

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Matic Potočnik

**Kalibracija in analiza barv na
digitalnih fotografijah kamnin**

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM RAČUNALNIŠTVO IN
INFORMATIKA

MENTOR: prof. dr. Franc Solina

SOMENTOR: doc. dr. Uroš Herlec

Ljubljana 2014

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil \LaTeX .



Št. naloge: 01960 / 2013
Datum: 14.9.2013

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **MATIC POTOČNIK**

Naslov: **KALIBRACIJA IN ANALIZA BARV NA DIGITALNIH FOTOGRAFIJAH
KAMNIN
COLOUR CALIBRATION AND ANALYSIS OF DIGITAL ROCK
PHOTOGRAPHS**

Vrsta naloge: DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Tematika naloge:

Pri terenskem delu v geologiji je pomembno pravilno določanje barv in barvne pokritosti kamnin, kar je precej zamudno delo, hkrati pa tudi dokaj subjektivno, saj primerjave opravlja človek. Postopek bi bilo potrebno optimizirati (avtomatizirati) in napraviti bolj objektivnega s pomočjo računalniške analize digitalnih slik kamnin, posnetih z zrcalno refleksnim fotografskim aparatom. Preglejte področje barve kalibracije in določite ustrezen postopek zajema (osvetlitev, postavitve pripomočkov za barvno kalibracijo) in postopek barvne korekcije slik, da bodo odstopanja od realnih barv čim manjša. Implementirajte demonstracijsko aplikacijo, ki čim bolj avtomatizira celoten postopek barvne korekcije. Na podlagi testnih primerov ocenite učinkovitost metode in jo primerjajte z običajnimi geološkimi metodami.

Mentor:

prof. dr. Franc Solina

Somentor:

doc. dr. Uroš Herlec

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Matic Potočnik, z vpisno številko **63060270**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Kalibracija in analiza barv na digitalnih fotografijah kamnin

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Franca Soline in somentorstvom doc. dr. Uroša Herleca (Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo),
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 17. marca 2014

Podpis avtorja:

Hvala mentorju prof. dr. Francu Solini, somentorju doc. dr. Urošu Herlecu in asistentu Bojanu Klemencu, ki so s svojo strokovno pomočjo ogromno prispevali k nastanku tega dela. Hvala študentom Oddelka za geologijo za prostovoljno pomoč in mnenja o razviti aplikaciji. Hvala družini in prijateljem, ki so me vsa leta podpirali in vzpodbujali pri študiju.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Barvna teorija	3
2.1	Barvni prostor CIE 1931 XYZ	3
2.2	Barvni sistem Munsell	5
2.3	Barvna prostora CIE Lab in CIE LCh	8
2.4	Barvni prostor sRGB	10
2.5	Razdalja med barvami	10
3	Razvoj aplikacije	15
3.1	Cilji razvoja aplikacije	15
3.2	Uporabljene tehnologije	16
3.3	Zaznavanje barvne karte ColorChecker	20
3.4	Barvna korekcija fotografij	23
3.5	Uporabniški vmesnik	28
3.6	Uporaba drugih aplikacij	29
4	Testiranje aplikacije	33
4.1	Ocena natančnosti barvne korekcije	33
4.2	Primerjalna analiza	36

KAZALO

5	Sklepne ugotovitve	41
A	ColorChecker – tabela barvnih vrednosti	
B	Fotografije vzorcev iz primerjalne analize	

Povzetek

V diplomskem delu smo se posvetili opisu razvoja aplikacije za barvno korekcijo ter analizo terenskih in laboratorijskih fotografij v geologiji. Trenutne metode, ki jih geologi uporabljajo za določanje barv in barvne pokritosti, so drage, zamudne in/ali subjektivne, v tem delu pa smo predstavili metodo, ki bi te naloge poenostavila in objektivizirala. Najprej smo na kratko pregledali področje barvne teorije in se pri tem osredotočili na barvni sistem Munsell, ki ga geologi že desetletja uporabljajo kot standard za določanje barvnih odtenkov, ter na barvne prostore, ki smo jih sicer uporabili pri barvni korekciji in analizi, predvsem CIE Lab, CIE XYZ ter sRGB. Predstavili smo barvno kalibracijsko karto Macbeth ColorChecker oz. njeno novejšo in za terensko delo bolj primerno izvedbo X-Rite ColorChecker Passport. Opisali smo pristop k zaznavanju barvne karte ColorChecker z algoritmom ASIFT, zatem pa smo opisali še štiri postopke za avtomatsko barvno korekcijo fotografij s pomočjo barvne karte ColorChecker. Na koncu smo prikazali rezultate testiranja postopkov barvne korekcije in rezultate poskusa, v katerem smo analizo barv z našo aplikacijo primerjali z barvnimi analizami študentov geologije, ki so uporabljali primerjalno barvno karto Munsell Rock-color Chart. V zaključku smo podali nekaj idej in smernic, kako bi se aplikacija lahko razvijala v prihodnosti in na katerih področjih, poleg geologije, bi bila morda lahko še uporabna.

Ključne besede:

barvna korekcija, barvna analiza, analiza slik kamnin, barvni sistem Munsell, algoritem ASIFT

Abstract

In this diploma thesis, we have described the development of an application for colour correction and analysis of field and laboratory photographs in geology. The current methods used by geologists to determine the colour and colour coverage are expensive, time-consuming, and/or subjective. In this work, we present a method which will make such tasks simpler and more objective. First, we briefly overview the field of colour theory, focusing on the Munsell colour system, which has been used by geologists for decades as the standard for determining colour, and on colour spaces which we have used for colour correction and analysis, particularly CIE Lab, CIE XYZ, and sRGB. We present the colour calibration target Macbeth ColorChecker, and its newer model, the X-Rite ColorChecker Passport, which is more appropriate for terrain work. We describe an approach to detecting the ColorChecker colour target, using the ASIFT algorithm, and then we describe four algorithms for automatic colour correction of photographs using the ColorChecker colour target. Lastly, we present test results for the colour correction algorithms, and results of an experiment in which we have compared colour analysis performed using our application, with colour analysis performed by students of geology, who have used a comparative colour chart, the Munsell Rock-color Chart. In conclusion we have listed a few ideas and guidelines on how the application could be developed further in the future, and in which fields, besides geology, it might find its usefulness.

Keywords:

colour correction, colour analysis, rock image analysis, Munsell colour system, ASIFT algorithm

Poglavje 1

Uvod

Terensko in laboratorijsko delo v geologiji zahteva od geologa čim večjo natančnost in objektivnost pri zajemanju podatkov o kamninah in tleh, če želimo, da bodo ti podatki uporabni za njihove končne uporabnike. Izjemno pomemben atribut pri opisovanju kamnin in tal je barva, saj nakazuje na njihovo mineralno sestavo ali na njihovo oksidacijsko stanje in s tem tudi na način in okolje njihovega nastanka.

Večina kamninotvornih mineralov se pojavlja v dovolj ozkih barvnih razponih, da lahko že samo na podlagi barve določimo vrsto in količino posameznega minerala v nekem vzorcu. Na podlagi mineralne sestave lahko za magmatske in v mnogo primerih tudi sedimentne in metamorfne kamnine določimo ime kamnine, kar je seveda končni cilj analize. Ostale bolj natančne in uveljavljene metode za določanje mineralne sestave so: mikroskopija, rentgenska difrakcija (*angl.* X-ray diffraction – XRD), kemična analiza in njihove kombinacije. Težave teh metod so cena, zamudnost ter nepraktičnost uporabe na terenu.

Za opisovanje barv v geologiji je najpogosteje uporabljena metoda opisa še vedno nestrukturirano opisovanje barvnih odtenkov z besedami, kar je izredno subjektivno. Druga pogosta metoda, ki je v uporabi, je uporaba namenskih barvnih kart za primerjalno določanje barv (npr. Munsell Rock-color [2] in Munsell Soil-color Chart [2]). Vizualno primerjanje je sicer manj subjektivno,

težava pa je v potrebnem času za določitev barvnih vrednosti. Cilj tega diplomskega dela je predstaviti razvoj aplikacije, ki geologu omogoča, da z digitalnim fotoaparatom zajame sliko kamnine ali tal skupaj s standardno barvno karto ColorChecker, nato pa po avtomatski barvni korekciji zajeto fotografijo barvno analizira. Geolog lahko tako hitro, poceni in bolj objektivno določi barvo kamnine ali tal. Aplikacija nudi tudi izračun statistike barvne pokritosti na določenem delu slike in s tem geologu potencialno omogoča tudi določitev razmerja mineralov v vzorcu.

V laboratorijskem okolju bi opisani pristop lahko nadomestil dolgočasno in rutinsko delo določanja barvnih odtenkov in barvne pokritosti. Pri terenskem delu, kjer se mora geolog ravnati tudi po vremenskih razmerah, pa so prednosti hitrejšega dela še večje, saj lahko geolog z digitalnim fotoaparatom hitro zajame podatke in jih analizira šele, ko se vrne s terena. Tako lahko bolje izkoristi ugodne razmere za delo na terenu, hkrati pa se izogne nekaterim možnim napakam pri ročnem zajemu in delu s podatki.

Diplomsko delo smo razčlenili na naslednja poglavja: v drugem poglavju bomo opravili pregled nekaterih potrebnih tem iz teorije barv s poudarkom na sistemu Munsell, prostoru CIE Lab in izračunu razdalj med barvami. Nato bomo v tretjem poglavju predstavili cilje razvoja aplikacije, uporabljene tehnologije, sam razvoj pa bomo opisali v treh delih: zaznavanje barvne karte, barvna korekcija in uporabniški vmesnik. V četrtem poglavju bomo razvito aplikacijo preizkusili, v zaključku pa bomo delo povzeli in razmislili, kako bi se aplikacija lahko razvijala naprej in kje vse bi še lahko našla svojo uporabo.

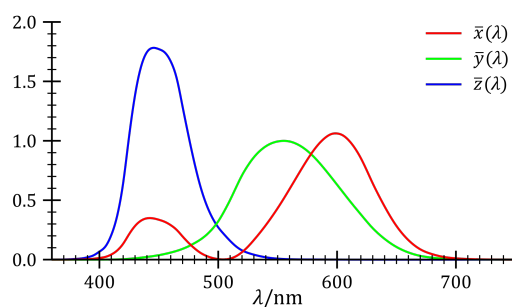
Poglavje 2

Barvna teorija

V tem poglavju bomo naredili pregled barvne teorije. Ogleдали si bomo sistem Munsell, prostore CIE XYZ, CIE Lab in sRGB ter računanje barvnih razdalj. Našteto v nadaljevanju uporabljamo pri korekciji in analizi fotografij.

2.1 Barvni prostor CIE 1931 XYZ

Barvni prostor CIE XYZ so leta 1931 potrdili v Mednarodnem odboru za barve (*fr.* Commission internationale de l'éclairage – CIE). Bil je prvi matematično definiran barvni prostor in še vedno služi kot osnova za modernejše barvne prostore ter, kot bomo videli v nadaljevanju, kot vmesni prostor za izračun pretvorb med barvnimi prostori.



Slika 2.1: Prikaz odziva čepnic na različne valovne dolžine svetlobe

Prostor sestavljajo komponente X, Y in Z, ki so bile zasnovane po zgledu človeškega vidnega zaznavanja barv s tremi čepnicami (*angl.* cones). S poskusi so raziskovalci določili, kako močno se pozamezna čepnica odzove na določeno valovno dolžino svetlobe λ , ter tako sestavili funkcije $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ in $\bar{z}(\lambda)$ za odziv čepnic, ki jih lahko vidimo na sliki 2.1.

Barvne vrednosti lahko zelo natančno merimo s pomočjo fotospektrometrov. S fotospektrometri v enakomernih razmakih merimo odbojnost (*angl.* reflectance) materialov pri različnih valovnih dolžinah vidne svetlobe. Barvo v prostoru CIE XYZ nato dobimo tako, da čez celoten razpon vidnega spektra (npr. od 380 nm do 780 nm) integriramo zmnožek odziva čepnice ter izmerjene intenzivnosti odbite svetlobe materiala $I(\lambda)$:

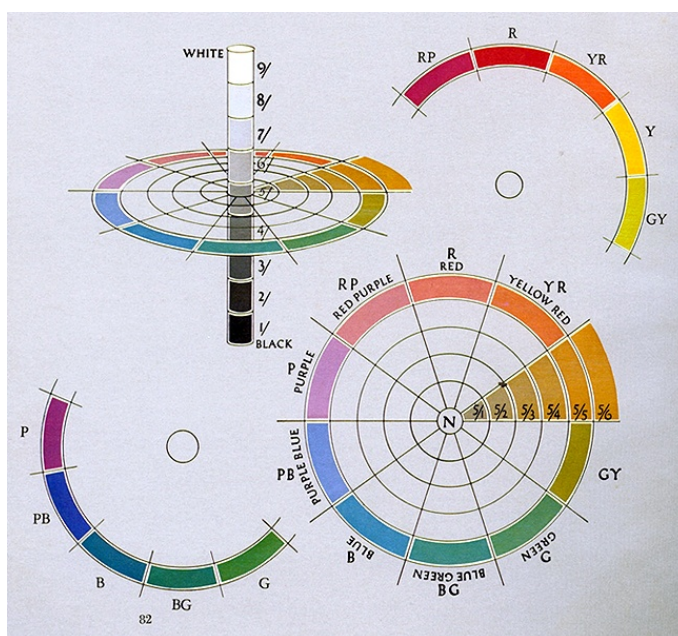
$$X = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Pri tem je treba upoštevati tudi, kakšen je vir svetlobe (*angl.* illuminant), s katerim opravljamo meritve odbojnosti. Odbor CIE je definiral nekaj standardnih virov svetlobe. Tako kot funkcije odziva čepnic so viri določeni kot funkcija valovne dolžine, opisujemo pa jih tudi z barvno temperaturo v kelvinih. Od virov, ki so bili določeni v osnovnem standardu, je bil najbolj pogosto uporabljan standardni vir C s temperaturo 6774 K, kasneje pa ga je nadomestil standardni vir D65 s temperaturo 6504 K, ki ga tudi v tem delu uporabljamo pri rokovanju z barvami. Ta dva vira predstavljata model naravne dnevne svetlobe, nekateri drugi viri pa predstavljajo modele svetlobnih spektrov različnih vrst umetnih svetil (standardni viri A in F), jutranjo naravno svetlobo (standardni vir D55) in podobno.

Težava s fotospektrometri za potrebe geologije pa je v njihovi visoki ceni in nepraktičnosti za uporabo na terenu. Z njimi barvno vrednost merimo le v eni točki, tako da niso direktno uporabni za določanje barvne pokritosti, prav tako pa niso primerni za merjenje neravnih vzorcev. Barva je za geologe pogosto posredna informacija, zato, če že, raje uporabljajo druge vrste naprav, ki neposredno določajo kemijsko zgradbo.

2.2 Barvni sistem Munsell

Barvni sistem Munsell je v začetku 20. stoletja razvil prof. Albert H. Munsell z namenom ustvariti zaznavno uniformen (*angl.* perceptually uniform) sistem. Zaznavna uniformnost je lastnost barvnega sistema, pri kateri za celoten sistem velja, da za človeško vidno zaznavanje enaka sprememba ene izmed komponent pomeni enako barvno razliko. Od leta 1943 je v uporabi nekoliko posodobljen sistem Munsell (t.i. Munsell Renotation) [15, 4], ki so ga na podlagi velikega števila poskusov in meritev pripravili raziskovalci združenja OSA (*angl.* Optical Society of America).













Slika 2.2: Prikaz zgradbe barvnega sistema Munsell

Barvo v sistemu Munsell določimo s tremi komponentami: “odtenkom” (*angl.* hue), “vrednostjo” (*angl.* value) in “nasičenostjo” (*angl.* chroma).

Komponenta “odtenek” je podana s kotom na intervalu od 0 do 100, v standardnem zapisu pa jo razdelimo na deset odtenkov, vsakega na intervalu od 0 do 10, na desno stran pa dodamo še eno- oz. dvočrkovno oznako odtenka. Zapis odtenka 2.5GY pomeni kot 32.5 in označuje bolj rumen odtenek zeleno-

rumene, zapis 5B pa je ravno na sredini modrega odtenka in ima kot 65. Vseh deset barvnih odtenkov v sistemu Munsell, skupaj s koti, je navedenih v tabeli 2.1.

Barva	Kot	Oznaka	Ime	Barva	Kot	Oznaka	Ime
	0-10	R	rdeča		10-20	YR	rumeno-rdeča
	20-30	Y	rumena		30-40	GY	zeleno-rumena
	40-50	G	zelena		50-60	BG	modro-zelena
	60-70	B	modra		70-80	PB	vijolično-modra
	80-90	P	vijolična		90-100	RP	rdeče-vijolična

Opomba: Poznamo tudi oznako **N**, ki označuje odsotnost odtenka.

Tabela 2.1: Barvni odtenki v sistemu Munsell

Naslednja komponenta, “vrednost”, označuje svetlost barve na intervalu od 0 do 10, pri čemer je 0 čista črna, 10 pa čista bela.

Tretja komponenta, “nasičenost”, lahko v teoriji zavzame poljubno negativno vrednost, a je v praksi omejena z barvnimi pigmenti, ki jih lahko realiziramo. V primerjalnih barvnih kartah, ki jih uporabljajo geologi in pedologi, je najvišja nasičenost, ki jo najdemo, 8, sicer pa smatramo nasičenost nad 20 za zelo visoko. Nasičenost 0 pomeni čisto sivino oz. odsotnost barvnega odtenka. V terminologiji sistema Munsell tako barvo imenujemo nevtralna barva in v zapisu izpustimo nasičenost in odtenek; zapišemo le posebno črkovno oznako **N** in komponento “vrednost”, npr. **N7**.

Prednosti sistema Munsell so intuitivnost uporabe, zaznavna uniformnost komponent ter dolga tradicija uporabe v industriji, umetnosti in naravoslovju. Glavna slabost pa je, da je sistem definiran z le nekaj tisoč barvnimi pigmenti, tako da ga z matematično definiranimi barvnimi prostori povezujejo le tabele barvnih meritev [4]. Natančno računanje in pretvorba v druge prostore je tako nekoliko otežena.

2.2.1 Uporaba sistema Munsell v geologiji

Sistem Munsell ima v geologiji že dolgo tradicijo, saj se v proučevanju tal uporablja že od začetka 1920-ih. Leta 1948 je ameriško združenje geologov (*angl.* Geological Society of America – GSA) izdalo prvi Rock-color Chart, zasnovan na sistemu Munsell, leta 1949 pa je podjetje Munsell v navezi z ameriškim ministrstvom za kmetijstvo (*angl.* United States Department of Agriculture – USDA) izdalo prvi Munsell Soil-color Chart. Gre za knjigi oz. zbirki barvnih kart, namenjenih primerjalnemu določanju barvnih vrednosti kamnin in tal. Obe barvni karti se v posodobljenih in dopolnjenih izdajah uporabljata tudi danes. Pri izdelavi te diplomske naloge smo uporabili trenutno najnovejši izdaji barvnih kart Munsell Rock-color Chart in Munsell Soil-color Chart [2, 3].



Slika 2.3: Barvni karti Munsell Rock-color in Munsell Soil-color

Barvne karte podjetja Munsell geologi uporabljajo za primerjalno določanje barv kamnin in tal, tako na terenu kot v laboratoriju. Metoda je bolj objektivna od opisovanja barv z besedami, a sta vseeno prisotni subjektivnost in nenatančnost, ki izhajata iz omejene natančnosti človeške vizualne primerjave in dokaj nizkega števila barvnih zaplat v primerjavi s številom barv, ki jih lahko zajame digitalni fotoaparati ali celo fotospektrometer. Pri barvni karti

Munsell Soil-color Chart imamo nad določenim barvnim odtenkom kar dober pregled in je tudi določanje vmesnih vrednosti do neke mere možno, pri Munsell Rock-color Chartu pa je vrednosti za to premalo. Tudi razporeditev barvnih zaplat je manj primerna za to, saj sosednji barvi navadno nista hkrati tudi najbolj podobni barvi.

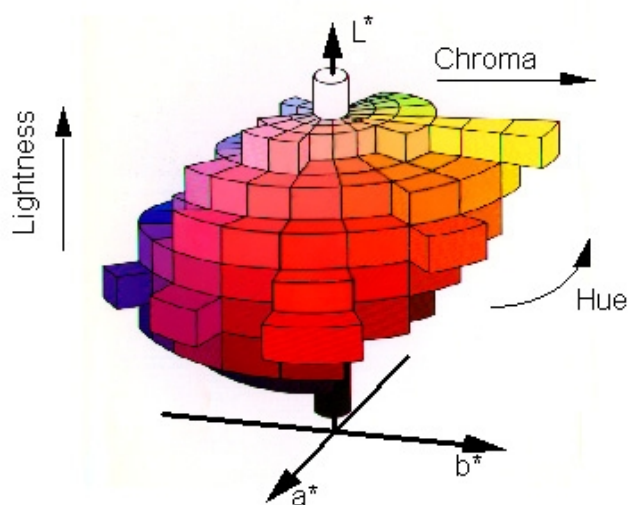
Rock-color Chart vsebuje tri strani kart z izbranimi pogostimi odtenki kamnin, Soil-color Chart pa devet strani kart, ki pokrivajo odtenke od 5R do 5Y pri različnih svetlostih in nasičenostih, ter še štiri dodatne strani; eno z nekaj barvami odtenkov 10Y in 5GY, dve strani z nizko-nasičenimi barvami glin iz mokrišč (*angl.* gleysol) ter eno stran zelo svetlih odtenkov. Vsaka stran barvnih kart ima največ dvainštirideset zaplat (navadno nekaj manj, saj so nekateri barvni pigmenti redki ali težki za realizacijo) in luknje v strani za lažje vizualno primerjanje. Poleg strani z barvnimi kartami obe knjigi vsebujeta še strani, ki podajajo barvne oznake Munsell na zaplatah kart, ter imena barv po barvnem sistemu ISCC-NBS, ki so povzeta po grafih, podanih v knjigi *Color: Universal Language and Dictionary of Names* [8]. Namen sistema ISCC-NBS je bila sicer delna objektivizacija besednih opisov barv in poenostavitev barvne komunikacije, saj definira, kaj pomenijo določeni pridevniki (npr. temno-, živo-, zelo blede-), katera imena odtenkov smemo uporabiti in povezavo z barvnimi oznakami v sistemu Munsell.

Na tem mestu omenimo raziskavo [7], v kateri so avtorji primerjali veliko število opisov barv v sistemu Munsell in besednih opisov z obalnega področja ob Atlantskem oceanu. Na podlagi teh meritev in sistema ISCC-NBS so razvili preslikavo iz besednih opisov v sistem Munsell. Ugotovili so, da so opisi barvnih odtenkov v večini primerov natančni, pri svetlosti in nasičenosti pa je bil rezultat precej slabši.

2.3 Barvna prostora CIE Lab in CIE LCh

Mednarodni odbor za barve CIE je potrdil barvni prostor CIE Lab leta 1976. Podobno kot sistem Munsell je bil prostor CIE Lab zasnovan kot zaznavno

uniformen, ampak je izpeljan iz barvnega prostora CIE 1931 XYZ in je tako matematično definiran. Barvo v prostoru CIE Lab določajo tri komponente: L^* – svetlost (*angl.* lightness), a^* – razmerje med rdečo in zeleno barvo ter b^* – razmerje med modro in rumeno barvo.



Slika 2.4: Prikaz barvnih prostorov CIE Lab in CIE LCh

Pretvorba iz prostora CIE Lab v prostor CIE LCh je enostavna. Kot lahko vidimo tudi na sliki 2.4, gre pri komponentah C^* in h le za pretvorbo komponent a^* in b^* v polarne koordinate, komponenta L pa ostane enaka. Pomen komponente C^* je barvna nasičenost (*angl.* chroma), h pa je odtenek (*angl.* hue). Pretvorbo opravimo po naslednjem postopku:

$$\begin{aligned} C^* &= \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \\ h &= \tan^{-1}(b^*/a^*) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Prostor CIE LCh je teoretično zanimiv, saj imajo komponente enak pomen kot v sistemu Munsell, med njima pa na žalost ni enostavne pretvorbe.

2.4 Barvni prostor sRGB

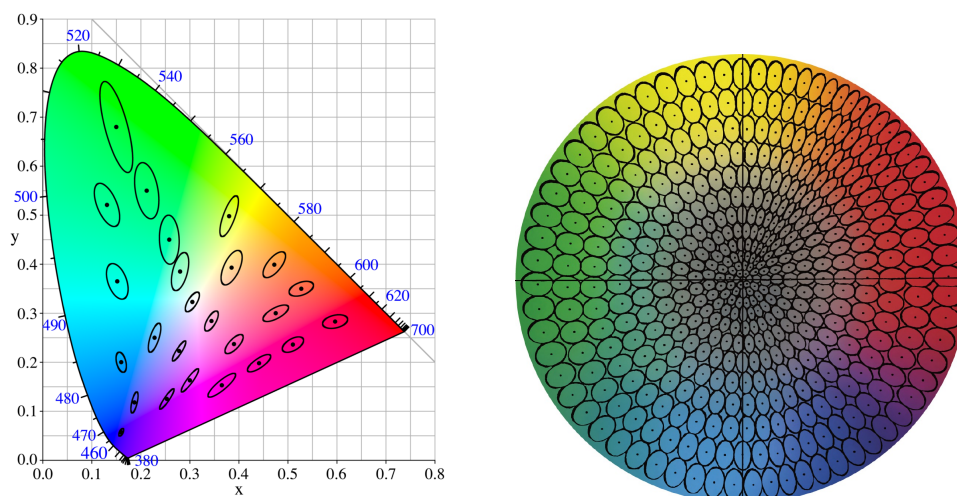
Barvni prostor sRGB je danes v računalništvu verjetno najbolj uporabljeni način zapisa barv, saj ga uporabljamo pri zaslonih, za slikovne zapise in skoraj povsod drugje, kjer imamo opravka z barvami [19]. Družno sta ga leta 1996 razvili podjetji HP in Microsoft.

Barvo v prostoru sRGB podamo s tremi 8-bitnimi celoštevilskimi komponentami: R – rdeča, G – zelena, B – modra. Iz teh komponent je z aditivnim procesom (npr. z mešanjem rdeče, zelene in modre luči) mogoče sestaviti željeni barvni odtenek. Ker sta vnaprej določena razpon vrednosti in bitna globina, je prostor sRGB bolj omejen in manj natančen od npr. prostora CIE Lab, a za potrebe zaslonov, tiskalnikov in zapisa slik je dovolj natančen in bolj učinkovit ter tako bolj primeren.

2.5 Razdalja med barvami

Pogosto opravilo pri delu z barvami je določanje razdalje med dvema barvama. V grafiki in barvni industriji najpogosteje želijo določiti največje dovoljeno odstopanje od dogovorjene barvne vrednosti (*angl.* tolerancing) in to odstopanje meriti (*angl.* differencing). V tem razdelku bomo podali definicije treh formul za izračun barvnih razdalj, definiranih v barvnem prostoru CIE Lab.

Ena izmed zahtev pri merjenju barvnih razdalj je, da se mera sklada s človeškim zaznavanjem, tako da lahko povemo nekaj več o principu zaznavne uniformnosti. Na levem delu slike 2.5 je prikazanih nekaj t.i. MacAdamovih elips na kromatičnem diagramu prostora CIE xyY. MacAdamove elipse prikazujejo področje s približno enako zaznavno barvno razliko [11]. V bolj zaznavno uniformnem prostoru namesto različno velikih elips dobimo približno enako velike kroge. Desni del slike 2.5 prikazuje MacAdamove elipse na diagramu prostora CIE Lab; opazimo lahko, da je prostor nekoliko neuniformen pri oranžnih odtenkih in pri spremembah nasičenosti, saj so elipse pri sivih odtenkih manjše kot pri najbolj nasičenih odtenkih na robu. Na obeh slikah so elipse nekajkrat povečane in so uporabljene le za ilustracijo.



Slika 2.5: Primeri MacAdamovih elips v CIE xyY (levo) ter CIE Lab (desno)

2.5.1 Formula CIE ΔE_{76}^*

Ker je bil prostor CIE Lab zasnovan kot zaznavno uniformen po vseh komponentah, je po osnovni definiciji razdalja med barvami kar evklidska razdalja med komponentami dveh barv:

$$\Delta E_{76}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2.2)$$

Za lažjo interpretacijo rezultatov v nadaljevanju dela naštejmo nekaj primerov vrednosti. Meja, pri kateri človek komaj opazi razliko med dvema barvama, če ju opazuje neposredno eno zraven druge (*angl.* Just noticeable difference – JND), je 2,3 [12]. Najmanjše barvne razdalje na barvni karti ColorChecker, ki jo bomo obravnavali v nadaljevanju, so med sosednjimi sivinskimi zaplatami in znašajo približno 15.

2.5.2 Formula CIE ΔE_{94}^*

Potreba po boljših formulah za izračun razdalj med barvami se je pokazala kmalu, saj se je izkazalo, da prostor CIE Lab ni popolnoma zaznavno unifor-

men. To otežuje delo pri določanju največjih dovoljenih odstopanj v barvni industriji, saj tako ne moremo uporabiti enake vrednosti na različnih delih barvnega prostora.

Že leta 1984 so v britanskem Society of Dyers and Colourists zasnovali boljšo formulo CMC l:c [1], ki je tu ne bomo obravnavali, leta 1994 pa je odbor CIE standardiziral formulo CIE ΔE_{94}^* . Formula je bila zasnovana na podlagi velikega števila podatkov, ki so jih zbrali avtomobilski proizvajalci.

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}, \quad (2.3)$$

kjer veljajo naslednje definicije:

$$\begin{aligned} \Delta L^* &= L_1^* - L_2^*, & \Delta a^* &= a_1^* - a_2^*, & \Delta b^* &= b_1^* - b_2^* \\ C_1^* &= \sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}}, & C_2^* &= \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}} \\ \Delta C_{ab}^* &= C_1^* - C_2^* \\ \Delta H_{ab}^* &= \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}} \\ S_L &= 1, & S_C &= 1 + K_1 C_1^*, & S_H &= 1 + K_2 C_1^* \end{aligned}$$

Formula ima še nekaj koeficientov, ki jih lahko nastavimo glede na potrebe. Včasih na primer želimo kako izmed komponent formule utežiti bolj kot ostale. V tem delu uporabljamo standardne vrednosti koeficientov, ki so:

$$k_L = 1, \quad k_C = 1, \quad k_H = 1, \quad K_1 = 0.045, \quad K_2 = 0.015$$

2.5.3 Formula CIE ΔE_{00}^*

Tudi formula CIE ΔE_{94}^* ni odpravila vseh težav pri merjenju barvnih razdalj [18], zato je odbor CIE leta 2000 standardiziral novo formulo za merjenje razdalj, CIE ΔE_{00}^* .

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}, \quad (2.4)$$

kjer veljajo naslednje definicije:

$$\begin{aligned} \Delta L' &= L_2^* - L_1^*, & \bar{L} &= \frac{L_1^* + L_2^*}{2}, & \bar{C} &= \frac{C_1^* + C_2^*}{2} \\ a'_1 &= a_1^* + \frac{a_1^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right), & a'_2 &= a_2^* + \frac{a_2^*}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right) \\ C'_1 &= \sqrt{a_1'^2 + b_1^{*2}}, & C'_2 &= \sqrt{a_2'^2 + b_2^{*2}} \\ \bar{C}' &= \frac{C'_1 + C'_2}{2}, & \Delta C' &= C'_2 - C'_1 \\ h'_1 &= \tan^{-1}(b_1^*/a'_1), & h'_2 &= \tan^{-1}(b_2^*/a'_2) \\ \Delta h' &= \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ, h'_2 > h'_1 \end{cases} \\ \Delta H' &= 2\sqrt{C'_1 C'_2} \cdot \sin(\Delta h'/2), & \bar{H}' &= \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ \end{cases} \\ T &= 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ) \\ R_T &= -2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \sin \left[60^\circ \cdot \exp \left(- \left[\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ} \right]^2 \right) \right] \\ S_L &= 1 + \frac{0.015 (\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}}, & S_C &= 1 + 0.045 \bar{C}', & S_H &= 1 + 0.015 \bar{C}' T \end{aligned}$$

Formulo CIE ΔE_{00}^* v aplikaciji uporabljamo na mestih, kjer je pričakovana barvna razdalja navadno majhna. Pri teh razdaljah je CIE ΔE_{00}^* najbolj primerna formula, pri računanju velikih razdalj se pri njej pojavijo matematične nezveznosti [18]. Te formule tudi ne uporabljamo na mestih, kjer bi se morala izračunati zelo velikokrat, saj je izračun te formule precej bolj časovno zahteven kot izračun prejšnjih dveh formul.

Poglavje 3

Razvoj aplikacije

V tem poglavju bomo opisali razvoj aplikacije za barvno korekcijo in analizo fotografij, na katerih je prisotna barvna kalibracijska karta ColorChecker. Najprej bomo naredili pregled zahtev in uporabljenih tehnologij, nato bomo opisali naš pristop k zaznavanju barvne karte in k barvni kalibraciji fotografij, na koncu pa se bomo posvetili še grafičnemu uporabniškemu vmesniku aplikacije in si ogledali, zakaj uporaba kombinacije že razvitih aplikacij ne zadošča zadanim ciljem.

3.1 Cilji razvoja aplikacije

Naštejmo nekatere uporabniške zahteve oz. cilje aplikacije, ki smo se jo namenili razviti v okviru tega diplomskega dela.

Aplikacija naj uporabniku omogoča:

- branje surovih in navadnih bitnih slikovnih zapisov,
- barvno korekcijo na podlagi barvne kalibracijske karte ColorChecker,
 - natančno zaznavanje barvnih zaplat karte ColorChecker,
 - barvno korekcijo na podlagi zaznanih barvnih zaplat,

- prikaz barvno popravljene slike in barvna analiza,
 - določitev barve v okolici točke na sliki (v sistemu Munsell),
 - statistiko barvne pokritosti dela slike (v sistemu Munsell),
 - oceno natančnosti podanih podatkov,
 - shranjevanje poteka in rezultatov analize.

3.2 Uporabljene tehnologije

3.2.1 Programski jezik Scala

Scala je sodoben splošno-namenski programski jezik, ki se prevaja v vmesno kodo (*angl.* bytecode) za izvajanje na navideznem stroju Java (*angl.* Java Virtual Machine – JVM). Jezik je statično tipiziran in združuje objektno-orientiran in funkcijski način programiranja. Za implementacijo aplikacije smo jo uporabili, ker omogoča hiter razvoj, hkrati pa je združljiva z obstoječimi knjižnicami, napisanimi v Javi.

3.2.2 Scala Swing

Scala Swing je ovojnica (*angl.* wrapper) okrog javanske knjižnice Swing in omogoča izgradnjo grafičnih uporabniških vmesnikov. Ovojnik je stilsko prilagojen Scali, drugačen pa je tudi način rokovanja z dogodki (npr. miškinimi kliki, pritiski tipk na tipkovnici ...).

3.2.3 Scala Blitz

Scala Blitz je razširitev standardne knjižnice za zbirke (*angl.* collection library). Knjižnica omogoča optimizacijo in enostavno vzporedno poganjanje operacij nad elementi zbirk in tako na večjedrnih procesorjih precej pohitri izvajanje nekaterih algoritmov, ki smo jih razvili.

3.2.4 Jrawio

Jrawio je javanska knjižnica, ki omogoča delo s surovimi slikovnimi zapisi (*angl.* raw image format). Knjižnica omogoča tako neposreden dostop do podatkov v surovih zapisih kot tudi tvorjenje navadnih slik iz surovih preko postopka demosaiciranja (*angl.* demosaicing). Slednje omogoča uporabo standardnega javinega vmesnika za delo z bitnimi slikami `javax.imageio` za enostavno rokovanje z datotekami v surovih slikovnih zapisih.

3.2.5 Ogrodje OpenCV

OpenCV [6] je ogrodje za računalniški vid, izdano pod odprtokodno licenco BSD. Vključuje algoritme računalniškega vida in strojnega učenja, hkrati pa ponuja tudi module za izgradnjo grafičnih uporabniških vmesnikov, obdelavo slik ter zajem slik in videa. Knjižnica je napisana v programskem jeziku C++, vendar ponuja vmesnike za C, Javo, Python in MATLAB.

3.2.6 Knjižnica za delo z barvnimi zapisi

Programsko knjižnico za delo z različnimi barvnimi zapisi smo implementirali sami, saj nismo našli druge knjižnice, ki bi ponujala vse funkcije, ki smo jih potrebovali. S tem mislimo predvsem funkcionalnosti, povezane s sistemom Munsell, in izračun barvnih razdalj.

Naša knjižnica podpira zapis in delo z barvami v barvnih prostorih sRGB, CIE XYZ, CIE xyY, CIE Lab, CIE LCh, HunterLab, Y'CbCr in v sistemu Munsell. Omogoča tudi enostavno pretvorbo med njimi, ki v ozadju v večini primerov poteka preko prostora CIE XYZ; izjeme so le sistem Munsell, ki je definiran s tabelo pretvorb, prostor CIE LCh, ki je zelo soroden prostoru CIE Lab, in prostor Y'CbCr, ki ga je lažje pretvoriti iz prostora sRGB. Pri pretvorbah, pri katerih se lahko informacija izgublja, npr. pri sRGB in Munsell, knjižnica ponuja tudi samodejno hranjenje izvorne barve, tako da ob nadaljnjih pretvorbah in pri algoritmih, ki znajo uporabiti izvorni barvni zapis, delamo z najbolj natančnim zapisom, ki je na voljo.

Knjižnica podpira tudi računanje razdalje med barvami po formulah CIE ΔE_{76}^* , CIE ΔE_{94}^* in CIE ΔE_{00}^* . Formule za izračun razdalj so definirane v prostoru CIE Lab, zato se pred izračunom razdalje samodejno izvede pretvorba barvnega prostora, če je ta potrebna.

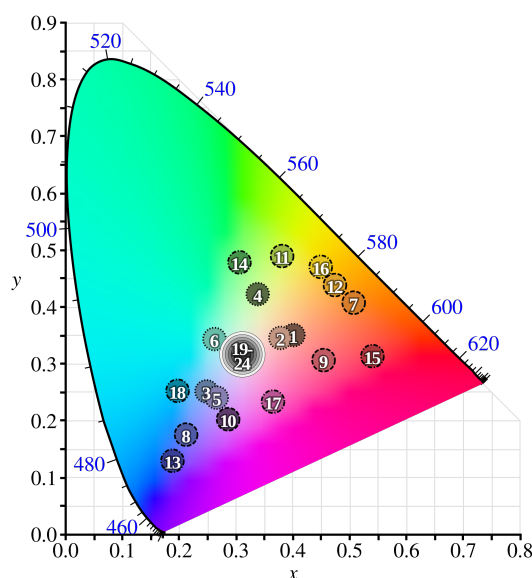
Na spletu so na voljo tabele vrednosti [4] za pretvobo med sistemom Munsell in prostorom CIE xyY, izmerjene s standardnim virom C. Za naše potrebe smo morali vrednosti najprej pretvoriti v prostor CIE XYZ, nato smo po Bradfordovi metodi pretvorili vrednosti za standardni vir C v tiste za standardni vir D65, zatem pa smo jih pretvorili še v prostor CIE Lab, v katerim opravljamo večino operacij v nadaljevanju. Ugotovili smo, da je tabela vrednosti A.1 za kalibracijsko karto ColorChecker podana na enak način in se enake vrednosti v obeh tabelah skladajo, zato smo v aplikaciji tabeli združili.

Naštete pretvorbe smo implementirali s pomočjo knjige Digital Color Imaging Handbook [17], spletne strani EasyRGB [5] in spletne strani Bruca Lindbloom [9].

3.2.7 Barvna kalibracijska karta ColorChecker

Barvno kalibracijsko karto ColorChecker [13] so leta 1976 razvili v podjetju Munsell (danes del podjetja X-Rite). Uporablja se za potrebe barvne kalibracije različnih naprav (npr. fotoaparatorov, tiskalnikov, zaslonov ...). Barvna karta ColorChecker ima štiri vrstice po šest barvnih zaplat (*angl.* colour patch), skupaj torej štiriindvajset zaplat. Zaplate imajo natančno določene barvne vrednosti, s pomočjo katerih lahko preverimo kakovost barvne reprodukcije ali zajema. Barvne vrednosti barvne karte v sistemu Munsell in prostoru CIE Lab lahko preberemo v tabeli A.1, samo karto pa lahko vidimo na spodnjem delu slike 3.2.

Prvi dve vrstici barvnih zaplat vsebujeta nekatere pogoste naravne odtenke (npr. človeška koža, zelenje, modro nebo ...) in vmesne odtenke (npr. oranžna, rumeno-zelena ...). Tretja vrstica predstavlja skrajne točke sistemov RGB (rdeča, zelena, modra) ter CMY (cianova, škrlatna, rumena), v četrti vrstici



Slika 3.1: Razpored zaplat na barvni karti ColorChecker na kromatičnem diagramu prostora CIE xyY

pa najdemo šest različnih odtenkov sive, ki pomagajo pri svetlobni kalibraciji in ravnovesju beline (*angl.* white balance).

3.2.8 X-Rite ColorChecker Passport

Glede na naše potrebe smo, raje kot klasično izvedbo barvne karte ColorChecker, izbrali izvedbo X-Rite ColorChecker Passport [20], ki je prikazana na sliki 3.2. Ta izvedba barvne karte je primerna za terensko delo v geologiji, saj je barvna karta v primerjavi s klasično izvedbo manjša in je shranjena v ohišju iz trde plastike. S stališča barvne natančnosti bi bila za laboratorijsko delo morda bolj primerna katera izmed večjih barvnih kart z veliko barvnimi zaplatami (npr. ColorChecker Digital SG, IT8 ...), prednost manjšega formata barvne karte v tem primeru pa je, da je po velikosti bližje velikosti vzorcev kamnin, ki jih tako lahko zajamemo v višji ločljivosti. Za mnogo vzorcev kamnin bi bila s tega stališča bolj primerna še nekoliko manjša barvna karta.

V ohišju sta poleg klasične karte ColorChecker še dve kalibracijski karti – v posebnem razdelku je le ena velika siva zaplata, ki se uporablja za kalibracijo ravnovesja beline, v prvem razdelku pa je ob klasični karti ColorChecker še t.i. Creative Enhancement Target (v nadaljevanju CET), ki vsebuje osemindvajset zaplat; osem visoko-nasičenih barvnih zaplat, dvakrat po šest zaplat, namenjenih vizualni korekciji ravnovesja beline, ter štiri zelo svetlo in štiri zelo temno sive zaplate, namenjene zaznavanju pod- oz. presvetljenosti. Ta barvna karta ni namenjena avtomatski barvni korekciji, kar je morda razlog, zakaj na spletu in v literaturi niso dostopni uradni podatki o barvnih vrednostih njenih zaplat. Našli pa smo neuradne fotospektrometrске meritve [14], s katerimi smo si pomagali pri ovrednotenju kakovosti korekcije.



Slika 3.2: Barvna kalibracijska karta X-Rite ColorChecker Passport

3.3 Zaznavanje barvne karte ColorChecker

Natančno zaznavanje zaplat na ColorCheckerju je izjemno pomembno, saj je od prebranih povprečnih barvnih vrednosti odvisen postopek korekcije. Za za-

znavanje barvne kalibracijske karte ColorChecker na fotografijah smo uporabili algoritem ASIFT [21] (*angl.* Affine Scale Invariant Feature Transform).

3.3.1 Algoritem ASIFT

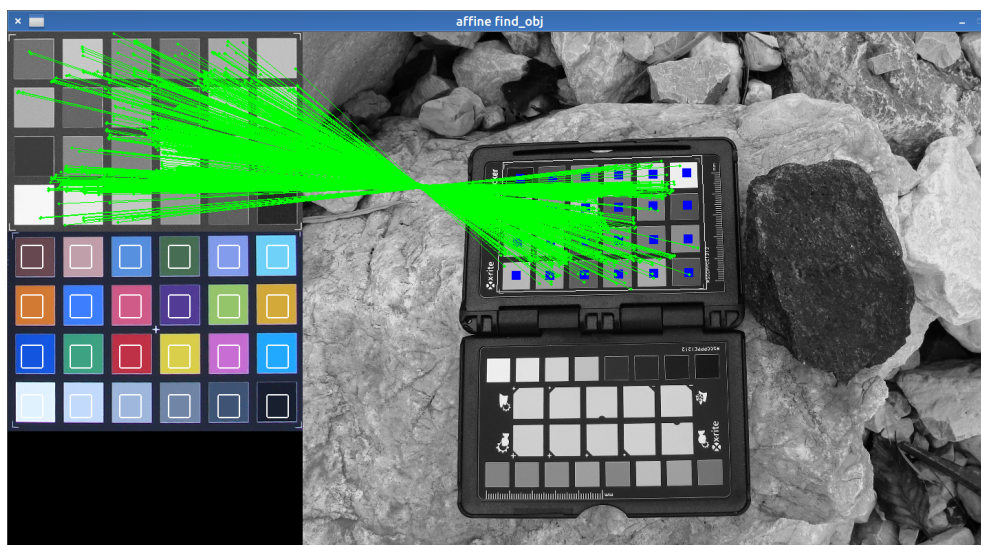
Algoritem SIFT [10] je algoritem računalniškega vida, ki iz slike izračuna značilne točke, ki jih nato lahko uporabimo za različne naloge računalniškega vida, npr. zaznavanje objektov, sestavljanje panoram, avtomatsko 3D modeliranje in prepoznavanje gest. Značilne točke, dobljene z algoritmom SIFT, so odporne na spremembo velikosti, premike in do neke mere na rotacijo. Algoritem ASIFT je preprosta razširitev algoritma SIFT, kjer nad osnovno sliko večkrat izvedemo transformacije, ki so kombinacija rotacije in striženja (*angl.* shearing), izračunamo značilne točke SIFT na transformirani sliki, nato pa jih z inverzno transformacijo preslikamo nazaj v koordinatni prostor osnovne slike. Tako dobimo večje število značilk, ki so hkrati bolj odporne (*angl.* robust) na različne afine transformacije. V literaturi se kot zadostno število transformacij pojavi priporočilo šestih striženj ter od stopnje striženja odvisno število rotacij od 0° do 180° – vsega skupaj 42 transformacij.

Za zaznavanje določenega objekta z algoritmom ASIFT potrebujemo sliko tega objekta, nato pa izračunamo značilne točke SIFT, tako za sliko objekta, kot za sliko, na kateri želimo objekt zaznati. Objekt zaznamo tako, da poiščemo čim boljše ujemanje (*angl.* correspondence) med značilnimi točkami SIFT obeh slik.

3.3.2 Implementacija zaznavanja

Za potrebe zaznavanja barvne karte ColorChecker smo nekoliko priredili implementacijo algoritma ASIFT, ki je na voljo v primerih ogrodja OpenCV. Ko algoritem na fotografiji zazna barvno karto ColorChecker, lahko izračunamo transformacijo, s katero dobimo poravnanano sliko ColorCheckerja. Položaji barvnih zaplat na tej sliki so, ob pravilni zaznavi in transformaciji, vedno na približno istem mestu. Povprečne barve zaplat dobimo, če povprečimo barve

znotraj kvadratov, v katerih predpostavimo, da se nahajajo zaplate. Ker zaznavanje ni popolnoma natančno, smo bili pri tem nekoliko konzervativni in vzeli nekoliko manjše kvadrate, kot so ti v resnici. Na sliki 3.3 vidimo prikaz ujemanja točk ASIFT v zeleni barvi. Z modro so označena izračunana središča zaplat, na barvni sliki na levi pa vidimo kvadrate s povprečnimi barvami zaplat.



Slika 3.3: Grafični prikaz, ki smo ga uporabili pri razvoju algoritma ASIFT

Pristop je dovolj splošen, da bi lahko deloval tudi za druge barvne karte. Spremeniti bi bilo treba le del, ki predpostavlja razpored zaplat, kot so na karti ColorChecker. V aplikacijo smo za potrebe ovrednotenja kakovosti korekcije poleg zaznavanja barvne karte ColorChecker dodali tudi možnost zaznavanja barvne karte CET na ColorChecker Passportu.

Možna izboljšava, s katero bi morda pokrili večji del zaplat in hkrati pridobili na odpornosti na manjše nenatančnosti pri zaznavanju, je uporaba algoritma poplavljanja (*angl.* flood fill). Iz predpostavljenih središč barvnih zaplat bi razlili barvo in se ustavili šele na robovih. Ta pristop ima nekaj drugih možnih težav. Pri zelo šumnih slikah bi se lahko prehitro ustavil, druga težava pa je pri zaplatah, kjer je barvna razdalja med zaplato in ohišjem

majhna (npr. pri temno sivih zaplatah, pri slikah z nizkim kontrastom ali nasičenostjo barv pa tudi druge zaplate).

3.4 Barvna korekcija fotografij

Cilj barvne korekcije fotografij je zajete barvne vrednosti čim bolj približati vrednostim, kot bi jih lahko opazili oz. izmerili na površinah, ki jih fotografiramo. Korekcije se lahko lotimo povsem programsko, tako da iz slike izvlečemo določene informacije, na podlagi katerih lahko sklepamo o pogojih na fotografiji, in na podlagi tega ugotovimo, kakšne bi morale biti barvne vrednosti na fotografiji. Raje kot za take postopke, ki nam ne morejo dati zagotovila natančnosti, smo se odločili za barvno korekcijo na podlagi barvne kalibracijske karte.

Barvno korekcijo tako opravimo s pomočjo barvne kalibracijske karte ColorChecker, ki jo vsakič položimo v področje zajema fotografije. Za kar najboljši rezultat mora biti, poleg kakovostnega zaznavanja karte, osvetlitev na barvni karti in na kamnini oz. tleh, za katera določamo barvo, čim bolj enakomerna [20]. To lahko dosežemo z uporabo dodatne osvetlitve ali bliskavice na fotoaparatu, če uporabljamo naravno svetlobo, pa je potrebno paziti na to, da sta smer in intenzivnost svetlobe čim bolj enaki tisti na kamnini oz. tleh.

Pri postopku korekcije v aplikaciji za vsako sliko najprej zaznamo barvno karto ColorChecker, kot smo opisali v razdelku 3.3, ter iz nje preberemo povprečne barvne vrednosti, nato pa ugotovimo, za koliko te odstopajo od znanih nazivnih vrednosti (glej tabelo A.1). Tako za vsako zaplato dobimo korekcijski vektor v barvnem prostoru CIE Lab. Prek korekcijskih vektorjev lahko nato določimo korekcijsko funkcijo za celoten barvni prostor. Korekcijo bi lahko opravili tudi v drugem barvnem prostoru, a je CIE Lab zaradi svoje dobre zaznavne uniformnosti najbolj primeren.

Problem prevelikega prileganja

Kot je pri algoritmih, kjer na podlagi majhnega števila podatkov delamo posplošitve, običajno, je potrebno paziti na problem prevelikega prileganja (*angl.* overfitting). Pri enostavnih postopkih korekcije se ta lahko pojavi že zaradi neenakomernih razdalj med zaplatami, saj tako bolj utežimo dele prostora, kjer je več barvnih zaplat. Pri kompleksnejših postopkih pa se preveliko prileganje pojavi tudi zaradi same moči algoritmov, ki lahko barvni prostor transformirajo na način, ki se ne sklada z resničnostjo.

Pri korekciji z uteženim povprečjem smo se problemu prevelikega prileganja poskusili izogniti z uporabo navzkrižnega preverjanja na način izpusti enega (*angl.* leave-one-out cross-validation), tako da pri preverjanju uteži zaplata, za katero napovedujemo vrednost, ne sodeluje pri napovedi. Pri postopku linearne kombinacije in premika pa nam nekoliko odpornosti na pojav prevelikega prileganja daje dejstvo, da so na barvni karti ColorChecker dobro predstavljene tako skrajne (predzadnja vrstica zaplat, črna in bela) kot sredinske točke (cela zadnja vrstica zaplat) barvnega prostora, tako da linearen postopek težko preveč zaide. Prikaz položaja zaplat na kromatičnem diagramu lahko vidimo na sliki 3.1.

3.4.1 Korekcija s premikom

Prvi postopek za barvno korekcijo, ki smo ga implementirali, poišče en sam barvni vektor \vec{v} v prostoru CIE Lab, ki kar najbolj zmanjša barvno razdaljo CIE ΔE_{00}^* med povprečnimi zaznanimi barvnimi vrednostmi zaplat \widehat{CC}_i ter znanimi vrednostmi barvnih zaplat karte ColorChecker CC_i .

$$\begin{aligned}\vec{C} &= (L, a, b) \\ \vec{C}' &= \vec{C} + \vec{v}\end{aligned}\tag{3.1}$$

kjer je \vec{v} tak vektor, ki kar najbolj zmanjša izraz:

$$\sum_{i=1}^{24} \Delta E_{00}^*(\widehat{CC}_i + \vec{v}, CC_i)$$

Kot smo že omenili, prostor CIE Lab ni popolnoma zaznavno uniformen, prav tako pa se pri zajemu fotografije pojavijo različna popačenja prostora, ki zahtevajo zahtevnejše postopke (npr. nepravilen kontrast, zamik le določenega dela spektra, presvetljenost, podsvetljenost . . .), zato se tak postopek korekcije sam ne izkaže najbolje, smo ga pa vseeno opisali in ovrednotili.

Dobra stran preprostosti tega korekcijskega postopka je, da ga lahko uporabimo v kombinaciji z drugimi, saj ne izkrivi barvnega prostora, moramo pa paziti, da ga na uporabimo za algoritmom, ki ima boljšo odpornost proti prevelikemu prileganju.

3.4.2 Korekcija z uteženim povprečjem

Korekcijski postopek z uteženim povprečjem med vrednostmi korekcijskih vektorjev \vec{C}_i izračuna uteženo povprečje, kjer so uteži določene z dvema koeficientoma – prvi koeficient uteži u_{i_k} je statičen in ga pred korekcijo določimo z genetskim algoritmom, drugi koeficient $d_i(\vec{C})$ pa je odvisen od razdalje med barvo, ki jo popravljamo, \vec{C} in i -to zaznano barvno zaplato na barvni karti ColorChecker \widehat{CC}_i .

$$\begin{aligned}\vec{C} &= (L, a, b), & \vec{C}' &= (L', a', b') \\ \vec{C}_i &= (Lc_i, ac_i, bc_i) = CC_i - \widehat{CC}_i \\ d_i(\vec{C}) &= 1 - \frac{\Delta E_{94}^*(\vec{C}, \widehat{CC}_i)}{\max_{j=1}^{24} \Delta E_{94}^*(\vec{C}, \widehat{CC}_j)} \\ L' &= L + \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} Lc_i \cdot u_{i_L} \cdot d_i(\vec{C}) \\ a' &= a + \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} ac_i \cdot u_{i_a} \cdot d_i(\vec{C}) \\ b' &= b + \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} bc_i \cdot u_{i_b} \cdot d_i(\vec{C})\end{aligned}\tag{3.2}$$

Za prvi koeficient uteži u_{i_k} imamo trikrat po štiriindvajset statičnih uteži, s katerimi za vsako komponento barvnega prostora (torej za L , a in b), posebej določimo pomembnost določene barve zaplate barvne karte ColorChecker. Če barvna vrednost neke zaplate močno odstopa od pričakovane (npr. poškodovana barvna karta, pod- oz. presvetljenost, prekrita zaplata na sliki ...), oz. če se iz kakršnegakoli razloga pri iskanju izkaže, da je iz bližnjih zaplat mogoče bolje opraviti korekcijo v tem delu barvnega prostora, utež za to zaplato ustrezno zmanjšamo. Vrednosti tega nivoja uteži določimo pred korekcijo s pomočjo enostavnega genetskega algoritma za iskanje.

Genetski algoritem začne z vsemi utežmi u_{i_k} nastavljenimi na 1, nato pa nad utežmi iterativno izvaja naključne spremembe in z ustreznostno funkcijo (*angl.* fitness function) preveri, ali je trenuten nabor uteži boljši od prejšnjih. Ustreznostna funkcija deluje po principu navzkrižnega preverjanja na način izpusti enega (*angl.* leave-one-out cross-validation). To pomeni, da štiriindvajsetkrat poženemo algoritem za korekcijo in vsakič izpustimo eno od barvnih zaplat ter izračunamo barvno korekcijo te zaplate prek vseh preostalih barvnih zaplat. Rezultat ustreznostne funkcije je povprečje barvnih razdalj med popravljenimi in znanimi vrednosti posameznih zaplat po formuli CIE ΔE_{00}^* .

Drugi koeficient uteži $d_i(\vec{C})$ je odvisen od barve, ki jo popravljamo. Po formuli CIE ΔE_{94}^* izračunamo barvno razdaljo do zaznanih barv zaplat ColorCheckerja in zaplate, ki so bolj oddaljene, utežimo manj kot tiste, ki so bližje barvi, ki jo popravljamo. Formulo CIE ΔE_{94}^* smo uporabili, ker so v tem primeru barvne razdalje velike in se želimo izogniti nezveznostim v formuli CIE ΔE_{00}^* , ki smo jih omenili v razdelku 2.5.3.

3.4.3 Korekcija z linearno kombinacijo komponent

Pri korekciji z linearno kombinacijo komponent za vsako barvno komponento prostora CIE Lab poiščemo linearno kombinacijo vseh treh komponent, ki se prek povprečnih zaznanih vrednosti zaplat kar najbolje približa znanim

vrednostim zaplat barvne karte ColorChecker.

$$\begin{aligned}\vec{C} &= (L, a, b), & \vec{C}' &= (L', a', b') \\ L' &= L \cdot u_{L_1} + a \cdot u_{a_1} + b \cdot u_{b_1} + u_1 \\ a' &= L \cdot u_{L_2} + a \cdot u_{a_2} + b \cdot u_{b_2} + u_2 \\ b' &= L \cdot u_{L_3} + a \cdot u_{a_3} + b \cdot u_{b_3} + u_3\end{aligned}\tag{3.3}$$

Pomen komponent a in b v prostoru CIE Lab je razmerje med rdečo in zeleno oz. med rumeno in modro. Uteži za ti komponenti tako lahko določimo posebej glede na to, na kateri strani izhodišča se nahajamo:

$$u_{a_n}(a) = \begin{cases} u_{a_n}^+ & a > 0, \\ 0 & a = 0, \\ u_{a_n}^- & a < 0; \end{cases} \quad u_{b_n}(b) = \begin{cases} u_{b_n}^+ & b > 0, \\ 0 & b = 0, \\ u_{b_n}^- & b < 0; \end{cases}$$

S tem, kot bomo videli v razdelku 4.1, pri kakovosti korekcije nekaj pridobimo, še vedno pa gre za dovolj linearno preslikavo barvnega prostora, da ni opaznih artefaktov pri korekciji, razen v primerih, kjer vrednost ene ali več zaplat res močno odstopa od znanih vrednosti. Temu bi se morda lahko izognili tako, da bi zaplate, ki bi najbolj odstopale, utežili malo manj, a to bi lahko vodilo v preveliko prileganje ali pa v neoptimalno korekcijo v primeru, da nek del prostora zares odstopa tako, kot to kažejo zaznani podatki barvnih zaplat karte ColorChecker. Proti takim težavam je postopek korekcije z uteženim povprečjem precej bolj odporen.

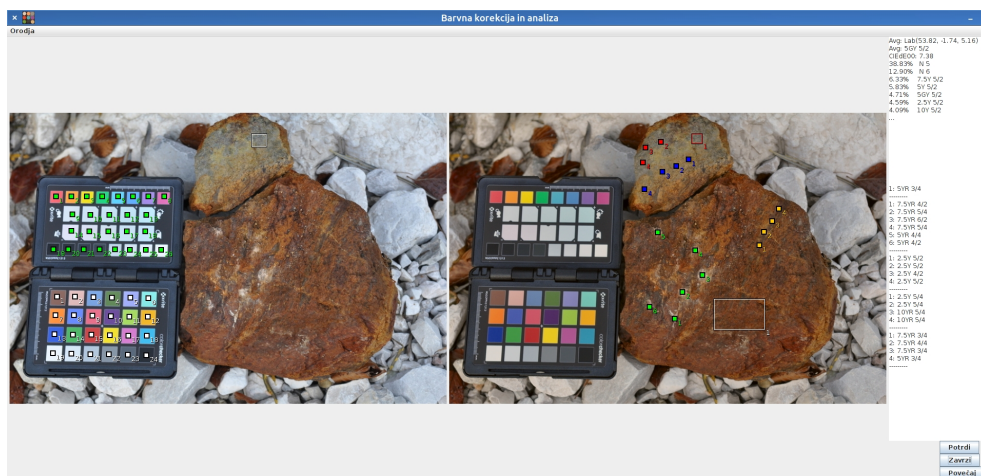
Pri slikah brez težavnih zaplat smo pri tem postopku korekcije naleteli le na en opazen artefakt, in sicer na cianovi zaplati v tretji vrstici ColorCheckerja. Vzrok zanj ni bila napačna korekcija, temveč ojačanje artefaktov, ki so nastali kot posledica kompresije JPEG, v kombinaciji z dejstvom, da vrednost CIE Lab na zaplati leži rahlo izven predstavljenih vrednosti sistema sRGB. Rdeča komponenta bi tako morala imeti negativno vrednost, ampak v praksi njeno vrednost pri pretvorbi zaokrožimo na najbližjo predstavljenjo vrednost, tj. 0. Dejstvo, da so slike navadno zapisane v formatu sRGB, sicer za korekcijo ne pomeni hudih težav, saj je barvna razdalja CIE ΔE_{00}^* med pravo vrednostjo

cianove zaplate v prostoru CIE Lab in najbližjo predstavljivo vrednostjo v sRGB le 2.2.

3.5 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik je dokaj preprost in vsebuje le tisto, kar je res potrebno za hitro, natančno in ponovljivo barvno analizo. Zgradili smo ga s pomočjo knjižnice Scala Swing, ki smo jo opisali v razdelku 3.2.2.

Na sliki 3.4 je na levi prikazana izvorna slika z avtomatsko dodanimi anotacijskimi točkami za barvni karti ColorChecker in Creative Enhancement Target, na desni pa je prikazana popravljena slika z nekaj ročno določenimi anotacijami. Rezultat barvne analize v teh točkah in področjih se izpiše v tekstovno polje na desni, lahko pa ga shranimo tudi v datoteko, kjer so dodani še nekateri metapodatki o sliki in podatki o tem, kje na sliki se nahajajo anotacijske točke in področja. Levo sliko lahko po korekciji tudi skrijemo, tako da popravljena slika pokrije celotno okno.



Slika 3.4: Uporabniški vmesnik razvite aplikacije

V meniju “Orodja” na vrhu okna imamo na voljo naslednje možnosti:

- Odpri sliko – sliko le odpre (brez korekcije),
- Odpri in popravi – sliko odpre in jo barvno popravi,
- Zajemi anotacije – omogoči zajem točk in področij na sliki,
- Shrani anotacije – shrani trenutna področja in točke,
- Shrani analizo – shrani rezultate analize v tekstovno datoteko,
- Izhod – izhod iz aplikacije.

Če želimo le preveriti nekaj barvnih vrednosti na sliki, lahko preprosto z miško kliknemo na zelene točke. V primeru, da držimo tipko **Shift** in se premikamo po sliki, se nam sprti izpisujejo trenutne barvne vrednosti pod miškinim kazalcem. Področje na sliki označimo pritiskom na tipko **Ctrl** in potegom z miško. Tu nam program izpiše povprečno barvo ter barvno pokritost s posameznimi odtenki Munsell v odstotkih. V načinu zajema anotacij se na desni izpisujejo barvne vrednosti trenutno izbranih točk in področij.

3.6 Uporaba drugih aplikacij

V tem razdelku bomo opisali, kakšen je en možen postopek korekcije in analize z uporabo že razvitih aplikacij in zakaj je tak postopek neprimeren za potrebe geologov.

3.6.1 X-Rite ColorChecker Passport

V kompletu z barvno karto X-Rite ColorChecker Passport [20] dobimo tudi aplikacijo z enakim imenom, s katero lahko izdelamo barvni profil DCP, ki ga druge aplikacije nato lahko uporabijo za barvno korekcijo. Prva težava je, da aplikacija ColorChecker Passport podpira le surovi slikovni zapis DNG (*angl.*

Digital Negative), kar pomeni, da moramo slike pred analizo pretvoriti v ta slikovni zapis, kar zahteva čas in dodaten prostor na disku.

Aplikacija ima zmožnost avtomatskega zaznavanja barvne karte ColorChecker, a ta ne deluje najbolje, saj je pri testu z desetimi fotografijami le pri štirih res zaznala barvno karto, sicer pa smo morali karto označiti ročno. Aplikacija je v prvi vrsti namenjena fotografom, ki navadno zajamejo le eno fotografijo z barvno karto, nato pa v istih svetlobnih pogojih zajamejo mnogo slik in uporabijo nad vsemi fotografijami v zbirki enako korekcijo. Za tak način uporabe ročno označevanje barvne karte ni preveč moteče, v našem primeru, kjer je barvna karta prisotna na vsaki sliki, pa je to nesprejemljivo.

Potem ko je barvna karta ColorChecker označena, aplikacija zgradi profil DCP in ga uporabniku ponudi v shranjevanje. Barvno korekcijo s pomočjo profila DCP omogočajo nekatere aplikacije, namenjene fotografom, npr. Adobe Lightroom z dodatkom Camera Raw in aplikacija RawStudio.

3.6.2 Adobe Lightroom

Adobe Lightroom je ena izmed najbolj razširjenih aplikacij za rokovanje z zbirkami digitalnih fotografij. Prilagojena je potrebam fotografom, tako da podpira uporabo enega barvnega profila nad večimi fotografijami. Če bi želeli nad vsako fotografijo uporabiti drug barvni profil, bi bilo to potrebno storiti ročno za vsako fotografijo posebej, kar pa je spet povsem neprimerno za našo uporabo. Aplikacija X-Rite ColorChecker Passport vsebuje dodatek za Adobe Lightroom, ki omogoča izgradnjo barvnega profila kar znotraj Adobe Lightrooma.

3.6.3 Wallkill CMC Instruments

Aplikacija CMC Instruments je skoraj edina aplikacija, ki omogoča delo z barvnim sistemom Munsell. Podpira tudi interpolacijo med vrednostmi v sistemu Munsell in tako poskuša sistem Munsell obravnavati kot barvni prostor. Postopek interpolacije med barvnimi vrednostmi ni opisan nikjer. Po

našem mnenju je bolj primerno, da se uporabniku prikaže najbližja vrednost Munsell iz tabele vrednosti [4], bolj natančne rezultate pa shranjujemo v prostoru CIE Lab, ki je standardiziran in tako ni težav pri interpretaciji rezultatov. Poleg tega aplikacija podpira le določanje barve v okolici točke ali pa zajame statistiko v enako velikih kvadratih za celotno sliko. Prednost naše aplikacije je tudi v tem, da je z anotacijami možno shraniti podatke o poteku analize, kar je za preverjanje in ponovljivost rezultatov zelo pomembno.

Poglavje 4

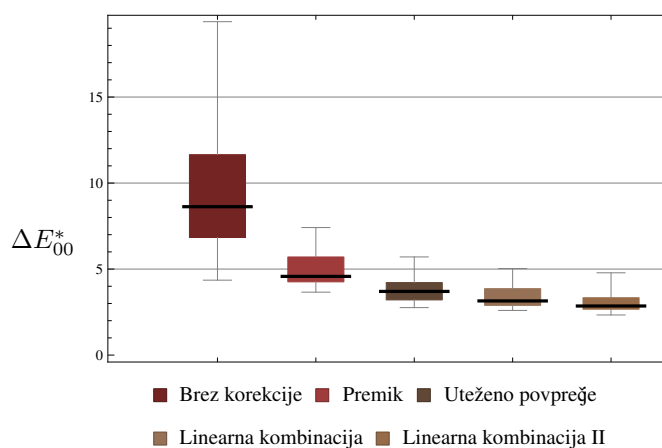
Testiranje aplikacije

Za natančno določanje barvnih vrednosti je kakovostna barvna korekcija zelo pomembna, zato bomo v tem poglavju preverili, kako dobro delujejo postopki za korekcijo, ki smo jih razvili v razdelku 3.4.

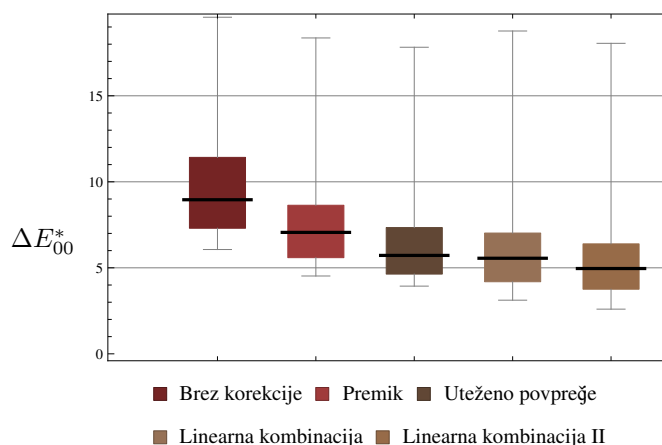
4.1 Ocena natančnosti barvne korekcije

V tem razdelku smo ocenili natančnost korekcije z zbiranjem statistike odstopanj med zaznanimi in nazivnimi barvnimi vrednostmi na zaplatah dveh barvnih kart. Najprej smo zbrali statistiko za zaplate barvne karte ColorChecker. To je seveda problematično, saj je ravno na podlagi teh podatkov potekalo iskanje vrednosti parametrov postopkov za korekcijo. V primeru, da bi prišlo do prevelikega prileganja, tega ne bi zaznali. Kot bolj neodvisno metodo vrednotenja smo zbrali še statistiko barvnih odstopanj na zgornjih in spodnjih osmih zaplatah druge barvne karte v kompletu X-Rite ColorChecker Passport, tj. Creative Enhancemet Suite (v nadaljevanju CET). Tu moramo omeniti, da nazivne vrednosti, ki smo jih uporabili za barvno karto CET, niso proizvajalčeve, kar bi tudi lahko povzročilo nekaj odstopanja, a načeloma naj bi bila ta odstopanja majhna, saj je šlo za fotospektrometrске meritve. Možen razlog, zakaj za to barvno karto niso na voljo uradni podatki, smo podali v razdelku 3.2.8.

Pri vrednotenju smo uporabili dva nabora fotografij. Prvi nabor vsebuje štirideset različnih fotografij, ki so bile zajete v nenadzorovanih pogojih, tako na terenu kot v zaprtih prostorih, in tako vsebuje mešanico najrazličnejših svetlobnih pogojev (direktno sonce, oblačno vreme, indirektno svetlobo v senci, bliskavico, sobno osvetlitev ...) ter uporabo več različnih digitalnih fotoaparátov.

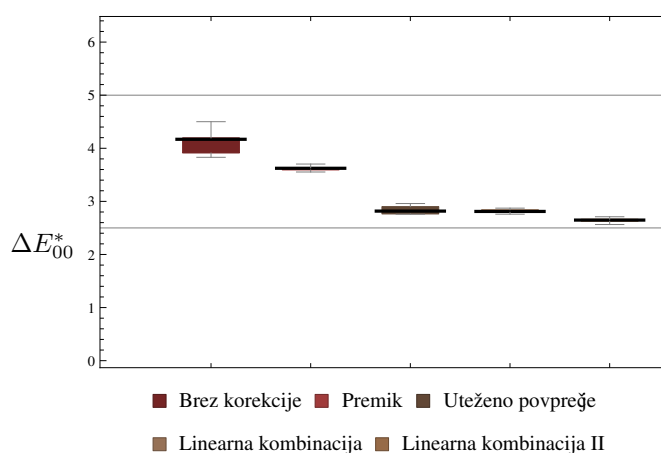


Slika 4.1: Barvna odstopanja na zaplatah barvne karte ColorChecker v terenskih pogojih zajema fotografij

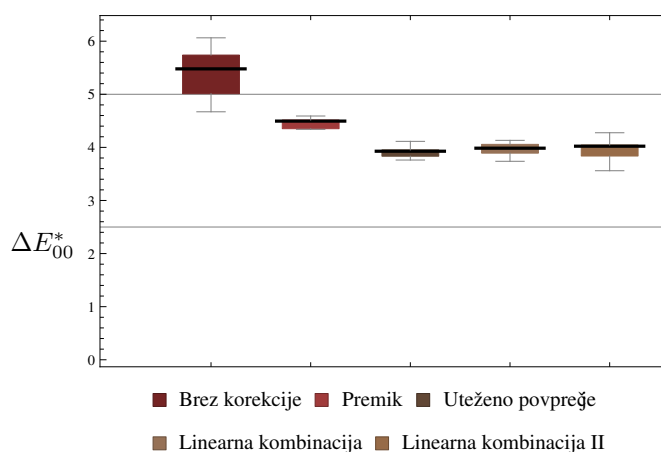


Slika 4.2: Barvna odstopanja na zaplatah barvne karte CET v terenskih pogojih zajema fotografij

Drugi nabor fotografij vsebuje deset fotografij, zajetih v geološki zbirki Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Ta nabor fotografij je bil zajet v dokaj dobro nadzorovanih pogojih: na beli podlagi, z uporabo bliskavice, prav tako pa sta obe strani kalibracijske karte (ColorChecker in CET) na fotografijah pod karseda enakim kotom in osvetlitvijo.



Slika 4.3: Barvna odstopanja na zaplatah barvne karte ColorChecker v laboratorijskih pogojih zajema fotografij



Slika 4.4: Barvna odstopanja na zaplatah barvne karte CET v laboratorijskih pogojih zajema fotografij

Kot lahko razberemo iz slik 4.1, 4.2, 4.3 in 4.4, so postopki korekcije v praktično vseh primerih zmanjšali barvna odstopanja, tako da lahko trdimo, da je korekcija izboljšala pravilnost barvnih vrednosti. Prvi stolpec na slikah predstavlja odstopanje nepopravljenih barv od znanih vrednosti, ostali stolpci pa kažejo odstopanja barv, ki smo jih popravili s postopki, predstavljenimi v razdelku 3.4 o barvni korekciji.

Pri terenskih fotografijah lahko vidimo precejšnje odstopanje med vrednostmi, prikazanimi na slikah 4.1 in 4.2. To lahko pojasnimo z različno osvetljenostjo prve in druge barvne karte na fotografijah, zato še enkrat poudarimo pomen enakomerne osvetlitve oz. uporabe dodatne osvetlitve ali bliskavice pri zajemu fotografij. Pri fotografijah, posnetih v laboratorijskih pogojih, na slikah 4.3 in 4.4 so barvna odstopanja med zaznanimi in nazivnimi vrednostmi precej nižja pa tudi interval, na katerem se pojavljajo, je ožji. Zanimivo je, da so prav vse vrednosti v prvem stolpcu na sliki 4.3 nižje od tistih na sliki 4.4. To je morda posledica odstopanja vrednosti med uradnimi vrednostmi za barvno karto ColorChecker in neuradnimi podatki za barvno karto CET.

4.2 Primerjalna analiza

V drugem delu testiranja aplikacije smo primerjali rezultate barvne analize kamnin, ki so jo izvedli študenti geologije s pomočjo primerjalne barvne karte Munsell Rock-color Chart, ter rezultate, dobljene z uporabo naše aplikacije.

V geološki zbirki na Oddelku za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani smo izbrali deset vzorcev kamnin in jih fotografirali na ravni beli podlagi in z uporabo bliskavice. Fotografije, imena in mineralne zgradbe vzorcev so zbrane v dodatku B. Zajete slike smo barvno popravili z drugim postopkom linearne kombinacije, ki smo ga opisali v razdelku 3.4.3 in ki se je v prejšnjem poglavju izkazal za najboljšega. Nato smo izbrali in z aplikacijo določili barvne vrednosti na nekaj najbolj značilnih delih vsakega vzorca, kot jih je določil somentor doc. dr. Uroš Herlec.



Slika 4.5: Vzorcev kamnin, ki so jih barvno analizirali

S prostovoljno pomočjo osmih študentov geologije smo nato izvedli poskus. Na mizo v laboratoriju smo zložili izbranih deset vzorcev kamnin in poleg njih napisali še, koliko različnih barv je potrebno določiti za vsak vzorec, kot je prikazano na sliki 4.5. Študentom smo naročili, naj odčitajo dogovorjeno število barv glede na pokritost oz. kot poznavalci področja glede na njihovo pomembnost. Študenti imajo ustrezne izkušnje iz primerjalnega določanja barv, saj so tekom študija na ta način barve že določali, tako v laboratoriju kot na terenu. Izkazalo se je, da niso vsi študenti ocenjevali istih delov vzorcev kamnin pa tudi zaporedja barvnih vrednosti in seveda same barvne oznake se v večini primerov niso skladale. Poskus je s tem pokazal tudi, kako subjektivno

je v resnici delo geologov pri zajemanju barvnih vrednosti, je pa to na žalost povzročilo tudi, da je bilo za nekaj vzorcev kamnin skoraj nemogoče določiti, katere barvne oznake označujejo kateri del kamnine. Še vedno smo v tabeli 4.1 zbrali statistiko vseh vzorcev, kjer je bilo podatke možno smiselno sestaviti. Te vrednosti smo nato primerjali z vrednostmi, ki smo jih zbrali s pomočjo razvite aplikacije.

Vzorec	Aplikacija	Študenti (le različne vrednosti)	ΔE_{00}^*
1	2.5Y 6/2	5GY 8/1, 5Y 8/1, N8, N7	15.90
1	7.5Y 5/4	10Y 6/6, 10Y 5/4, 10Y 7/4	11.81
1	7.5YR 3/2	10R 3/4, 10R 2/2, 5YR 3/4, 5R 2/2, 10R 6/2	8.79
1	N2	N2, N3	3.10
2	N6.5	5B 9/1, 5Y 8/1, 5G 8/1, N7, N9, N8	13.07
2	7.5GY 4/2	10GY 5/2, 10Y 4/2, 10G 4/2	6.72
2	10Y 5/4	10Y 5/4, 5GY 7/4, 5GY 7/2, 10Y 6/6	11.32
3	5R 3/4	5R 3/4, 5R 2/6, 5R 4/6	1.77
3	5YR 5/2	5Y 6/1, 5Y 6/2, 5Y 4/1, N7, N5	11.93
3	7.5R 2/2	N1, 10YR 2/2	10.78
5	10R 4/4	5R 4/6, 10R 3/4, 10R 5/4, 5R 3/4	3.65
6	5Y 6/4	5Y 7/6, 10Y 5/4, 10Y 7/4, 5Y 4/4, 5Y 6/4	5.46
6	N2	N1, N2, 5Y 2/1, 5G 2/1	3.38
7	10YR 7/6	10YR 8/6	9.39
7	2.5YR 4/4	10R 3/4	7.09
7	10R 6/6	10R 7/4	8.17
8	N4	5G 4/1, N4, N3, N5	3.97
8	5Y 6/2	5Y 8/1, N9, 5GY 8/1	13.37
8	2.5Y 7/2	5Y 7/2, 5Y 6/1, 5GY 8/1	3.62
10	N2	N1, N2, 5G 2/1	3.17
10	N8	N9	6.02
Povprečje			7.73

Tabela 4.1: Barvne vrednosti za nekatere vzorce iz poskusa

Razdaljo CIE ΔE_{00}^* v tabeli 4.1 smo izračunali med povprečno vrednostjo, ki smo jo določili z aplikacijo na ustreznem delu kamnine, in povprečno vrednostjo iz podatkov študentov. Vrednosti študentov smo predhodno z uporabo tabele [4] pretvorili iz sistema Munsell v prostor CIE Lab, v aplikaciji pa smo kar neposredno izpisali vrednost v prostoru CIE Lab.

Vzorec 3 (z živim srebrom orudena kamnina, glej dodatek B.3) je med izbranimi edini brušeni vzorec. Pri prvi vrednosti (rdeča) se podatki izredno dobro skladajo, pri drugi (siva) in tretji (črna) pa so študenti izbirali manj nasičene odtenke, torej bolj čisto sivo in črno. Ena možna razlaga, za katero tudi pri ogledu fotografije te kamnine na računalniku menimo, da drži, je, da je okoliška rdeča barva vplivala na njihovo barvno zaznavanje sive in črne. Taki pojavi pri človeškem vidnem zaznavanju so v literaturi znani [17].

Pri vzorcu 7 (aluminijeva ruda, glej dodatek B.7) smo podali le tri najbolj pogoste barve študentov, saj ostalih nismo mogli smiselno umestiti. Prva vrednost se sedemkrat pojavi v podatkih študentov, drugi dve pa vsaka po petkrat, kar je dovolj pogosto za vključitev. Če predpostavimo, da smo vrednosti zajemali z istega dela kamnine, večina odstopanja po CIE ΔE_{00}^* izhaja iz razlike v svetlosti.

Vzorec 5 (rdeči hematizirani apnenec, glej dodatek B.5) omenimo, ker je zelo enakomerno obarvan in smo zanj zahtevali le eno vrednost – tu lahko subjektivnost pri izbiri in težave z obdelavo podatkov zanemarimo. Barvni vrednosti sta v tem primeru blizu skupaj.

Za težavna sta se izkazala vzorca 4 in 9 (glej dodatka B.4 in B.9). Pri vzorcu 4 je pri podatkih študentov težava to, da je edina pogosta oznaka 10R 3/4. Vzrok je verjetno to, da ima kamnina raznobarvna zrna in je bila zato pri izbiri zrn prisotna subjektivnost. Pri vzorcu 9 pa je v podatkih študentov edina pogosta vrednost 10YR 6/6, ostale vrednosti pa so zelo blizu skupaj (sivinski odtenki). Vzorec 9 je težaven tudi za analizo z aplikacijo, saj se rjavi mineral sfalerit pojavlja v majhnih koščkih in poleg tega odbija svetlobo – v tem primeru bi bilo morda vzorec bolje fotografirati brez uporabe bliskavice in čim bolj od blizu, da bi lahko analizirali posamezne koščke.

Omenimo še nekaj težav, ki smo jih opazili pri izvedbi poskusa. En študent je barvno karto ponesreči obrnil narobe in nato prebral napačne barvne vrednosti, a je po oceni enega vzorca svojo napako opazil. Pri večini vzorcev se je pojavila kakšna vrednost, ki je nismo upeli smiselno umestiti k ostalim, saj je precej odstopala. Ena vrednost ni bila veljavna oznaka Munsell. Dvema študentoma se je zgodilo, da sta z isto številko označila dva različna vzorca, a smo s pomočjo ostalih podatkov razbrali, za katere vzorce je šlo. Pri nekaj vzorcih je kakšna barvna vrednost manjkala, nekje je bila celo ena preveč. Pri prepisovanju podatkov z listov v računalnik smo naredili nekaj napak, ki smo jih po večkratnem pregledu našli in popravili. Barvna analiza z uporabo aplikacije bi razrešila tudi večino od teh težav.

Če za vsak vzorec preštejemo število meritev in število različnih barvnih oznak, ugotovimo, da je vsaka barva v povprečju označena s približno štirimi različnimi oznakami v sistemu Munsell. Če bi lahko izničili vpliv tega, da so različni študenti zajemali podatke na različnih delih kamnine in da je bilo v podatkih tudi nekaj vrst drugih napak, bi se povprečje nekoliko znižalo, je pa potrebno poudariti, da so bili študenti motivirani prostovoljci in da so barvne podatke zajemali v dobro osvetljenem prostoru. Menimo, da bi bile vrednosti, zajete na terenu, še precej bolj raznolike, saj je treba všteti še vsaj vpliv vremena in spremenljivih svetlobnih pogojev.

Poglavje 5

Sklepne ugotovitve

V okviru diplomskega dela smo za potrebe barvne analize v geologiji razvili aplikacijo za avtomatsko barvno korekcijo digitalnih fotografij, ki vsebujejo barvno karto ColorChecker, ter uporabniški vmesnik, ki omogoča določanje barv in barvne pokritosti v sistemu Munsell ter shranjevanje podrobnosti opravljene analize.

Pri zajemu digitalnih fotografij tako v terenskih kot v laboratorijskih pogojih moramo digitalno sliko pred analizo obvezno barvno popraviti. S tem kar najbolj zmanjšamo barvna odstopanja na fotografiji, ki so lahko posledica različnih pojavov pri zajemu slike.

Za potrebe barvne korekcije smo izbrali barvno kalibracijsko karto X-Rite ColorChecker Passport, ki je dovolj majhna in robustna, da je primerna za terensko delo v geologiji, njen format pa je primeren tudi za laboratorijsko delo, saj je po velikosti podobna vzorcem kamnin in lahko tako kamnine zajamemo z večjo ločljivostjo. Za mnogo vzorcev kamnin bi bila s tega stališča bolj primerna še manjša barvna karta.

Naš pristop k zaznavanju barvnih kart temelji na algoritmu ASIFT. Za potrebe barvne korekcije smo implementirali zmožnost zaznavanja barvne karte ColorChecker, za potrebe testiranja postopkov korekcije pa smo dodali tudi zmožnost zaznavanja barvne karte Creative Enhancement Suite, ki je tudi del kompleta X-Rite ColorChecker Passport. V prihodnosti bi lahko

dokaj enostavno dodali podporo tudi za druge modele barvnih kart, saj je pristop dovolj splošen.

Po opravljenem zaznavanju barvne karte dobimo povprečne vrednosti njenih barvnih zaplat, prek katerih lahko izvedemo postopek barvne korekcije. Implementirali smo štiri postopke barvne korekcije, ki za vsako fotografijo posebej s pomočjo iskanja z genetskim algoritmom poiščejo čim boljše barvno korekcijo. Postopki barvne korekcije so v praktično vseh primerih izboljšali natančnost barvnih vrednosti na fotografiji, omeniti pa je potrebno, da je bilo v nekaterih primerih v naboru terenskih fotografij barvno odstopanje na barvni karti Creative Enhancement Target (ki je pri korekciji nismo uporabili) vseeno zelo veliko. To je posledica neenakomerne osvetlitve, zato je pri zajemu nujno paziti, da je osvetlitev na barvni karti in na kamnini oz. tleh, ki jih fotografiramo, čim bolj enakomerna. Enakomerno osvetlitev lahko dosežemo z uporabo bliskavice na digitalnem fotoaparatu.

Geologi pri svojem delu za določanje barvnih vrednosti že desetletja uporabljajo primerjalne barvne karte Munsell Rock-color Chart in Munsell Soil-color Chart. Opravili smo primerjalno analizo, kjer smo za deset vzorcev kamnin primerjali barvne vrednosti, ki smo jih zbrali s pomočjo naše aplikacije, ter vrednosti, ki so jih s pomočjo primerjalne karte Munsell Rock-color Chart zbrali za to usposobljeni študenti geologije. Rezultati so pokazali, da je določanje barv s primerjalnimi barvnimi kartami celo v laboratorijskih pogojih subjektivno in podvrženo napakam in da so vrednosti zbrane s pomočjo aplikacije relativno blizu povprečjem vrednosti, ki so jih zbrali študenti.

Uporabniški vmesnik razvite aplikacije omogoča določanje barvne vrednosti v točki ali pa zbiranje barvne pokritosti in povprečne barve na večjem področju. Izbrane anotacijske točke in področja lahko skupaj z metapodatki o sliki in natančnimi barvnimi vrednostmi shranimo v datoteko in tako dosežemo preverljivost in ponovljivost barvne analize.

Menimo, da aplikacija ponuja hitro in kakovostno barvno analizo digitalnih fotografij, nadaljnji razvoj pa bi lahko potekal v mnogo smeri. Za enostavnejšo analizo zelo raznobarnih vzorcev bi uporabnik lahko izbral področje analize

in število barv, ki jih želi zajeti, nato pa bi z uporabo algoritma za razvrščanje z metodo voditeljev (*angl.* k-means clustering algorithm) barvne vrednosti razdelili v željeno število gruč in prikazali rezultate za vsakega posebej. Kot smo omenili, se nekateri kamninotvorni minerali pojavljajo v dokaj ozkih barvnih razponih. Z ustrezno bazo podatkov in barvnih razponov bi lahko naredili korak proti avtomatskemu prepoznavanju teh mineralov iz fotografij. Aplikacijo bi lahko bolj prilagodili delu na terenu s tem, da bi tekla kar na pametnih telefonih. S hkratnim zajemom fotografij in koordinat GPS pa bi lahko sestavili nekatere vrste geoloških kart.

Razvita aplikacija pa seveda ni uporabna le za potrebe geologije, ampak bi bila lahko uporabna povsod, kjer je določanje barvnih vrednosti pogosto opravilo. Možni primeri takih področij so slikarstvo, umetnostna zgodovina, biologija, arheologija in arhitektura.

Literatura

























- [1] CMC colour-difference formula. *Color Research & Application*, 9(4):250–250, 1984.
- [2] Munsell Rock-color Charts with genuine Munsell color chips, 2009.
- [3] Munsell Soil-color Charts with genuine Munsell color chips, 2009.
- [4] Munsell Color Laboratory - Munsell Renotation Data. <http://www.cis.rit.edu/research/mcs12/online/munsell.php>, (februar 2014).
- [5] EasyRGB - Color conversion math and formulas. <http://www.easyrgb.com/index.php?X=MATH>, (januar 2014).
- [6] G. Bradski. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [7] C. Jenkins. Automated digital mapping of geological colour descriptions. *Geo-Marine Letters*, 22(4):181–187, 2002.
- [8] K. Kelly and D. Judd. *Color: Universal Language and Dictionary of Names*. Number 440 in National Bureau of Standards special publication. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1976.
- [9] B. Lindbloom. Useful color equations. <http://www.brucelindbloom.com/index.html?Math.html>, (februar 2014).
- [10] D. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110, 2004.

- [11] D. L. MacAdam. Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.*, 32(5):247–273, May 1942.
- [12] M. Mahy, L. Van Eycken, and A. Oosterlinck. Evaluation of Uniform Color Spaces Developed after the Adoption of CIELAB and CIELUV. *Color Research & Application*, 19(2):105–121, 1994.
- [13] C. S. McCamy, H. Marcus, and J. G. Davidson. A color- rendition chart. *J. Appl. Photogr. Eng.*, 2(3):95–99, Summer 1976.
- [14] R. D. Myers. ColorChecker Passport Technical Review, revision 3. 2010.
- [15] S. M. Newhall, D. Nickerson, and D. B. Judd. Final Report of the O.S.A. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors. *J. Opt. Soc. Am.*, 33(7):385–411, Jul 1943.
- [16] C. Poynton. ColorChecker (“Macbeth”) Chart. <http://www.poynton.com/notes/color/GretagMacbeth-ColorChecker.html>, 2008, (november 2013).
- [17] G. Sharma and R. Bala. *Digital Color Imaging Handbook*. Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series. Taylor & Francis, 2002.
- [18] G. Sharma, W. Wu, and E. N. Dalal. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color research and application*, 30(1):21–30, 2005.
- [19] M. Stokes, M. Anderson, S. Chandrasekar, and R. Motta. A Standard Default Color Space for the Internet — sRGB. <http://www.color.org/contrib/sRGB.html>, 1996, (februar 2014).
- [20] X-Rite, Inc. ColorChecker Passport User Manual, 2009. http://www.xrite.com/documents/manuals/en/ColorCheckerPassport_User_Manual_en.pdf, (september 2013).
- [21] G. Yu and J.-M. Morel. ASIFT: An Algorithm for Fully Affine Invariant Comparison. *Image Processing On Line*, 2011, 2011.

Dodatek A

ColorChecker – tabela barvnih vrednosti

DODATEK A. COLORCHECKER – TABELA BARVNIH VREDNOSTI

Barva	H	V	C	L	a	b	Ime zaplate
	3YR	3.7	3.2	38.010	12.885	14.354	temna koža
	2.2YR	6.47	4.1	66.359	13.847	16.988	svetla koža
	4.3PB	4.95	5.5	50.982	-0.395	-22.172	modro nebo
	6.7GY	4.2	4.1	43.292	-16.909	22.007	rastje
	9.7PB	5.47	6.7	56.288	12.233	-25.530	modra roža
	2.5BG	7	6	71.705	-31.671	1.294	modrikasto-zelena
	5YR	6	11	61.730	29.295	58.003	oranžna
	7.5PB	4	10.7	41.033	16.681	-43.323	vijoličasto-modra
	2.5R	5	10	51.497	44.541	14.600	srednje rdeča
	5P	3	7	30.733	26.302	-23.633	vijolična
	5GY	7.1	9.1	72.581	-28.134	59.371	rumeno-zelena
	10YR	7	10.5	71.671	13.785	66.811	oranžno-rumena
	7.5PB	2.9	12.7	29.390	26.527	-51.458	modra
	0.25G	5.4	9.6	55.633	-41.617	33.697	zelena
	5R	4	12	41.081	52.913	25.772	rdeča
	5Y	8	11.1	81.453	-2.765	78.802	rumena
	2.5RP	5	12	51.412	50.232	-16.003	škrlatna
	5B	5	8	51.600	-23.559	-26.569	cianova
	N	9.5		95.997	0.044	-0.067	bela
	N	8		81.346	0.039	-0.058	nevtralna 8
	N	6.5		66.672	0.033	-0.049	nevtralna 6.5
	N	5		51.610	0.027	-0.040	nevtralna 5
	N	3.5		35.984	0.021	-0.031	nevtralna 3.5
	N	2		20.440	0.014	-0.022	črna

Vrednosti v CIE Lab so pretvorjene iz vrednosti ki so na voljo v [16].

Tabela A.1: Barvne vrednosti in imena zaplat na barvni karti ColorChecker

Dodatek B

Fotografije vzorcev iz primerjalne analize

Izbiro in identifikacijo kamnin in mineralov iz geološke zbirke Oddelka za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti, Univerza v Ljubljani, je opravil somentor doc. dr. Uroš Herlec. Fotografije so delo avtorja.

DODATEK B. FOTOGRAFIJE VZORCEV IZ PRIMERJALNE ANALIZE



belo – kalcit

zeleno – epidot

rdeče – granat

črno – rudni mineral magnetit

Slika B.1: Oruden skarn – kontaktno-metamorfna kamnina



belo – kremen

temno zeleno – klorit

svetlo zeleno – epidot

Slika B.2: Hidrotermalno spremenjena drobnozrnata magmatska kamnina



rdeče – rudni mineral cinabarit

sivo – dolomit

črno – pirobitumen

Slika B.3: Z živim srebrom orudena kamnina rudnika Idrija



rjavo – goethit

rumeno – lepidokrokit

rdeče – hematit

Slika B.4: Aluminijska ruda – boksit

DODATEK B. FOTOGRAFIJE VZORCEV IZ PRIMERJALNE ANALIZE



rdeče: hematit, ki ga v apnencu gradi kalcit
belo: žilica kalcita

Slika B.5: Rdeči hematitizirani apnenec



zeleno – serpentinit
črno – rudni mineral kromit

Slika B.6: Kromova ruda



rjavo – goethit
rumeno – lepidokrokit
rdeče – hematit

Slika B.7: Aluminijeva ruda – boksit



črno – rudni mineral galenit
rjavo – rudni mineral sfalerit
belo – dolomit

Slika B.8: S svincem in cinkom orudena karbonatna kamnina

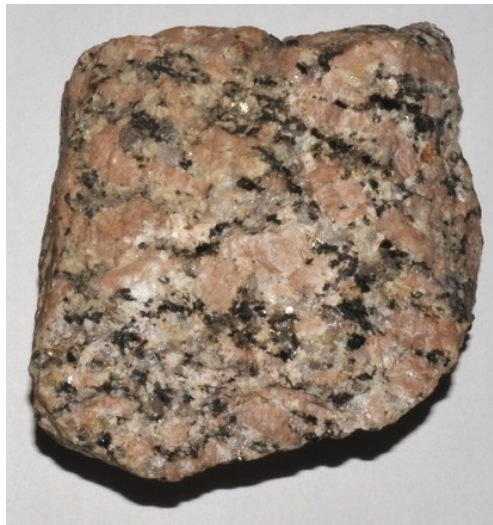
DODATEK B. FOTOGRAFIJE VZORCEV IZ PRIMERJALNE ANALIZE



rjavo – rudni mineral sfalerit

belo – delno s kremenom nadomeščeni dolomit

Slika B.9: S cinkom orudena okremenjena karbonatna kamnina



bela – plagioklaz

rožnata – kalijev glinenec

siva – kremen

črna – biotit

Slika B.10: Magmatska debelozrnata kamnina – globočnina (granit)