

Računalna rekonstrukcija slabo vidljivog povijesnog rukopisa primjenom multispektralnog slikovnog sustava

Milićević, Jelena Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:467641>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

JELENA KATARINA MILIĆEVIĆ

**RAČUNALNA REKONSTRUKCIJA SLABO VIDLJIVOG
POVIJESNOG RUKOPISA PRIMJENOM
MULTISPEKTRALNOG SLIKOVNOG SUSTAVA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

JELENA KATARINA MILIĆEVIĆ

**RAČUNALNA REKONSTRUKCIJA SLABO VIDLJIVOG
POVIJESNOG RUKOPISA PRIMJENOM
MULTISPEKTRALNOG SLIKOVNOG SUSTAVA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
prof.dr.sc. Damir Modrić

Student:
Jelena Katarina Milićević

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET
Getaldićeva 2
Zagreb, 15. 9. 2023.

Temeljem podnijetog zahtjeva za prijavu teme diplomskog rada izdaje se

RJEŠENJE

kojim se studentu/ici Jeleni Katarini Milićević, JMBAG 0128063458, sukladno čl. 5. st. 5. Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada od 13.02.2012. godine, odobrava izrada diplomskog rada, pod naslovom: Računalna rekonstrukcija slabo vidljivog povijesnog rukopisa primjenom multispektralnog slikovnog sustava, pod mentorstvom prof. dr. sc. Damira Modrića.

Sukladno čl. 9. st. 1. Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada od 13.02.2012. godine, Povjerenstvo za nastavu, završne i diplomske ispite predložilo je ispitno Povjerenstvo kako slijedi:

1. doc. dr. sc. Itrić Ivanda Katarina, predsjednik/ica
2. prof. dr. sc. Modrić Damir, mentor/ica
3. izv. prof. dr. sc. Budimir Ivan, član/ica


Dekan
Prof. dr. sc. Klaudio Pap

Sažetak

Sustav za multispektralno snimanje jedan je od brojnih načina digitalizacije kulturne baštine. Njime se mogu dohvatiti informacije koje su slabo vidljive ili nevidljive ljudskom oku što ga čini idealnim alatom za proučavanje povijesnih dokumenata koji često na sebi nose veliku štetu. To je hardverski i softverski sustav koji kombinira podatke dobivene prilikom snimanja infracrvenom, ultraljubičastom i vidljivom svjetlosti. Tako se snimanje uzoraka vrši pomoću multispektralne kamere s filterima koji propuštaju samo određeno, vrlo usko područje valnih duljina svjetlosti u kameru te softwarea na računalu na kojem se prikazuje dobivena fotografija. Daljnjom obradom zabilježenih fotografija naglašavaju se elementi koji se proučavaju, dok se ostatak fotografije izolira. Ovaj rad napravljen je u suradnji s Hrvatskim državnim arhivom u Zagrebu te sažima postupak obrade elementa koji su uključivali rukopis koji datira iz 17. stoljeća. Rukopis je snimljen s ukupno 36 optičkih filtera. Ovim radom se pokušava objasniti važnost multispektralnog snimanja koje može donijeti i superiornije rezultate od tradicionalnih, analognih postupaka digitalizacije kulturne baštine. Također, rad pokazuje veliku ulogu multispektralnog snimanja u očuvanju originala s obzirom na to da ovim načinom ne činimo nikakvu štetu originalnim uzorcima snimanjem te se samim time očuvanost originala ne riskira kao kod analognih metoda digitalizacije. Iz tog razloga možemo reći da je multispektralno snimanje nedestruktivna, neinvazivna i beskontaktna metoda, a njime se može postići daljnje razumijevanje povijesnih građa.

Ključne riječi: multispektralno snimanje, digitalizacija kulturne baštine, filteri, nedestruktivna, neinvazivna

Abstract

The system for multispectral imaging is one of the many ways of digitizing cultural heritage. It can retrieve information that is barely visible or invisible to the human eye which makes it an ideal tool for studying historical documents that often carry great damage. It is a hardware and software system that combines data obtained during infrared, ultraviolet and visible light imaging. Thus, the imaging of samples is done using a multispectral camera with filters that allow only a certain, very narrow range of wavelengths of light into the camera and software on a computer that displays the obtained photo. Further processing of the recorded photos emphasizes the elements under study while isolating the rest of the photo. This paper was made in collaboration with the Croatian State Archives in Zagreb and summarizes the process of processing the element that included a manuscript dating from the 17th century. The manuscript was recorded with a total of 36 optical filters. This thesis tries to explain the importance of multispectral imaging which can bring superior results than traditional, analog methods of digitizing cultural heritage. Also, the thesis shows the great role of multispectral imaging in the preservation of the original, considering that in this way we do not cause any damage to the original samples by recording and thus the preservation of the original is not at risk as with analog digitization methods. For this reason, we can say that multispectral imaging is a non-destructive, non-invasive and non-contact method and it can be used to achieve a further understanding of historical materials.

Keywords: multispectral imaging, digitization of cultural heritage, filters, handwriting, non-destructive, non-invasive

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Multispektralno snimanje	2
2.1.1. Refleksijsko snimanje	5
2.1.2. Transmisijsko snimanje.....	6
2.2. Primjena multispektralnog snimanja	7
2.2.1. Snimanje dokumenata i umjetnina	9
2.3. Slikovna analiza	11
2.3.1. Analiza glavnih komponenti – PCA metoda.....	12
2.3.2. Analiza nezavisnih komponenti – ICA metoda.....	13
2.3.3. Optička spektrometrija	14
3. EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1. Postav multispektralnog sustava	16
3.2. Specifikacije sustava	16
3.2.1. Strojni vid	17
3.2.2. Spektralni filteri.....	19
3.2.3. Izvor svjetla	22
3.3. Multispektralno snimanje slabo vidljivih segmenata rukopisa	22
3.4. Računalna analiza	27
3.4.1. Multispektralna kocka.....	29
3.4.2. PCA metoda	30
3.4.3. ICA metoda.....	35
3.5. Optička spektrometrija	39
4. REZULTAT I RASPRAVA	42
5. ZAKLJUČAK	44

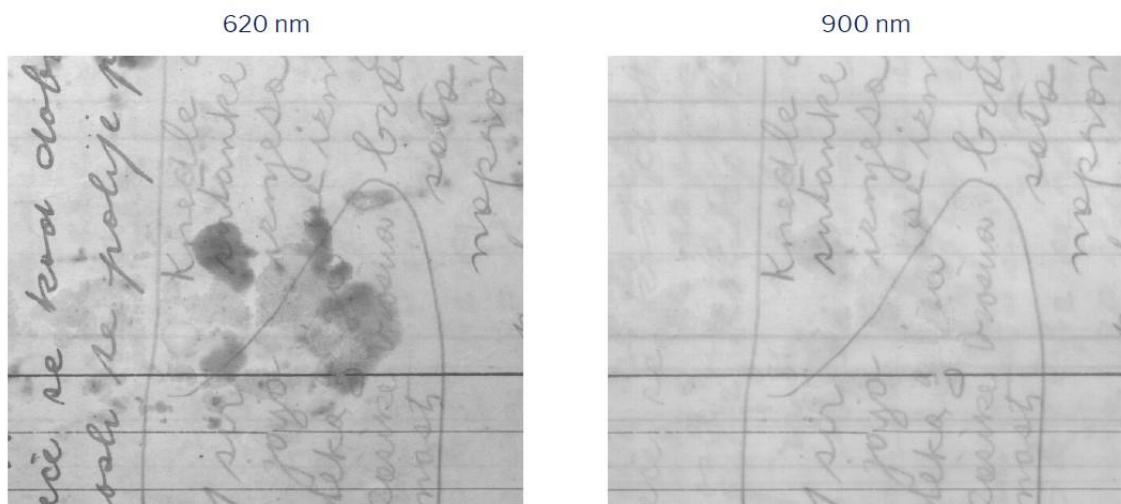
1. UVOD

Multispektralno snimanje je sukcesivni postupak snimanja korištenjem uskopojasnih optičkih filtera s ciljem dobivanja spektara u svakom pikselu slike i otkrivanja skrivenih informacija. To je hardverski i softverski sustav koji snima u području infracrvenog, ultraljubičastog i vidljivog svjetla. Multispektralno snimanje ima raznoliku upotrebu pa se tako primjenjuje u vojnim istraživanjima, medicini, poljoprivredi, povijesti, ekologiji itd. Može se upotrebljavati i za proučavanje umjetnina poput slika i freski, pa tako možemo reći da je multispektralno snimanje jedan od bitnijih i naprednijih načina za očuvanje i digitalizaciju kulturne baštine. Razlog tome je što je ovaj sustav, izrađen na Grafičkom fakultetu, u potpunosti prenosiv, a od još većeg značaja je i da je to nedestruktivna, neinvazivna i beskontaktna metoda snimanja koja pomoću raznih algoritama daje ono što analogne, tradicionalne metode snimanja i očuvanja kulturne baštine ne mogu dati. Rezultati dobiveni multispektralnim snimanjem mogu se koristiti u daljnja istraživanja u različitim područjima poput lingvistike, tekstologije, povijesti, medicine, ekologije itd. U slučaju obrađenom u ovom diplomskom radu, multispektralno snimanje omogućuje nam razlikovanje različitih objekata poput tinte, mrlja i papira, analizu okolnih utjecaja poput starenja te atmosferskog i ljudskog utjecaja na uzorak. Tako možemo reći da multispektralno snimanje otvara nove mogućnosti u očuvanju, analizi i rekonstrukciji rukopisa. Također, dešifriranje, proučavanje i uređivanje rukopisa na temelju slika rasterećuje originale i čini istraživanje neovisnim o mjestu čuvanja, a analiza rukopisa ima kraće trajanje zbog metoda automatske analize slike. Samu rasprostranjenost i kompleksnost multispektralnog snimanja pokazuje nam činjenica da je unutar procesa uključena velika skupina stručnjaka iz različitih polja kako bi se dobio krajnji željeni rezultat ovisno o uzorku koji se snima.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Multispektralno snimanje

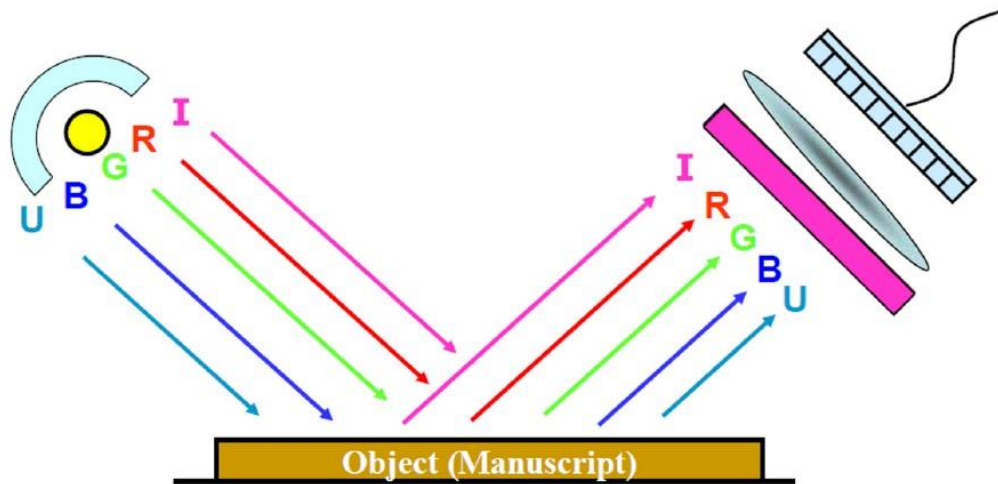
Prilikom stvaranja multispektralne slike, veliku ulogu igra svjetlost koju koristimo za akviziciju podataka. Svjetlost je elektromagnetsko zračenje, a vidljivo dio zračenja proteže se u rasponu od 400 do 700 nm koje ljudsko oko razlikuje kao boje. Multispektralno snimanje bilježi slikovne podatke unutar određenih raspona valnih duljina u elektromagnetskom spektru. Valne duljine mogu se odvojiti filtrima ili detektirati pomoću instrumenata koji su osjetljivi na određene valne duljine, uključujući svjetlost s frekvencijama izvan raspona vidljive svjetlosti, tj. infracrveno i ultraljubičasto. Multispektralno snimanje može omogućiti ekstrakciju dodatnih informacija koje ljudsko oko ne uspijeva uhvatiti svojim vidljivim receptorima [1]. Odvajanjem spektralnim filterima dobivamo fotografije odnosno „slojeve“ istog kadra od kojeg svaki zahtjeva filter određene valne duljine [2].



Slika 1: Primjer filtriranja informacija (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

Jednostavnije objašnjenje je da multispektralni sustav funkcionira tako da odabrani filter u kameru propušta samo onu valnu duljinu na koju je osjetljiv. Promatrajući sliku 2, možemo primijetiti da izvor svjetlosti (lijevo) isijava više vrsta zračenja te da se od objekt

iste zrake reflektiraju natrag prema filteru tj. kameri (desno). U ovom slučaju, kroz filter prolazi samo zraka roze boje na koju je isti filter i osjetljiv te tako ulazi u objektiv kamere.



Slika 2: Princip funkcioniranja multispektralnog sustava (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

Kao i svaki drugi sustav i multispektralni sustav ima svoje prednosti, ali i nedostatke. Zato je bitno dobro poznavati sustav kako bismo u kasnijoj analizi snimljenog uzorka mogli poboljšati sve što možemo kako bi krajnji rezultat bio optimalan. Neke od prednosti ovog sustava su:

- Nedestruktivnost – kako u ovom slučaju ne dolazi do direktnog kontakta sustava i uzorka, ne postoji rizik od oštećenja uzorka prilikom snimanja. Na ovaj način uzorak ostaje očuvan [3].
- Osjetljivost – korištenjem spektralnih filtera multispektralni sustav može detektirati informacije koje su slabije vidljive ili nevidljive ljudskom oku. Ova značajka je i jedna od najvažnijih značajki sustava zato što omogućuje prikaz i najmanjih razlika ili promjena uzorka koje mogu činiti veliku razliku u daljnjem istraživanju pružajući vrijedne informacije [3].

- Klasifikacija materijala – multispektralni sustav pomaže u klasificiranju i karakterizaciji različitih materijala analizirajući njihov spektralni odgovor. U nekim je znanstvenim područjima ovo od iznimne važnosti pošto razlikovanje materijala može biti vrlo zahtjevno [3].
- Prenosivost – ovaj sustav, izrađen na Grafičkom fakultetu, u potpunosti je prenosiv. Ova prednost sustava od velikog je značaja jer sami uzorak snimanja nije potrebno prenositi nego on ostaje na svom mjestu čuvanja. Time se znatno smanjuje rizik od oštećenja uzorka prilikom transporta ili manevriranja uzorkom.
- Otkrivanje skrivenih informacija – sustav može hvatati informacije izvan vidljivog spektra dajući uvid u informacije koje nisu vidljive golim okom ili drugim tehnikama digitalizacije i restauracije kulturne baštine. Na taj način može otkriti bilo kakve izmjene nastale okolišnim čimbenicima poput starenja, otkrivati tj. „razdvajati“ postojeće slojeve uzorka ili pak otkriti informacije koje su, namjernim ili slučajnim putem, skrivene unutar uzorka [3].

Kao što je važno poznavati prednosti sustava, bitno je poznavati i njegove mane, a neke od njih su:

- Obrada podataka – datoteke kreirane multispektralnim sustavom su obično velike što može predstavljati problem prilikom pohranjivanja podataka. Uz to, obrada ovih podataka zahtjeva napredniju računalnu tehnologiju [4].
- Cijena – nadovezujući se na prethodnu točku možemo zaključiti da pojedine računalni zahtjevi mogu biti izrazito skupi zbog njihovih naprednih specifikacija. Uz navedeno, oprema multispektralnog sustava poput kamere i optičkih filtera je vrlo osjetljiva za korištenje, a samim time i vrlo skupocjena u proizvodnji. Dodatni troškovi mogu biti i automatizacija sustava kako bi se smanjila mogućnost ljudske pogreške [4].

- Prostorna razlučivost – ograničenje prostorne razlučivosti utječe na količinu detalja snimljenih na fotografiji. Događa se zbog samog snimanja na različitim valnim duljina i upotrebom optičkih filtera koji smanjuju ukupnu rezoluciju fotografije [4].
- Dostupnost opreme – prilikom izrade multispektralnog sustava vrlo je važno odabrati adekvatnu i kvalitetnu opremu kako bi se na kraju dobili optimalni rezultati. Osjetljivost opreme dodatno pridonosi ovom problemu što ujedno pridonosi i skupocjenosti sustava [4].

Usprkos ovim nedostacima, multispektralno snimanje i dalje pruža jedinstvene rezultate prilikom korištenja, a potencijalna primjena ostaje široka. Međutim, kako bi se to postiglo, bitno ih je uzeti u obzir i njima pravilno upravljati prilikom obrade podataka, ali i prilikom samog postupka snimanja. Kod multispektralnog snimanja postoje dva postupka snimanja, a to su refleksijski ili transmisijski između kojih je glavna razlika način osvjetljavanja uzorka koji se snima. Dok se u refleksijskom postupku snimanja koristi lampica koja obasjava cijeli uzorak, kod transmisijskog postupka snimanja koristi se izvor svjetlosti koji osvjetljuje uzorak na način da transmitira svjetlost kroz svaki sloj uzorka.

2.1.1. Refleksijsko snimanje

Ovaj postupak snimanja obuhvaća osvjetljavanje površine uzorka te zapisivanje reflektirane svjetlosti s površine snimanog primjerka. Izvor svjetlosti obasjava uzorak koji se snima, svjetlost se reflektira od uzorka natrag prema filteru tj. multispektralnoj kameri, a dobivena slika prikazuje se u stvarnom vremenu na ekranu. Kod ovakvog snimanja, vrlo je bitno obratiti pažnju na vrstu, jačinu i orijentaciju izvora svjetlosti koji će se razlikovati s obzirom na to kakav primjerak snimamo tj. ograničenja koja moramo poštivati kako bi primjerak ostao neoštećen i sačuvan. Primjerice, ukoliko u refleksiji snimamo stari povijesni dokument, morat ćemo paziti na jačinu svjetlosti koju izvor emitira. Uz navedeno, moramo paziti i na UV zračenje koje je vrlo štetno za dokumente. U nekim slučajevima UV zračenje nam neće biti potrebno kako bi se snimio uzorak, dok je u drugim slučajevima potrebno, stoga moramo biti dodatno na oprezu kako ne bismo

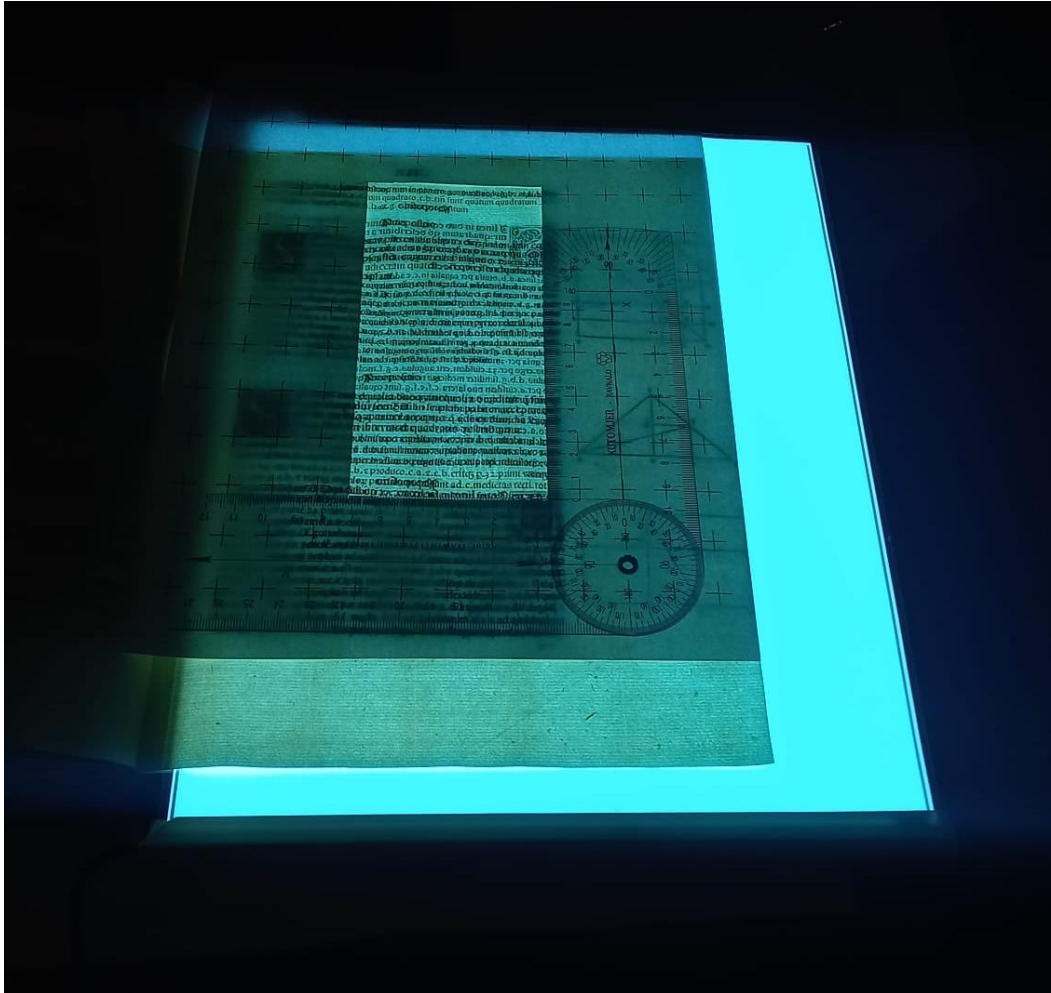
oštetili uzorak [5]. Postav u ovom slučaju obuhvaća računalo i ekran, refleksijski izvor svjetlosti koji na pravilan način obasjava uzorak, kameru i sam uzorak koji se snima.



Slika 3: Postav multispektralnog sustava prilikom refleksijskog snimanja

2.1.2. Transmisijsko snimanje

Transmisijsko snimanje obuhvaća osvjetljavanje kroz sve slojeve uzorka. Ovakav način snimanja se najčešće koristi kod snimanja starih knjiga kada se pomoću svjetlosnog papira prosvjetljava kroz stranicu knjige prema kameri. Kao i kod refleksijskog snimanja, vrlo je bitno obratiti pažnju na jačinu i vrstu izvora svjetlosti, iako kod ovakvih izvora često manje možemo upravljati samim postavkama nego kod refleksijskih izvora svjetlosti. Najčešći izvor svjetlosti koji se koristi prilikom transmisijskog snimanja je svjetlosni papir koji je razvijen miješanjem tinte i LED dioda koje su zatim ispisan na vodljivom sloju. Ovaj se sloj zatim stavlja u „sendvič“ između još dva sloja kako bi se stvorio tanki materijal koji je svijetli. LED diode su sićušne i jedva vidljive ljudskom oku, a zatim su nasumično razbacane po materijalu [6].



Slika 4: Transmisijsko osvjetljavanje stranice knjige pomoću svjetlosnog papira

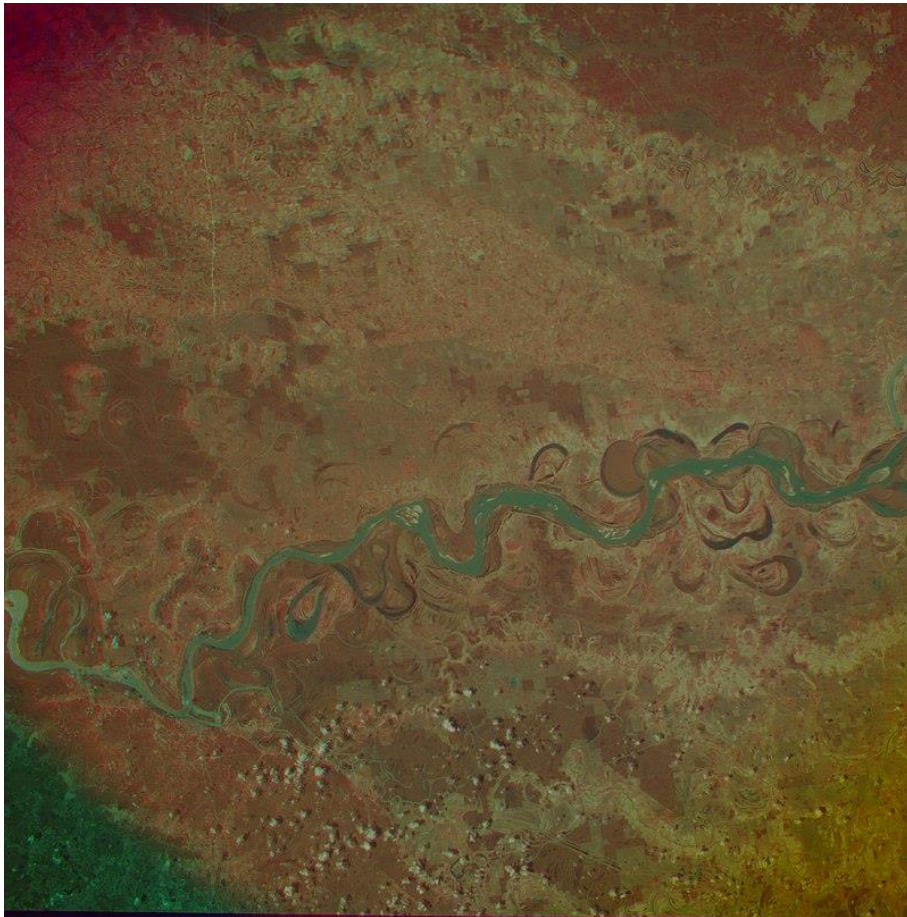
2.2. Primjena multispektralnog snimanja

Multispektralno snimanje izvorno je razvijeno za identifikaciju vojnih ciljeva i izviđanje, kao i za mapiranje detalja Zemlje. Uz to, zbog svojih mogućnosti detektiranja skrivenih ili slabo vidljivih informacija, multispektralno snimanje je našlo primjenu u analizi dokumenata i slika, a koristi se i u medicini, poljoprivredi, ekologiji i mnogim drugim granama znanosti.

Pošto je multispektralno snimanje prvotno bilo razvijeno u vojne svrhe, često se koristi u otkrivanju ili praćenju vojnih ciljeva. Jedan od ciljeva za koje se multispektralno snimanje koristi u vojne svrhe je proučavanje poremećenog tla. Podpovršinsko i površinsko tlo posjeduje različita fizikalna i kemijska svojstva koja se pojavljuju prilikom spektralne

analize pa će tako poremećeno tlo imati veću emisivnost u spektralnom rasponu od 8,5 do 9,5 mikrometara od normalnog, dok se promjene neće događati u valnim duljinama koje su veće od 10 mikrometara [7].

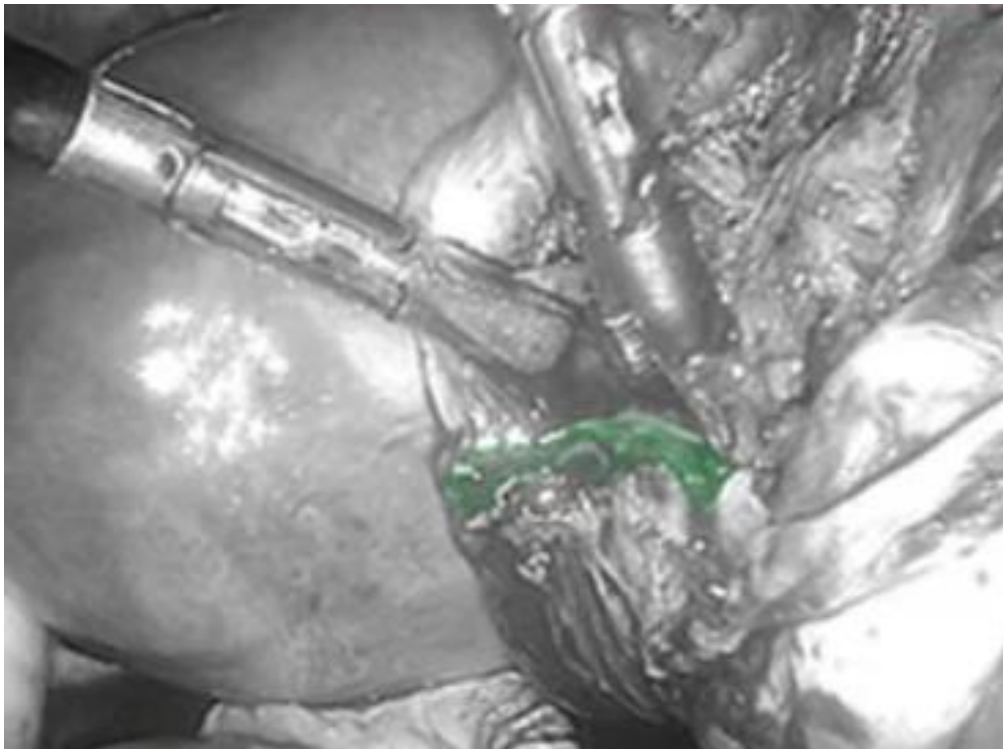
Jedan od primjera snimljenog tla je multispektralna snimka dijela rijeke Mississippi dobivena kombinacijom tri slike dobivene na različitim valnim duljinama (800nm/infracrvena, 645nm/crvena i 525nm/zelena) od strane Apolla 9 iz 1969. godine.



Slika 5: Multispektralna snimka dijele rijeke Mississippi (izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Multispectral_imaging#/media/File:AS09-26-3741_CDB_to_RGB.jpg)

Zbog svoje mogućnosti da vidi i najmanje promjene, multispektralno snimanje našlo je svoju ulogu i u medicini te je tako u nekim slučajevima zamijenilo tradicionalne metode

dijagnostike. Kao primjer možemo uzeti biopsiju koja je invazivna metoda, neugodna za pacijenata i rezultira gubitkom tkiva. Te probleme riješilo je multispektralno snimanje ujedno pružajući sve potrebne informacije i rezultate unutar stvarnog vremena koje pružaju i konvencionalne metode dijagnostike. Također, multispektralno snimanje koristi se i prilikom dijagnostike malignih bolesti koje uzrokuju promjene u tkivu, u hematologiji, a koristi se i za navođenje prilikom kirurških procesa poput operacija [8].



Slika 6: Primjena multispektralnog snimanja prilikom operativnog zahvata gdje je promijenjeno tkivo zelene boje (izvor: <https://news.jai.com/blog/multispectral-imaging-in-healthcare-a-convolution-of-machine-vision-and-spectroscopy>)

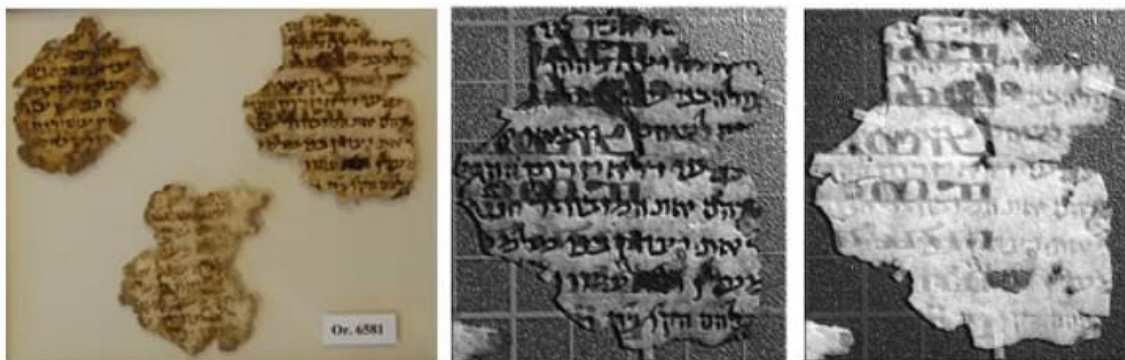
2.2.1. Snimanje dokumenata i umjetnina

Multispektralno snimanje uvelike se koristi i za snimanje umjetnina i dokumenata. Uzorak se osvjetljava ultraljubičastim, vidljivim i infracrvenim zrakama ili samo jednom vrstom navednih zračenja, a reflektirano zračenje se bilježi kamerom i spektralnim filterima ovisno o vrsti korištenog osvjetljenja. Neke umjetnine se mogu snimati i pomoću

propuštanog zračenja tj. transmisijskim načinom snimanja. Razlozi zbog kojih se umjetnine i dokumenti snimaju mogu biti različite prirode, a manifestacija skrivenih informacija može biti namjerna ili može biti posljedica materijala koji podliježu vremenu što još nazivamo i arhivskom degradacijom. Arhivska degradacija prisutna je u svim materijalima zbog prirodnog starenja i može se ubrzati korištenjem, lošim uvjetima skladištenja, neprikladnom vlagom, plijesni, najezde insekata i fizičke štete kao što su poplave ili požari. Ovi uvjeti dovode do propadanja artefakata, a uključuju i koroziju metalne žučne tinte, difuziju i blijeđenje tinte, curenje tinte s poleđine (efekt prolijevanja), zamućene natpise, fragmentaciju tinte ili područja gubitka tinte. Pokušaj detektiranja onog što je izvorno bilo ispod ovih artefakata može biti vrlo izazovno jer je svaki slučaj jedinstven i često se radi o kombinaciji više tehnika kojima je napravljena umjetnina ili dokument [9].

Poznati primjer multispektralne analize je primjer tumačenja drevnih papirusa, poput onih pronađenih u Herculaneumu gdje su se fragmenti uzorka prikazivali u infracrvenom rasponu od otprilike 1000 nm. Na toj valnoj duljini tekst je jasno čitljiv jer papir i tinta drukčije reflektiraju infracrveno svjetlo. Još jedan od primjera koji je snimljen multispektralnim snimanjem je Arhimedov palimpsest, rukopisna stranica s koje je prethodni tekst sastrugan ili ispran te je preko vidljivih ostataka ispisan novi tekst [10] [11] gdje su se spektralnim rasponom od 365 do 870 nm prikazivali listovi pergamenta. Daljnji postupak uključivao je korištenje naprednih tehnika digitalne obrade slike kako bi se otkrio podtekst. Također, multispektralno snimanje korišteno je u projektu Zaklade Mellon na Sveučilištu Yale za usporedbu tinti u srednjovjekovnim engleskim rukopisima.

Još jedan primjer palimpsesta koji se rekonstruiran multispektralnim snimanjem su fragmenti palimpsesta pronađeni u Ciaru gdje su komentari na hebrejskom iz 11. ili 12. stoljeća ispisani preko izvornog teksta. Najveći od fragmenata (slika 7, sredina i desno) sadrži natpis na staro arapskom jeziku koji se nalazi ispod hebrejskog, a ne gruzijski, kao što se nalazi ispod teksta u središnjem fragmentu. Razlog zbog kojeg su fragmenti ispitani pomoću multispektralnog snimanja je stvaranje novih slika koje bi mogle pomoći u ponovnom spajanju susjednih fragmenata [9].



Slika 7: Fragmenti palimpsesta iz Caira

(<https://blogs.bl.uk/collectioncare/2013/07/revealing-hidden-information-using-multispectral-imaging.html>)

Multispektralno snimanje također se koristi za ispitivanje diskoloracija i mrlja na starim knjigama i rukopisima. Usporedba „spektralnog otiska“ mrlje s karakteristikama poznatih kemijskih tvari može omogućiti prepoznavanje mrlje. Ova tehnika korištena je za ispitivanje medicinskih i alkemijskih tekstova, tražeći naznake o aktivnostima ranih kemičara i mogućim kemijskim tvarima koje su koristili u svojim eksperimentima. Poput kuhara koji proljeva brašno ili ocat po kuharici, rani kemičar mogao je na stranicama ostaviti opipljive dokaze o sastojcima koji se koriste za izradu lijekova [12].

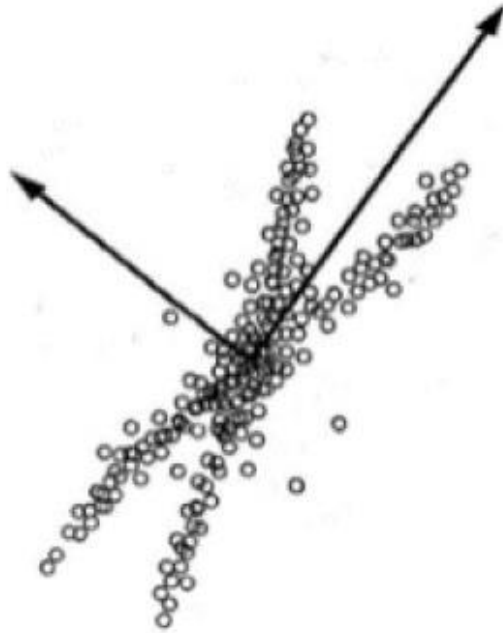
2.3. Slikovna analiza

Multispektralno snimanje obuhvaća i postupak obrade dobivenih fotografija. Njihovom daljnjom obradom možemo odbaciti podatke koji nam ne trebaju, odnosno naglasiti one podatke od kojih imamo koristi i koji su nam potrebni. Glavni način obrade multispektralnih snimki i dobivanja potrebnih podataka obuhvaćaju dvije analize, a to su analiza glavnih komponenti (PCA metoda) te analiza nezavisnih komponenti (ICA metoda).

2.3.1. Analiza glavnih komponenti – PCA metoda

Analiza glavnih komponenti (PCA) je tehnika koja se koristi za identificiranje manjeg broja nekoreliziranih varijabli poznatih kao glavne komponente iz većeg skupa podataka. Izmislio ju je Karl Pearson 1901. godine, a koristi se za naglašavanje varijacija i dohvaćanje snažnih uzoraka unutar skupine podataka. Ova vrsta analize služi kao alat koji se koristi u prediktivnim modelima i istraživačkim analizama podataka. Smatra se korisnom statističkom metodom i koristi se u područjima kao što su kompresija slike, prepoznavanje lica, neuroznanost i računalna grafika. Uz navedeno, analiza glavnih komponenti pomaže da se podaci lakše istraže i vizualiziraju. Prednost koja je povezana s ovom metodom je pronalaženje obrazaca u dobivenim podacima. Između ostalog, analiza glavnih komponenti koristi se kako bi se eliminirao broj varijabli, kada ima previše prediktora u usporedbi s brojem opažanja ili kako bi se izbjegla multikolinearnost. Također, PCA metoda koristi ortogonalnu transformaciju da bi se skup opažanja koji sadrže korelirane varijable pretvorio u skup vrijednosti poznatih kao glavne komponente. Broj glavnih komponenti korištenih u analizi glavnih komponentata manji je ili jednak manjem broju opažanja.

Analiza glavnih komponenti široko se koristi u mnogim područjima kao što su istraživanje tržišta, društvene znanosti ili u bilo kojoj industriji u kojoj se koriste veliki skupovi podataka. Prednost analize glavnih komponenti je ta što je potreban minimalan napor kako bismo složen i zbunjujući skup podataka pretočili u novi, pojednostavljeni skup korisnih informacija [13].

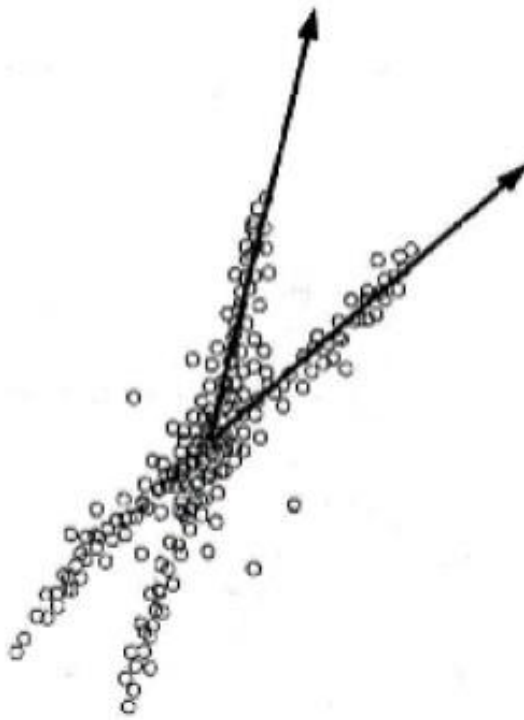


Slika 8: PCA metoda (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

2.3.2. Analiza nezavisnih komponenti – ICA metoda

Analiza nezavisnih komponenti (ICA) način je za izvlačenje određenih skrivenih informacija iz signala, a sa sobom nosi ne Gaussove i međusobno neovisne elemente iz kombiniranog signala.

Proces ove vrste analize može se primijeniti na više različitih vrsta izvora podataka. Za potrebe analize nezavisnih komponenti, podaci se izvlače iz neovisnih izvora u skupinu, kao što je slučaj s digitalnim slikama, radio signalima ili zvučnim tokovima za mikrofone. Jedan od primjera je tzv. „koktel zabava“ gdje analitičari izdvajaju jedan glas u gomili ljudi na ulici. U ovakvim situacijama ova vrsta analize daje rezultate koje druge vrste analiza ne mogu pružiti [14].



Slika 9: ICA metoda (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

2.3.3. Optička spektrometrija

Spektrometrija je grana atomske i molekularne fizike, a kasnije i analitičke kemije koja se isprva temeljila samo na mjerenjima interakcije elektromagnetskoga zračenja s česticama (atomima i molekulama) tvari, a danas je proširena. Njome se vrlo precizno mjere valne duljine elektromagnetskog zračenja ili veličine proporcionalne energiji zračenja tj. frekvencija ili valni broj te kinetička energija izbačenih ili preostalih nabijenih čestica. Iz dobivenih podataka mogu se saznati bitne informacije o kemijskom sastavu uzoraka u kvantitativnom i kvalitativnom smislu pa se tako spektrometrija smatra jednom od najvažnijih instrumentalnih tehnika analize. Uz dobivene informacije o kemijskom sastavu dobivamo i informacije o električnim i magnetskim svojstvima molekula, kao i informacije o strukturi uzorka koje uključuju masu, geometriju i energiju snimljenog uzorka [15].

Danas se tehnike spektrometrijske analize ubrajaju u najveću i najvažniju skupinu instrumentalnih tehnika suvremene kemijske analize, a primjenjuju se i u biokemiji, medicini, forenzici, fizici, geologiji, astronomiji i dr. [16].

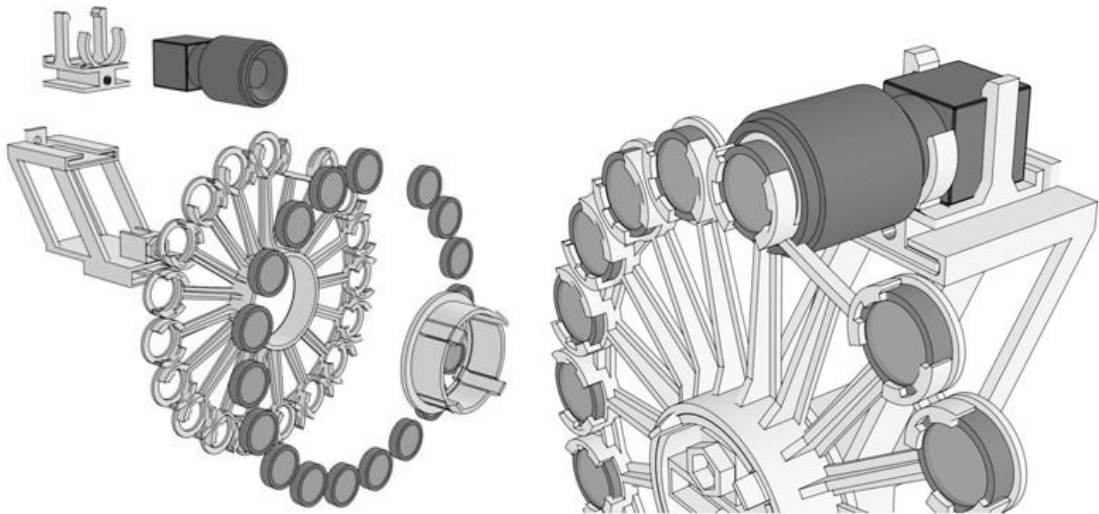
Optička spektrometrija obuhvaća samo ultraljubičasto, vidljivo i infracrveno zračenje. Budući da spektri nastaju na različit način, spektrometri su vrlo različiti u izvedbi i stupnju složenosti. Tako se npr. u optičkoj spektrometriji rabe dva tipa spektrometara: disperzivni i interferometrijski. Sastavni dijelovi disperzivnoga spektrometra su: izvor zračenja, selektor valnih duljina, pretvornik zračenja, sustav za očitavanje signala (detektor), procesor signala (računalo) i pisac. U interferometrijskom spektrometru disperzivni selektor valnih duljina (prizma ili optička rešetka s pukotinama i filtrima) zamijenjen je interferometrom, koji mjeri spektre u vremenskoj intervalu, a računalo podatke prenosi u frekvencijsku domenu korištenjem tzv. diskretne Fourierove transformacije [17]. Optičku spektrometriju moguće je napraviti samo kada smo u potpunosti okarakterizirali svaki dio sustava odnosno kad smo odredili tzv. instrumentalnu funkciju kako bismo razlučili što nam je u mjernom signalu doprinos sustava, a što dolazi od samog artefakta. Zbog toga smo svu opremu dodatno ispitali na Grafičkom fakultetu u Zagrebu.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Snimanje uzorka provodilo se u posebnim uvjetima u Hrvatskom državnom arhivu u Zagrebu. Okolišni čimbenici uključivali su potpunu izolaciju od prirodne svjetlosti tj. od UV zraka koje su u ovom slučaju bile štetne za uzorak.

3.1. Postav multispektralnog sustava

Postav se sastojao od uzorka kojeg smo snimali, prilagodljivog izvora svjetla te multispektralnog sustava kojeg čini set filtera, multispektralna kamera, računalo i prenosivi ekran. Postav je u potpunosti dizajniran i izrađen od strane tima na Grafičkom fakultetu, 3D modeliran i stereolitografski 3D printan.



Slika 10: Princip slaganja multispektralnog sustava (lijevo), uvećani prikaz pozicije optičkih filtera i objektivna (desno) (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

3.2. Specifikacije sustava

Kako se radi o vrlo kompleksnom i osjetljivom sustavu, sva korištena oprema za snimanje morala se dodatno testirati na Grafičkom fakultetu kako bismo potvrdili ili demantirali specifikacije dobivene od strane proizvođača.

Oprema korištena za snimanje:

- Kamera tj. strojni vid – monokromatski senzor rezolucije 20 MP (5472x3648 px) spektralnog raspona od 300 do 1100 nm
- Spektralni filteri – 36 spektralnih filtera od 380 do 1000 nm spektralne širine 10 nm, debljina filtera 6,5 mm
- Objektiv – žarišna duljina 25 mm
- Računalo – procesor i5 2,4 GHz, 16 GB RAM, Win operativni sustav + software razvijen u C# jeziku (SDK)
- Touchscreen zaslon – prijenosan 13“ zaslon osjetljiv na dodir s više aktivnih točaka
- Izvor svjetla – vidljivi spektar + IR, prilagodljiva snaga izvora maksimalne snage 300 W [18]



Kamera – strojni vid



Touchscreen zaslon



Spektralni filteri



Objektiv



Računalo



Izvor svjetla

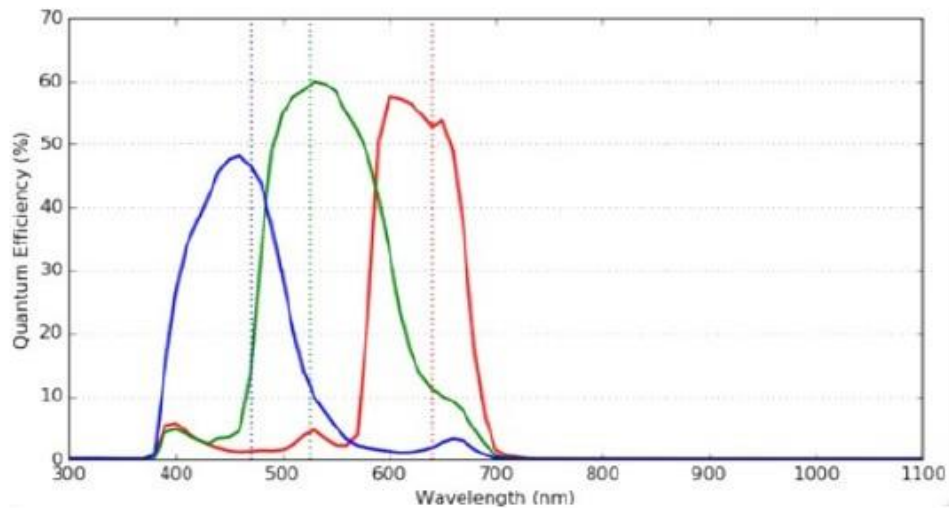
Slika 11: Dijelovi multispektralnog sustava (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc.

Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

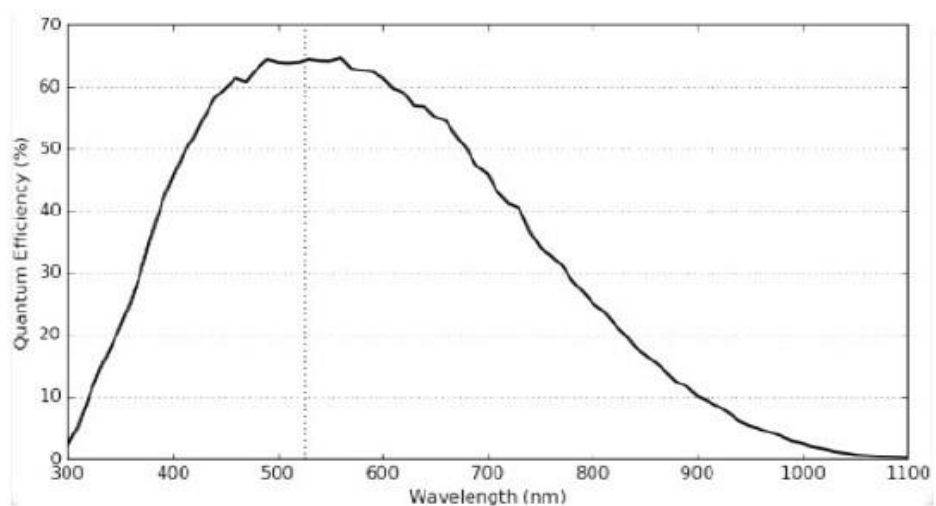
3.2.1. Strojni vid

Uspoređujući klasičnu kameru i kameru koja se koristi za multispektralno snimanje, najprije ćemo uočiti razliku da je klasična kamera sastavljena od 3 kanala, odnosno crvenog, zelenog i plavog kanala te samim time stvara fotografije u boji, dok je kamera

za multispektralno snimanje monokromatska kamera koja stvara crno-bijele fotografije. Također, spektralni raspon klasične kamere iznosi od 400 do 700 nm, dok kamera za multispektralno snimanje ima raspon od 300 do 1100 nm te može imati N – uskopojasnih (*bandpass*) filtera, dok klasična može imati samo crveni, zeleni i plavi filter.



Slika 12: Prikaz osjetljivosti senzora klasične kamere (RGB filteri) (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)



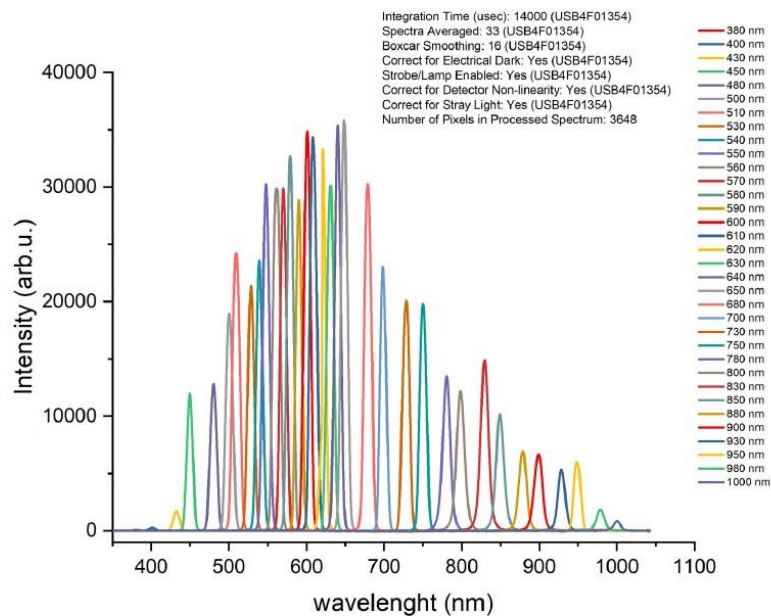
Slika 13: Prikaz osjetljivosti senzora multispektralne kamere (monokromatska) (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

3.2.2. Spektralni filteri

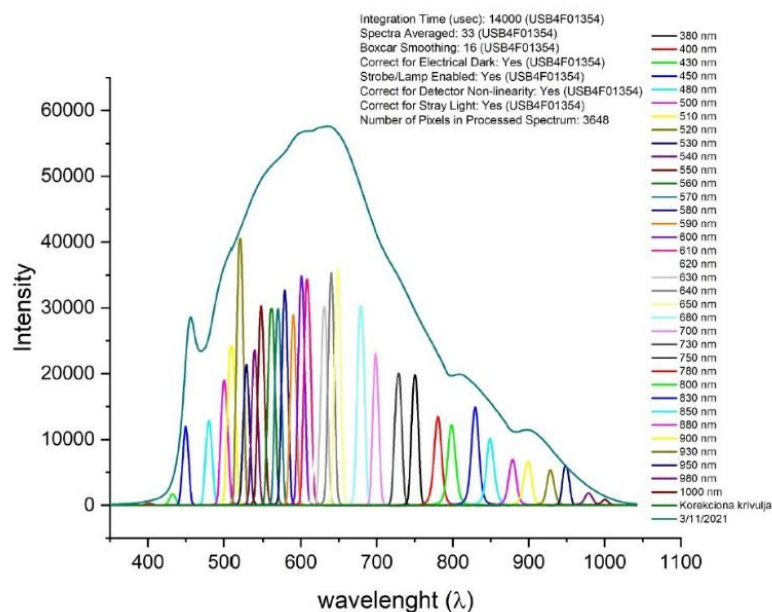
Za različite svrhe mogu se koristiti različite kombinacije spektralnih filtera. Korištenje filtera ovisi o namjeni slike, okolišnim čimbenicima i osobnim preferencijama analitičara. Toplinska infracrvena zraka često se izostavlja iz razmatranja zbog loše prostorne rezolucije, osim za posebne namjene. Valne duljine filtera su približne; točne vrijednosti ovise o pojedinim instrumentima (npr. karakteristike satelitskih senzora za promatranje Zemlje, karakteristike osvjetljenja i senzora za analizu dokumenata): [19]

- Plava – od 450 do otprilike 520 nm; koristi se za snimanje atmosfere i duboke vode i može dosegnuti dubine do 50 m u čistoj vodi
- Zelena - od 520 do otprilike 600 nm; koristi se za snimanje vegetacije i dubokih vodenih struktura, do 30 m u čistoj vodi
- Crvena – od 600 do otprilike 690 nm; koristi se za snimanje objekata koje je napravio čovjek, u vodi do 9 m dubine, tla i vegetacije
- Bliski infracrveni (NIR) - 750-900 nm; koristi se prvenstveno za snimanje vegetacije
- Srednji infracrveni (MIR) - 1550–1750 nm; koristi se za snimanje vegetacije, sadržaja vlage u tlu i nekih šumskih požara
- Daleki infracrveni (FIR) - 2080–2350 nm; koristi se za snimanje tla, vlage, geoloških obilježja, silikata, gline i požara
- Toplinska infracrvena - 10400-12500 nm; koristi emitirano umjesto reflektirano zračenje za prikaz geoloških struktura, toplinskih razlika u vodenim strujama, požara i za noćna istraživanja [19]

Vrlo važna stavka prilikom korištenja filtera je ta da spektralni raspon filtera ne smije izlaziti iz spektralnog raspona kamere (slike 13 i 14). Razlog tome je jednostavan – ukoliko spektralni raspon filtera izlazi izvan spektralnog raspona kamere, korištenjem onih valnih duljina koje se nalaze izvan raspona kamere nećemo dobiti rezultate zbog neosjetljivosti senzora na iste.



Slika 14: Krivulje intenziteta spektralnih filtera na odgovarajućim valnim duljinama (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)



Slika 15: Krivulja intenziteta svjetlosnog izvora i spektralnih filtera (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

Spektralni filteri nalaze se na „obruč“ pričvršćenom za kameru. Kako bismo promijenili koji filter koristimo, moramo okrenuti обруč na željeni filter odnosno na željenu valnu duljinu.

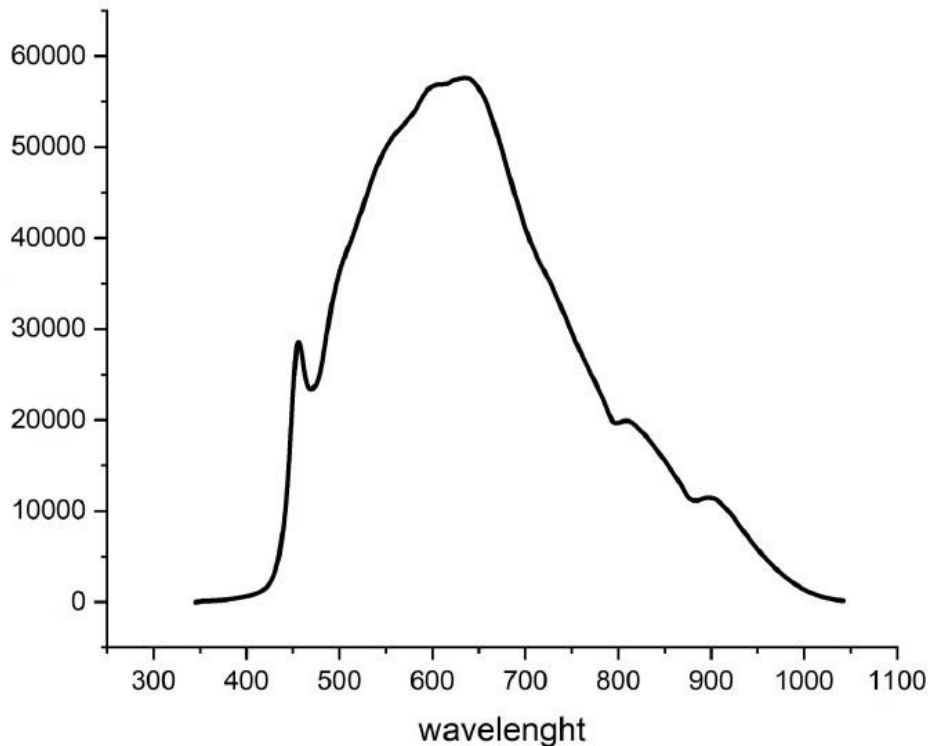


Slika 16: Filteri

Filteri moraju imati jednolik odziv na cijeloj svojoj površini. Interferencijski filteri koji imaju vrlo uski upadni kut obično nisu prikladni za snimanje scena koje uključuju široku površinu. Odabrali smo komercijalne uskopojasne spektralne filtere proizvođača Thorlabs. Korišteni su filteri promjera 25.4 mm i debljine 6.5 mm. Filteri su montirani u aluminijski prsten kako bi se zaštitili od oštećenja i kako bi se montaža filtera na kameru učinila lakšom. Promjer filtera podudara se sa promjerom prednjeg otvora blende, što je bitno kako bi se sustav učinio što kompaktnijim [18].

3.2.3. Izvor svjetla

Korišteni izvor svjetla bio je Broncolor Siros L kojem je moguće kontroliranje snage izvora te koji uz vidljivi spektar još može sadržavati i infracrveni spektar. Raspona je od 430 do 1000 nm, maksimalne snage 300 W / 120 V [18]. Naziva se još i „umjetnim Suncem“ jer zbog svojih svojstava isijava veliku količinu energije te imitira Sunčevo zračenje.



Slika 17: Krivulja intenziteta svjetlosnog izvora Broncolor Siros L (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

3.3. Multispektralno snimanje slabo vidljivih segmenata rukopisa

Cijeli postupak snimanja može se rasporediti unutar tri koraka:

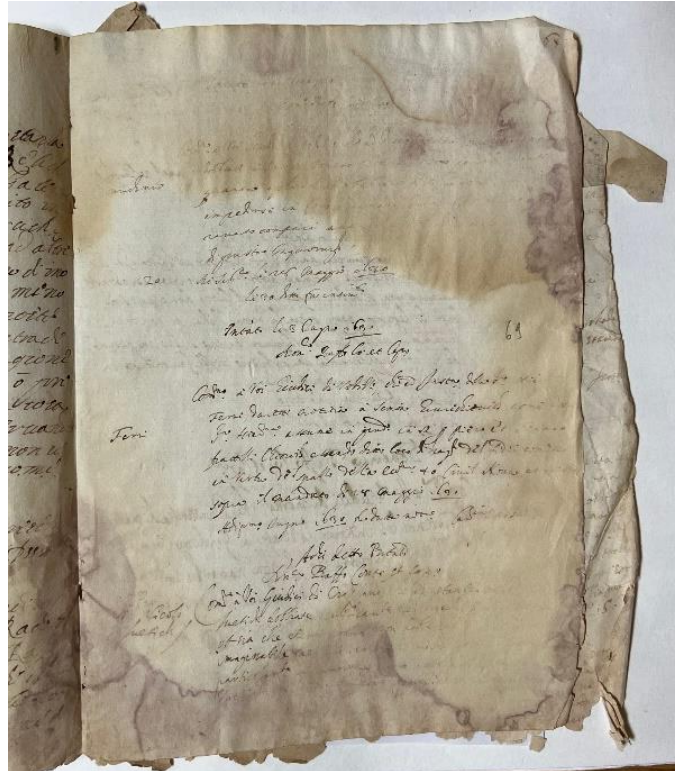
1. Pripremu podataka – analiza ekspozicije, poravnanje slike, korekcija aberacija...
2. Kompenzacija – karakterizacija svake komponente, kompenzacija instrumentalnih funkcija...

3. Analiza slika – obrada velike količine podataka – primjerna matematičkih algoritama poput PCA i ICA metode [18]

Uzorak koji je snimljen bio je rukopis koji datira iz 17. stoljeća pisan na staro talijanskom. Snimljen je s 36 optičkih filtera u rasponu od 380 do 1000 nm. Snimanje je obuhvatilo dva uzorka istog rukopisa, jedan restaurirani i jedan nerestaurirani uzorak.

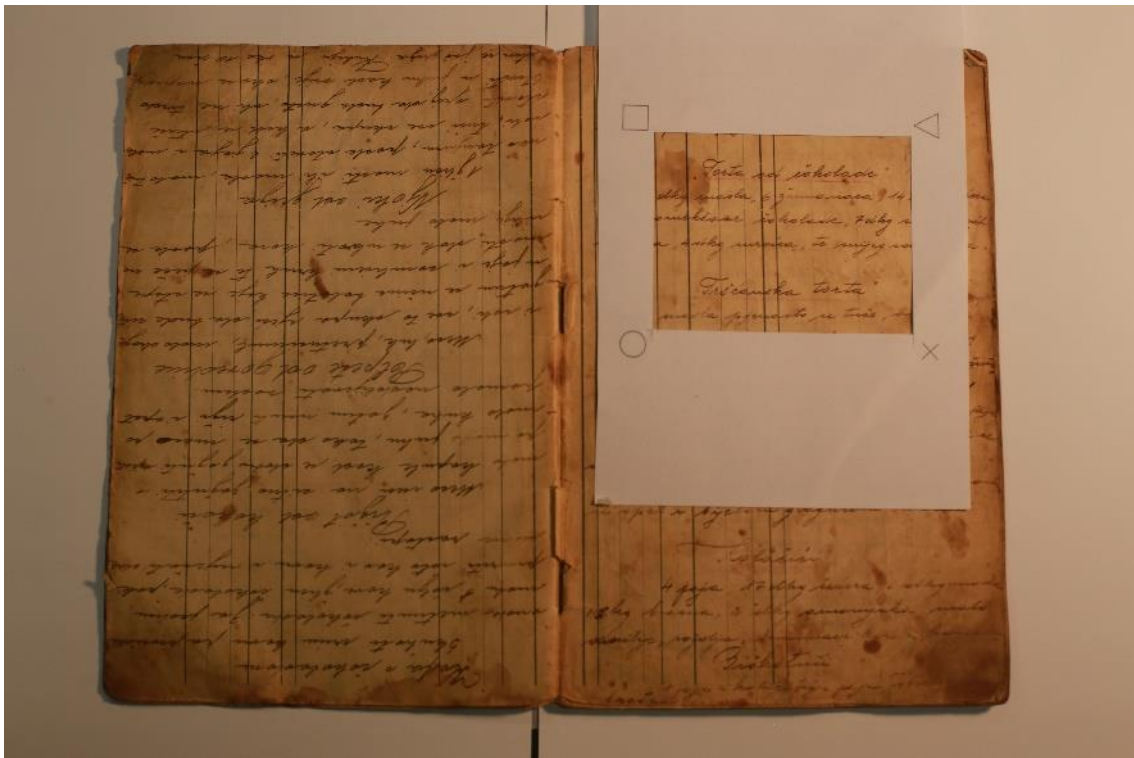
Snimanje se vršilo u prostoriji koja nije imala pristup prirodnom svjetlu. Razlog tome je što uzorci iz sigurnosnih razloga nisu mogli biti osvijetljeni prirodnom svjetlošću zbog UV zračenja koje može biti štetno za uzorak. Zbog toga su uzorci bili osvijetljeni umjetnim svjetlom Broncolor Siros L koje ima prilagodljiv izvor energije, odnosno izvorom koji ne emitira UV zrake. Osvjetljavanje svakog uzorka je trajalo otprilike 20 minuta, a jačina iluminacije za to vrijeme iznosila je 500 luksa.

Svaki uzorak smo prvo postavili na čistu površinu tj. stol na kojem se vršio cijeli postupak snimanja. Kada smo smjestili uzorak na adekvatnu površinu, to smo isto morali učiniti i s cijelim multispektralnim sustavom.



Slika 18: Rukopis

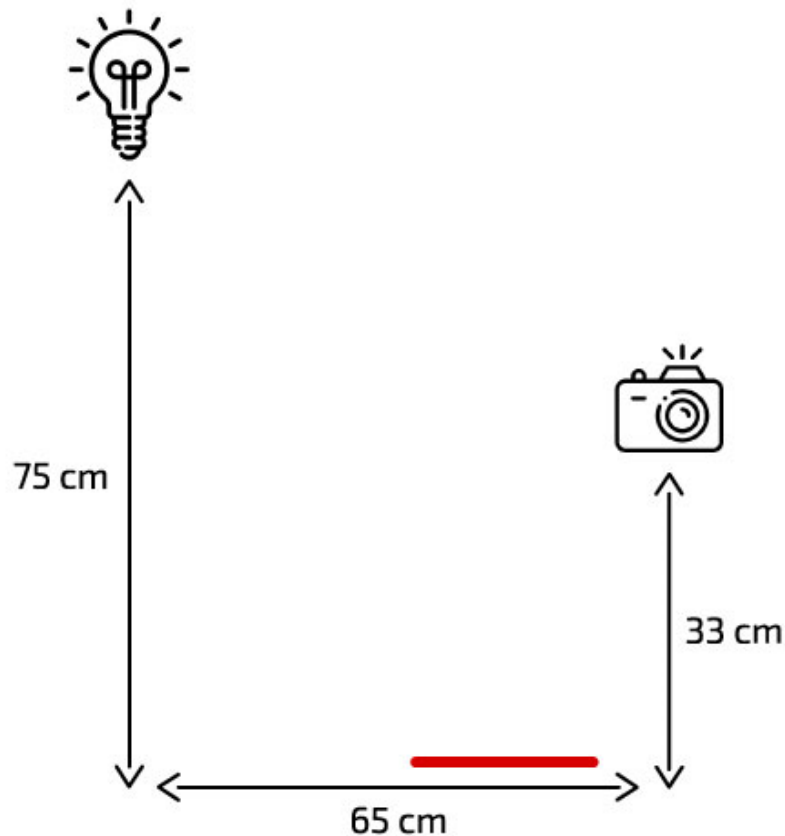
Prije početka postupka snimanja, odredili smo koje točno dijelove želimo snimati. Problem koji se ovdje javljao je taj da nismo mogli snimati veću površinu zbog ograničenja kuta snimanja, tako da je unutar kadra stala samo manja površina svakog uzorka. Uz to, kako bismo u kasnijoj analizi mogli adekvatno obraditi slike tj. „naslagati“ slijed fotografija jednu na drugu, na uzorak smo morali postaviti papir koji je sadržavao četiri različite oznake – kvadrat, trokut, kružnicu te znak „x“ što nam je dodatno smanjilo površinu snimanja.



Slika 19: Primjer odabira dijela za snimanje s oznakama

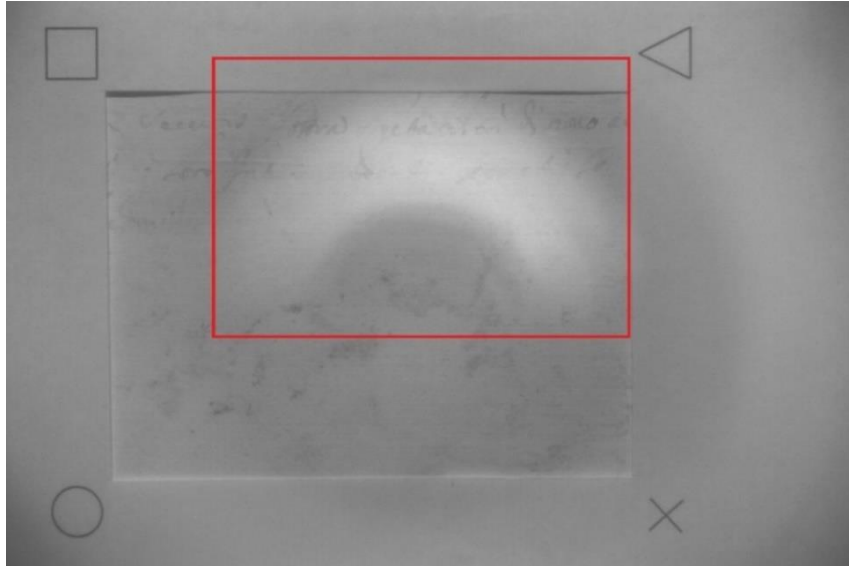
Vrlo bitna stavka u ovom dijelu snimanja je da je multispktralni sustav vrlo osjetljiv na bilo kakve pomake, pa se tako niti uzorak niti kamera ne smiju pomaknuti. Ukoliko se dogodi pomak jedne od te dvije komponente, uzorak je potrebno snimiti ispočetka. Razlog tome je izuzetna osjetljivost sustava na bilo kakve pomake koji stvaraju veliki problem u kasnijoj računalnoj obradi zbog kojih potencijalno nećemo moći adekvatno obraditi fotografije, odnosno fotografije nećemo moći „naslagati“ jednu na drugu te ćemo

izgubiti sve potrebne informacije. Također, kako bismo adekvatno snimili uzorak, bilo je bitno prilagoditi kut snimanja i kut osvjetljavanja uzorka, stoga je visina svjetlosnog izvora iznad uzorka iznosila 75 cm, a visina na kojoj je kamera snimala iznosila je 33 cm iznad uzorka, dok se uzorak nalazio između izvora svjetlosti i kamere (slika 20, uzorak označen crvenom bojom). Udaljenost između izvora svjetlosti i kamere iznosila je 65 cm.



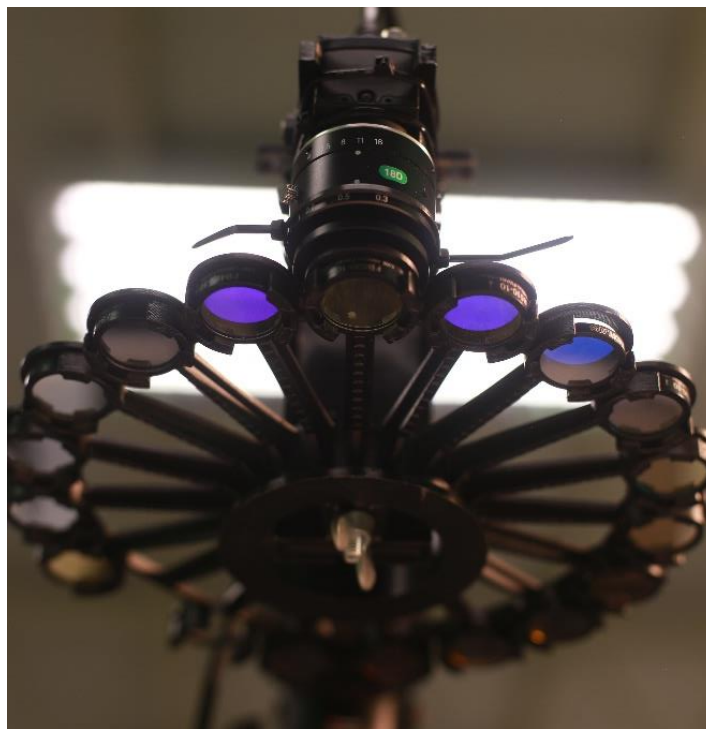
Slika 20: Skica postava

Kut rasvjete prilagodili smo uzorku kako odbijeni dio svjetlosti koji se reflektira od uzorka u objektiv ne bi prouzročio tzv. *flare*, tj. djelomično preeksponiranje uzorka koji se na slici pojavljuje kao svjetliji polukrug. Takva pojava otežava daljnju analizu te se vidljivost podataka na slici smanjuje, a uzrok joj leži u činjenici da dio svjetlosti uđe između objektiva i filtera što uzrokuje višestruke refleksije upadne svjetlosti između tih dviju komponenti.

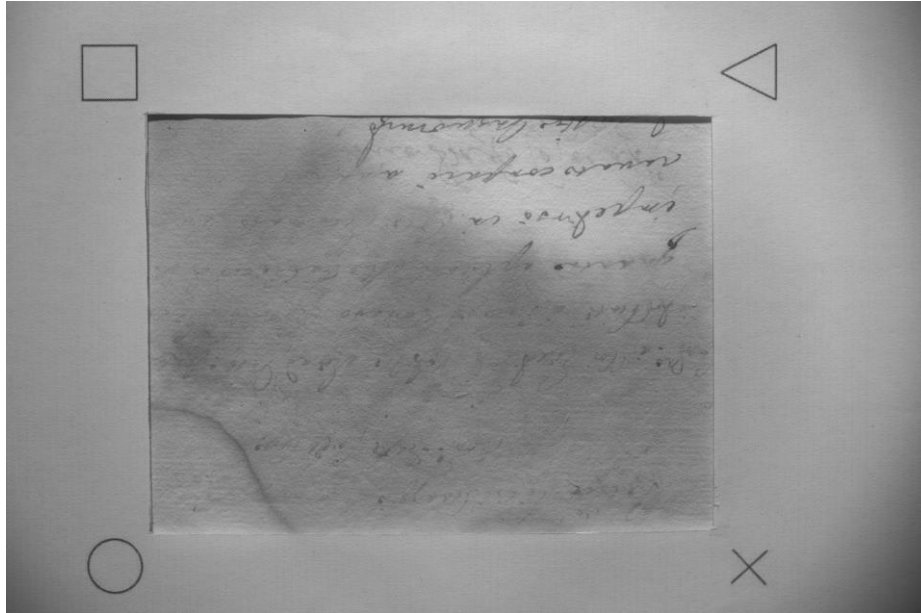


Slika 21: Prikaz *flarea*

Daljnji postupak obuhvaćao je ručno mijenjanje filtera kao i snimanje fotografije prilikom primjene svakog filtera. Pošto sustav sadrži 36 filtera, tako smo u slijedu fotografija dobili 36 fotografija, a svaka je bila snimljena različitom valnom duljinom u rasponu od 380 do 1000 nm.



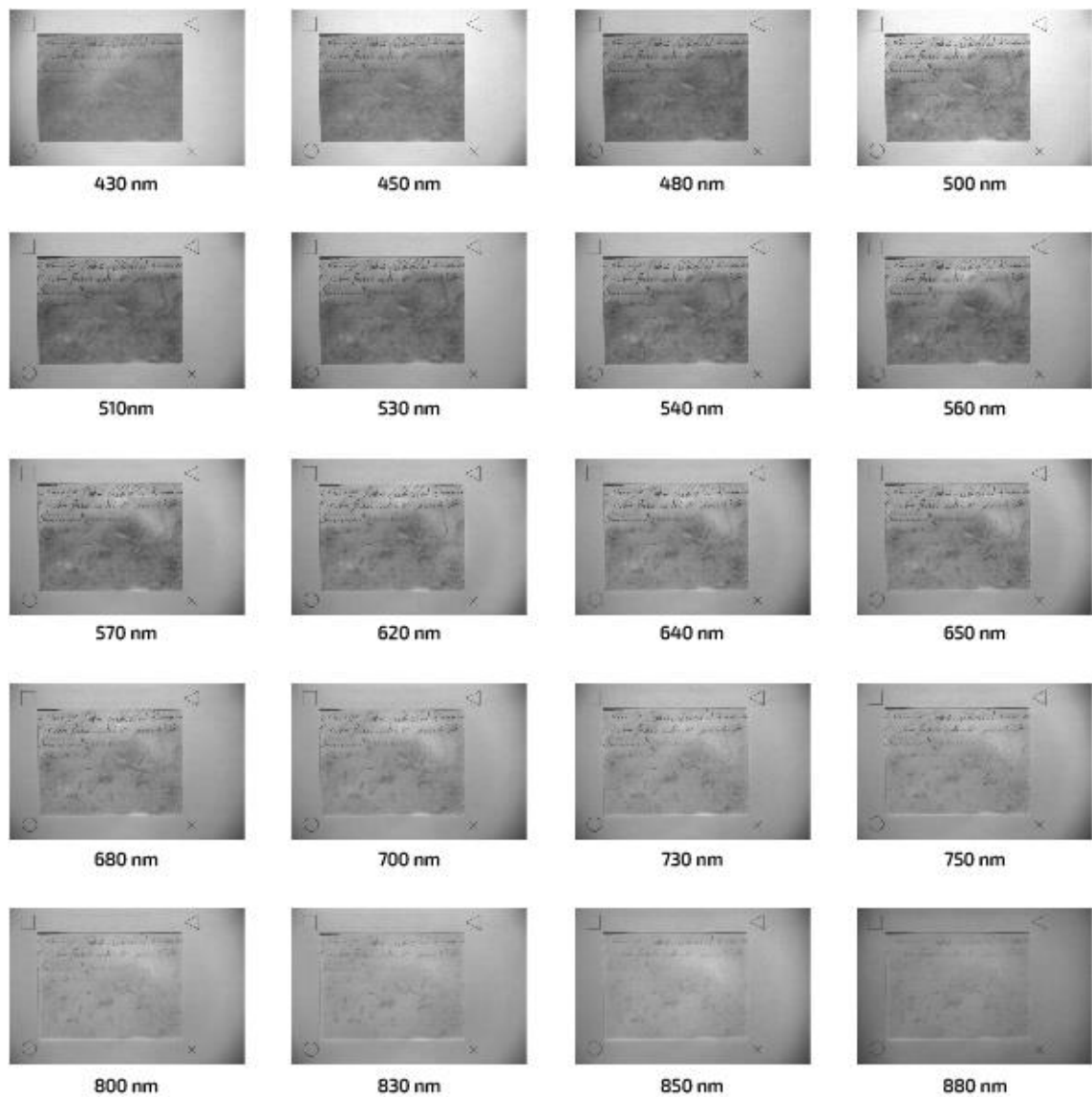
Slika 22: Primjer postava kamere i filtera



Slika 23: Neobrađena fotografija s četiri različite oznake snimljena filterom od 520 nm

3.4. Računalna analiza

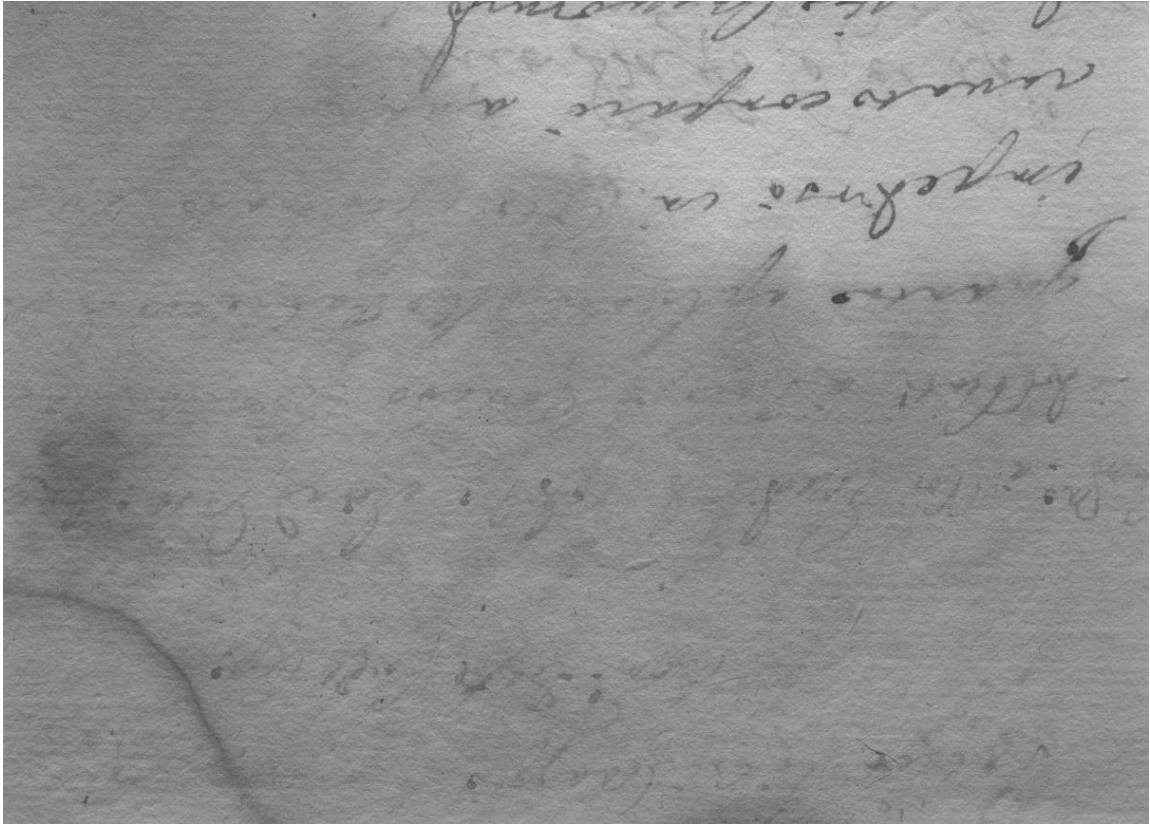
Kako bismo mogli izvršiti računalnu analizu u potpunosti, koristili smo dva srodna programa za obradu fotografija, a to su *ImageJ* te *Fiji*. Prije samog početka filtrirali smo fotografije na način da smo odbacili one fotografije na kojima se pojavio *flare* kako bi nam daljnji rezultati bili što relevantniji te smo dobili sekvencu od 20 fotografija s kojom smo izrađivali daljnji postupak.



Slika 24: Dobivena sekvenca od 20 fotografija

Prvi dio postupka računalne analize bio je naslagati fotografije jednu na drugu, a cilj ovog dijela postupka je kalibrirati tj. poravnati fotografije. Poravnanje fotografija vršilo se u programu *Fiji*, a uključivalo je umetanje sekvence snimljenih fotografija u program. Prilikom poravnavanja fotografija, dozvoljeno odstupanje između svakog piksela svake fotografije iznosio je jedan piksel. Za poravnanje je korištena opcija *Linear Stack Alignmetn with SIFT* koja omogućuje detekciju značajki u različitim mjerilima, kutovima i osvjetljenju scene. Dobivenu poravnatu sekvencu smo zatim izrezivali samo na ono područje koje proučavamo, tj. odbacili smo oznake (kvadrat, trokut, kružnicu i znak „x“)

kako bismo bez smetnji mogli nastaviti računalnu analizu. Slijed fotografija smo zatim spremili kao sekvencu fotografija u posebnu mapu na računalu, a jedna od dobivenih fotografija izgleda ovako:

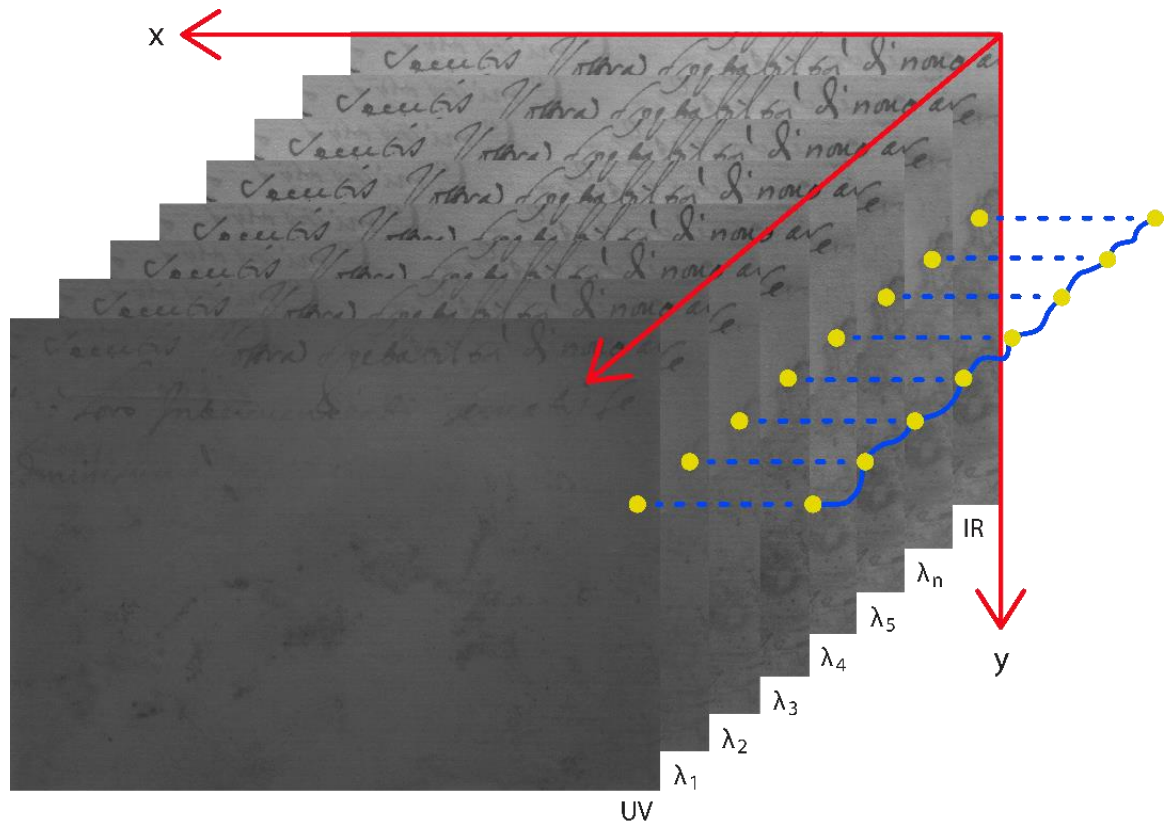


Slika 25: Poravnata i izrezana fotografija snimljena filterom od 520 nm

3.4.1. Multispektralna kocka

Dobivena sekvenca tvori tzv. multispektralnu kocku koja je bitna zbog dobivanja podataka za optičku spektrometriju. Podaci spektralne slike se mogu vizualizirati kao trodimenzionalnu kocku u kojoj je površina kocke funkcija prostornih koordinata, a dubina je funkcija valne duljine. Jedna od važnih prednost ove tehnike je da može pokazati spektar refleksije, apsorpcije ili fluorescencije za svaki piksel na slici, koja se može koristiti u razne svrhe poput otkrivanja biokemijskih tvari promjene objekata koji se ne mogu identificirati s tradicionalnim sivim ili kolor metodama snimanja [20]. U ovom slučaju je ta mogućnost bila korištena za prikupljanje informacija o papiru, tinti i

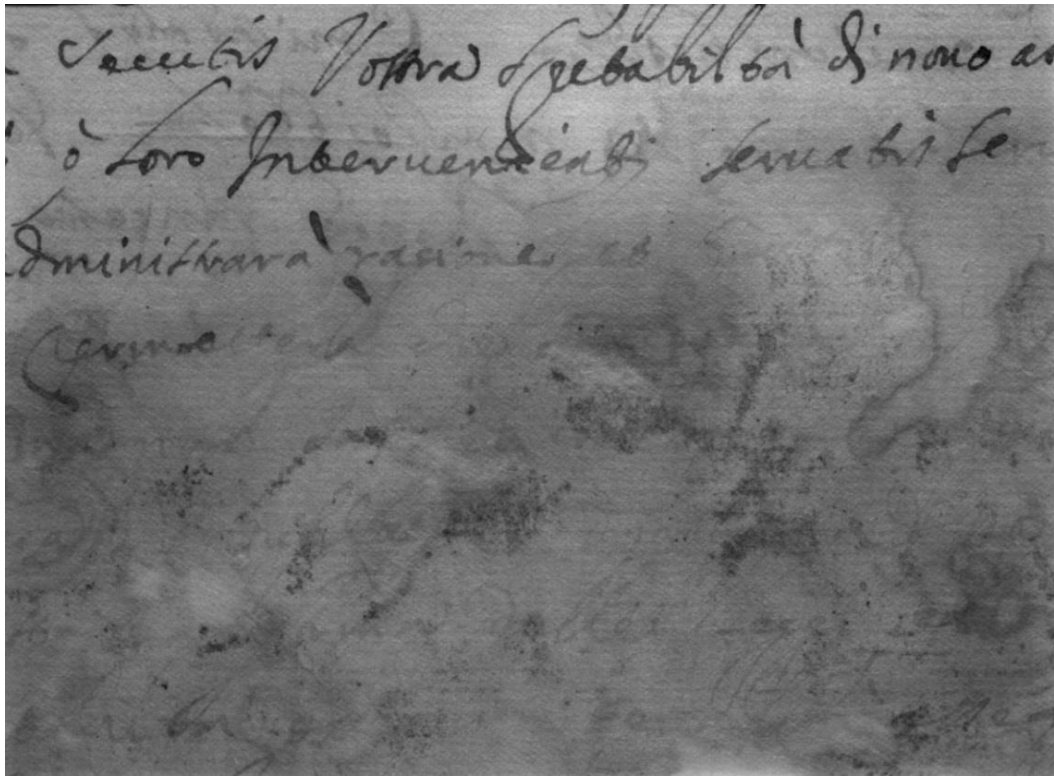
mlji, a to smo postigli uzimanjem malog uzorka odgovarajućeg piksela u svakoj slici. Na slici (?) piksel je označen žutom bojom, a puna plava linija predstavlja spektar tog istog žutog piksela. Ovaj korak napravljen je u programu *ImageJ*.



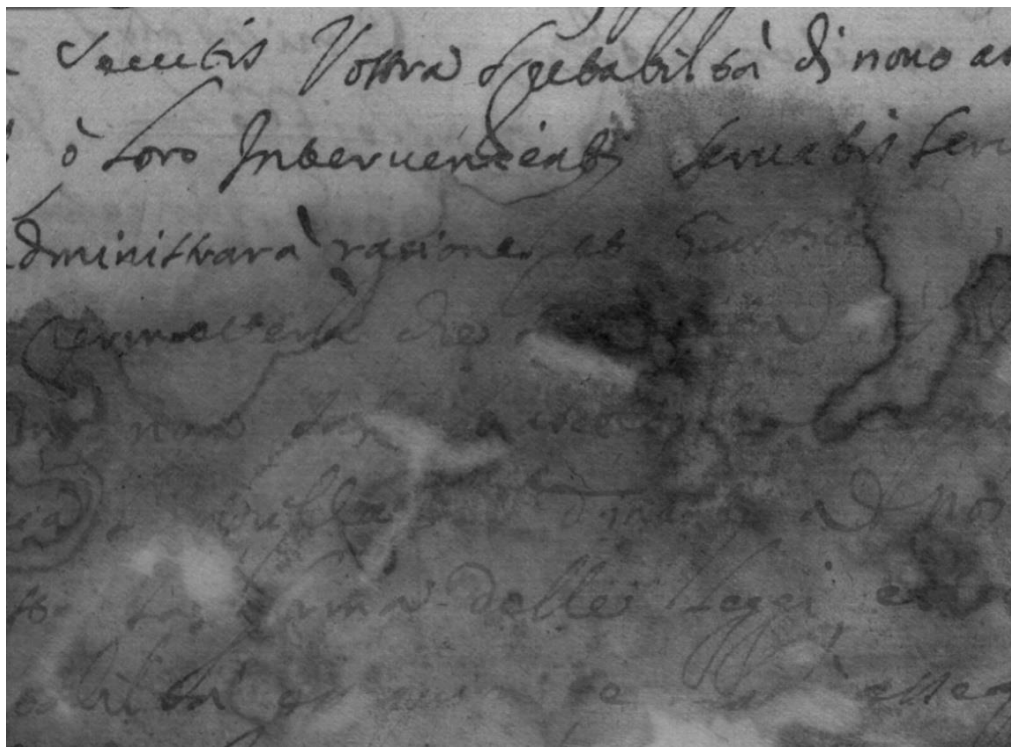
Slika 26: Multispektralna kocka

3.4.2. PCA metoda

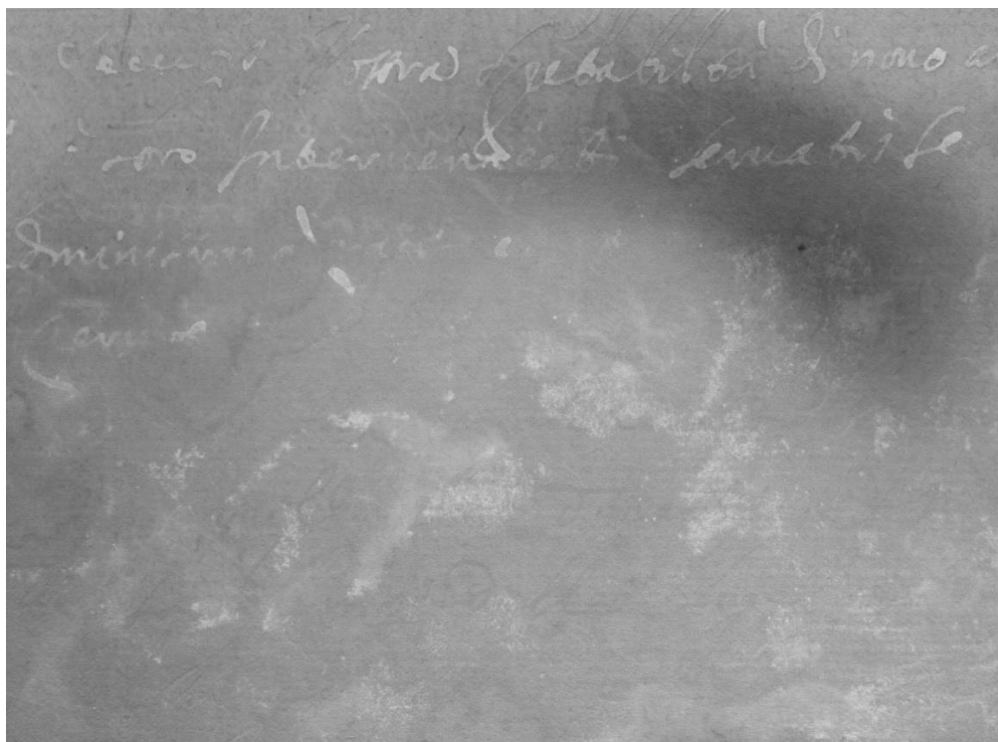
Sljedeći korak bio je dobivenu sekvencu umetnuti u program *ImageJ* te fotografije analizirati PCA i ICA metodama. Prva metoda računalne analize bila je PCA metoda. Prilikom odabira broja komponenti koje smo u ovom slučaju htjeli analizirati ovisila je o broju komponenti koje sadrži sam uzorak, a te komponente su papir, tinta i mrlja. S obzirom na to, vršili smo PCA analizu nad tri komponente, dok je ostatak rezultata automatski bio odbačen te ih nismo koristili u daljnjoj analizi. Krajnji dobiveni rezultat bile su tri fotografije, a svaka je imala različit izgled.



Slika 27: Prva fotografija dobivena PCA metodom



Slika 28: Druga fotografija dobivena PCA metodom

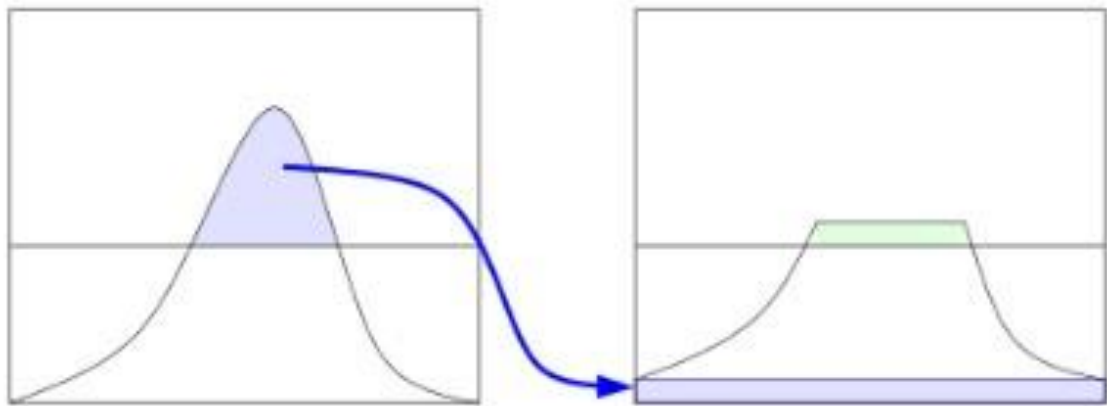


Slika 29: Treća fotografija dobivena PCA metodom

Nadalje, dobivanjem ova tri kanala, odabrali smo jedan koji je najviše odgovarao našim potrebama te smo ga dodatno obradili posebnim *plug-inom* pod nazivom *CLAHE*. Odabrana fotografija bio je prvi dobiveni kanal, a obrađeni kanal s ovim *plug-inom* izgleda oštrije i kvalitetnije s naglašenim kontrastima između papira, mrlje i tinte. *Plug-in CLAHE* je proizašao iz *Adaptive histogram equalization* (dalje u tekstu *AHE*), tj. adaptivnog izjednačavanje histograma, tehnike za računalnu obradu slike koja se koristi za poboljšanje kontrasta na slikama. Razlikuje se od običnog izjednačavanja histograma u smislu da adaptivna metoda izračunava nekoliko histograma, od kojih svaki odgovara posebnom dijelu slike te ih koristi za preraspodjelu vrijednosti svjetline slike. Međutim, *AHE* ima tendenciju pretjeranog pojačavanja šuma u relativno homogenim područjima slike. *Contrast limited adaptive histogram equalization* (dalje u tekstu *CLAHE*), tj. varijanta adaptivnog izjednačavanja histograma, sprječava ovo ograničavanjem pojačanja kontrasta. Obični *AHE* nastoji pretjerano pojačati kontrast u gotovo konstantnim područjima slike jer je histogram u takvim područjima visoko koncentriran. Kao rezultat, *AHE* može uzrokovati pojačanje šuma u gotovo konstantnim područjima. *CLAHE* je

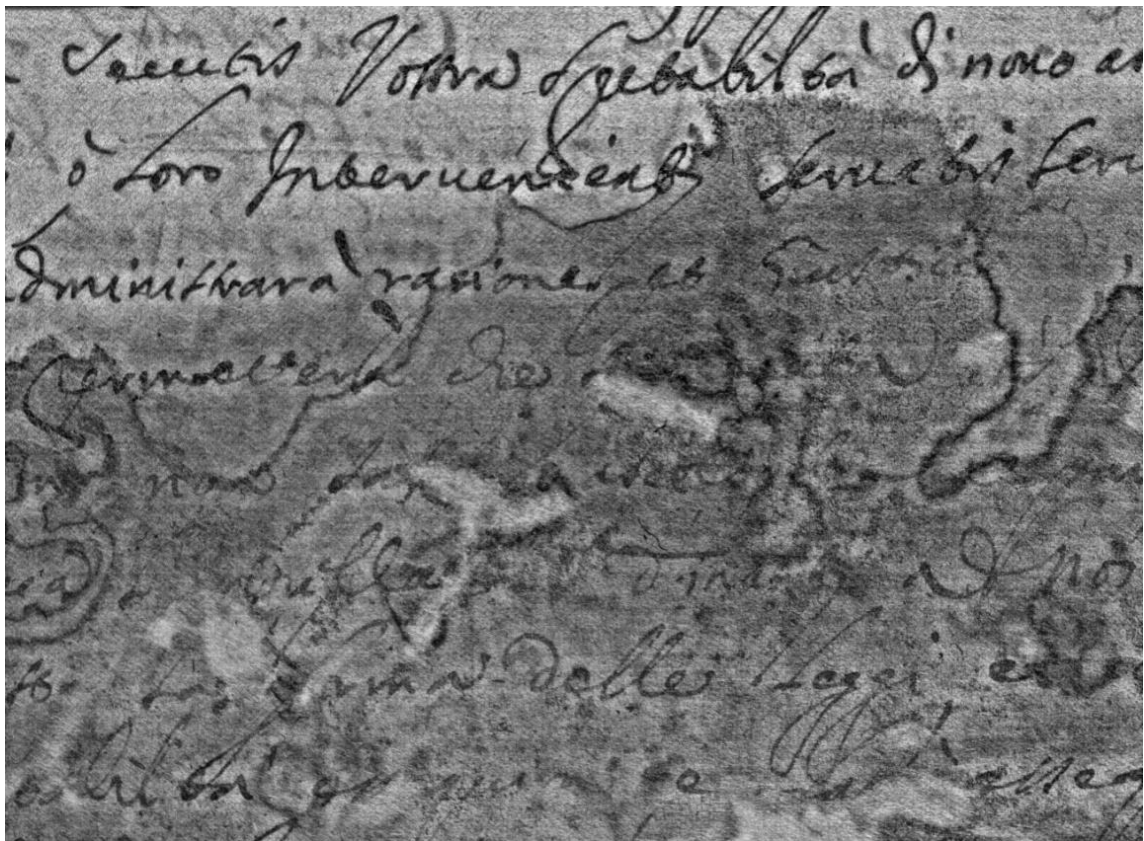
varijanta adaptivnog izjednačavanja histograma u kojoj je pojačanje kontrasta ograničeno, kako bi se smanjio ovaj problem pojačanja šuma.

CLAHE ograničava pojačanje izrezujući histogram na unaprijed definiranu vrijednost prije izračunavanja *cumulative distribution functiona* (dalje u tekstu *CDF*), tj. kumulativne distribucije. Ovo ograničava nagib *CDF*-a, a time i transformacijske funkcije. Vrijednost pri kojoj se histogram isječe, tzv. *clip limit*, odnosno granica isječka, ovisi o normalizaciji histograma, a time i o veličini susjedne regije. Korisno je ne odbaciti dio histograma koji premašuje ograničenje isječka, već ga ravnomjerno redistribuirati.



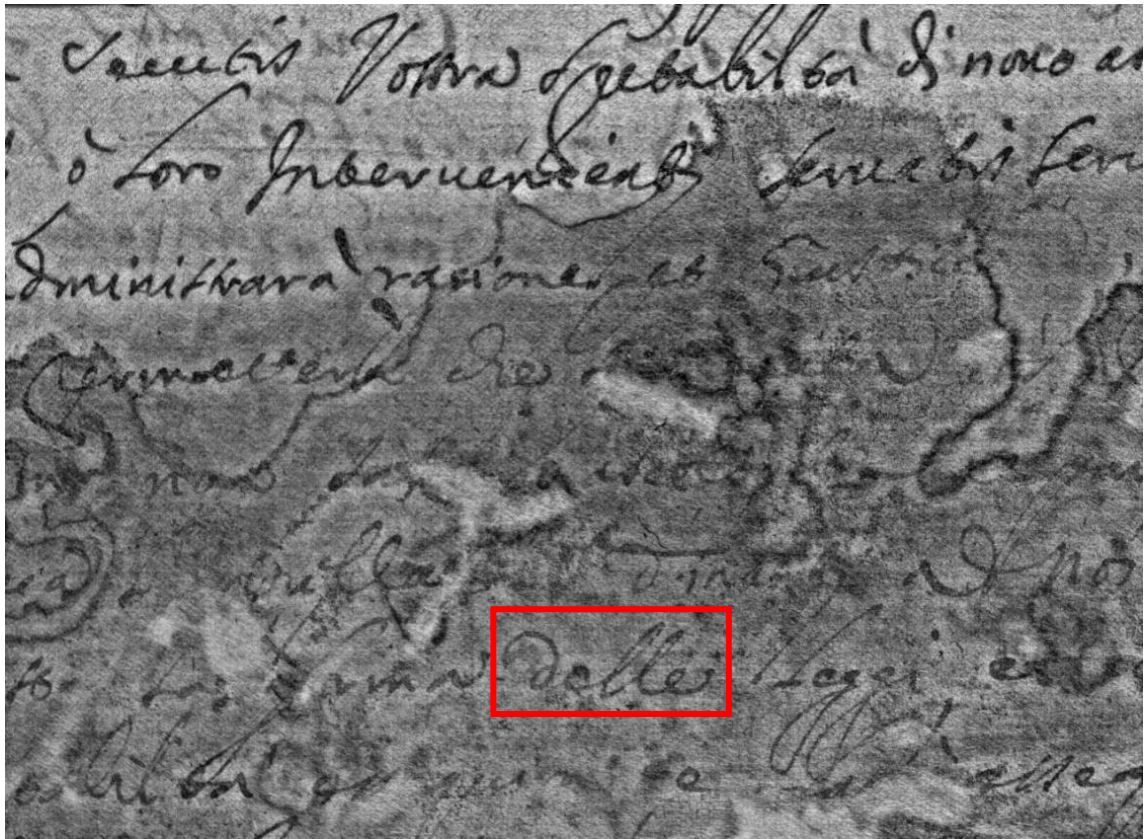
Slika 30: Princip funkcioniranja *CLAHE plug-ina* (izvor: S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, et al.: Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 39 (1987) 355-368)

Preraspodjela će ponovno gurnuti neke *binove* (vrijednosti koje su na histogramu vizualno prikazane kao okomite osi) preko granice isječka (područje osjenčano zelenom bojom na slici(?)), što će rezultirati efektivnim ograničenjem isječka koje je veće od propisanog ograničenja, a točna vrijednost ovisi o slici. Ako je to nepoželjno, postupak redistribucije može se ponavljati rekurzivno sve dok višak ne postane zanemariv [21]. Ovaj *plug-in* obično se koristi u medicini kako bi dodatno naglasio kontrast i izoštrio snimke koje su snimljene npr. magnetskom rezonancom, ali se po potrebi može koristiti i u druge svrhe.



Slika 31: Fotografija obrađena *CLAHE plug-inom*

Prilikom korištenja *CLAHE plug-ina*, moguće je izoštriti i samo jedan dio fotografije. U ovom slučaju dobivamo bolji rezultat nego da navedeni *plug-in* koristimo za obradu cijele fotografije. Naime, *CLAHE plug-in* uzima krajnje vrijednosti unutar označenog područja, tj. uzima vrijednosti najtamnijih i najsvjetlijih piksela te njihovim naglašavanjem stvara kontrast. Ukoliko je područje obrade veće, krajnosti su dalje te se između njih nalazi puno više vrijednosti. U slučaju manjih površina, krajnosti s bliže jedna drugoj te se između njih nalazi puno manje vrijednosti tj. krajnosti imaju puno manji raspon.

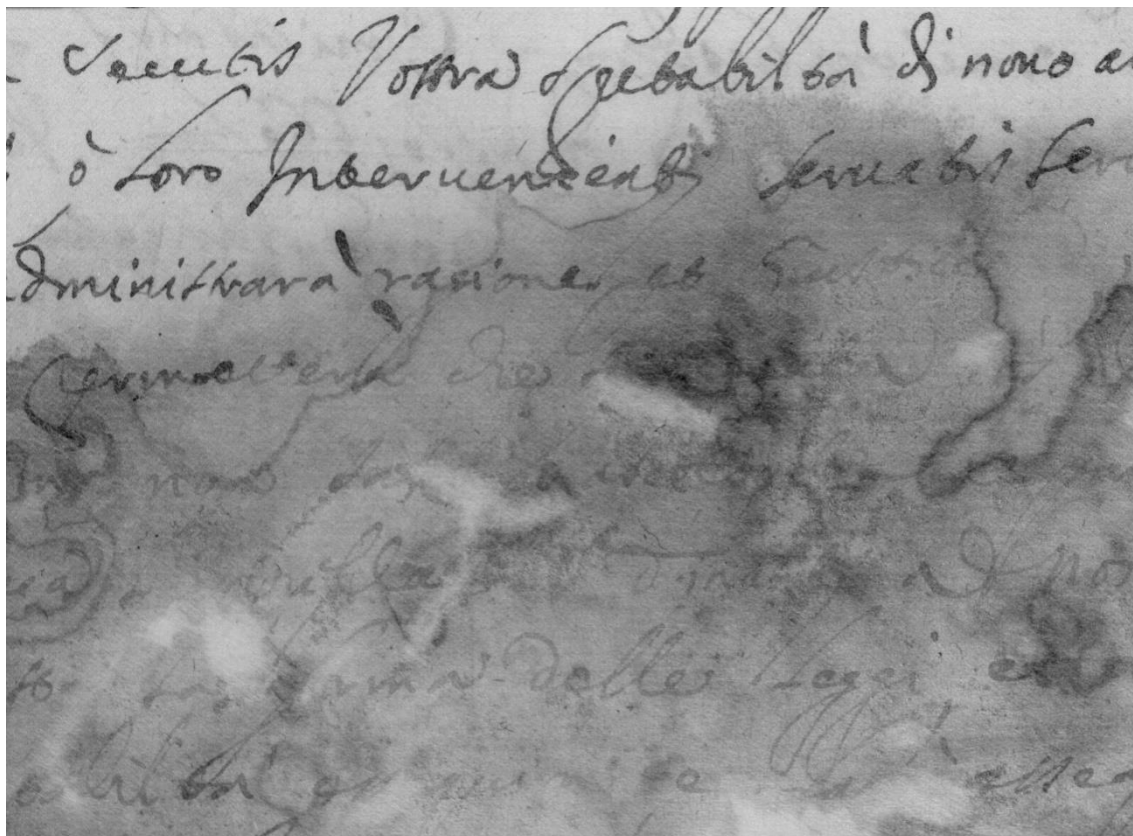


Slika 32: Detalj dodatno naglašen *CLAHE plug-inom*

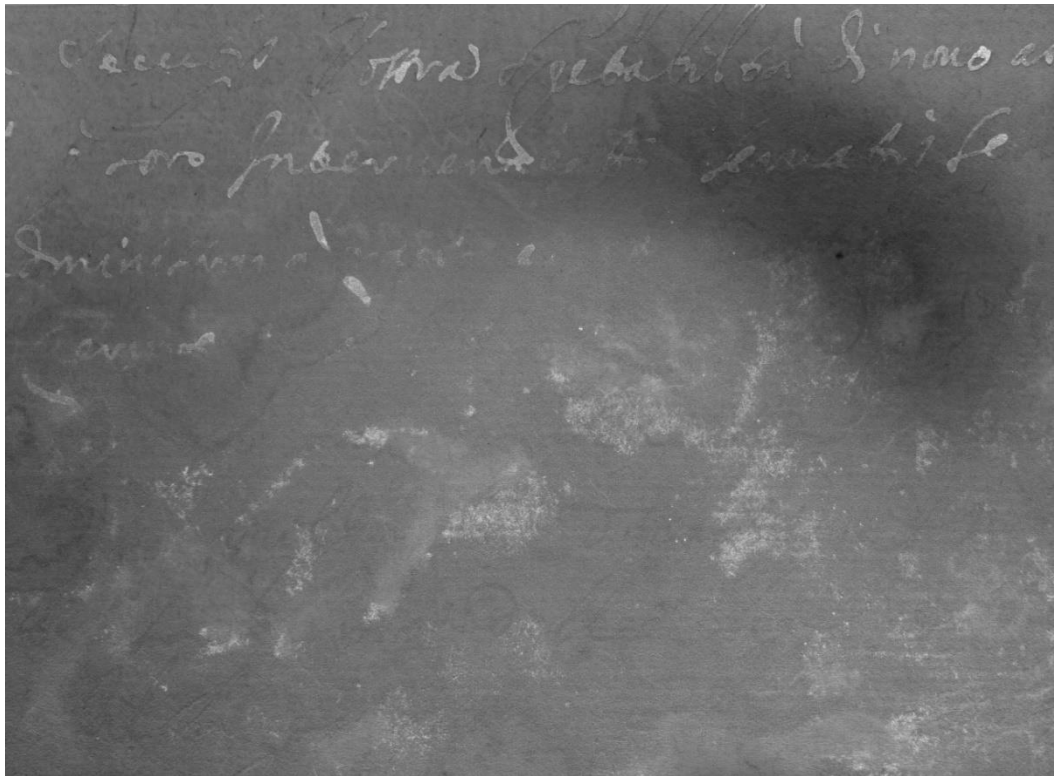
3.4.3. ICA metoda

Postupak kojeg smo radili u PCA metodi, ponovili smo i u ICA metodi, što znači da je prvi korak obuhvaćao poravnanje istog seta fotografija kojeg čini 20 odabranih sekvenci unutar programa *Fiji*. Odrezivanjem pomoćnih oznaka za poravnanje fotografija smo

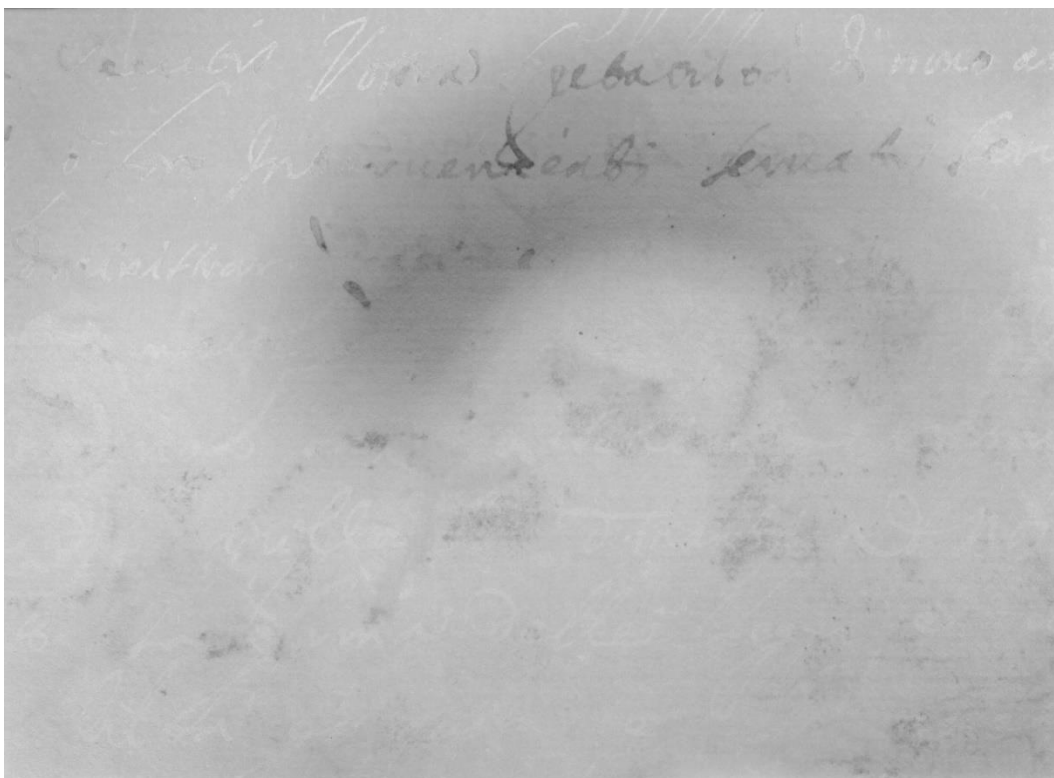
dobili površinu koju smo, kao i kod PCA metode, dalje koristili kroz postupak. Zatim smo u program *ImageJ* ubacili dobivenu sekvencu te smo ICA metodom vršili analizu nad tri komponente. Dobivene fotografije razlikuju se od fotografija dobivenih PCA metodom. Kao i kod PCA metode, najadekvatniji kanal za daljnju analizu i najbolje dobivanje rezultata bila je prva fotografija.



Slika 33: Prva fotografija dobivena ICA metodom

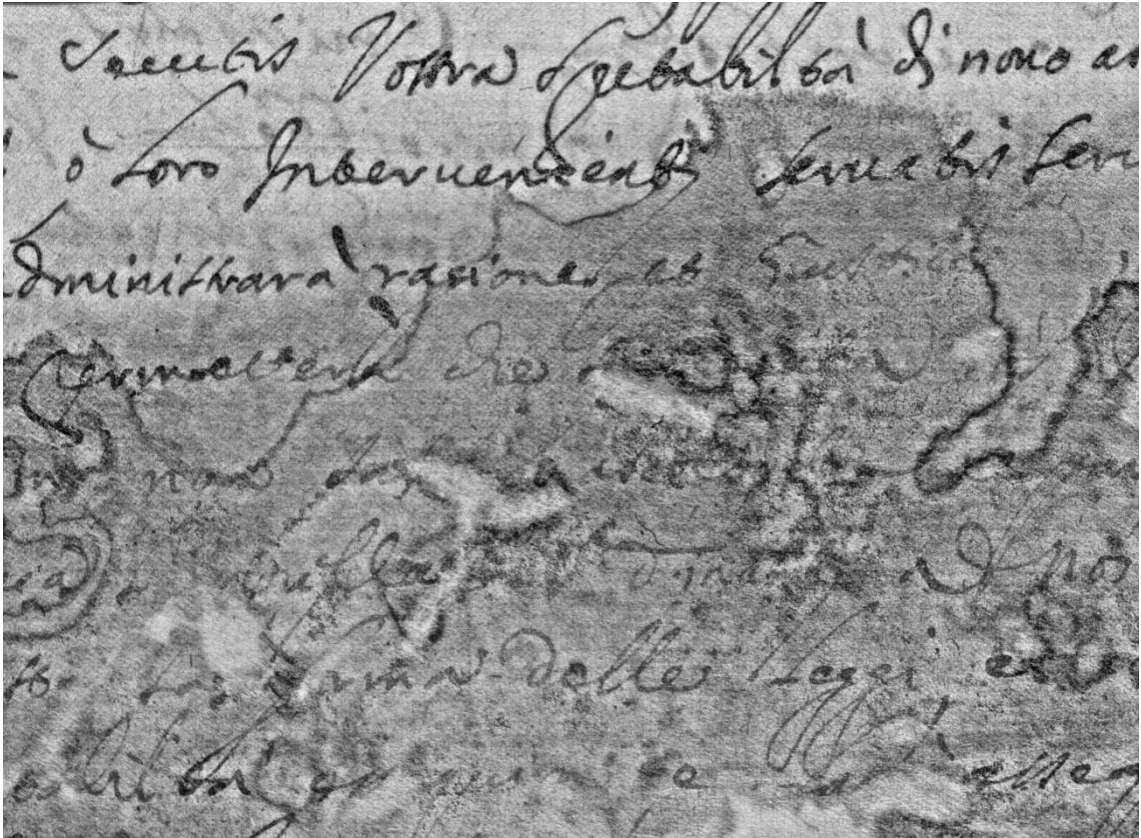


Slika 34: Druga fotografija dobivena ICA metodom



Slika 35: Treća fotografija dobivena ICA metodom

Odabrana prva fotografija je provučena kroz *plug-in CLAHE* pa smo tako dobili sljedeće rezultate:



Slika 36: Prva fotografija obrađena pomoću *CLAHE plug-ina*

Isto kao i kod PCA metode, dodatno smo obradili jedan detalj istim *plug-inom*.

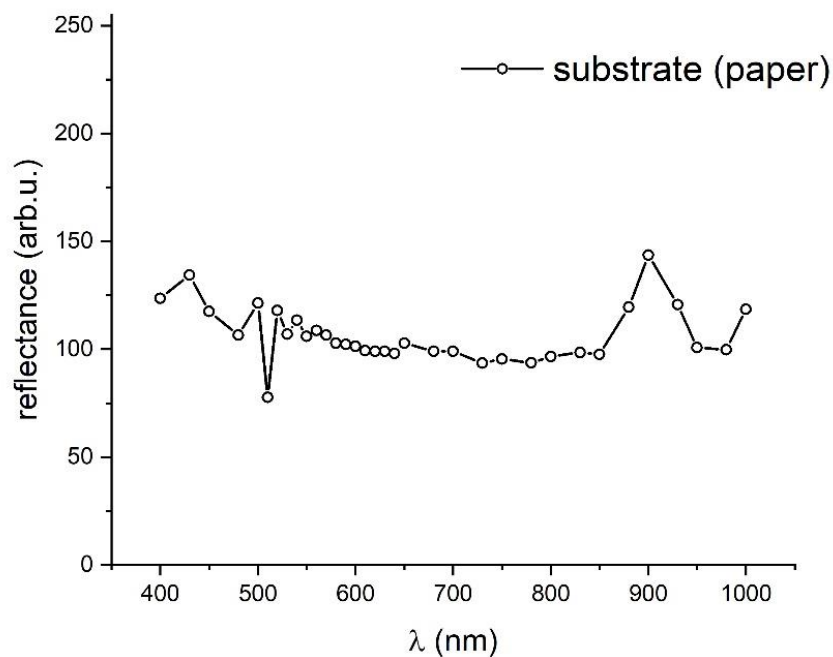


Slika 37: Dodatno obrađeni detalj iz teksta

Ukoliko promatramo krajnje rezultate dobivene s ove dvije metode, možemo zaključiti da se dobiveno vrlo malo razlikuje.

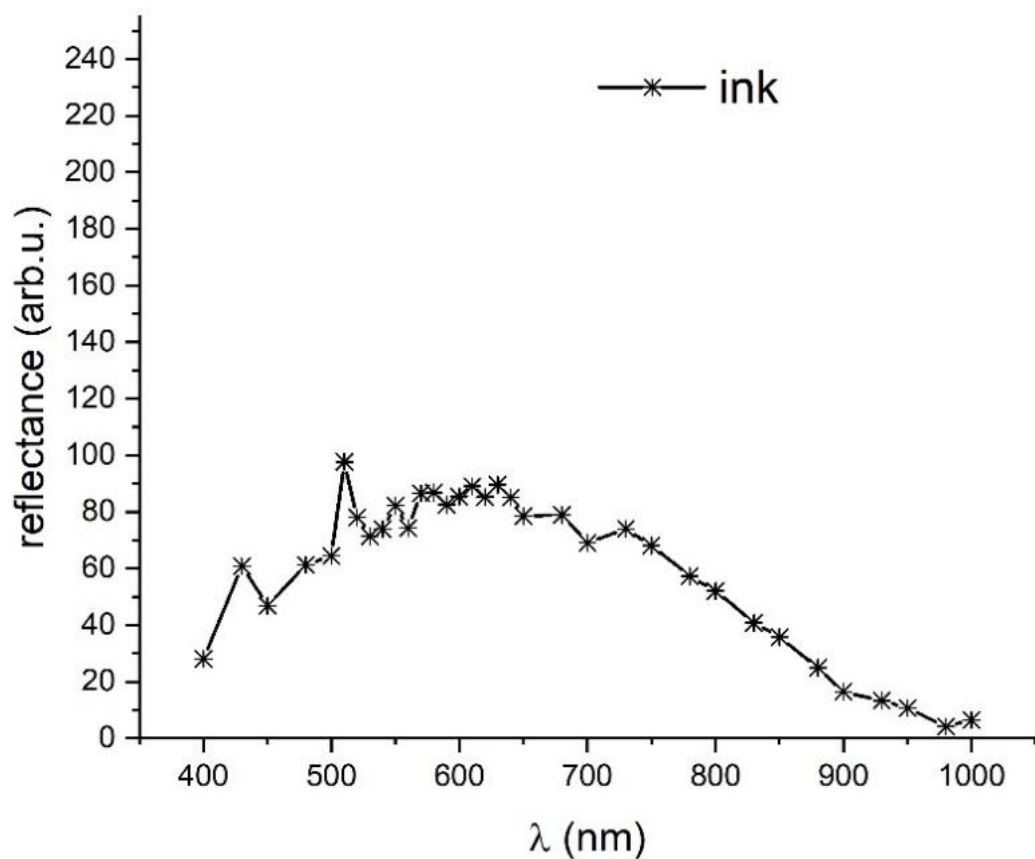
3.5. Optička spektrometrija

Osim što smo pomoću multispektralne kocke dobili vidljivo naglašene elemente rukopisa, pomoću nje također možemo dobiti i podatke za optičku spektrometriju. Uobičajena optička spektrometrija vrši se pomoću spektrometrijskog uređaja poput spektrometra, no kod multispektralnog snimanja ona se vrši računalno što pridonosi neinvazivnosti cijelog sustava. Ovaj dio multispektralne analize otkriva nam podatke u odabranim pikselima slike kroz cijeli naslagani niz. Podatke koje dobijemo pokazuju nam kolika se količina svjetlosti odbila u određenoj valnoj duljini za odabranu površinu. Ta vrijednost dobiva se tako što program izračuna srednju vrijednost odabranih piksela te dobiveno uvrštava na graf. U ovom slučaju bitni su samo relativni odnosi između točaka, a ne pozicija tj. „visina“ cijele krivulje. Razlog tome je taj ukoliko povećamo količinu energije koju isijava izvor svjetla, cijela krivulja će se popeti na grafu jer je sama energija svjetlosnog izvora veća.



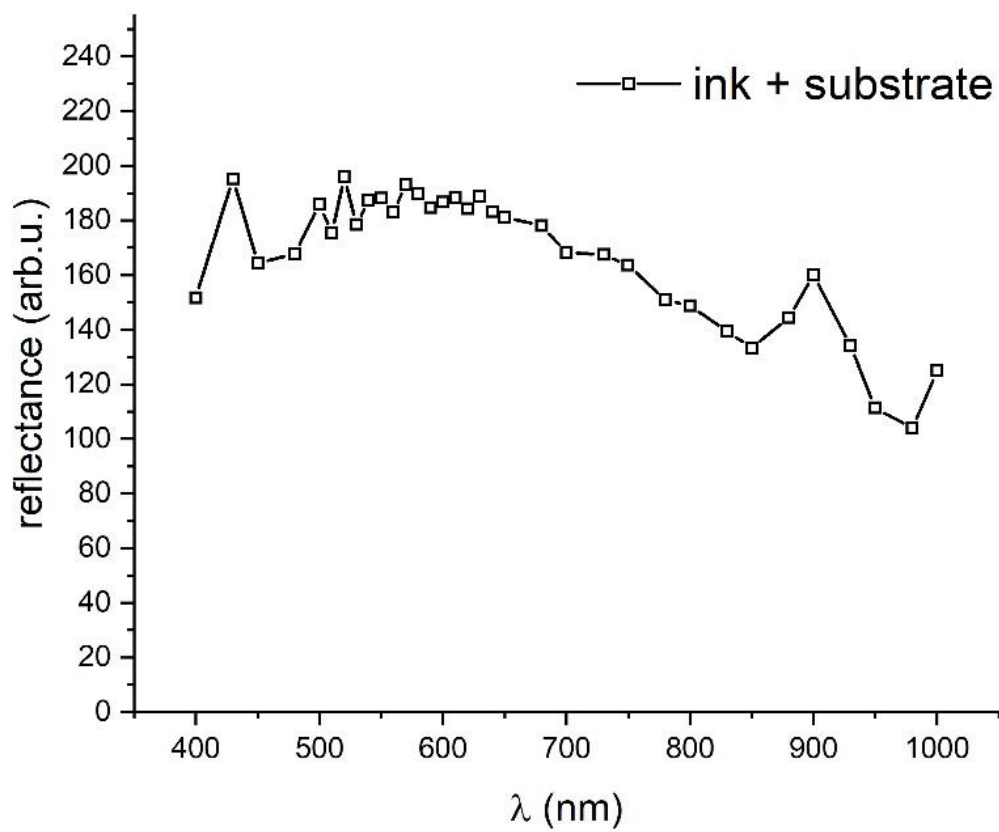
Slika 38: Graf optičke spektrometrije za papir

Primjerice, na slici 38 dobiveni su podaci za optičku spektrometriju papira. Ukoliko pogledamo graf, možemo vidjeti kolika je refleksija svjetlosti na određenoj valnoj duljini. Ovaj podatak govori nam i o samim korekcijama koje je potrebno izvršiti kako bismo „uskладili“ tj. izjednačili refleksiju svjetlosti na cijeloj slici zbog jednake rasprostranjenosti svjetlosti čitavom površinom. Prilikom izvršavanja korekcija potrebno je uzeti u obzir i spektralne krivulje svjetlosnog izvora i spektralnih filtera koji nam otkrivaju u kojem postotku na određenoj valnoj duljini moramo korigirati fotografiju kako bismo dobili adekvatan rezultat. Gornja granica grafa iznosi 255 jedinica, što odgovara 8-bitnoj fotografiji tj. 256 mogućih tonskih vrijednosti



Slika 39: Graf optičke spektrometrije za tintu

Krivulje za tintu dobili smo oduzimanjem krivulje za tintu i papir (slika 40) i krivulje za papir (slika 38).



Slika 40: Graf optičke spektrometrije za papir i tintu

4. REZULTAT I RASPRAVA

Tradicionalni načini dešifriranja rukopisa uključuju više koraka koji se multispektralnim snimanjem mogu izbjeći. Fotokopiranjem, skeniranjem ili kreiranjem fotografije dokumenta koji se dešifrira, paleografi si pokušavaju olakšati posao jer na taj način mogu uvećati pojedine dijelove dokumenta kako bi bolje vidjeli oblik slova ili riječi. Ne samo da je takav postupak invazivan i vrlo lako može oštetiti dokument, nego se često događa da ni tada oblik slova nije u potpunosti vidljiv zbog starosti. Dodatan problem je i sličnost određenih slova poput „j“ i „i“, „v“ i „r“, „m“, „n“, „u“ i „w“ itd. Taj problem može riješiti multispektralna kamera koja može „uhvatiti“ i one najmanje poteze i udubine u papiru kako bi se okarakteriziralo slovo [22].

Cijeli opisani postupak je izbjegnut multispektralnim snimanjem pa se tako uzorak u potpunosti očuvao od bilo kakve vrste oštećenja. U ovom slučaju, sustavom za multispektralno snimanje analiziran je rukopis koji datira iz 17. stoljeća. Svrha analize bila je izvući slabo vidljive informacije u rukopisu koje su zbog okolišnih čimbenika izbljebile i ne vide se golim okom kako bi se rukopis u potpunosti mogao rekonstruirati i dešifrirati. Iako je na ovaj način obrađen vrlo mali dio uzorka, rezultati koje smo dobili su vrlo pozitivni, a pružaju nam uvid i predviđanje u daljnje rezultate. Krajnji postupak snimanja uključuje cjelovito multispektralno snimanje rukopisa kako bi se mogli klasificirati materijali (tinta, mrlja i papir), a rukopis u potpunosti dešifrirati i prevesti.

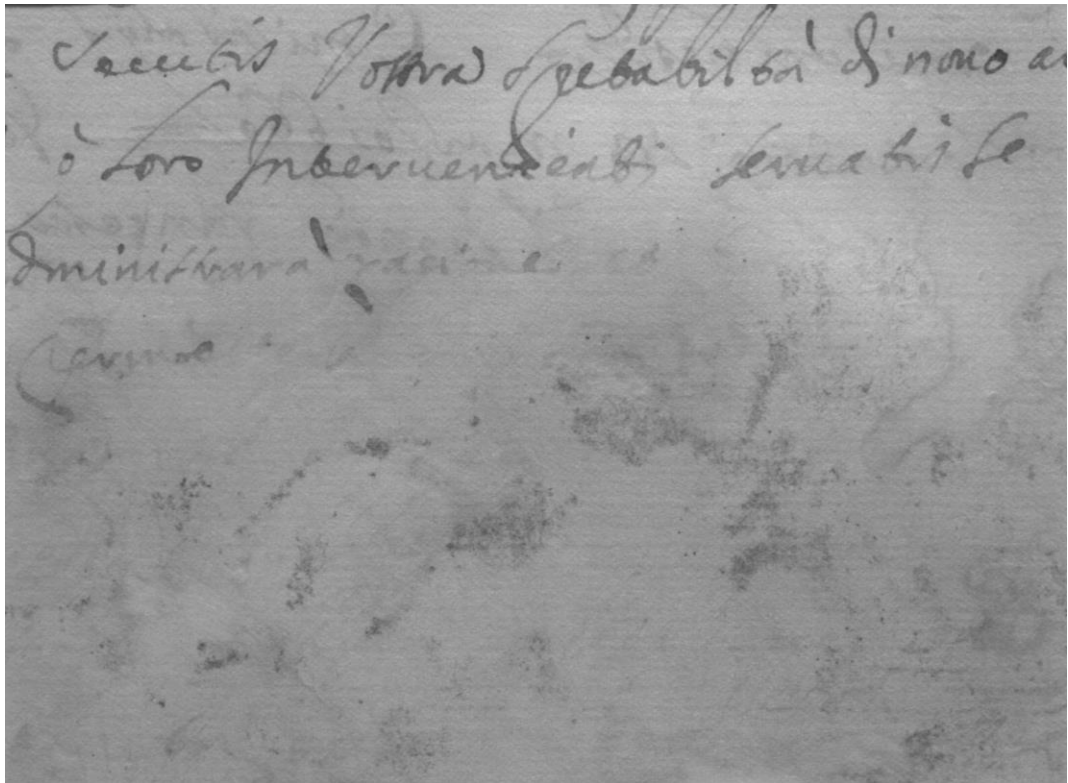
Korištenjem PCA i ICA metode maksimalno smo optimizirali uzorak kako bismo izvukli što jasnije i čišće informacije. Dobiveno smo koristili kako bismo razdvojili signale i kako bismo posebno mogli specificirati papir, tintu i mrlju. Optičkom spektrometrijom dobivenoj na temelju ovih istraživanja, dodatno smo klasificirali materijale.

Razlog ispitivanja korištene opreme je bio neophodan korak kako bismo potvrdili da je sustav uistinu ispravan i kako bismo potvrdili ili demantirali specifikacije dane od strane proizvođača. Također, istim informacijama dobili smo uvid u moguće naknadne popravke slika dobivene tijekom multispektralnog snimanja. Pogledamo li graf vrijednosti spektralne krivulje senzora, možemo točno znati na kojoj valnoj duljini i u kojoj mjeri moramo popraviti sliku snimljenu filterom istom tom valnom duljinom.

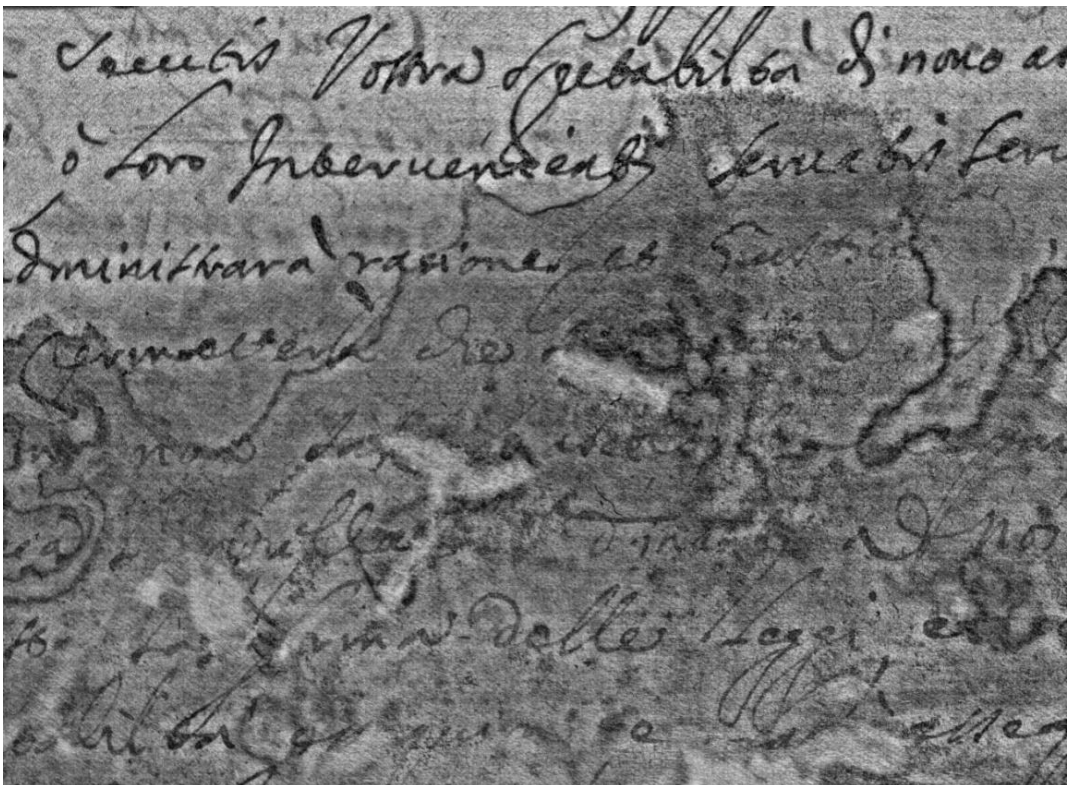
Kako bi se ovakva analiza uopće mogla napraviti, potrebna je velika skupina vrhunskih stručnjaka koji su specijalizirani u određenim poljima poput restauratora dokumenata i umjetnina, povjesničara, paleografa, fizičara, grafičara itd. koji su uključeni u proces s jednim zajedničkim ciljem, a to je potpuna restauracija i dešifriranje rukopisa.

5. ZAKLJUČAK

Kada pogledamo dokument, ono što obično vidimo nije nužno sve što je tamo. Golo oko ne može uvijek identificirati važne karakteristike kao što su bojila, tinte i mrlje ili detektirati značajke poput tinti koje su izbrisane, skrivene prepisivanjem, lakiranjem, izbljedjele zbog okolišnih čimbenika ili koje su iz bilo kojeg drugog razloga pretrpjele štetu. Gledajući dokumente pod različitim vrstama svjetla mogu se uhvatiti upravo te nevidljive značajke. Tako multispektralno snimanje daje rezultate koje niti jedna druga tehnika očuvanja kulturne baštine ne daje, a razlog tome je detaljna analiza uzorka i dobivanje podataka koje je moguće dobiti samo posebnim računalnih tehnikama koje pruža ova metoda. Također, uz dobivene rezultate, snimljeni uzorak ostaje neoštećen i očuvan jer je ova tehnika neinvazivna i ne destruktivna. Područja interesa u kojima se multispektralno snimanje može koristiti su vrlo široka te njihov spektar uključuje povijest, medicinu, poljoprivredu, vojsku, umjetnost itd. Ova metoda otvara nove mogućnosti u očuvanju, analizi i rekonstrukciji snimljenih materijala, a omogućuje i dobivanje bržih rezultata pružajući manje dugotrajnu analizu zbog automatiziranih metoda analize slike koristeći informacije koje se ne mogu dobiti klasičnim, analognim tehnikama očuvanja kulturne baštine. Takav slučaj je i rukopis snimljen i računalno obrađen prilikom izrade ovog diplomskog rada. Ukoliko usporedimo sliku 41 i sliku 42, možemo jasno zaključiti da je multispektralno snimanje uistinu unikatan sustav koji daje jedinstvene rezultate koje niti jedna druga tehnika ne može pružiti.



Slika 41: Neobrađena fotografija snimljena filterom od 680 nm



Slika 42: Krajnje obrađena fotografija PCA metodom i CLAHE plug-inom

6. LITERATURA

1. R.A. Schowengerdt. Remote sensing: Models and methods for image processing, Academic Press, 3rd ed., 2007.
2. Multispectral Image. Pristupljeno 22.6.2023. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/multispectral-image>
3. Jones, C., Terras, M., Duffy, C., Gibson, A. (2020). Understanding Multispectral Imaging of Cultural Heritage: Determining Best Practice in MSI Analysis of Historical Artefacts. Accepted, Journal of Cultural Heritage
4. E. Salerno et al., Analysis of Multispectral Images in Cultural Heritage and Archaeology https://www.researchgate.net/publication/266379616_Analysis_of_multispectral_images_in_cultural_heritage_and_archaeology
5. IFLA Principles for the Care and Handling of Library Material, 27.-28. str
6. Light Paper. Pristupljeno 24.7.2023. <https://www.steon.com/light-paper/>
7. Goldberg, A.; Stann, B.; Gupta, N. (July 2003). "Multispectral, Hyperspectral, and Three-Dimensional Imaging Research at the U.S. Army Research Laboratory" (PDF). Proceedings of the International Conference on International Fusion [6th]. 1: 499–506
8. Multispectral Imaging in Healthcare – a convolution of machine vision and spectroscopy. Pristupljeno 22.6.2023. <https://news.jai.com/blog/multispectral-imaging-in-healthcare-a-convolution-of-machine-vision-and-spectroscopy>
9. Revealing hidden information using multispectral imaging. Pristupljeno 30.6.2023. <https://blogs.bl.uk/collectioncare/2013/07/revealing-hidden-information-using-multispectral-imaging.html>
10. Palimpsest definicija. Pristupljeno 10.7.2023. <http://struna.ihjj.hr/naziv/palimpsest/25042/>
11. Archimedes Palimpsest. Pristupljeno 2.7.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Archimedes_Palimpsest

12. Avril, Tom (May 14, 2018). "Scans reveal secrets of medieval 'Harry Potter' book and medical texts at Penn". The Philadelphia Inquirer. Retrieved 14 May 2018.
13. A Step-by-Step Explanation of Principal Component Analysis (PCA). Pristupljeno 20.7.2023. <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>
14. What is Independent Component Analysis: A Demo. Pristupljeno 20.7.2023. <http://research.ics.aalto.fi/ica/icademo/>
15. Spektrometrija. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 11.7.2023. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57377>
16. Spektrometrijska analiza. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 11.7.2023. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57378>
17. Spektrometrijski instrumenti. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 11.7.2023. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57379>
18. Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr.sc. Vladimir Cviljušac , prof. dr. sc. Damir Modrić, dr.sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv
19. Hyperspectral & Multispectral Imaging. Pristupljeno 24.7.2023. <https://onlsole.com/hyperspectral-multispectral-imaging/>
- 20.. Multispectral data cube acquisition of aligned images for document analysis by means of a filter-wheel camera provided with focus control, Maurizio Muzzupappa, Gianfranco Bianco, Fabio Bruno, 2013.
21. S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, et al.: Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 39 (1987) 355-368.
22. 5 Strategies for Deciphering Old Handwriting on Documents, Danny Arsenault. Pristupljeno 26.7.2023. <https://familytreemagazine.com/records/documentary-evidence/>