in Z_n _____	Koordinate bele točke svetlobnega vira
C^* _____	Barvno nasičenje v CIE $L^*C^*H^*$ barvnem prostoru
h^* _____	Barvni odtenek v CIE $L^*C^*H^*$ barvnem prostoru
$I(\lambda)$ _____	Spektralna močnostna razporeditev
$E(\lambda)$ _____	CIE standardni svetlobni vir
A, B, C, Dxx, Fxx _____	Tipi CIE standardih virov svetlobe
$R(\lambda)$ _____	Relativni odbojni spekter
ΔH^* _____	Metrična razlika odtenkov
ΔE_{ab}^* _____	Osnovna (evklidska) barvna razlika v CIE $L^*a^*b^*$ barvnem prostoru
S_L , S_C in S_H _____	Utežnostne funkcije metode CIE 1994
k_L , k_C in k_H _____	Parametrični faktorji metode CIE 1994

ΔE_{94}^* _____	Barvna razlika po metodi CIE 1994
k_v _____	Prag barvne sprejemljivosti metode CIE 1994
σ _____	Standardni odklon

Povzetek

Magistrsko delo opisuje sistem za sprotno ugotavljanje barvnega odstopanja lahkih gradbenih plošč med njihovo proizvodnjo s pomočjo slikovnega spektrografa, pritrjenega na črno-belo video kamero.

Tak pristop nam omogoča zajem vidnega dela elektromagnetnega spektra obsežnejšega opazovalnega območja (daljice) kot s točkovnim spektrografom. To nam ob predpostavki, da je predmet na opazovani površini enovito obarvan (morebitne drobne napake na površini predmeta lahko torej zanemarimo), prinaša bistveno prednost - s pomočjo hkratnega zajema večjega števila točk na daljici lahko v veliki meri izločimo zajemalni šum. Posledično je možna uporaba toliko krajšega časa zaklopa kamere, da lahko za zajemanje odbojnega spektra predmeta uporabimo strategijo spremenljivega časa zaklopa kamere. Z njeno pomočjo lahko zajamemo spekter tudi v tistih predelih, kjer ga zaradi prešibkega izhoda svetila z običajnim, hkratnim zajemanjem ne bi mogli. Iz delnih spektralnih zajetij, ki jih s to metodo dobimo, nazadnje sestavimo končni odbojni spekter opazovanega predmeta. Bistvena pridobitev takega načina zajemanja spektra je možnost uporabe spektralno manj homogene in s tem cenejše vrste osvetlitve. Če niso časovne zahteve ugotavljanja barvnega odstopanja previsoke, je namesto dragega ksenonskega svetila tako povsem primerna uporaba navadnega halogenskega svetila.

Strategijo zajemanja s spremenljivim časom zaklopa kamere je mogoče izvesti le s hkratnim neprestanim nadzorom in upoštevanjem spektra svetlobnega vira, kar predstavlja še dodatno prednost predstavljenega sistema - tako je namreč izničen vpliv tako hitrih (motnje v napajanju) kot počasnih (staranje žarnice) sprememb vira svetlobe.

S pomočjo palete natisnjenih testnih barvnih odtenkov smo ugotovili, da opisani sistem dobro sledi človekovim barvnim zaznavam: zaznani barvni razliki ustreza po velikosti sorazmeren rezultat enačbe CIE94, ki predstavlja izhod merilnega sistema.

Med samo proizvodnjo lahkih gradbenih plošč bi težavo utegnil predstavljati skupni čas, ki ga potrebuje sistem z uporabo metode spremenljivega časa zaklopa (okoli 20 s). Čase zajetja bi bilo mogoče nekoliko skrajšati z uporabo

močnejšega vira svetlobe, bistveno skrajšanje pa bi dosegli z uporabo nekaj dražjega metal-halidnega svetlobnega vira z bolj uravnoveženim spektrom.

Ključne besede:

slikovni spektrograf, elektromagnetni spekter, barvni prostor, barvno odstopanje, CIE XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*C^*H^*$, CIE 1994, obdelava slik, avtomatizacija, nadzor kakovosti, lahka gradbena plošča

Abstract

This master thesis describes a colour difference acceptability determination system based on an imaging spectrograph, mounted on a standard gray-scale camera. It is intended to be used for on-line colour quality inspection in lightweight construction panels production.

The adoption of an imaging spectrograph makes us possible to acquire a broader area (a line) of the visible part of the electromagnetic spectrum compared to a spot spectrograph, thus allowing us, neglecting small surface artefacts, to cancel a big part of the acquiring noise and consequently to use a sensible shorter shutter time of the camera. The latter becomes short enough to enable us to use a flexible exposure time acquiring strategy – making it possible to acquire the reflectance of those parts of the spectrum where the output of the light source is not strong enough to be acquired by a single snapshot. The whole visible spectrum of the sample is then made up from all of the partial spectrums. As a result we can now use a spectrally less homogeneous and thus cheaper light source like an ordinary halogen lamp instead of an expensive xenon lamp, if time requirements are not too demanding.

However, flexible exposure time acquiring strategy is only adoptable when permanent light source supervision and its subsequent consideration is done. This is also an important advantage of our system: it remains unaffected by sudden (power supply noise) and slow (bulb ageing) changes in the light source spectrum.

A test measurement with a printed colour palette has brought us to the conclusion that our system is able to mimic human colour perception with good fidelity: the result of the CIE 1994 equation, which represents the output of the measurement system, is proportional to the perceived colour difference.

One issue could possibly arise when thinking of integrating our system into a production line - the total time needed to complete the task using the flexible exposure time acquiring strategy. If it comes out that it takes too long for a specific application, some speed improvements could be achieved using a brighter light source, while using a not-too-expensive metal-halide lamp with a more balanced spectrum, we could significantly reduce the acquisition time.

Keywords:

imaging spectrograph, electromagnetic spectrum, colour space, colour acceptability, CIE XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*C^*_{ab}H^*_{ab}$, CIE 1994 image processing, automation, quality control, lightweight construction panel.

1. Uvod

Če se prebivalec kateregakoli urbaniziranega predela Slovenije dandanes nekoliko razgleda naokoli, je malo verjetno, da ne bi zagledal nobenega žerjava ali vsaj kakšne ravnokar dokončane novogradnje. Današnje razmere v gospodarstvu namreč narekujejo hiter tempo vlaganja in najcenejše možne gradnje ob hkratnem upoštevanju potrebnih predpisov in izpolnjevanju vseh mogočih (in nemogočih) želja in pričakovanj naročnikov. Zatorej ni čudno, da je velik del današnjih modernih, predvsem poslovnih, zgradb zgrajenih po principu v privlačno fasado oblečenega nosilnega jeklenega ogrodja. To je namreč relativno cenen in hiter način postavitve najrazličnejših stavb za zadovoljitev potreb današnjega gospodarstva, poleg tega je končni izgled takih stavb v veliki večini primerov v skladu s smernicami današnje tehno-minimalistične mode, kar v veliki meri izkoriščajo predvsem trgovci s svojimi prodajnimi centri takšnih in drugačnih dobrin (slika 1).



Slika 1: Moderni prodajni center [1]

Lep, privlačen in moderen izgled stavbe, v kateri poteka trgovska dejavnost, potencialnega kupca vsekakor privlači in spodbuja k obisku trgovine, tudi če vanjo ni ravno namenjen – in obisk je prvi pogoj, da do nakupa sploh pride...

Kaj bi lahko torej bolj pokvarilo veselje investitorja ob predaji njegovega novega vira dobička, po težko pričakovanem zaključku gradnje, kot barvno neenovita,

mogoče celo šahovnici podobna, in zaradi tega povsem neestetska, fasada poslopja, kakršna po vseh pravilih dobrega okusa ne bi smela biti?

Velik del fasad takih modernih poslopij je sestavljenih iz t.i. lahkih gradbenih plošč. To so sendvič konstrukcije, najpogosteje sestavljene iz sloja izolacijskega materiala, obdanega na obeh straneh s predlakirano tanko pločevino, ki je v odvisnosti od namena in načina uporabe plošče različno profilirana (slika 2).



Slika 2: Detajl lahkih gradbenih plošč [2]

Večina proizvajalcev lahkih gradbenih plošč svoje izdelke ne proizvaja sama v celoti, ampak jih sestavlja iz sestavnih delov, ki jim jih dobavijo lastni dobavitelji, in med temi je tudi predlakirana tanka pločevina v kolutih. Vsak kolut naj bi ustrezal barvi, ki je določena ob naročilu (največkrat po barvnem sistemu RAL [3]), vendar je na veliko žalost proizvajalcev plošč resničnost povsem drugačna, saj se med koluti (v različnih ali celo istih saržah) in celo v samem kolutu (med njegovim odvijanjem) barva predlakirane tanke pločevine nemalokrat spremeni do take mere, da je barvna razlika z lahkoto opazna s prostim očesom opazovalca z zdravim barvnim vidom [4]. Če se odstopanja pravočasno ne ugotovi, lahko v nadaljevanju pri naročniku pride do upravičene reklamacije, kar lahko pripelje do velikih časovnih zamikov, materialnih stroškov, nejevolje in v najslabšem primeru celo do izgube kupca ali odškodninskih zahtevkov.

Razmišljanje o vključitvi barvanja pločevine v proizvodni proces lahkih gradbenih plošč po vsem naštetem ne bi bilo povsem neumestno. Ker pa je to za podjetje

velika in zahtevna investicija, ni težko razumeti, zakaj se skušajo proizvajalci lahkih gradbenih plošč problemu barvne nekonsistentnosti v čim večji meri zoperstaviti s pomočjo vhodne kontrole kakovosti. Ob odkritju barvnega odstopanja pred predajo plošč naročniku bi proizvajalec le-teh tako pridobil možnost reklamacije naročila predlakirane tanke pločevine v najzgodnejši fazi. Čeprav bi se moral tudi v tem primeru soočiti z dolgotrajnimi postopki, ki lahko ob današnji proizvodnji *ravno ob pravem času* (ang. *just-in-time*) spet pomenijo zakasnitve in s tem težave z naročnikom, je to še vedno najustreznejši način reševanja problematike barvne neustreznosti plošč.

Idealna izvedba vhodne kontrole bi morala biti sposobna zaznati barvna odstopanja v obeh prej omenjenih primerih – med različnimi koluti predlakirane tanke pločevine in v samem kolutu, saj bi le tako lahko na zadovoljiv način preprečili predajo neustrezno obarvanih plošč. To sposobnost je mogoče doseči s kombinacijo vhodne kontrole in kontrole med samo proizvodnjo plošč, med odvijanjem koluta (ang. *online inspection*): s prvo bi lahko v najkrajšem možnem času in z najmanjšimi posledicami ugotovili odstopanje od dogovorjenega barvnega odtenka in kolut izločili iz nadaljnje obdelave za konkretno naročilo [5], medtem ko bi druga predstavljala varnostni mehanizem, če bi slučajno prišlo do spremembe barvnega odtenka pločevine med odvijanjem koluta - v tem slučaju bi bilo potrebno proizvodnjo začasno ustaviti in zamenjati kolut.

Neustrezne kolute ali dele kolutov bi lahko potem ali reklamirali, ali pa jih shranili skupaj z ostalimi koluti (za človeško oko) enakega odtenka in jih uporabili, ko bi se jih nakopičilo dovolj za izvršitev naslednjega naročila plošč iste izvirne barve. Z izbiro druge možnosti se pojavita dva problema: skladiščenje odstopajočih kolutov in dejstvo, da ti koluti po vsej verjetnosti ne bi ustrezali nobenemu odtenku po uradnih barvnih lestvicah, kar ima za posledico tudi otežkočeno morebitno kasnejše naročanje dodatnih plošč istega odtenka s strani naročnika. Zaradi tega bi morali lahke gradbene plošče, izdelane iz takih kolutov, prodajati pod drugačnimi pogoji - ugodnejše prodajne cene, obvestitev naročnika, da je morebitno kasnejše dodatno naročilo lahko neizvedljivo v doglednem času...

Merilni sistem, temelječ na slikovnem spektrografu, ki je predstavljen v nadaljevanju, je namenjen drugemu delu barvne kontrole predlakirane tanke pločevine, torej tistemu, ki poteka med proizvodnjo lahkih gradbenih plošč [6]. Seveda so sistemi za natančno ugotavljanje barvnega odstopanja že prisotni na tržišču, vendar pogostokrat niso najbolj primerni za neposredno uporabo v

industrijskem okolju zaradi različnih razlogov – mednje lahko štejemo npr. neprilagodljivost, nepovezljivost ročnih izvedb merilnikov z informacijskim sistemom tovarne, ali prevelike dimenzije namiznih izvedb, ki so večinoma namenjene laboratorijskim razmeram. Pomembno je dejstvo, da je v nadaljevanju predstavljen sistem predvsem zaradi uporabe navadne halogenske luči kot vira svetlobe tudi cenovno ugoden.

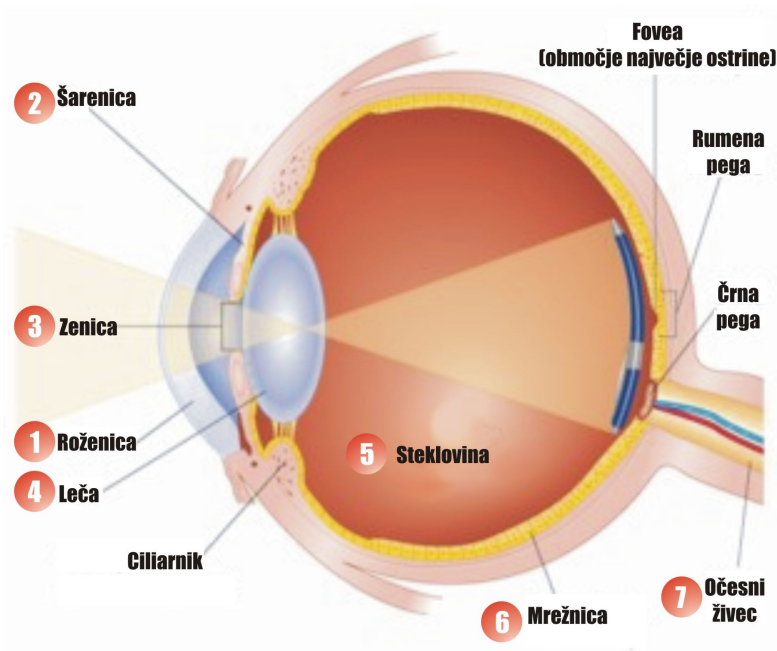
2. Barve

2.1. Kaj so barve in kako jih zaznamo?

Je papir resnično bel, rastline zelene, sonce rumeno in morje modro?

Gledano strogo fizikalno niso. Vendar jih (na srečo) kot take zaznavamo, občutimo z našim vidnim sistemom, ki je v milijonih let oblikoval tak odziv na dražljaje v določenem pasu elektromagnetnega (EM) spektra. Za obstoj barve, v smislu človekovega dožemanja le-te, so potrebni trije bistveni elementi: **opazovalec**, **osvetlitev** in **predmet**. Šele s kvantitativnim opisom vsakega izmed teh elementov je mogoče barve v največji meri objektivno zapisati, kar je tudi končna naloga našega merilnega sistema. Veda, ki se ukvarja s številskim zapisom barv, se imenuje **kolorimetrija** [7].

Videnje pomeni za človeka zaznavanje EM valovanja v območju vidnega spektra – to je med približno 380 nm in 760 nm valovne dolžine. Kot rečeno, potrebujemo za vidno zaznavo najprej svetlobno vzbujanje in šele takrat, ko je predmet dovolj osvetljen, ga lahko človeško oko (slika 3) zazna in človek torej vidi, seveda če le ni popolnoma črn ali popolnoma prosojen.



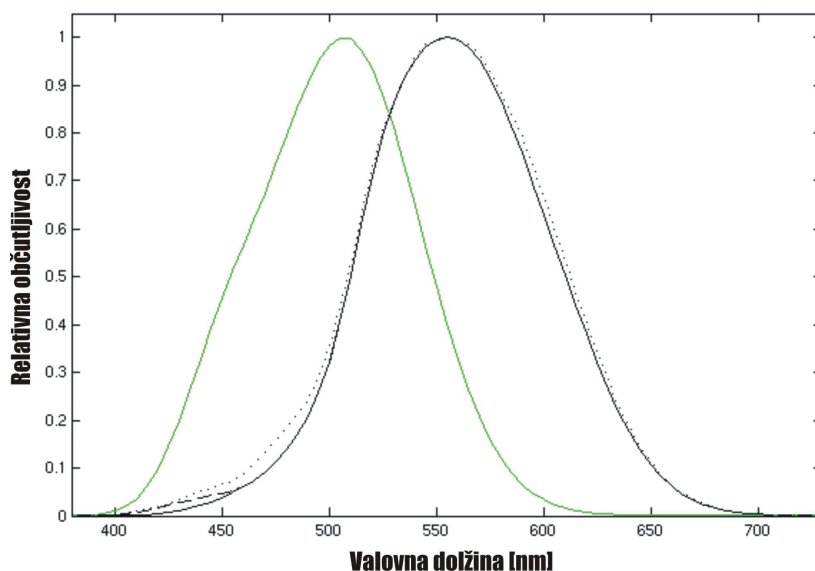
Slika 3: Prerez človeškega očesa [8]

Svetloba pri tem opravi pot skozi različne dele očesa: v oko vstopi skozi roženico **1**, nato preko odprtine v šarenici **2** – zenice **3** vstopi v lečo **4** in od tod preko steklovine **5** do mrežnice **6**, ki prispelo svetlobo pretvori v živčne impulze, ki jih očesni živec **7** vodi naprej do možganov.

Za našo razlago je najzanimivejša mrežnica, saj pri zdravem očesu s svojimi lastnostmi najbolj vpliva na kakovost zaznave barv. Sestavljata jo dve vrsti svetlobnih tipal - receptorjev:

- **čepki:** na mrežnici jih je 5 milijonov in so namenjeni dnevnemu – barvnemu (fotopskemu) videnju. Poznamo tri različne vrste čepkov, ki imajo različne maksimume občutljivosti - pri okoli 430 nm, 530 nm in 560 nm. Krivulje občutljivosti posameznih vrst čepkov predstavljajo najpopolnejši opis človekovega vidnega sistema v smislu barvnega zaznavanja; predstavili ga bomo v razdelku 3.1.1.
- **paličice:** imamo jih 120 milijonov in so namenjene nočnemu – črno-belemu (skotopskemu) videnju. Aktivirajo se, ko pade osvetljenost pod 1 lx, njihov maksimum občutljivosti je pri okoli 510 nm.

Zaradi različnih krivulj občutljivosti čepkov in paličic se tudi krivulji očesne občutljivosti za dnevno in nočno videnje razlikujejo (slika 4).



Slika 4: Krivulje očesne občutljivosti - za nočno (zeleno) [9] in dnevno (črno) videnje (trije različni viri podatkov – neprekinjeno [10], prekinjeno [11], točkasto [12])

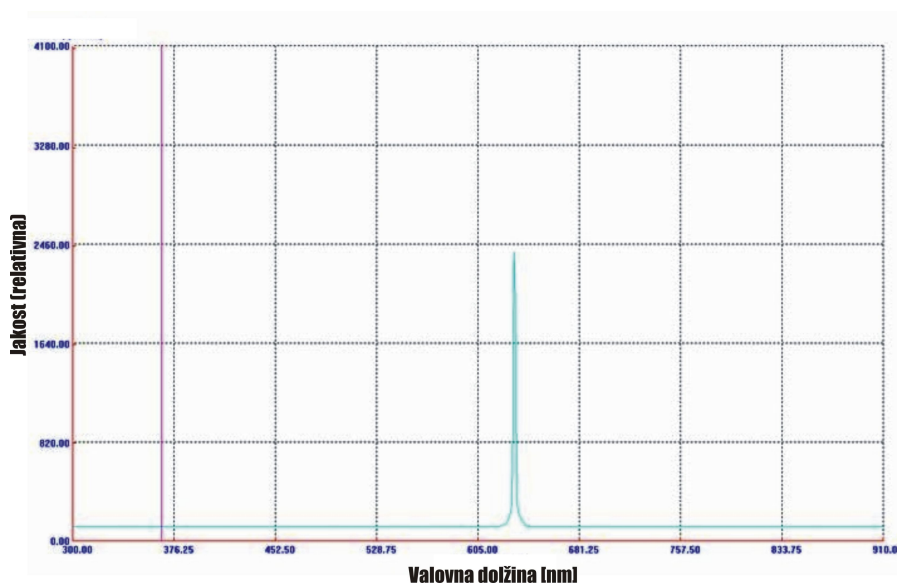
2.2. Na kakšen način so barve in spekter povezani?

Svetloba določene valovne dolžine iz območja vidnih valovnih dolžin EM spektra je v naših možganih interpretirana kot določena barva – tako se od krajših proti daljšim valovnim dolžinam izmenjajo vijolična, modra in zelena, preko rumene in oranžne do rdeče (slika 5).



Slika 5: Prikaz zaznanih barv v odvisnosti od valovne dolžine [13]

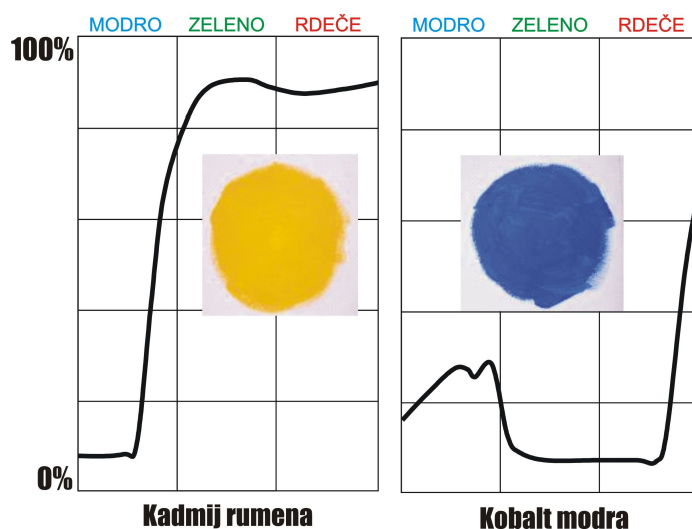
Primer ozko spektralne svetlobe je laser s svojim skoraj povsem monokromatskim spektrom (slika 6).



Slika 6: Spekter He-Ne laserja [14]

Barve s takimi spektri v naravi zelo redko srečamo. Pretežni del vsega, kar v okolju zaznajo naše oči, ima namreč širok, zvezen spekter. Različne razporeditve takega spektra naši možgani dojemajo kot različne barvne odtenke (slika 7); človek naj bi jih bil sposoben razločiti kar 10 milijonov.

V pričujočem delu govorimo o spektrih vzorcev, ki vpadno svetlobo odbijajo. Govorimo zato o odbojnem spektru in kasneje tudi o relativnem odbojnem spektru, saj je zajeti odbojni spekter primerjan z odbojnim spektrom svetlobnega vira, zaradi česar v zapisu nima fizikalnih enot (W/nm). Spektre svetlobnih virov merimo s spektrometri.



Slika 7: Različni spektralni razporeditvi in pripadajoča zaznana barvna odtenka (kadmij rumena (levo) in kobalt modra (desna)) [15]

Zapis barve predmeta z njenim odbojnim spektrom je najnatančnejši zapis njenih lastnosti. Navadno se spekter barve podaja z grafom (tabelo) razločljivosti 5 nm ali 10 nm skozi celoten vidni spekter (med 380 nm in 760 nm), kar nanese 39 oziroma 77 vrednosti, čemur zaradi popolnega opisa barve pravimo tudi DNK barve.

Vendar kakor je podajanje 39 ali celo 77 spektralnih vrednosti lahko natančno, je to v praksi tudi neprikladno in za predstavbo barve neintuitivno. Tak zapis ne odraža nobenih lahko doumljivih miselno-jezikovnih lastnosti barve, kot so njen odtenek, svetlost in nasičenost. Zaradi tega je potrebno vpeljati tak barvni zapis, ki bi to obsežno množico meritev na nek način skrčil, ne da bi opazno zmanjšal natančnost razločevanja barvnih odtenkov, ki nam ga omogoča zapis s celotnim odbojnim spektrom. Novi zapis naj bi bil hkrati tudi skladnejši s človekovim barvnim dožemanjem in bi poleg tega bil tudi zaznavno homogen, kar bi omogočilo učinkovito implementacijo algoritma ugotavljanja barvnih razlik in s tem barvnega odstopanja.

3. Od zapisa barve s spektrom do v praksi uporabnejšega zapisa barv

3.1. Prehod iz spektra v CIE XYZ barvni prostor

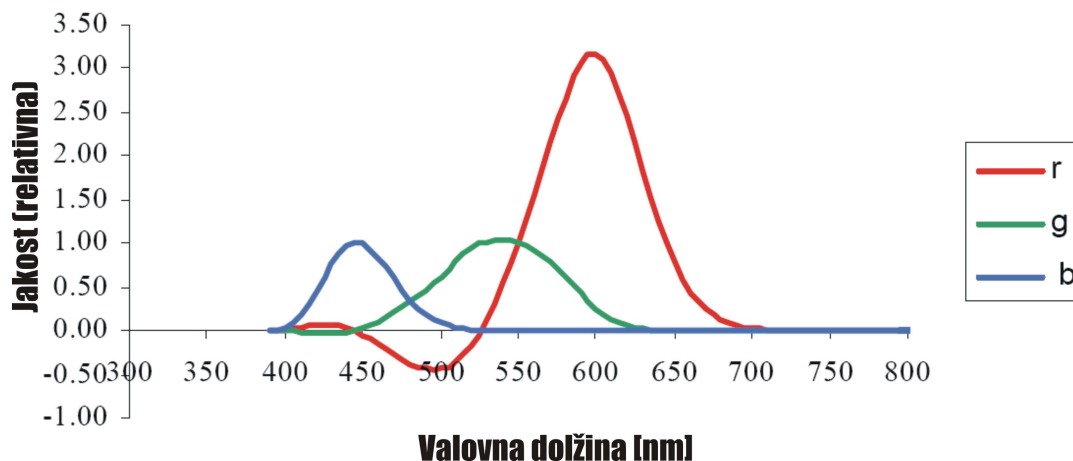
Rešitev v prejšnjem razdelku nakazanega problema pretvorbe dvodimenzionalnega relativnega odbojnega spektra v za človeško barvno dožemanje prikladnejšo obliko predstavlja CIE $L^*C^*h^*$ barvni zapis. To bo tudi končni zapis barve v našem merilnem sistemu, vendar direktni prehod iz spektralnega zapisa vanj ni mogoč. Spekter je namreč potrebno predhodno pretvoriti v CIE XYZ barvni prostor in nato opraviti še preslikavo v CIE $L^*a^*b^*$ barvni zapis [16]. Prvi korak do želenega zapisa nam torej predstavlja CIE XYZ barvni prostor, ki v svojem zapisu upošteva in opisuje vse tri bistvene, med seboj prepletajoče se elemente za obstoj barve, naštete že v razdelku 2.1.: opazovalca, osvetlitev in predmet. V nadaljevanju si jih bomo podrobneje ogledali, izpostavili njihovo vlogo v samem barvnem prostoru in izpeljali pretvorbo v CIE XYZ barvni prostor.

3.1.1. Opazovalec

Opis opazovalca v CIE XYZ barvnem prostoru sledi **Young-Helmholtzevi tribarvni teoriji** (ang. *trichromacy*) iz 19. stoletja [17]. Young in kasneje Helmholtz sta svojo teorijo utemeljila na Maxwellovih poskusih barvnega ujemanja, ki so pokazali, da je z aditivnim mešanjem treh t.i. osnovnih virov svetlobe mogoče reproducirati večji del barv. Tako sta Young in Helmholtz predpostavila, da obstajajo v človeškem očesu tri vrste receptorjev, od katerih je vsaka posebej občutljiva na določeno barvo. Njuna teorija je bila potrjena več kot stoletje kasneje, leta 1964, ko so bile opravljene prve mikrospektrofotopske meritve posameznih čepkov. Rečemo lahko, da ima Young-Helmholtzeva tribarvna teorija svoje korenine v zgodnjem, receptornem delu barvnega vida.

Po tribarvni teoriji lahko torej opazovalec predočenemu barvnemu dražljaju določi barvno skladno aditivno mešanico treh osnovnih barv. Vsaka barva je zato lahko predstavljena kot mešanica treh primarnih barv, ki bi jih opazovalec

uporabil, da bi se barvi skladali. Prva, ki sta opravila natančnejše eksperimente v tej smeri sta bila W. David Wright (leta 1928) in John Guild (leta 1931) [18]. Na osnovi njunih dognanj je CIE vpeljal t.i. **CIE RGB** barvni zapis s pripadajočimi **funkcijami barvnega ujemanja** (*colour matching functions*) $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ in $\bar{b}(\lambda)$ (slika 8).



Slika 8: CIE 1931 RGB krivulje barvnega ujemanja [19]

Krivulje na grafu, ki definirajo t.i. **1931 CIE RGB standardnega opazovalca** (*CIE 1931 RGB standard observer*), nam povedo intenziteto vsakega izmed treh primarnih svetlobnih virov, potrebno da dosežemo barvno usklajenost z monokromatskim testnim vzorcem pri 2° zornem kotu, ki ustreza velikosti povprečne očesne rumene pege. Za primarne vire so bili izbrani monokromatski viri svetlobe valovnih dolžin 700 nm (rdeče), 546,1 nm (zeleno) in 435,8 nm (modro). Na grafu lahko opazimo tudi negativni področji krivulj, kar pomeni, da barvnega ujemanja na tistih področjih ni bilo mogoče doseči z aditivnim mešanjem treh primarnih barv, zaradi česar je bilo potrebno spremeniti eksperimentalno postavitev - vira dotičnih primarnih barv je bilo potrebno preusmeriti na vzorec in nato izvesti ujemanje s preostalima dvema primarnima barvnima viroma.

Ker so bile računske zmožnosti za časa nastanka CIE RGB barvnega zapisa zelo skromne, so v CIE želeli sestaviti drugi barvni zapis, ki bi med drugim:

- imel pozitivno definitne krivulje barvnega ujemanja,
- imel komponento $\bar{y}(\lambda)$ sorazmerno zaznani svetlosti,
- imel t.i. **belo točko** predstavljeno s kombinacijo $X = Y = Z$,

- bil linearna transformacija CIE RGB barvnega zapisa,
- temeljil na **Grassmannovem zakonu** o linearnosti človeškega barvnega zaznavanja [20]. Ta pravi, da če opazovalec monokromatski barvi A izbere barvno enakovredne jakosti R_A G_A B_A in za prav tako monokromatsko barvo B izbere barvno enakovredne jakosti R_B G_B B_B , potem bodo za kombinacijo obeh barv AB barvno ustrezne vrednosti R , G in B , zapisane v enačbi 1.

$$\begin{aligned} R &= R_A + R_B \\ G &= G_A + G_B \\ B &= B_A + B_B \end{aligned} \quad (1)$$

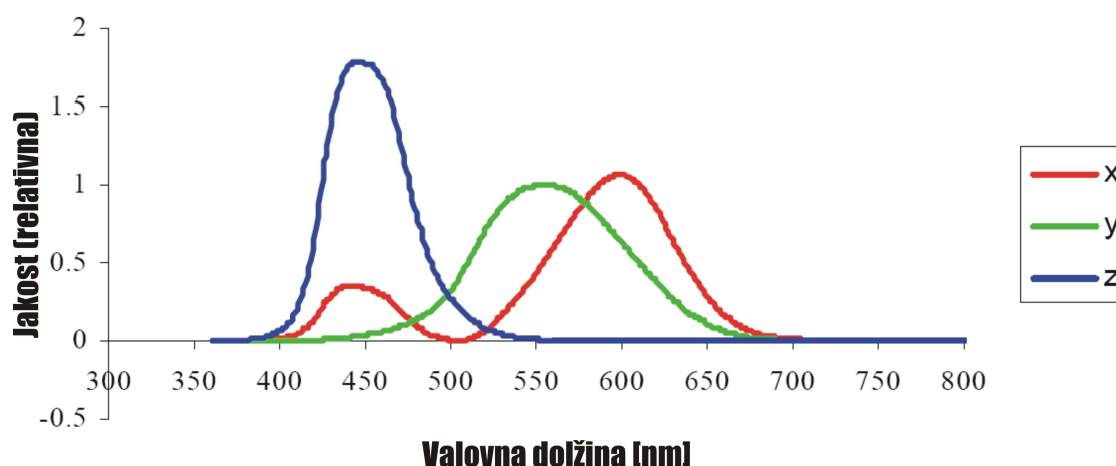
Pri dani **spektralni močnostni razporeditvi** $I(\lambda)$ lahko Grassmannov zakon predstavimo v RGB barvnem zapisu splošneje (enačba (2)).

$$\begin{aligned} R &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda \\ G &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) \cdot d\lambda \\ B &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

Kjer so $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ in $\bar{b}(\lambda)$ krivulje barvnega ujemanja CIE RGB barvnega prostora.

Tako je nastal **CIE XYZ** barvni zapis s svojimi $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ krivuljami barvnega ujemanja za CIE 1931 2° standardnega opazovalca (slika 9) in **X, Y, Z tristimulus vrednostmi**. Izpostaviti je potrebno dejstvo, da krivulj barvnega ujemanja v CIE XYZ barvnem prostoru ni več mogoče miselno enačiti z dejanskimi primarnimi viri svetlobe. Pokrivajo namreč ves barvni obseg s svojimi pozitivnimi vrednostmi, česar aditivni sistemi treh osnovnih barv niso sposobni. Krivulje barvnega ujemanja $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ so torej imaginarne primarne

barvne komponente. CIE je za primere, ko je pri opazovanju zorni kot večji od 4°, leta 1964 uvedel CIE 1964 10° standardnega opazovalca s pripadajočimi krivuljami barvnega ujemanja [21]. Ker fasada gospodarskega poslojja že pri večji oddaljenosti od opazovalca zavzame zorni kot večji od 4°, smo se v našem merilnem sistemu odločili uporabiti novejšega 10° CIE standardnega opazovalca. Grafični prikaz linearne transformacije CIE RGB barvnega prostora v CIE XYZ barvni prostor je prikazan s pomočjo **CIE kromatičnega diagrama** (slika 10 desno).



Slika 9: XYZ krivulje barvnega ujemanja CIE 1931 2° standardnega opazovalca [22]

Kromatični diagram je intuitivno orodje za pretvorbo tridimenzionalnega barvnega prostora v dvodimenzionalno obliko s pomočjo zanemaritve svetlostne komponente barvnega prostora. Kromatične koordinate so za CIE RGB barvni prostor podane, kot je zapisano v enačbi 3.

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R + G + B} \\ g &= \frac{G}{R + G + B} \\ b &= \frac{B}{R + G + B} \end{aligned}$$

(3)

Za CIE XYZ barvni prostor pa kot v enačbi 4

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\z &= \frac{Z}{X + Y + Z}\end{aligned}\tag{4}$$

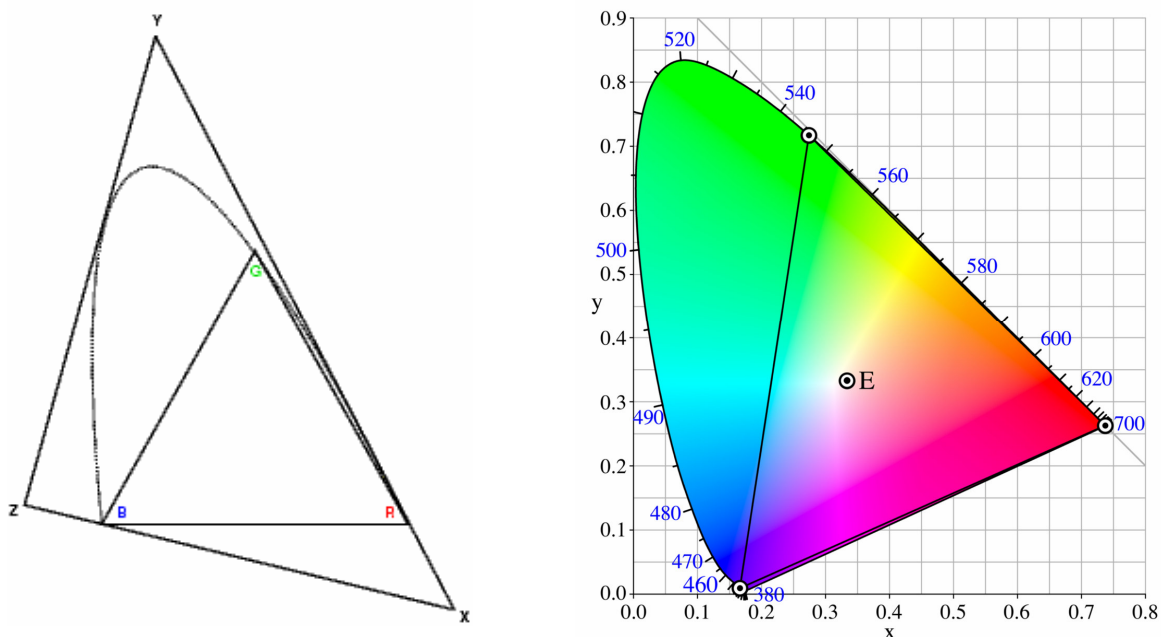
Ker v obeh primerih po definiciji velja, da je vsota vseh treh kromatičnih koordinat enaka 1 (enačba 5 [23]), postane tretja kromatična koordinata redundantna in lahko z izbiro r in g komponent za kromatične koordinate v CIE RGB barvnem prostoru ter x in y v CIE XYZ prostoru naposled narišemo kromatični diagram.

$$\begin{aligned}r + g + b &= 1 \\x + z + y &= 1\end{aligned}\tag{5}$$

Večji trikotnik na sliki 10 levo nakazuje končni kromatični diagram in prikazuje barvni obseg - *gamut* [16] CIE XYZ barvnega prostora, ki zaobjema vse barvne odtenke, ki jih je človek sposoben zaznati (ukrivljeni lik), in v katerega je vključen tudi gamut CIE RGB prostora (manjši trikotnik). Tako zastavljeni barvni prostor izpolnjuje vse zahteve, ki jih je CIE postavil, da bi izboljšal CIE RGB sistem. Slika 10 desno prikazuje CIE 1931 xy kromatični diagram novo dobljenega CIE XYZ barvnega prostora.

CIE 1931 xy kromatični diagram ima nekaj zanimivih lastnosti. Ena od teh je monokromatskost barv na ukrivljenem loku diagrama, vse ostale barve pa je možno dobiti s kombinacijo le-teh. Glede mešanja bi izpostavili dejstvo, da je z mešanjem dveh barv, ki v kromatičnem diagramu predstavljata vsaka svojo točko, možno dobiti katerokoli barvo na daljici med tema dvema točkama. Posledica te lastnosti je konveksna oblika kromatičnega diagrama. Spodnja stranica diagrama (t.i. *alychne*) predstavlja linijo nične svetlosti. To so barve, ki

se človeku zdijo najtemnejše in v nasprotju z barvami na zgornjem loku diagrama niso monokromatske - mavrica vijolične barve res ne pozna...



Slika 10: Prikaz razmerja med CIE RGB in CIE XYZ barvnima prostoroma [24] (levo) ter CIE 1931 xy kromatični diagram z vrisanim CIE RGB gamutom [25] (desno). Barv izven CIE RGB trikotnika ni mogoče reproducirati s končnim številom osnovnih barv, zato so prikazane le simbolično. E predstavlja točko enake energije, ko je $x=y=z=1/3$

Grassmannov zakon, preveden v CIE XYZ barvni prostor, za dano spektralno močnostno razporeditev $I(\lambda)$ opisuje enačba 6 [26].

$$\begin{aligned} X &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Y &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Z &= \int_0^{\infty} I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned}$$

(6)

Enačba (6) določa t.i. tristimulus vrednosti X, Y in Z CIE XYZ barvnega prostora. Spektralno močnostno razporeditev $I(\lambda)$ definira enačba 7 [27].

$$I(\lambda) = K * E(\lambda) * R(\lambda)$$

(7)

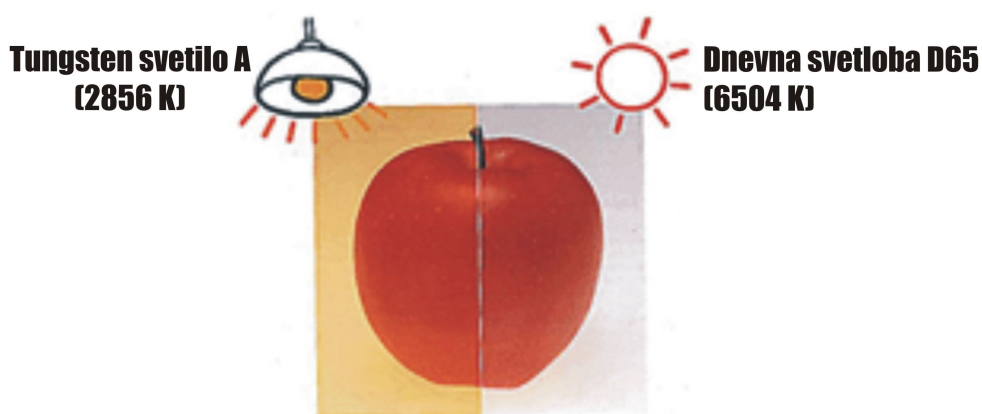
V enačbi (7) predstavlja K konstanto (običajno $K = 100$), $E(\lambda)$ opisuje **CIE standardni vir svetlobe (CIE standard illuminant)**, $R(\lambda)$ pa **relativni odbojni spekter opazovanega predmeta**.

3.1.2. Osvetlitev

Osvetlitev zaseda v kolorimetriji odločilno vlogo, saj se lahko zaznani odtenek istega predmeta pri različnih vrstah osvetlitve opazovalcu zdi povsem drugačen (slika 11) in obratno – v skrajnem primeru se lahko spektralno različna predmeta pri določeni osvetlitvi opazovalcu zdita identična, čemur pravimo **metamerija**.

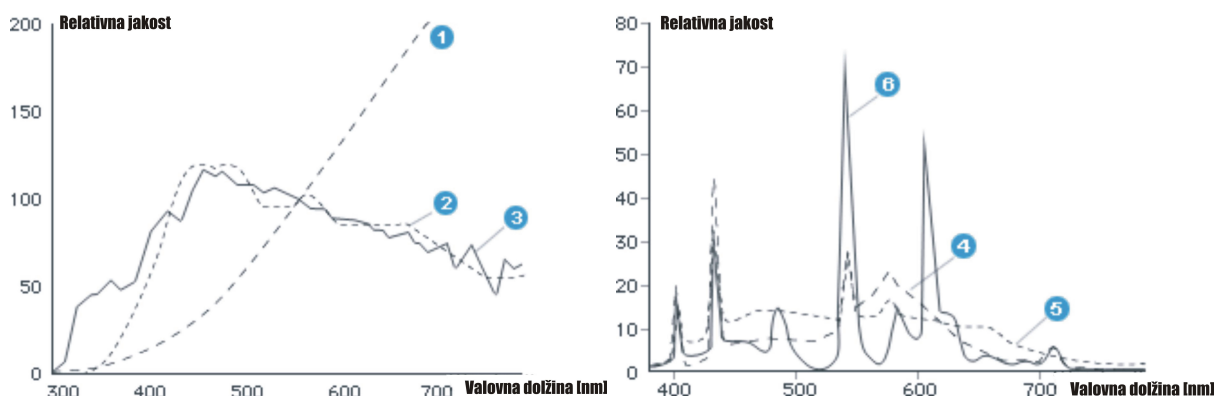
CIE je z namenom natančnega opisa osvetlitve, ki ji bo predmet (izdelek) ob uporabi najverjetneje podvržen, vpeljal različne nefizične vire svetlobe, t.i. standardne vire svetlobe $E(\lambda)$ – matematične specifikacije (spektralne tabele) potencialnih virov svetlobe [28]:

- **A** – svetila z žarečo nitko. Opisuje jih spekter, ki ga oddaja črno telo, segreto na 2856 K (slika 12 levo, **1**),
- **B** – direktna sončna svetloba (zastarelo),
- **C** – starejši opis dnevne svetlobe brez UV dela spektra, dobljen s filtriranjem vira A (slika 12 levo, **2**),



Slika 11: Sprememba zaznanega odtenka ozadja zaradi različnih vrst osvetlitve – navadna žarnica (levo) in D65 dnevna svetloba (desno)

- **Dxx** – novejši opisi dneвне svetlobe z dodanim UV delom spektra glede na vir C. Dvomestno število za črko D predstavlja temperaturo črnega telesa, ki bi oddajalo enakovreden spekter: npr. D65 opisuje severnoevropsko opoldansko svetlobo, ki ustreza črnemu telesu, segretemu na 6500 K (slika 12 levo, **3**),
- **Fxx** – fluorescenčna svetila. F serija svetil predstavlja različne vrste fluorescenčnih svetil:
 - F2 – *cool white* (hladna bela) (slika 12 desno, **4**),
 - F7 in F8 – *daylight* (dnevna svetloba) sta pogosto uporabljena kot približka za vira D65 in D50 (F7: slika 12 desno, **5**),
 - F11 – ozkopasovna (slika 12 desno, **6**).



Slika 12: CIE standardni viri svetlobe – zaporedno od št. 1 do št. 6: A, C, D65, F2, F7 in F11 [28]

Ker z vključitvijo standardnega vira svetlobe v izračun X, Y in Z komponente CIE XYZ barvnega prostora na nek način simuliramo izgled predmeta pod pričakovano končno osvetlitvijo, smo v našem primeru, ko naj bi se opazovalo fasadne plošče poslopij na prostem, uporabili specifikacijo dneвне opoldanske svetlobe s širokim in uravnoteženim spektrom CIE D65.

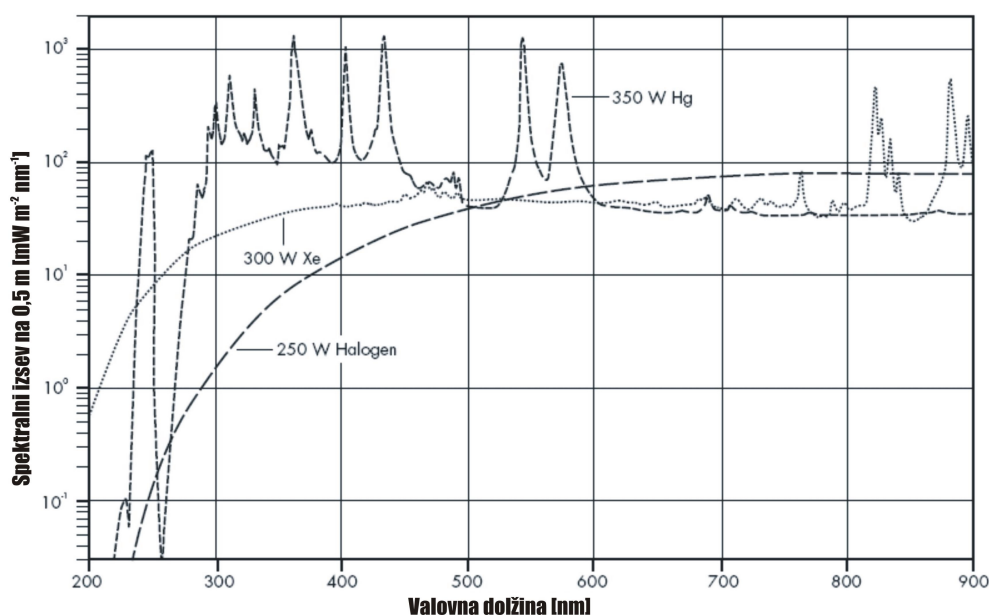
V tekočem razdelku smo predstavili tematiko končne osvetlitve (tiste, ki ji je predmet podvržen ob opazovanju) s strani njenega opisa s CIE standardi. Vendar se osvetlitev pojavi kot pomemben dejavnik tudi že pri samem razvoju sistema za ugotavljanje barvnega odstopanja – pri določanju relativnega odbojnega spektra predmeta, zaradi česar se bomo z njo srečali tudi v nadaljevanju, v razdelku 5.2.6.

3.1.3. Predmet

Predmet je v smislu barvnega zaznavanja opisan, ko poznamo njegov relativni odbojni spekter $R(\lambda)$ v vidnem območju EM spektra. Vsak osvetljen predmet, ki ni popolnoma črno ali prosojno telo, oddaja namreč določeno spektralno vsebino. Pri ugotavljanju relativnega odbojnega spektra predmeta se pojavita dve neželeni lastnosti njegove neidealne osvetlitve:

- **časovna spremenljivost** in
- **spektralna heterogenost.**

Obe težavi je mogoče zaobiti z uporabo posebnih ksenonskih svetil s kratkim lokom (ang. *Xenon short-arc light source*), ki imajo stabilen izhod in v primerjavi z drugimi svetlobnimi viri zelo homogen ter širok spekter podoben sončnemu (slika 13), vendar jih potreba po posebnem, reguliranem napajanju (potrebujejo vžigalni pulz v območju od 10 kV do 60 kV, imajo negativni temperaturni koeficient...), varnostnem ohišju (zaradi visokega tlaka) in sama tehnologija izdelave napravi zelo drage.



Slika 13: Tipični izhodni spekter ksenonskega (300 W Xe) in živosrebrnega (350 W Hg) svetila s kratkim lokom ter halogenskega svetila (250 W Halogen). Očitna je prednost ksenonskih svetil v širini in enovitosti izhodnega spektra [29]

Iz teh razlogov smo se odločili v našem sistemu uporabiti široko dostopno 500 W halogensko svetilo z zveznim, vendar ne toliko stabilnim in v kratkovalovnem (vijolično-modrem) področju siromašnim izhodnim spektrom (slika 13), ki smo ga z ustreznimi, v razdelku 5.2.6 predstavljenimi prijemi izkoristili do take mere, da je ustrezal nalogi svetlobnega vira v našem merilnem sistemu.

3.1.4. Izračun tristimulus vrednosti CIE XYZ barvnega prostora

Ko s pomočjo CIE 1964 10° krivulj barvnega ujemanja $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ definiramo opazovalca ter s CIE D65 standardnim virom svetlobe osvetlitev $E(\lambda)$ in z relativnim odbojnim spektrom $R(\lambda)$ predmet, lahko z izračunom tristimulus vrednosti X , Y in Z (enačba 8) opravimo prehod iz spektralnega v CIE XYZ barvni prostor.

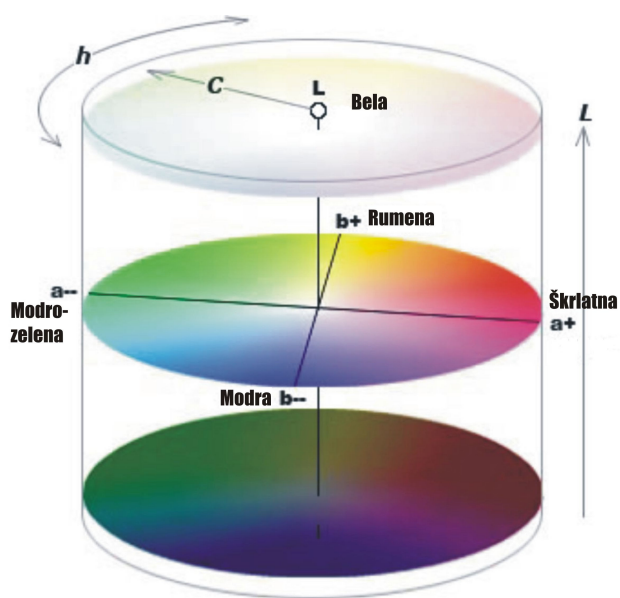
$$\begin{aligned}
 X &= K \cdot \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)} \\
 Y &= K \cdot \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)} \\
 Z &= K \cdot \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Pomanjkljivost CIE XYZ barvnega zapisa je, poleg neskladnosti s človekovim načinom predstave barv, njegova zaznavna nehomogenost - določena evklidska razdalja v tristimulus koordinatah po različnih predelih barvnega prostora za človeka ne pomeni po velikosti enako zaznane barvne razlike.

3.2. Prehod v CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor

Pomanjkljivosti CIE XYZ barvnega prostora v največji meri odpravimo s preslikavo v CIE $L^*a^*b^*$ in nato v CIE $L^*C^*H^*$ barvni prostor, ki temeljita na **Heringovi štiribarvni teoriji nasprotnih barv**. Le-ta je bila postavljena, da bi lahko obrazložili številne pojave, za katere tribarvna teorija ne pozna primerne razlage. Kot primer lahko omenimo t.i. pojav zakasnele slike (ang. *after-image*), ko se človeško oko privadi na npr. rumen dražljaj, po njegovi odstranitvi pa ostane na istem mestu občutek zaznavanja modrega dražljaja. Hering predlaga tri zbirne vode z nasprotujočimi si signali – dva kromatična in enega akromatičnega: rumeno-modrega, rdeče-zelenega in črno-belega. Razlog za tako izbiro je dejstvo, da barv ni mogoče dojeti kot hkratno kombinacijo rumene in modre, ali rdeče in zelene, temveč samo kot rumeno-rdečo, rumeno-zeleno, modro-rdečo in modro-zeleno mešanico [27].

CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor si lahko predstavljamo kot cilinder, določen z zbirnimi vodi L^* (svetlostni), a^* (rdeče-zeleni) in b^* (rumeno-modri) tako, kot je prikazano na sliki 14.



Slika 14: Predstavitev CIE $L^*a^*b^*$ barvnega prostora [31]

Prehod iz CIE XYZ v CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor opisujejo nelinearne enačbe in pogoji, zapisani v enačbi 9 [32].

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\
 a^* &= 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \\
 b^* &= 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$f(t) = t^{\frac{1}{3}} \text{ za } t > 0,008856$$

$$f(t) = 7,787 \cdot t + \frac{16}{116} \text{ drugod}$$

X_n , Y_n in Z_n predstavljajo koordinate bele točke za uporabljeno osvetlitev.

Čeprav se človeku zdi bela barva vedno enaka ne glede na različne vrste osvetlitve, se njena spektralna vsebina močno spreminja – pri uporabi svetil z žarilno nitko je nekoliko bolj oranžna, če jo primerjamo s tisto, dobljeno pri dnevni svetlobi. Pretvorba v CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor upošteva ta pojav z vključitvijo koordinat X_n , Y_n in Z_n , ki so za različne standardizirane osvetlitve (v našem primeru za CIE D65) določene in tabelirane [33].

3.3. Prehod v CIE $L^*C^*h^*$ barvni prostor

Predstavitev CIE $L^*a^*b^*$ barvnega prostora je intuitivnejša v polarnih koordinatah, kar izkoriščajo vse pomembnejše enačbe za izračun barvne razlike. Takemu zapisu pravimo CIE $L^*C^*h^*$ barvni prostor, njegove koordinate pa se skladajo s človekovim jezikovno-miselnim opisom barv:

- L^* (svetlostna) koordinata ostaja glede na CIE $L^*a^*b^*$ barvni zapis nespremenjena,
- C^* predstavlja barvno nasičenost,
- h^* predstavlja barvni odtenek.

Koordinate CIE $L^*C^*h^*$ barvnega prostora so poleg CIE $L^*a^*b^*$ koordinat označene na sliki 14. C^* tako pomeni vodoravno oddaljenost od središča v

barvnem cilindru, h^* pa kot v stopinjah, ki ga točka (barva) oklepa s pozitivno a osjo (enačba 10) [34].

$$\begin{aligned}C^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\ h^* &= \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)\end{aligned}\tag{10}$$

Tako smo prešli iz natančnega, vendar manj praktičnega zapisa barve s spektrom, do zgoščenega, intuitivnega in v veliki meri zaznavno homogenega zapisa barv v CIE $L^*C^*h^*$ barvnem prostoru, kar nam omogoča prehod na obravnavo ugotavljanja barvnega odstopanja.

4. Ugotavljanje barvnega odstopanja

4.1. MacAdamove elipse

Pri analizi barvne zaznave lahko po pretvorbi barve v CIE $L^*C^*h^*$ barvni prostor na vprašanje: »Kakšna barva je to?« odgovorimo z njenimi koordinatami v barvnem prostoru, če pa nas zanima odnos med dvema barvama, konkretnije: »Koliko se ti dve barvi razlikujeta?« se zdi logično, da bo odgovor v nekakšnem sorazmerju z razdaljo med obema barvama v tem barvnem prostoru.

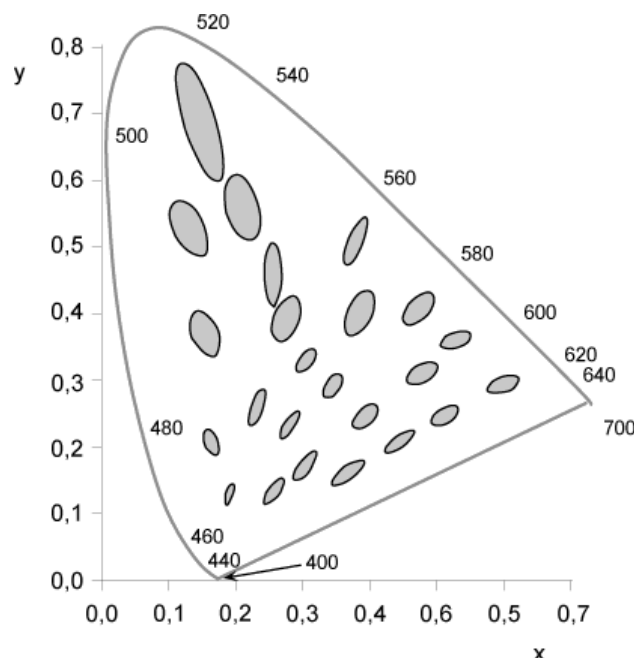
Prvi, ki se je lotil raziskave področja barvnih razlik je bil D. L. MacAdam, izsledki njegovih raziskav pa so bili objavljeni leta 1942 [35]. Napravil je preizkus, pri katerem so opazovalci opazovali dve različni barvi - prva je bila fiksna, druga pa spremenljiva. Naloga opazovalca je bila, da spremenljivo barvo nastavi tako, da se bo ujemala s fiksno. Doseženo ujemanje zaradi omejene natančnosti človekovega vidnega sistema seveda ni bilo popolno, kar je bilo v eksperimentu zabeleženo. MacAdam je pri tem opazil, da vse ekvivalentno nastavljene barve padejo v CIE 1931 xy kromatičnem diagramu v elipso, poleg tega pa, ker je bil preizkus izveden v 25 točkah kromatičnega diagrama, je bilo ugotovljeno tudi, da je velikost elips močno odvisna od pozicije testne barve v barvnem prostoru (slika 15).

MacAdamove elipse določajo metodo ugotavljanja razdalje v barvnem prostoru: v barvnem prostoru definirajo torej metriko. Po definiciji so MacAdamove elipse krogi z enakimi polmeri, razlog, da izgledajo v kromatičnem diagramu kot elipse, pa tiči v tem, da je CIE 1931 xy kromatični diagram (kot tudi CIE 1931 barvni prostor nasploh) glede na to metriko ukrivljen.

CIE $L^*a^*b^*$ barvni prostor je bil definiran z namenom, da bi vpeljal zaznavno homogenost, torej naravno barvno metriko v barvni prostor, ki bi bil glede na CIE XYZ barvni prostor *homeomorfen* (bil bi rezultat zvijanja in raztegovanja le-tega) in v katerem bi MacAdamove elipse v kromatičnem diagramu izgledale kot krogi z enakimi polmeri – in na kromatičnem diagramu CIE ab take tudi so.

Barvna razlika naj bi teoretično torej bila sorazmerna evklidski razdalji dveh barv v CIE $L^*a^*b^*$ barvnem prostoru, vendar se je kasneje izkazalo, da ta barvni prostor še vedno ni povsem brez deformacij, kljub temu da je res manj

deformiran kot njegov predhodnik, CIE XYZ barvni prostor. Zaradi tega je prišlo in še prihaja do različnih predstavitev poskusov učinkovitejših metod ugotavljanja barvnih razlik, ki naj bi bile skladnejše s človekovim dožemanjem le-teh.



Slika 15: MacAdamove elipse zaznavne enakosti prikazane na CIE 1931 xy kromatičnem diagramu. Elipse so zaradi preglednosti 10-krat povečane [36]

4.2. Model barvne razlike CIE 1994

Eno izmed novejših metod, ki danes spada med najbolj uveljavljene in najnatančnejše načine ugotavljanja barvnega odstopanja in smo jo tudi uporabili v našem sistemu, je enačba, ki jo je leta 1995 CIE izdal kot del svetovane prakse za ugotavljanje barvne razlike pod imenom **CIE 1994 model barvne razlike** (skrajšano CIE94) in s simbolom ΔE_{94}^* (uporaba črke *E* izhaja iz nemške besede za občutenje - *Empfindung*) [37]. Enačba CIE94 je podobna starejši CMC(l:c) enačbi, ki je sprejeta kot angleški BSI standard (standard BS 6923:1988) [38] za ugotavljanje majhnih barvnih razlik, s tem da njene utežne funkcije večinoma slonijo na RIT (Rochester Institute of Technology)/DuPont tolerančnih podatkih, izpeljanih s pomočjo poskusov z avtomobilskimi barvami na gladkih vzorčnih površinah [39], kar je skladno z načrtovano namembnostjo našega merilnega sistema.

Izračun CIE94 temelji na CIE $L^*C^*h^*$ barvnem zapisu, s tem da v enačbi ne nastopa odtenek h^* , marveč metrična razlika ΔH^* vzorčnega ($L_2^*, a_2^*, b_2^*, C_2^*, h_2^*$) in referenčnega odtenka ($L_1^*, a_1^*, b_1^*, C_1^*, h_1^*$) (enačba (11))

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2} = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 - (\Delta C^*)^2} \quad (11)$$

Error! Reference source not found.

ΔE_{ab} je osnovna (evklidska) barvna razlika v CIE $L^*a^*b^*$ barvnem prostoru.

Enačba CIE94 je zapisana v enačbi 12.

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{k_H \cdot S_H}\right)^2} \quad (12)$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot C_1^*$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot C_1^*$$

Kjer so S_L , S_C in S_H **utežnostne funkcije**, k_L , k_C in k_H pa **parametrični faktorji**.

S parametričnimi faktorji lahko vplivamo na posamične komponente barvne razlike, s čemer lahko kompenziramo morebitna odstopanja od referenčnih pogojev, ki bi se odražala v spremembi zaznavnih toleranc. Pri tem so referenčni pogoji, pod katerimi je bila razvita metoda CIE 1994, naslednji: CIE D65 1000 lx osvetlitev, sivo ozadje, homogeno obarvani vzorci, minimalni razmak vzorcev, ΔE_{94}^* med 0 in 5 ter normalni barvni vid [30].

Iz enačbe metode CIE94 je razvidno, da pri dani barvni referenci in izbrani vrednosti ΔE_{94}^* le-ta opisuje tolerančno območje v CIE $L^*C^*h^*$ barvnem prostoru kot elipsoid, ki mu pravimo **elipsoid barvne sprejemljivosti**. Njegova

prostornina (velikost), ki smo jo določili z izbiro ΔE_{94}^* , nam namreč predstavlja območje barvne tolerance, njegova oblika pa se s pomočjo utežnostnih funkcij spreminja v odvisnosti od barvne nasičenosti reference C_1^* . Z v enačbo CIE94 vgrajenimi parametričnimi faktorji je mogoče njegovo obliko dodatno prilagajati specifičnim zahtevam, vendar se v praksi večinoma uporabljata samo naslednji kombinaciji:

- $k_L = 2, k_C = k_H = 1$ za tekstil in
- $k_L = k_C = k_H = 1$ za ostala področja.

Pri dani barvni referenci in vzorcu predstavlja izhod enačbe CIE94 število ΔE_{94}^* , ki naj bi bilo sorazmerno z zaznano barvno razliko, kar je le še korak do končnega rezultata, do katerega smo se pri razvoju našega sistema želeli dokopati. To je ugotavljanje barvnega odstopanja, torej odločanje, ali vzorec s svojo barvo vidno odstopa od reference.

V ta namen se uporablja **prag barvne sprejemljivosti** (*cf* – ang. *commercial factor*, pri uporabi v CIE 1994: k_v), ki določa največjo še dopustno vrednost ΔE_{94}^* , pod katero opazovani vzorci še ustrezajo kvalitativnim kriterijem glede barvnega odstopanja. V industrijski praksi se večinoma uporablja $k_v = 1$ ($\Delta E_{94}^* \leq 1$), kar predstavlja enoto komaj opazne barvne razlike, vendar se ga lahko za specifične zahteve in področja prilagodi [39]. To smo v našem merilnem sistemu tudi storili.

5. Implementacija sistema za ugotavljanje barvnega odstopanja

5.1. Predpriprava: omejitev najvplivnejših motenj sistema

Ker je naloga našega merilnega sistema zagotavljanje kakovosti med potekom proizvodnje, je potrebno med njegovim razvojem premisliti o čim več motilnih faktorjih in jih že na samem začetku skušati v čim večji meri omejiti, da ne bi povzročali težav, ko bo sistem vključen v proizvodni proces. Izkazalo se je, da med pomembnejše motnje spadajo okoliška svetloba in motnje ob analogni povezavi kamere z računalnikom, če uporabljena video kamera nima digitalnega izhoda.

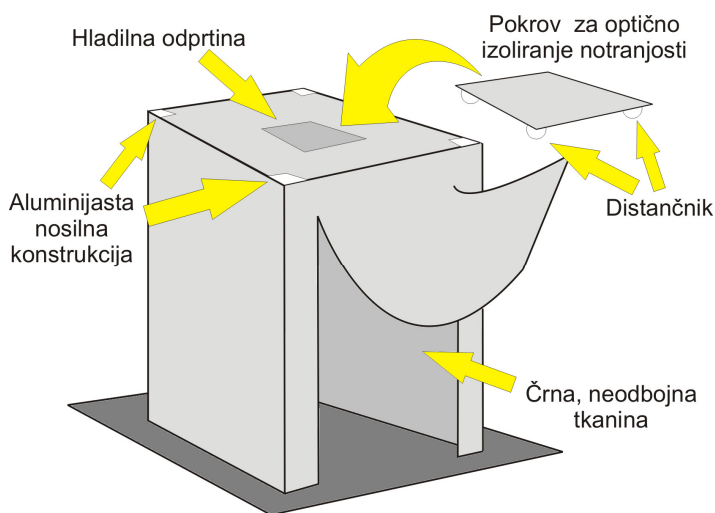
5.1.1. Motilna okoliška svetloba

Prva in najočitnejša motnja pri optičnih sistemih zagotavljanja kakovosti je okoliška svetloba – to je svetloba, ki ni del osvetlitve sistema. Kako spreminjajoča je, se človek v vsakdanjem življenju niti ne zaveda, ker naš vidni sistem podzavestno opravi velik del kompenzacij sprememb le-te. Do sprememb prihaja zaradi najrazličnejših vzrokov: staranja žarnic v prostoru, nihanja omrežne napetosti, ki napaja žarnice, senc premikajočih se objektov v prostoru, vremena, pozicije sonca na nebu in še kaj bi verjetno lahko dodali.

Zatorej je pred kakršnimkoli resnim delom merilnemu sistemu nujno zagotoviti ustrezno svetlobno zaščito (zastor) in ga tako optično povsem ločiti od motečega okolja. Taka previdnost je dobroprišla tudi v primerih, ko imamo namen uporabiti enega izmed prijemov za kompenzacijo sprememb v osvetlitvi (kot je to v našem primeru), saj tako motnje onemogočimo že pred prihodom v merilni sistem.

S tem namenom smo prototipno izvedbo merilnega sistema osnovali na aluminijasti konstrukciji, ki smo jo odeli v po meri sešito črno pokrivalo, tako da je bil ves sistem brez lastne osvetlitve v popolni temi. Z uporabo črne, neodbojne tkanine smo do največje možne mere zmanjšali neželene odseve v notranjosti

merilnega prostora. Težava je sedaj nastala zaradi uporabe močno segrevajočega se 500 W halogenskega svetila v njem, zaradi česar je bilo potrebno iz varnostnih razlogov zagotoviti izhod vročega zraka in hkrati paziti, da ne bi okoliški svetlobi s tem omogočili dostopa v merilni prostor. Z odprtino na zgornji ploskvi zastora, s črnim in nekoliko večjim pokrovom od le-te (da okoliška svetloba v čim manjši meri sveti neposredno v merilni prostor) in distančniki zanj (za zagotovitev neoviranega prehoda vročemu izhodnemu zraku) smo to težavo rešili (slika 16).



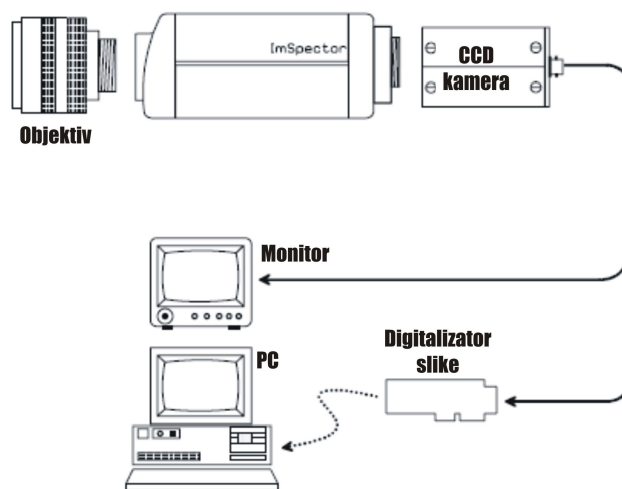
Slika 16: Zastor za optično izolacijo merilnega sistema

Seveda je taka rešitev namenjena laboratorijskemu prototipu – za uporabo sistema v dejanskem proizvodnem procesu je potrebno ob upoštevanju konkretnih razmer in omejitev izdelati prototipnemu funkcijsko enakovreden zastor.

5.1.2. Motnja ob uporabi analogne video kamere

V začetni izvedbi merilnega sistema smo uporabili analogno video kamero Sony XC-75 v kombinaciji z osebnim računalnikom, opremljenim s sistemom za zajem analogne slike Matrox Meteor, in črno-belim (Č/B) kontrolnim monitorjem (slika 17). Povezovalni kabel kamere je bil dolg okoli štiri metre, kar bi lahko ustrezalo dejanskim razmeram v proizvodnji. Take konfiguracije smo se poslužili z

namenom izkoriščenja obstoječe laboratorijske opreme, vendar bi se lahko podobna želja porodila tudi pri naročniku, ki bi morda želel svojo že obstoječo ali neuporabljeno opremo koristneje uporabiti.

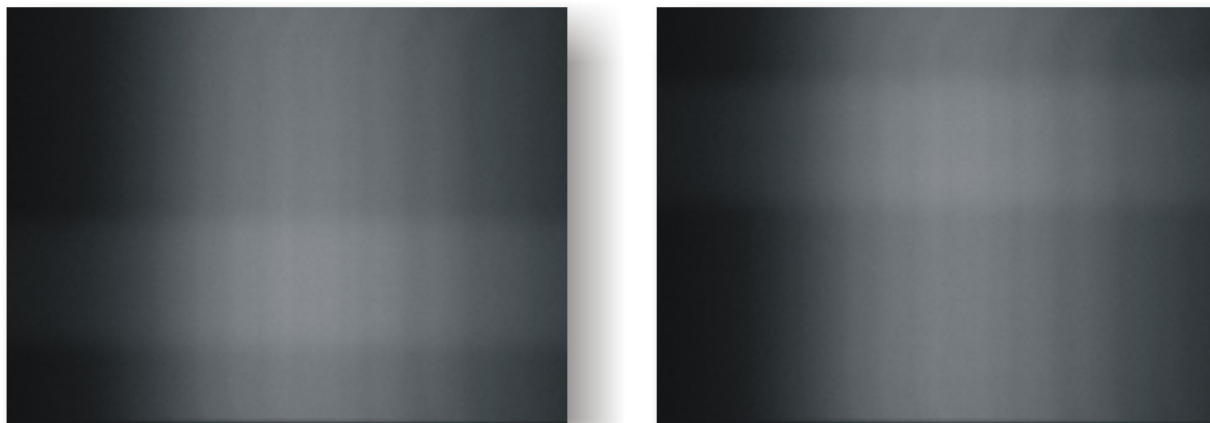


Slika 17: Shema prvotnega delno analognega sistema [40]

Ob primerjavi rezultatov meritev istega vzorca nas je presenetilo dejstvo, da dobivamo povsem različne rezultate, čeprav naj bi bil sistem ne samo na prvi pogled časovno pretežno nespremenljiv. Do kvalitativne spremembe je prišlo le takrat, ko smo meritve pognali časovno eno takoj za drugo – takrat se izmerjene vrednosti skoraj niso razlikovale. To je bil razlog, da smo sistem večkrat pregledali od vhoda do izhoda, in, šele ko smo kamero priklopili na monitor, na katerem smo lahko opazovali »živo« sliko, smo opazili vzrok trdoživih težav – časovno spremenljivo motnjo v obliki po navpičnici počasi potujočega in za celotno širino slike širokega svetlejšega področja na originalnem spektru, ki smo ga ob opazovanju zamrznjene slike spektra spregledali (slika18). To je bil hkrati odgovor, zakaj se rezultati skoraj niso spremenili, če smo meritve ponovili v zelo kratkem času.

Ker je motnja po izgledu izrazito analogne narave, je lahko razlog za njen nastanek v sami video kameri ali v sistemu za zajem analogne slike. Seveda bi bilo s poskušanjem mogoče ugotoviti točen vzrok motnje in jo odpraviti, vendar smo se mi odločili poslužiti radikalnejše in hkrati učinkovitejše rešitve za njeno popolno odpravo. Izvedli smo prehod v popolnoma digitalen sistem, kar smo dosegli z uporabo digitalne industrijske video kamere in računalnika,

opremljenega z digitalnim IEEE 1394 (*Firewire*, *iLink*) video vhodom, kar dandanes ne predstavlja več posebnega finančnega zalogaja. Z uporabo *Firewire* vmesnika smo hkrati dobili tudi možnost neposrednega krmiljenja časa zaklopa kamere, kar se je v nadaljevanju izkazalo za pomembno prednost, s pomočjo katere smo implementirali t. i. strategijo spremenljivega časa zaklopa.



Slika 18: Časovno spremenljiva motnja – primer zajetega spektra (levo) in spekter istega vzorca, zajet po pretečenih približno 5 sekundah (desno)

5.2. Opis merilnega sistema

5.2.1. Razmislek, na kateri napravi naj sloni postopek natančne zaznave barve vzorca

Prva misel, ki se nam porodi, ko nam je zadana naloga ugotavljanja barve nekega predmeta, je: zakaj ne bi uporabili kar barvne video kamere? Seveda bi bil tak pristop za marsikatero nalogo strojnega vida ustrezen (npr. pri ugotavljanju barve dresa igralcev na igrišču), vendar to pri nadzoru kakovosti, ko je potrebno razločiti vsak barvni odtenek, ki ga je sposobno zaznati človeško oko, zaradi določenih omejitev ne pride v poštev.

Prva in bistvena omejitev barvnih video kamer je njihov sistem barvnega zapisa. Uporabljajo namreč dodajalni (aditivni) zapis s tremi osnovnimi barvami, ki ni sposoben predstaviti celotnega gamuta. Poleg tega originalno barvo na različne načine predrugačijo interpolacijski algoritmi (pri večini kamer, ki ne uporabljajo

treh CCD tipal in razpršilne prizme), bližnje-infrardeč (NIR) filter in morebitni ostali vgrajeni postopki izboljševanja slike [41].

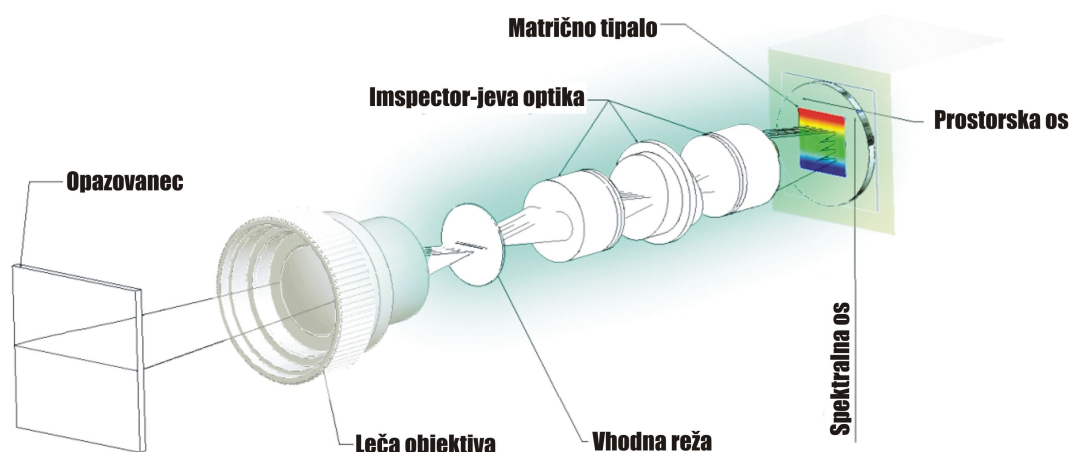
Poslužiti se je potrebno naprave, ki verodostojno opiše vsak barvni odtenek, ki ga je človek sposoben zaznati, in omogoča njihovo dobro medsebojno razločevanje. Tega so sposobne naprave, ki natančno zaznavajo določen pas EM valovanja - spektrofotometer in spektrograf [42, 43]:

- Bistveni sestavni deli **spektrofotometra** so vir bele svetlobe, vrtljiva uklonska reža ali prizma, ločilna reža in svetlobno tipalo. Bela svetloba je s pomočjo uklonske reže ali prizme najprej razpršena, nato ločilna reža zaustavi ves spekter razen ozkega pasu določene valovne dolžine, ki je nato spuščen na (skozi) vzorec. Odbito (prepuščeno) svetlobo nato zazna svetlobno tipalo. Zaznavanje celotnega vidnega spektra je omogočeno s pomočjo vrtljive uklonske reže ali prizme, ki skozi ločilno režo pošlje natančno izbrano valovno dolžino razpršene bele svetlobe. Tako se lahko z množico meritev sestavi celoten odbojni (prepustni) spekter vzorca.
- **Spektrograf** je naprava, ki s pomočjo optičnega sistema razprši vhodni svetlobni snop glede na valovno dolžino in rezultirajoči močnostni spekter zazna z ustreznim detektorjem. Prvotni spektrografi so za detektor uporabljali fotografski papir, ki ga je v praksi dandanes večinoma zamenjalo CCD tipalo.

Ker je princip delovanja obeh naprav precej podoben, smo se zaradi boljše prilagodljivosti, enostavnejše izdelave (in s tem nižje cene) za naš merilni sistem odločili uporabiti razširjeno izvedbo spektrografa, t.i. slikovni spektrograf, ki ga v nadaljevanju podrobneje opisujemo.

5.2.2. Slikovni spektrograf: osnova našega sistema

Osrednji element, okoli katerega je zgrajen naš merilni sistem, predstavlja slikovni spektrograf ImSpector V8 finskega proizvajalca Specim [44]. To je razširjena izvedba običajnega spektrografa, ki zaznavo le točke površine opazovanega vzorca s pomočjo vhodne reže razpotegne v daljico (slika 19).



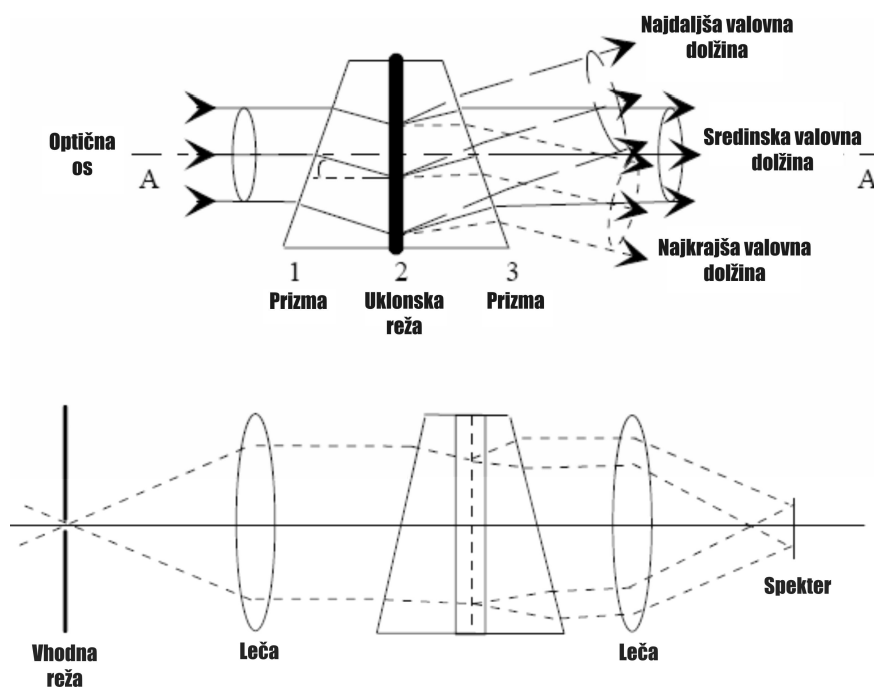
Slika 19: Shematski prikaz slikovnega spektrograфа s pripadajočimi vhodnimi (optični objektiv) in izhodnimi (CCD tipalo) elementi [44]

Ko je na vhodni strani pritrjen optični objektiv in na izhodni strani Č/B video kamera, lahko hkrati opazujemo določen pas EM spektra omejenega črtnega odseka. Tako dobljeni celoti v angleščini pravimo *spectral line imaging camera*, čemur bi lahko v prevodu rekli spektralna črtouslikovalna kamera.

Ker imamo namesto točke na razpolago celo daljico meritev, je mogoče pri opazovanju enobarvnega predmeta z zajemom ene same slike in povprečenjem po dolžini daljice izločiti velik del šuma, kar nam omogoča pridobitev uporabne meritve že z enim samim zajetjem slike. To je bistvena prednost slikovnega spektrograфа v primerjavi z navadnim, točkovnim, ki smo jo v našem merilnem sistemu tudi dobro izkoristili.

Bistveni sestavni del Inspector slikovnih spektrografov predstavlja patentirani PGP (ang. *prism-grating-prism*) element. To je zaporedni sestav dveh prizem z vmesno uklonsko režo, ki ima visoko uklonsko učinkovitost (med 50 % in 70%) in dobro spektralno linearnost (slika 20).

Z območjem zaznave med 380 nm in 800 nm Inspector V8 zaznava celotni vidni pas EM spektra in ga v rdečem področju malenkost tudi presega. Opazimo lahko, da se zgornja in spodnja valovnodolžinska meja razlikujeta za več kot oktavo, zaradi česar prihaja pri valovnih dolžinah, daljših od 760 nm, do prekrivanja vpadne svetlobe ničtega reda z vpadno svetlobo prvega reda valovnih dolžin, daljših od 380 nm (enačba 13).



Slika 20: Osnovni princip delovanja PGP elementa (zgoraj) in dejanska postavitve v slikovnem spektrografu (spodaj) [45]

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

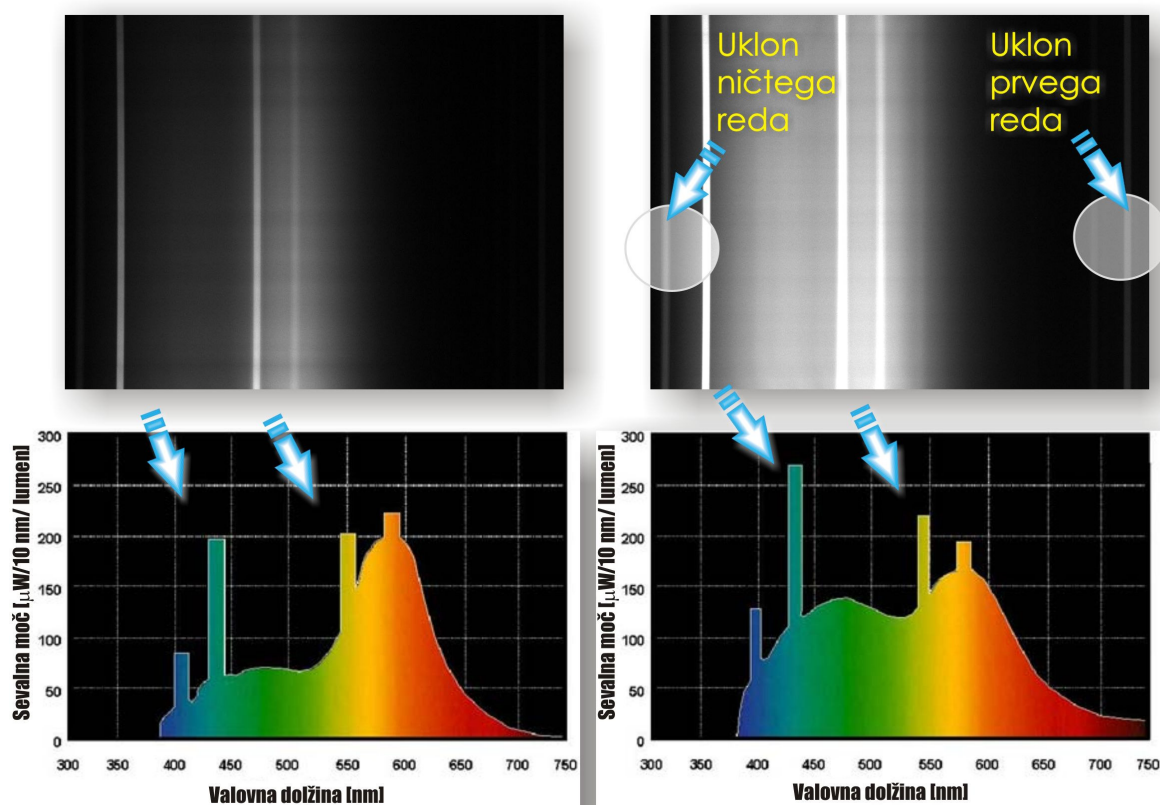
(13)

Kjer m pomeni red uklonitve ($0, \pm 1, \pm 2 \dots$), λ valovno dolžino vpadne svetlobe, d širino uklonske reže, α vpadni kot v režo in β uklonski kot iz reže.

V našem primeru to ne predstavlja posebne težave, saj nas valovne dolžine, ki presegajo vidni del EM spektra (λ daljši od 760 nm) ne zanimajo, zaradi česar smo ta del spektra enostavno izločili iz nadaljnje obravnave z neupoštevanjem skrajno desnega dela slike (slika 21 zgoraj desno). V primerih, ko izločitev skrajnega dela spektra ne pride v poštev, je potrebna uporaba OBF (*order blocking filter*) – frekvenčno odvisnega zaustavitvenega sita za svetlobo neželjenih redov.

5.2.2.1. Poravnava in kalibracija slikovnega spektrografa

Po spojitvi optičnega objektiva, slikovnega spektrografa in video kamere je nujno izvesti poravnavo in kalibracijo tako dobljene celote. Za izvedbo obojega so zelo



Slika 21: Zgoraj: sliki zajetih spektrov z namenom kalibracije slikovnega spektrografa (*CoolWhite* (levo) in *Daylight* (desno) fluorescenčna luč). Desno sta na osvetljenih področjih označena ničti in prvi uklonski red vpadne svetlobe
Spodaj: grafa karakterističnih porazdelitev spektralnih črt za zgoraj istoležni luči

prikladna fluorescenčna svetila s svojimi jasno izraženimi, ozkimi spektralnimi črtami lastnih polnilnih plinov.

Video kamera je na spektrograf pritrjena preko standardnega C-mount nastavka, ki je izveden tako, da pred popolnim zatiskom pritrditvenega obroča omogoča vrtenje kamere glede na spektrograf. Na ta način smo ob hkratnem opazovanju spektralnih črt na zaslonu kamero popolnoma poravnali s spektrografom, tako da so bile spektralne črte usmerjene povsem navpično. Spektralno koordinato smo torej usmerili po širini slike, krajevno pa po višini. Obrazložitev take izbire sledi v poglavju 5.2.4.

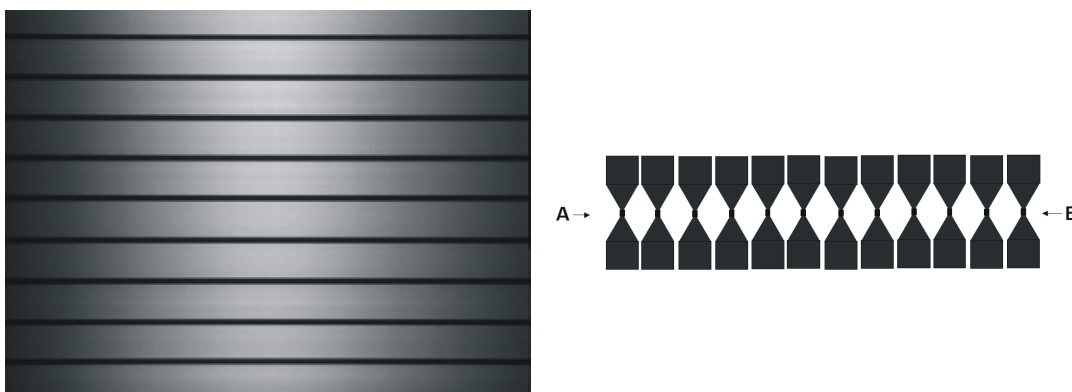
Za kalibracijo slikovnega spektrografa oziroma določitev preslikave med slikovnimi koordinatami in valovnimi dolžinami, smo uporabili zajeta spektra dveh različnih izvedb fluorescenčnih svetil, t.i. *Daylight* in *Cool White*, na belem listu papirja. Obe vrsti omenjenih svetil imata namreč dobro poznano

karakteristično porazdelitev spektralnih črt njunih polnilnih plinov (slika 21). S primerjavo dejanskih pozicij spektralnih črt na zajeti sliki z znanimi valovnimi dolžinami spektralnih črt posameznih polnilnih plinov smo lahko spekter preslikali iz slikovnega v valvnodolžinski prostor.

Ker je zajemalno področje slikovnega spektrografa daljica, je potrebno opraviti tudi poravnavo zajemalnega sistema (slikovnega spektrografa pritrjenega na kamero) glede na opazovano površino. V našem primeru je to potrebno zaradi dvojega:

- da lahko vemo, kje natančno leži polovica opazovane daljice, in s tem kje mora biti postavljen vzorec in kje bela referenca (več v poglavju 5.2.6),
- da poznamo točno lego opazovane daljice, da lahko čim bolj simetrično osvetlimo vzorec in belo referenco (več v poglavju 5.2.6).

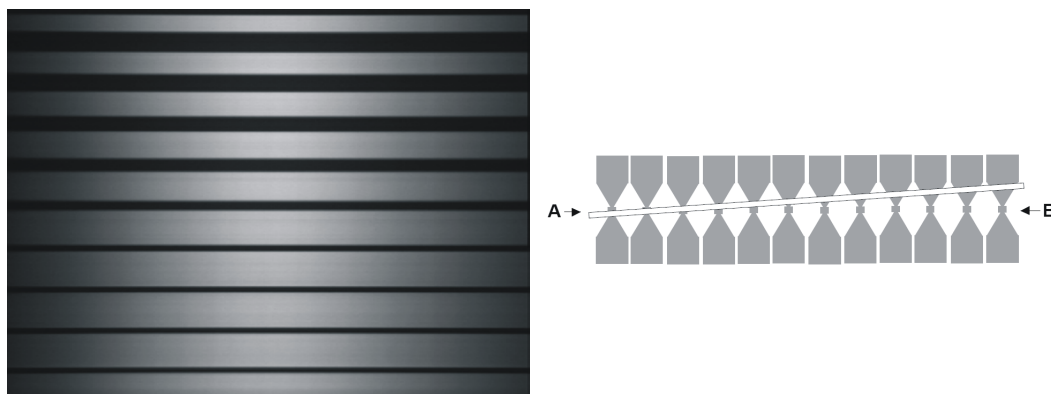
Poravnavo glede na opazovano površino smo izvedli s pomočjo posebnega vzorca, prikazanega na sliki 22 desno.



Slika 22: Vzorec za pomoč pri poravnavi sistema glede na opazovano površino [46]

Ko je bil slikovni spektrograf pravilno poravnan – opazovana daljica je torej ležala med točkama A in B (slika 22 desno) – smo dobili vrsto ozkih črnih vodoravnih črt na svetlejšem ozadju (slika 22 levo).

S prikazanim vzorcem je mogoče enostavno ugotoviti kakršnekoli nepravilnosti v položaju opazovane daljice – tako v poziciji kot v orientaciji. Primer spektra, ko daljica ne leži natanko med točkama A in B (slika 23 desno), ampak je nekoliko nagnjena, prikazuje slika 23 levo.



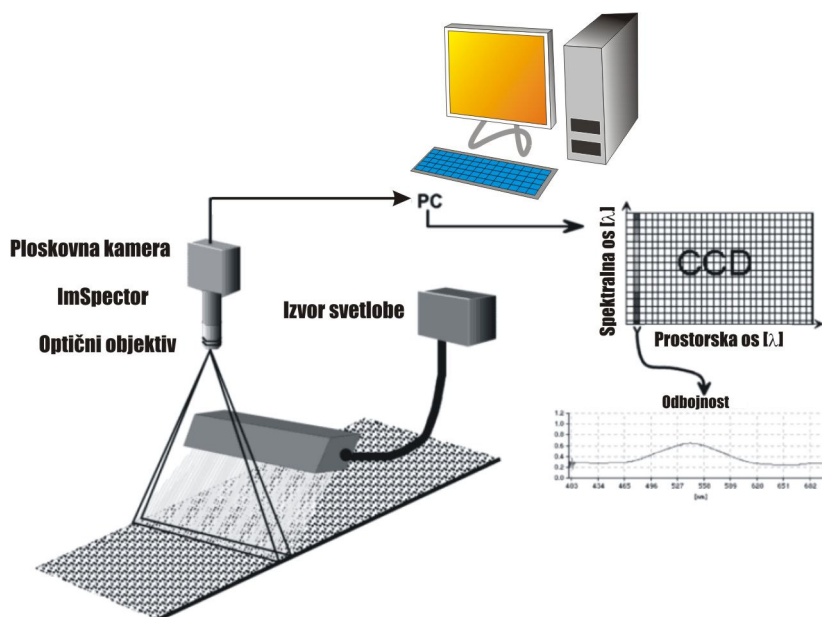
Slika 23: Nepravilno poravnana opazovana daljica (desno) in rezultat (spekter) take postavitve (levo) 46]

5.2.3. Optični objektiv

Na optični vhod slikovnega spektrografa smo preko standardnega C-mount nastavka pritrdili objektiv znamke Tamron z goriščno razdaljo 16 mm in svetlobno jakostjo $f/1,4$, kar je dvakrat večja vrednost od svetlobne jakosti našega slikovnega spektrografa, ki znaša $f/2,8$. To pomeni, da predstavlja omejujoč svetlobnojakostni faktor sam spektrograf in ne objektiv, zaradi česar ne bi z uporabo »hitrejšega« objektiv z nižjo f vrednostjo dosegli nikakršne pohitritve v zajemanju.

5.2.4. Video kamera

Kot smo omenili v razdelku 5.1.2, smo v prvotni različici merilnega sistema za zajemanje slike na izhodu slikovnega spektrografa uporabili analogno video kamero, vendar se je izkazalo, da je priporočljiv prehod na popolnoma digitalen sistem. Tako smo se poslužili digitalne industrijske Č/B video kamere DMK 41AF02 nemškega proizvajalca The Imaging Source, povezane na procesni računalnik preko Firewire digitalnega vmesnika (slika 24). Izboljšava v kakovosti slike je bila očitna.



Slika 24 Shematski prikaz končnega merilnega sistema [47]

Bistvene lastnosti video kamere DMK 41AF042 so sledeče [48]:

- ločljivost: 1280 x 960 slikovnih elementov,
- dinamični razpon: 8 bitni,
- format CCD tipala: 1/2" (4,6 mm x 6,4 mm),
- hitrost zaklopa: 1/10000 s do 30 s,
- ojačanje: od 0 dB do 36 dB.

Ker je ImSpector V8 prvenstveno načrtovan za uporabo z video kamerami, ki uporabljajo CCD tipalo velikosti 2/3", smo z namenom boljše izrabe našega manjšega 1/2" CCD tipala spektrograf (in s tem projekcijo spektra) zavrteli za 90° glede na shematski prikaz s slike 24. S tem smo za spektralno os uporabili daljšo stranico CCD tipala naše kamere in tako omogočili zajem celotnega vidnega spektra. Posledično se je skrajšalo krajevno pokrivanje tipala, ker pa je naš sistem namenjen kontroli enobarvnih vzorcev in je zajem daljice namenjen le povprečenju meritev, to ni zaznavno poslabšalo končnih rezultatov.

5.2.5. Procesni računalnik

Procesni računalnik, na katerega je bila priključena video kamera, je bil osebni računalnik s 3,2 GHz procesorjem Pentium IV in 2 GB delovnega pomnilnika. Na

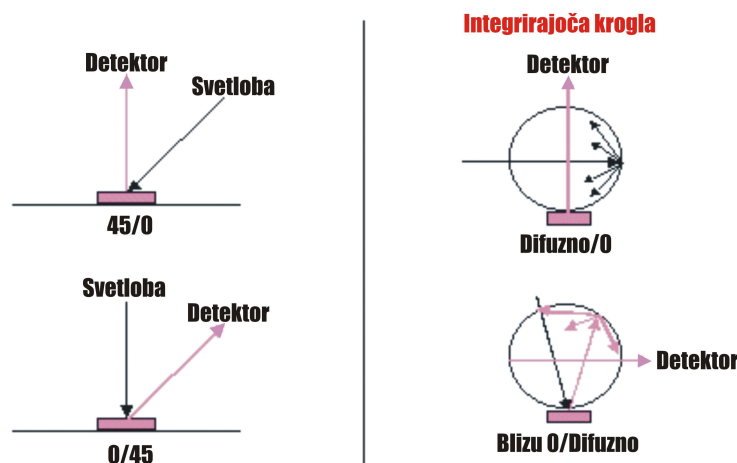
njem smo poganjali operacijski sistem Linux verzije 2.6.11.4-21.7 in grafičnim vmesnikom Suse KDE 3.4.0 Level »b«, ki se odlikuje s svojo hitrostjo, stabilnostjo, enostavnostjo, množico odprtokodnih orodij na spletu in nenazadnje prosto dostopnostjo. Za upravljanje video kamere smo uporabljali odprtokodno knjižnico libdc1394 [49]. To je visokonivojski vmesnik za video kamere, ki so skladne z *1394-based Digital Camera Specification* [50]. Konkretno smo z libdc1394 vzpostavili povezavo z video kamero, nastavili vse potrebne parametre kamere, zajeli posnetke in na koncu povezavo prekinili, ne da bi se poglobljali v nizkonivojske ukaze in registre.

5.2.6. Osvetlitev

Osvetlitev zavzema v sistemih za določanje barvnega odstopanja izredno pomembno mesto – tako pomembno, da je Mednarodna komisija za razsvetljavo CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*) standardizirala postavitev osvetlitve glede na detektor (t.i. optična geometrija) v takih sistemih. Tako obstajata po dve variaciji neposredne osvetlitve in osvetlitve s pomočjo t.i. integracijske krogle (slika 25). Integracijska krogla ima tri odprtine (za svetlobni izvor, vzorec in detektor) in ima svojo notranjost prevlečeno z odbojno plastjo, od katere se svetloba večkrat odbije in tako zagotovi enakomerno difuzno osvetlitev vzorca.

V našem primeru smo, predvsem zaradi enostavne implementacije tako v laboratorijski merilni komori kot kasneje na proizvodni liniji, uporabili halogensko svetilo moči 500 W v geometrijski postavitvi 45/0. Ker CIE standard predpostavlja točkovno merjenje, v našem sistemu pa smo morali čim bolj homogeno osvetljevati celotno dolžino merjene daljice, smo kot 45° vzpostavili med normalo svetila in pravokotnico na daljico, ležečo na sredini merilne površine. S tem, ko smo uporabili svetilo s svetilno površino reda velikosti merjene daljice in ga od nje ustrezno oddaljili, smo dosegli uporabno enovito osvetlitev celotne merjene daljice.

Krajevno nehomogena osvetlitev je lepo vidna na sliki 21 zgoraj, ko smo zajeli spektra fluorescenčnih svetil, ki nista bila pritrjena po prej opisanih navodilih, saj smo ju uporabili le za začetno kalibracijo slikovnega spektrografa. Fluorescenčna svetila so namreč zaradi svojega izrazito črtastega spektra (slika 21) neuporabna za spektrografske meritve, kar je podrobneje obrazloženo v razdelku 5.2.6.2.



Slika 25: CIE standardizirane optične geometrije [16]

5.2.6.1. Reševanje problema časovne spremenljivosti osvetlitve

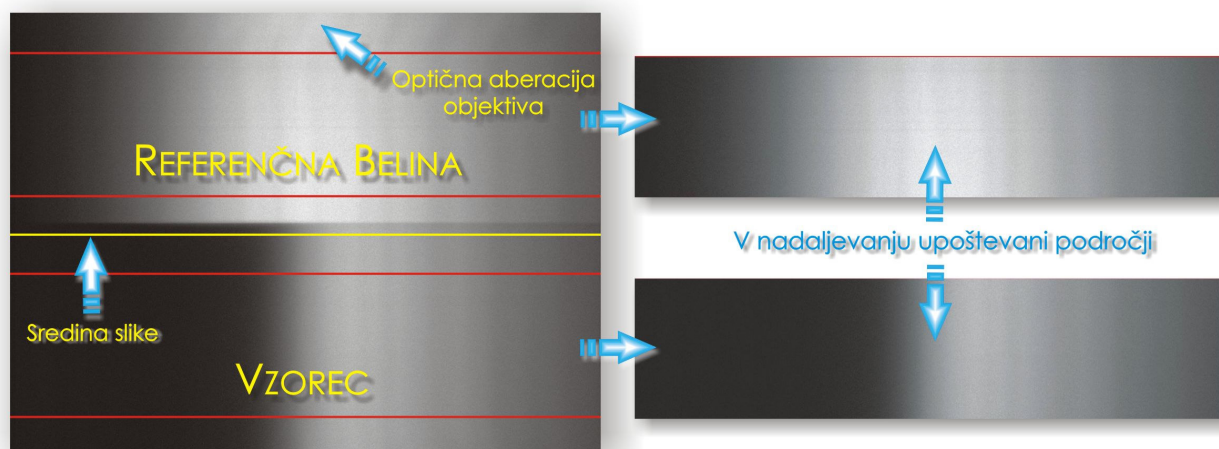
Pri reševanju problema časovne spremenljivosti osvetlitve je potrebno do najmanjše možne mere zmanjšati vpliv obeh njegovih sestavnih komponent na sistem:

- vpliv hitro spreminjajoče se komponente zaradi nestabilnosti napajalne omrežne napetosti,
- vpliv počasi spreminjajoče se komponente, ki jo povzroča staranje žarnice.

V našem sistemu smo se odločili uporabiti kompenzacijo obeh motenj s pomočjo hkratnega zajema spektra vzorca in **referenčne beline**. Referenčna belina bi v idealnem primeru bila bela keramična ali teflonska površina, ki smo jo zaradi težje dosegljivosti zamenjali s kvalitetnim belim foto papirjem. Ob zajemu sta vzorec in referenčna belina tako zavzemala po višini vsak približno polovico slike. Da bi olajšali vsakokratne priprave na zajem (odpravili iskanje točne sredine slike po višini) in da bi zmanjšali vpliv optičnih aberacij objektiva posebno na zgornjem robu slike, smo področje dejanskega zajemanja skrčili tako, kot je prikazano na sliki26.

Predhodno smo z namenom kompenzacije vplivov mirovnih tokov CCD tipala zajeli tudi **referenčno črnino** – sliko s povsem zakritim objektivom. Slika, zajeta na tak način, je sestavljena iz velike večine ničel, na nekaterih mestih pa nastopijo vrednosti, ki so od nič večje, čeprav do vznburjanja tam ne pride. Te vrednosti se pri zajemu odražajo kot konstanten odklon vrednosti posameznih

slikovnih elementov, ki ga je dobro odpraviti, čeprav je njegov vpliv na končni rezultat majhen.



Slika 26: Postopek določitve zajemalnih področij - spekter referenčne beline (bel list papirja) (zgoraj) in spekter oranžnega vzorca predlakirane tanke pločevine RAL 2004 (spodaj)

Ker nas zanima relativni odbojni spekter vzorca $R(\lambda)$ v točki s koordinatama y in λ na zajeti sliki vzorca, bomo odbojni spekter na tem mestu preimenovali v $R_{y\lambda}$. Z upoštevanjem spektra referenčne beline ($belina_{y\lambda}$) in referenčne črnine ($črnina_{y\lambda}$) v vsaki istoležni točki lahko v vsakem trenutku kompenziramo spremembe v spektru predmeta, nastale zaradi spremembe izhodnega spektra svetila (enačba 14 [51]).

$$R_{y\lambda} = \frac{vzorec_{y\lambda} - črnina_{y\lambda}}{belina_{y\lambda} - črnina_{y\lambda}} \quad (14)$$

V enačbi pomeni y prostorsko koordinato opazovanega črtnega odseka in λ valovno dolžino EM spektra.

5.2.6.2. Reševanje problema spektralne nehomogenosti osvetlitve

Z izrazitim primerom spektralne heterogenosti svetila smo se srečali že pri sliki 21, ki prikazuje dva tipična spektra fluorescenčnih žarnic. Dejstvo, da imajo fluorescenčna svetila izrazito črtast spekter, jih napravi povsem neprimerne za uporabo v kolorimetriji – skozi ves vidni spekter imajo povečini nizke spektralne vrednosti z nekaj zelo ozkimi in močnimi vrhovi.

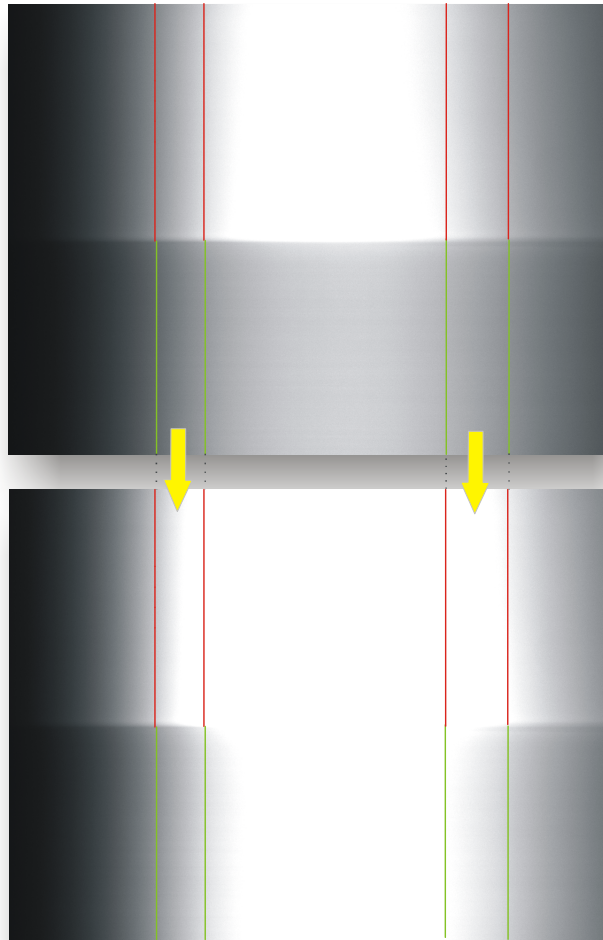
Svetila z zelo dinamično spektralno porazdelitvijo nam onemogočajo izvajanje meritev z zajetjem ene same slike s slikovnim spektrografom, saj je v območju vrhov (najmočnejšega izhoda) slika spektra referenčne beline (lahko tudi spektra vzorca) v nasičenju (kar pomeni, da je meritev tu neuporabna), hkrati pa so v območju nizkih spektralnih vrednosti referenčne beline zelo nizke, spektralne vrednosti vzorca pa le malo presegajo vrednosti šuma zajemanja.

V primerjavi s fluorescenčnimi ponujajo halogenska svetila veliko bolj zvezen, vendar na strani kratkih valovnih dolžin (v primerjavi z ostalim delom spektra) zelo siromašen spekter - na sliki 26 zgoraj nam spekter referenčne beline hkrati prikazuje zajeti spekter uporabljenega halogenskega svetila z vsemi pravkar opisanimi lastnostmi. Težave z spektralno dinamiko vira svetlobe so neodvisne od časa odprtja zaklopa in od širine odprtja zaslonke kamere, zato jih je nemogoče odpraviti z enim samim zajetjem slike.

Za rešitev tega problema smo se odločili uporabiti **metodo spremenljivega časa zaklopa**: sliko smo zajemali s fiksnim ojačanjem in zaslonko kamere odprto na največjo vrednost $f/1,4$, čas zaklopa pa spreminjali tako, da smo optimalno izkoristili ves izhodni spekter svetila. Slike smo začeli zajemati z dovolj kratkim časom zaklopa (0,02 s), da spekter referenčne beline ni bil nikjer v nasičenju, in ga eksponentno (s faktorjem 1,08 glede na prejšnjo vrednost) podaljševali do vrednosti, v kateri je prišel v nasičenje še zadnji pas vidnega spektra (2,2 s) – v primeru halogenskega svetila je to skrajni kratkovalovni vijolični pas. Medtem smo spektralne vrednosti beline in vzorca tik pred nasičenjem referenčne beline po navpičnih pasovih (konstantna λ koordinata) beležili (slika 27 zgoraj).

Po končanem postopku zajemanja 95 slik z različnimi hitrostmi zaklopa smo lahko z upoštevanjem zabeleženih spektralnih vrednosti iz pasov, povprečenih po prostorski koordinati, sestavili celoten relativni odbojni spekter $R(\lambda)$ predmeta, ki

je glede na uporabljeno svetilo mnogo bolj verodostojen od spektra, ki bi ga dobili z enkratnim zajemom.



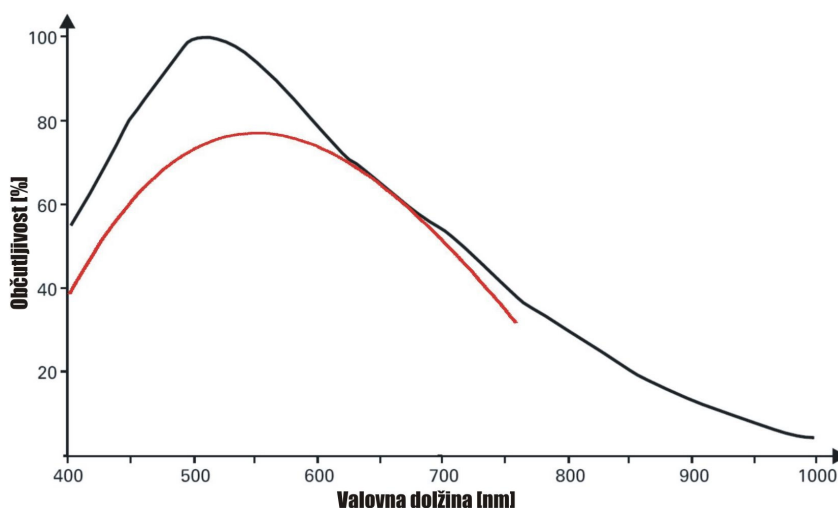
Slika 27: Princip delovanja metode spremenljivega časa zaklopa: rdeča pasova beline na zgornji sliki sta tik pred nasičenjem, ki nastopi pri naslednjem, daljšem zajemu (spodaj), zato je zabeležen relativni odbojni spekter v zelenih pasovih na zgornji sliki

Poudarili bi dejstvo, da je tako visok izkoristek svetila brez uporabe slikovnega spektrografa (in s tem brez uporabe metode spremenljivega časa zaklopa) zelo težko izvedljiv.

5.2.7. (Ne)upoštevanje občutljivosti v merilnem postopku

CCD tipalo video kamere in slikovni spektrograf imata vsak svojo karakteristično spektralno občutljivostno krivuljo (slika 28), ki bi ju bilo potrebno upoštevati, če bi razvijali sistem za merjenje absolutnega barvnega spektra. V tem primeru bi slikovni spektrograf najprej umerili s pomočjo ozkospektralnega izvora in nato izmerjene spektralne vrednosti množili s produktom obeh (obratnih) inverznih karakterističnih spektralnih občutljivostnih krivulj.

Ker gre v našem primeru za razvoj sistema, ki temelji na merjenju relativnega odbojnega spektra, se odstopanja, ki jih vnašajo različne občutljivostne krivulje v sistemu, medsebojno kompenzirajo.



Slika 28: Krivulja spektralne občutljivosti slikovnega spektrogra (rdeče) in CCD tipala video kamere (črno) [52 in 53]

6. Opazovanja in meritve

Ker je pridobitev testne množice v različni meri barvno odstopajočih vzorcev predlakirane tanke pločevine zelo težko izvedljiva (potrebno bi bilo dolgotrajno zbiranje vzorcev reklamiranih kolotov), smo se odločili izvesti testna opazovanja/meritve na množici različno obarvanih pasov, ki smo jih natisnili s pomočjo brizgalnega tiskalnika Hewlett-Packard PSC 2510 Photosmart. Natisnili smo družino osmih odtenkov za vsako družino barv po barvnem sistemu RAL, od barvne družine RAL 1xxx do družine 9xxx, kar znaša skupno 72 odtenkov. Vsi odtenki so informativno predstavljeni v prilogi »Paleta testnih barvnih odtenkov«, saj enakost s testnimi odtenki zaradi različnih datotečnih formatov in tiskalnikov ni zagotovljena.

Pri izvajanju meritev izmerjenih absolutnih vrednosti CIE $L^*a^*b^*$ nismo beležili zaradi več razlogov:

- sistem je prvenstveno namenjen ugotavljanju barvnega odstopanja med samo proizvodnjo, ne pa določanju barvnih odtenkov v laboratorijskih razmerah,
- tiskalniško barvilo na papirju ima povsem različne odbojne lastnosti in teksturo od laka na predlakirani tanki pločevini,
- izpis tiskalnika ni bil barvno umerjen,
- uporabljeno referenčno belino je predstavljal bel list papirja namesto namenskega materiala.

Kljub naštetemu naj bi sistem odseval dejansko barvno stanje vzorcev in s tem omogočal ugotavljanje barvnega odstopanja vzorcev raznolikih materialov.

Vsako družino testnih odtenkov sestavlja referenčna barva z referenčnimi CIE $L^*a^*b^*$ vrednostmi, kot jih določa RAL sistem, in odtenki, ki se od referenčnega različno razlikujejo po posamezni CIE $L^*a^*b^*$ komponenti. Zadnji v vsaki družini je odtenek, ki se od referenčnega razlikuje po vseh treh CIE $L^*a^*b^*$ komponentah. Seveda so CIE $L^*a^*b^*$ vrednosti samo približne oporne vrednosti, saj kot smo že omenili, naš brizgalni tiskalnik ni bil barvno umerjen.

V vsaki družini odtenkov smo s pomočjo testne množice opazovalcev določili tri odtenke z različnimi stopnjami razlikovanja od referenčne barve:

- odtenek, ki se od referenčnega pri opazovanju s prostim očesom ni razlikoval (priloga in tabela 1, **1**),
- odtenek, ki se je od referenčnega razlikoval malenkostno (priloga in tabela 1, **2**) in
- odtenek, pri katerem je bila razlika do referenčnega RAL odtenka lažje opazna (priloga in tabela 1, **3**).

RAL barvna oznaka	ΔE_{94}^*				
	Isti odtenek	Neopazna razlika 1	Minimalna razlika 2	Lažje opazna razlika 3	Standardni odklon (σ)
1003 Signal yellow	0,025	0,964	1,867	5,696	0,022
2008 Bright red orange	0,125	0,890	1,351	2,719	0,021
3015 Light pink	0,123	0,929	1,933	3,173	0,084
4005 Blue lilac	0,057	1,073	2,137	2,741	0,016
5024 Pastel blue	0,063	1,087	1,487	3,103	0,119
6018 May green	0,104	0,840	2,009	4,882	0,074
7040 Window grey	0,079	1,164	1,725	4,085	0,031
8008 Olive brown	0,106	1,187	1,553	3,821	0,045
9018 Papyrus white	0,090	0,442	1,560	2,690	0,066

Tabela 1: Rezultati meritev na paleti testnih barvnih odtenkov

Testno množico opazovalcev je predstavljalo 18 ljudi z zdravim barvnim vidom. Opazovanja so bila izvedena v nekontrolirani dnevni svetlobi (D65), saj smo hoteli simulirati dejanske pogoje, pod katerimi naj bi opazovalec fasado opazoval. Odtenke smo določili z glasovanjem – zmagovalec je bil tisti, ki je dobil več glasov za predstavnika določene stopnje razlikovanja.

Po opravljeni označitvi odtenkov smo z našim merilnim sistemom na njih opravili meritve – določitev barvne razlike ΔE_{94}^* med posameznimi izbranimi odtenki in referenčno barvo. Povprečja meritev prikazuje Tabela 1. Za ugotovitev ponovljivosti sistema smo izvedli tudi ugotavljanje barvne razlike ΔE_{94}^* med istim odtenkom (tabela 1, stolpec »Isti odtenek«). Z modro barvo so v tabeli označene najmanjše, z rdečo pa največje izmerjene vrednosti v posameznih stolpcih. Slednji predstavljajo glede na referenčne barve posameznih barvnih družin podobno razlikujoče se odtenke.

Kot lahko razberemo iz tabele 1, znaša ponovljivost našega sistema v najslabšem primeru $\Delta E_{94}^* = 0,125$. Pri tem zna razločevati tudi odtenke, ki jih človek ni sposoben. Ob primerjavi drugega in tretjega stolpca meritev lahko ugotovimo, da sta zgornja meja neopazne razlike ($\Delta E_{94}^* = 1,187$) in spodnja meja minimalne razlike ($\Delta E_{94}^* = 1,351$) precej skupaj. To območje je za nas najpomembnejše, saj predstavlja mejno območje, ko človek z normalnim barvnim vidom opazi, da se odtenka razlikujeta. Določimo lahko torej prag barvne sprejemljivosti k_v . Iz naših meritev lahko določimo k_v kot povprečje teh dveh vrednosti in, ker gre za sistem za zagotavljanje kakovosti, z zaokroževanjem k nižji vrednosti vgradimo tudi nekoliko varnostnega faktorja. Tako smo ugotovili, da je v primeru našega merilnega sistema za prag barvne sprejemljivosti dobro uporabiti vrednost $k_v = 1,2$, kar pomeni, da bi bila tista predlakirana tanka pločevina, ki bi se od referenčne barvno razlikovala za več kot $\Delta E_{94}^* = 1,2$, izločena iz proizvodnje. Kot komentar k tretjemu stolpcu meritev bi radi izpostavili dejstvo, da je nesmiselno govoriti o barvnih razlikah, večjih od približno 5, saj postanejo takrat barvne razlike že tolikšne, da jih človek težko opiše ali primerja med seboj.

7. Sklepne ugotovitve

Naša naloga je bila zasnovati in izdelati merilni sistem, ki bi lahko verno oponašal odločitve človeškega opazovalca glede barvne enakosti ali neenakosti reference in vzorca predlakirane tanke pločevine. V končni fazi je zato potrebna empirična določitev praga barvne sprejemljivosti k_v .

Ker je pridobitev kakovostne testne množice vzorcev predlakirne tanke pločevine težko izvedljiva, smo se odločili testirati naš merilni sistem na tiskani paleti testnih barvnih odtenkov. Ob primerjavi izhoda sistema ΔE_{94}^* in mnenj opazovalcev smo za naš sistem ugotavljanja barvnega odstopanja ugotovili, da znaša najustreznejši prag barvne sprejemljivosti $k_v = 1,2$. To je nekoliko višja vrednost od običajno uporabljene v industriji, vzrok za to pa bi bilo moč pripisati tudi alternativni testni metodi. Hkrati smo se lahko prepričali, da je izhod sistema ponovljiv in skladen z zaznavanjem človeškega vidnega sistema, saj je primerjava barv, ki so se opazovalcu zdele podobne, na izhodu sistema dala nizko vrednost ΔE_{94}^* in obratno, brez nobenih izjem, kar nakazuje na robustnost sistema.

Predstavljeni merilni sistem bi svojo nalogo v proizvodnji torej lahko odlično opravljal, težava pa bi se lahko pojavila zaradi časa meritve, ki ga potrebuje sistem ob uporabi metode spremenljivega časa zaklopa kamere. Da bi kakovostno zajeli celoten vidni spekter so namreč potrebna večkratna daljša zajetja slike, dolga tudi po dve sekundi, kar skupaj nanese dobrih dvajset sekund na meritev. Tolikšen interval bi morebiti lahko že predstavljal oviro v proizvodnem procesu ali glede na način proizvodnje (premikajoča se pločevina) vnašal napake v same meritve. Čas zajetja spektra bi bilo mogoče nekoliko skrajšati z uporabo močnejšega vira svetlobe (kar zaradi že tako visokih temperatur v merilni komori ne bi bilo priporočljivo), bistveno pa z uporabo nekoliko dražjega metal-halidnega svetlobnega vira z bolj uravnoteženim izhodnim spektrom.

Viri

1. Avtor ni podan, slika, BTC-CITY, Hal interactive d.o.o., 2002-2003, <http://www.btc-city.com>
2. Avtor ni podan, slika, Marcegaglia SpA, 2006, <http://www.marcegaglia.com/>
3. Avtor ni podan, Barvne palete, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., <http://www.ral.de>
4. Uroš Podbrežnik, Spektrofotometrična objektivizacija in upravljanje z barvnimi niansami predlakirane tanke pločevine: specialistično delo, UL FE, 2006
5. Uroš Podbrežnik, Nadzor barvnih nians predlakirane tanke pločevine s pomočjo spektrofotometra: diplomsko delo, UL FE, 2003
6. Mitja Placer, Boštjan Murovec, Janez Perš, Stanislav Kovačič, Ugotavljanje barvnega odstopanja izdelkov s slikovnim spektrografom, ERK 2006, Zv. B, str. 177-180, ISSN 1581-4572
7. Krešimir Matković, Tone Mapping Techniques and Color Image Difference in Global Illumination, poglavje: Colorimetry, Technische Universität Wien, Institut für Computergraphik und Algorithmen, Abteilung für Computergraphik, december 1997, <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/theses/matkovic/node14.html>
8. Michael Delahunt, slika, <http://www.artlex.com/ArtLex/s/see.html>
9. Skotopska občutljivostna krivulja, G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae. (2nd ed.), New York, Wiley, 1982, Tabela I (4.3.2)
10. CIE1924 $V(\lambda)$ fotopska občutljivostna krivulja, G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae. (2nd ed.), New York, Wiley, 1982, Tabela I (3.3.1)
11. Modificirana CIE1924 $V(\lambda)$ fotopska občutljivostna krivulja po Judd-Voss-u, G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae. (2nd ed.), New York, Wiley, 1982, Tabela I (5.5.2)
12. Fotopska občutljivostna krivulja po Stockman, Sharpe, Jagla in Jägle, L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla & H. Jägle. A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. Journal of Vision, 2005, 5, strani 948-968
13. Celine Loscos, Jan Kautz, slika, Advanced Modeling, Rendering and Animation 2007, Department of Computer Science, University College London, Velika

Britanija

http://www.cs.ucl.ac.uk/teaching/4074/Slides/JK2007/01_colour.pdf, stran 3

14. Avtor ni podan, slika, BT-Photonics Co. Ltd., <http://www.bt-photon.com/Echanpin%20HeNe.htm>
15. Alejandro Garcia, slika, Physics of Color, Dept. Physics, San Jose State University, <http://www.algarcia.org/PhysicsOfColor.ppt>, stran 32
16. Avtor ni podan, Frequently asked questions about Colour Physics, version 2.0a, Colourware Ltd., 2000, <http://www.colourware.co.uk>
17. Edward H. Adelson, Course 9.35: Color vision, MIT OpenCourseWare, Massachusetts institute of technology, 2004, http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Brain-and-Cognitive-Sciences/9-35Spring-2004/14BF30AB-D606-4DD3-83AC-81BEB66B0DD8/0/color_vision2004.pdf, stran 1
18. Avtor ni podan, CIE (1931) 2-deg color matching functions, Colour & Vision database, Color & Vision Research Laboratories, Institute of Ophtalmology, UCL, 2006, <http://www.cvrl.org/database/text/cmfs/ciexyz31.htm>
19. Celine Loscos, Jan Kautz, slika, Advanced Modeling, Rendering and Animation 2007, Department of Computer Science, University College London, Velika Britanija
http://www.cs.ucl.ac.uk/teaching/4074/Slides/JK2007/01_colour.pdf, stran 10
20. A. D. Broadbent, Trichromatic color matching, Département de génie chimique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Kanada, <http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/broadbent/TrichromaticColorMatching.pdf>, stran 2
21. Earl F. Glynn, Color Chromaticity Diagrams Lab Report, efg's Computer Lab, <http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm>
22. Celine Loscos, Jan Kautz, slika, Advanced Modeling, Rendering and Animation 2007, Department of Computer Science, University College, London, Velika Britanija,
http://www.cs.ucl.ac.uk/teaching/4074/Slides/JK2007/01_colour.pdf, stran 17
23. Avtor ni podan, What are chromaticity coordinates?, Frequently asked questions about Colour Physics, version 2.0a, Colourware Ltd., 2000, <http://www.colourware.co.uk>

24. Mark Roberts, slika, The CIE Colour System, School of Computer Science, University of Birmingham, Velika Britanija, <http://www.cs.bham.ac.uk/~mer/colour/cie.html>, slika 4
25. Prof. Harrit Fell, slika, Lecture 35, CS U540 Computer Graphics, College of Computer and Information Science, Northeastern University, Boston, ZDA, 2007, www.ccs.neu.edu/home/fell/CSU540/lectures/CSU540SP2007-35-Color.ppt, stran 21
26. Ruey-Feng Chang, Chapter 4 Color in Image and Video, Medical Image Processing laboratory, Dept. Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, 2007, www.csie.ntu.edu.tw/~rfchang/lab/pdf/MM/mm_chap4.pdf, stran 7
27. Avtor ni podan, National Physical Laboratory, 2007, Colorimetry, http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_5/2_5_4.html
28. Avtor ni podan, Precise color communication, Part II, Konica Minolta sensing, Inc., 2003, <http://www.konicaminoltaeurope.com/pcc/en/part2/07.html>
29. Avtor ni podan, Lamp spectra and irradiance data, LOT–Oriel Group Europe, http://www.lot-oriel.com/site/site_down/ls_irradiance_iten04.pdf
30. Avtor ni podan, Color learning: from the experts, Datacolor, 2002-2006, <http://www.datacolor.com/>
31. Bruce MacEvoy, Color Vision, 2005, <http://www.handprint.com/HP/WCL/color7.html#CIELAB>
32. Alan Roberts (British Broadcasting Corporation), Adrian Ford (University of Westminster), Colour Space Conversions, <http://www.martinreddy.net/gfx/faqs/colorconv.faq>
33. Avtor ni podan, CIE Standards, Colour & Vision database, Color & Vision Research Laboratories, Institute of Ophtalmology, UCL, 2006, <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>
34. Avtor ni podan, Precise color communication, Part IV, Konica Minolta sensing, Inc., 2003, <http://www.konicaminoltaeurope.com/pcc/en/part4/05.html>
35. Claudio Oleari, Colour Spaces, Chromaticity Diagrams and Non-Uniformity of Scale, Laboratory of Optics, Optical Spectroscopy and Applied Colorimetry, Physics Department, University of Parma, Italija, http://www.fis.unipr.it/~fermi/PagInternet_English/GCA_Color_Theory.html
36. Avtor ni podan, Introduction à la colorimétrie (2ème partie), Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son, Paris, Francija, 1998

http://www.cst.fr/IMG/pdf/Introduction_a_la_colorimetrie_2eme_partie_.pdf,
stran 7

37. CIE Publication 116-1995, 'Industrial Colour-Difference Evaluation', CIE, Dunaj, 1995
38. David Hoggie, The CIE 1994 Colour Difference Model, Scottish College of Textiles, Heriot Watt University, Edinburgh, Velika Britanija, <http://www.colorpro.com/info/data/cie94.html>
39. R. S. Berns, D. H. Alman, L. Reniff, G. D. Snyder, and M. R. Balonon-Rosen, "Visual determination of supra-threshold color-difference tolerances using probit analysis," Color Res. Appl. 16, strani 297-316, 1991
40. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, str 1-10
41. Avtor ni podan, How color cameras work, The Imaging Source Europe GmbH, 2005, <http://www.theimagingsource.com>
42. David R. Caprette, Principles of Spectrophotometry, Rice University, Houston, ZDA, 2005, <http://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/methods/protein/spectrophotometer.html>
43. Avtor ni znan, Obtaining Astronomical Spectra – Spectrographs, Australia Telescope Outreach and Education, 2004, <http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/spectrographs.html>
44. Avtor ni podan, slika, Spectral Imaging Ltd., <http://www.specim.fi>
45. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, str 1-5
46. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, Appendix 4, Technical note 1, str 1-2
47. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, str 1-4
48. Avtor ni podan, DMK 41AF02 – Overview, The Imaging Source Europe GmbH, 2007, <http://www.theimagingsource.com>
49. Avtor ni podan, SourceForge, Inc., 2007, 1394-based DC Control Library, <http://sourceforge.net/projects/libdc1394/>
50. Avtor ni podan, 1394 Trade Association, 1394-based Digital Camera Specifications, <http://www.1394ta.org/>

51. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, Appendix 3, Application note 4, str 1-2
52. Avtor ni podan, Spectral Imaging Ltd., ImSpector imaging spectrograph user manual, version 2.21, 2003, str 1-7
53. Avtor ni podan, FireWire cameras - Spectral sensitivity and color formats, Imaging Source Europe GmbH,
<http://www.theimagingsource.com/en/resources/whitepapers/download/fwcamspecwp.en.pdf>, stran 3

Spletne strani dostopane 30. septembra 2007

PRILOGA: Paleta testnih barvnih odtenkov**RAL 1003 Signal yellow: L*75, a*19, b*77****L*77, a*19, b*77** ①**L*79, a*19, b*77****L*75, a*24, b*77** ②**L*75, a*29, b*77****L*75, a*19, b*72****L*75, a*19, b*60** ③**L*77, a*24, b*72**

RAL 2008 Bright red orange: L*61, a*46, b*58**L*63, a*46, b*58** ①**L*66, a*46, b*58****L*61, a*51, b*58** ②**L*61, a*55, b*58** ③**L*61, a*46, b*55****L*61, a*46, b*50****L*63, a*51, b*55**

RAL 3015 Light pink: L*72, a*21, b*4



L*74, a*21, b*4



L*76, a*21, b*4 ①



L*72, a*25, b*4 ②



L*72, a*30, b*4 ③



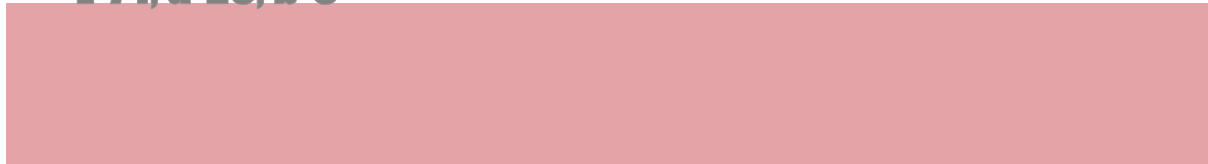
L*72, a*21, b*8



L*72, a*21, b*13



L*74, a*25, b*8



RAL 4005 Blue lilac: L*49, a*16, b*-24



L*51, a*16, b*-24 ①



L*54, a*16, b*-24



L*49, a*20, b*-24



L*49, a*23, b*-24 ③



L*49, a*16, b*-27 ②



L*49, a*16, b*-30



L*52, a*20, b*-27



RAL 5024 Pastel blue: L*60, a*-10, b*-18



L*62, a*-10, b*-18 ①



L*64, a*-10, b*-18 ②



L*60, a*-6, b*-18



L*60, a*-2, b*-18 ③



L*60, a*-10, b*-22



L*60, a*-10, b*-27



L*62, a*-6, b*-22



RAL 6018 May green: L*59, a*-35, b*40



L*61, a*-35, b*40



L*63, a*-35, b*40 ②



L*59, a*-39, b*40 ①



L*59, a*-43, b*40



L*59, a*-35, b*35



L*59, a*-35, b*30 ③



L*61, a*-39, b*35



RAL 7040 Window grey: L*66, a*-1, b*-3



L*68, a*-1, b*-3



L*70, a*-1, b*-3



L*66, a*-3, b*-3



L*66, a*-5, b*-3 ②



L*66, a*-1, b*-8



L*66, a*-1, b*-13 ③



L*68, a*-3, b*-8 ①



RAL 8008 Olive brown: L*37, a*12, b*24



L*39, a*12, b*24 ①



L*41, a*12, b*24



L*37, a*16, b*24



L*37, a*20, b*24 ③



L*37, a*12, b*29 ②



L*37, a*12, b*34



L*39, a*16, b*29



RAL 9018 Papyrus white: L*81, a*-2, b*2

L*83, a*-2, b*2

L*85, a*-2, b*2

L*81, a*0, b*2 ①

L*81, a*2, b*2

L*81, a*-2, b*6 ②

L*81, a*-2, b*10 ③

L*83, a*0, b*6

Obrazložitev palete je podana v poglavju 6.

OPOMBA:

V prilogi predstavljeni testni odtenki niso verna kopija tistih, ki so bili uporabljeni v izvedenih meritvah/opazovanjih!

Izjava

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca, univ. dipl. inž. el. in somentorja prof. dr. Stanislava Kovačiča, univ. dipl. inž. el.. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Mitja Placer