

Primjena multispektralnog slikovnog sustava u otkrivanju skrivenih detalja vodenih znakova iz povijesne knjižnične građe

Jurišić, Ivona

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:216:763272>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

IVONA JURIŠIĆ

**PRIMJENA MULTISPEKTRALNOG
SLIKOVNOG SUSTAVA U OTKRIVANJU
SKRIVENIH DETALJAVODENIH
ZNAKOVA IZ POVIJESNE KNJIŽNIČNE
GRAĐE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

IVONA JURIŠIĆ

**PRIMJENA MULTISPEKTRALNOG
SLIKOVNOG SUSTAVA U OTKRIVANJU
SKRIVENIH DETALJAVODENIH
ZNAKOVA IZ POVIJESNE KNJIŽNIČNE
GRAĐE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Modrić

Student:

Ivona Jurišić

Zagreb, 2023.

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

Temeljem podnietog zahtjeva za prijavu teme diplomskog rada izdaje se

RJEŠENJE

kojim se studentu/ici Ivoni Jurišić, JMBAG 0128062791, sukladno čl. 5. st. 5. Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada od 13.02.2012. godine, odobrava izrada diplomskog rada, pod naslovom: Primjena multispektralnog slikovnog sustava u otkrivanju skrivenih detalja vodenih znakova iz povijesne knjižnične građe, 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

Multispektralno snimanje omogućuje bilježenje širokog spektra elektromagnetskog zračenja od vidljivog dijela spektra, uključujući infracrveni i ultraljubičasti dio spektra. Ova tehnologija omogućuje dohvat informacija koje ljudsko oko ne može vidjeti, a primjena je raznolika (medicina, šumarstvo, kontrola kvalitete hrane i lijekova, forenzika i sl.). Jedna od primjena, na kojoj se ovaj rad temelji, je i detekcija vodenih znakova.

Upravo multispektralno snimanje omogućuje precizno detektiranje i prikazivanje vodenih znakova čime se povjesničarima i drugim istraživačima pružaju važne informacije o povijesnoj pozadini vremena u kojem je vodeni znak nastao. Nakon snimanja, fotografije se obrađuju korištenjem određenih računalnih programa kako bi se dobili konačni digitalni oblici vodenih znakova koji se mogu koristiti u daljnjim istraživanjima.

Ovaj rad predstavlja dobru osnovu za daljnja istraživanja vodenih znakova ali je važno biti pažljiv planiranju svih koraka istraživanja kako bi se osigurala pouzdanost i kvaliteta rezultata.

Konačno, nakon što se dobije digitalizirani oblik vodenih znakova potrebno je provesti daljnje analize kako bi se procijenila kvaliteta njihove rekonstrukcije. To uključuje mjerenje njihove veličine i dubine, utvrđivanje točnosti njihovog položaja u odnosu na tekst.

Ključne riječi: multispektralno snimanje, digitalizacija kulturne baštine, vodeni znakovi, filteri, rekonstrukcija

ABSTRACT

Multispectral recording enables the recording of a wide spectrum of electromagnetic radiation from the visible part of the spectrum, including the infrared and ultraviolet part of the spectrum. This technology enables the retrieval of information that the human eye cannot see and its application is diverse (medicine, forestry, quality control of food and drugs, forensics, etc.). One of the applications on which this paper is based is the detection of watermarks.

It is multispectral recording that enables precise detection and display of watermarks, which provides historians and other researchers with important information about the historical background of the time in which the watermark was created.

This work represents a good basis for further research on watermarks, but it is important to be careful in planning all research steps in order to ensure the reliability and quality of the results. First of all, it is necessary to choose the appropriate book for research, as well as the sample papers used in it. Also, it should be checked whether the selected filters of the multispectral system are optimal for obtaining the best results. It is recommended to test other filters and compare their effectiveness and when all necessary photos are collected, they need to be processed in computer programs. It is important to ensure that a consistent processing method is used to ensure quality contrast and clarity.

Finally, after obtaining the digitized form of the watermarks, it is necessary to carry out further analyzes in order to assess the quality of their reconstruction. This includes measuring their size and depth, determining the accuracy of their position in relation to the text.

Keywords: multispectral recording, digitization of cultural heritage, watermarks, filters, reconstruction

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	TEORIJSKI DIO	3
2.1.	Multispektralno snimanje	3
2.1.1.	Povijest i razvoj multispektralnog snimanja.....	4
2.1.2.	Elektromagnetski spektar i valna duljina.....	4
2.1.3.	Komponente multispektralnog sustava.....	6
2.1.4.	Prednosti i nedostaci multispektralnog snimanja	9
2.2.	Razlika između MSI i HSI.....	11
2.2.1.	Hiperspektralno snimanje (HSI).....	12
2.3.	Područja interesa i primjena	14
2.3.1.	Digitalizacija i analiza kulturne baštine.....	15
2.3.2.	Povijesni razvoj detekcije vodenih znakova.....	16
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	18
3.1.	Svrhe i ciljevi eksperimentalnog rada.....	18
3.1.1.	Pregled primjene metodologije i tehnika	19
3.2.	Komponente multispektralnog sustava.....	20
3.3.	Prikupljanje podataka – postupak snimanja vodenih znakova	24
3.4.	Obrada podataka	29
4.	REZULTAT I RASPRAVA	32
4.1.	Evaluacija i rezultati	32
5.	ZAKLJUČAK.....	39
6.	LITERATURA	40
7.	POPIS MANJE POZNATIH RIJEČI I AKRONIMA.....	43

1. UVOD

Digitalizacija kulturne baštine predstavlja proces prevođenja raznih oblika kulturne baštine u njihov digitalni surogat. Ovaj proces omogućuje bolju zaštitu, očuvanje i dostupnost kulturne baštine koja bi inače bila izložena propadanju i gubitku. Ona omogućuje lakši pristup i korištenje kulturnih artefakata, što je posebno važno za istraživače, studente i širu javnost. Digitalni oblik kulturnih artefakata također olakšava njihovu distribuciju i pristup te omogućuje njihovo korištenje u različitim vrstama projekata i aplikacija. [1]

Međutim proces digitalizacije kulturne baštine predstavlja izazove u pogledu odabira odgovarajuće tehnologije i metoda snimanja, obrade i prikaza digitalnih podataka. Istovremeno se razvijaju nove tehnologije i metode koje omogućuju bolju kvalitetu i preciznost digitalizacije. Multispektralno snimanje je jedna od takvih metoda koja se sve više koristi u digitalizaciji kulturne baštine. Cilj i svrha digitalizacije najčešće su određeni namjerom ustanove da pomoću digitalnih preslika poboljša dostupnost građe, zaštiti izvornike, izrađuje nove proizvode i usluge te upotpuni fond ustanove. [1]

Zbog akvizicije niza slika dobivenih snimanjem kroz uskopojasne filtere raznih vršnih valnih duljina (multispektralna kocka) multispektralno snimanje može biti korisno u otkrivanju vodenih znakova na dokumentima. Ona omogućuje snimanje objekata u različitim spektralnim područjima te analizu podataka koji se dobivaju na taj način. Osim toga, multispektralno snimanje omogućuje vizualizaciju materijala na različitim dubinama, što može pomoći u otkrivanju vodenih znakova koji nisu vidljivi golim okom. [2]

Vodeni znakovi su sastavni dio papirne dokumentacije i umjetničkih djela, a nastaju umetanjem metalnog štambilja u sito tijekom proizvodnje papira. Oni su važni za datiranje i autentifikaciju papira i umjetničkih djela te su stoga važni za istraživanje kulturne baštine. Vodeni znakovi znaju često biti skriveni ili oštećeni te je njihova detekcija i analiza vrlo teška. Multispektralno snimanje se pokazalo kao vrlo učinkovita tehnologija za detekciju vodenih znakova. Pomoću analize spektralnih podataka dobivenih multispektralnim snimanjem, mogu se otkriti i djelomično oštećeni vodeni znakovi. [2]

Postoji nekoliko vrsta multispektralnih kamera, a najčešće korištene su one koje snimaju u vidljivom i infracrvenom spektru. Hiperspektralno snimanje (HSI) je također jedna od tehnika multispektralnog snimanja koja omogućuje snimanje u velikom broju uzastopnih spektralnih područja. Usporedbom MSI i HSI, pokazalo se da su obje tehnike korisne za detekciju vodenih znakova te da oba pristupa imaju svoje prednosti i nedostatke, te se izbor tehnike treba prilagoditi specifičnim potrebama snimanja i analize materijala.

Detekcija vodenih znakova multispektralnim snimanjem predstavlja važan korak u istraživanju i očuvanju kulturne baštine. Korištenje multispektralnih kamera omogućuje otkrivanje vodenih znakova koji su nevidljivi na standardnim fotografijama te time pruža novu perspektivu u analizi i istraživanju papirne dokumentacije i umjetničkih djela. [3]

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Multispektralno snimanje

Multispektralno snimanje uključuje dobivanje vidljivih, bliskih infracrvenih i kratkovalnih infracrvenih slika. Ove slike su dobivene u nekoliko širokih pojaseva valnih duljina (računa se da ima do 6 filtera). Stoga multispektralna slika bilježi slikovne podatke unutar određenog raspona valnih duljina u elektromagnetskom spektru. Različiti snimljeni materijali različito reflektiraju i apsorbiraju na tim različitim valnim duljinama. U ovoj metodi snimanja moguće je razlikovati materijale prema njihovim potpisima spektralne refleksije koji se opažaju na ovim daljinski očitanim slikama.

S druge strane, hiperspektralno snimanje je tehnika koja analizira široki spektar svjetlosti. Njegov primarni cilj je dobiti spektar od svakog piksela na slici scene kako bi se pronašli objekti, detektirali procesi ili identificirali materijali. Hiperspektralno daljinsko očitavanje uzorkuje širok raspon valnih područja u spektru svjetlosti (ima mnogo više uskopojasnih filtera). [4]

Povijesno gledano, daljinsko očitavanje bilo je glavno tržište za multispektralno snimanje. Proteklih nekoliko godina vidjeli smo sve veće prihvaćanje multispektralnog snimanja za automatsku optičku inspekciju (AOI), uključujući inspekciju ispisa, proizvodnju elektronike, sortiranje hrane i materijala i lijekove. Ključni zahtjevi za industrijske primjene uključuju veliku brzinu, nisku cijenu i male naklade. [6]

Jedna od aplikacija u nastajanju je sigurnosni ispis za novčanice. Bankomati traže posebne sigurnosne tinte koje ljudsko oko ne može vidjeti, kao mjeru protiv krivotvorina. Novčanica eura koristi posebne sigurnosne tinte koje su vidljive samo pod osvjetljenjem oko 850 nm u NIR području. U komercijalnoj tiskari, kvaliteta sigurnosnih tinti se 100 posto provjerava tijekom procesa ispisa. Ranije su dizajneri sustava trebali kameru u jednoj boji za provjeru boje novčanice i zasebnu NIR ili UV kameru za provjeru sigurnosnih boja, što je kompliciralo dizajne i povećavalo troškove.

S multispektralnom kamerom, dizajneri sustava mogu koristiti jednu kameru s kombinacijom izvora bijelog i NIR LED svjetla. U ovom slučaju, multispektralna kamera dramatično pojednostavljuje dizajn sustava i smanjuje troškove. [3]

2.1.1. Povijest i razvoj multispektralnog snimanja

Multispektralno snimanje je tehnika za snimanje elektromagnetskog zračenja više valnih duljina. Ideja multispektralnog snimanja nastala je otkrićem infracrvenog zračenja od strane Williama Herschela u 19. stoljeću. U 20. stoljeću, s razvojem elektroničke tehnologije, multispektralno snimanje postaje sve popularnije. Prvi primjeri multispektralnog snimanja korišteni su u astronomiji, gdje se spektrometri koriste za snimanje i analizu elektromagnetskog zračenja. Šezdesetih godina prošlog stoljeća NASA je počela koristiti multispektralno snimanje u svojim programima istraživanja Zemlje. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća u svemir su lansirani prvi sateliti s multispektralnim kamerama, što je omogućilo snimanje Zemljine površine u različitim spektralnim područjima te je ono postalo sve popularnije i koristi se u mnogim područjima, uključujući poljoprivredu, geologiju, medicinu, forenziku, umjetnost i kulturnu baštinu. Napredak računalne tehnologije omogućio je digitalizaciju multispektralnog snimanja, a danas postoji niz alata i tehnologija za multispektralno snimanje kao što su kamere s više filtara i senzora te softver za obradu i analizu podataka. [4]

Multispektralno snimanje igra važnu ulogu u raznim istraživačkim i primjenljivim poljima, omogućujući detaljnije analize i istraživanja koja se ne mogu postići tradicionalnim metodama snimanja.

2.1.2. Elektromagnetski spektar i valna duljina

Elektromagnetski spektar je raspon svih mogućih frekvencija elektromagnetskog zračenja. Pokriva širok raspon valnih duljina, od kojih svaka odgovara određenom dijelu spektra. On ima ključnu ulogu u multispektralnog snimanju jer pokriva raspon valnih duljina koji se koristi za analizu informacija s objekta ili scene. Razumijevanje elektromagnetskog spektra ključno je u raznim poljima uključujući fiziku, astronomiju, telekomunikacije i daljinsko detektiranje. Elektromagnetski spektar kreće se od visokoenergetskih kratkovalnih gama zraka i X-zraka do dugovalnih radio valova. Pokriva mnogo više područja kao što su ultraljubičasto (UV), vidljivo svjetlo i infracrveno (IR). Svako područje ima različita svojstva i interakcije s materijom. [5]

Valna duljina, simbolizirana grčkim slovom lambda (λ), je udaljenost između dva uzastopna vrha ili udubljenja. Obično se mjeri u jedinicama kao što su metri (m), nanometri (nm) ili mikrometri (μm). Valna duljina određuje vrstu elektromagnetskog zračenja i njegovo ponašanje. Odnos valne duljine i energije obrnuto je proporcionalan. To znači da kraće valne duljine odgovaraju zračenju veće energije, dok duže valne duljine odgovaraju zračenju niže energije. Na primjer, gama i X-zrake imaju kraće valne duljine i veću energiju, dok radiovalovi imaju duže valne duljine i nižu energiju. Različiti materijali i tvari međusobno djeluju s elektromagnetskim zračenjem na jedinstvene načine, pokazujući različite stupnjeve refleksije, transmisije ili apsorpcije na različitim valnim duljinama. [5]

Spektar vidljive svjetlosti mali je dio elektromagnetskog spektra i podrazumijeva valne duljine EM zračenja od oko 400 do 700 nm. Unutar ovog raspona opažaju se različite boje, pri čemu se kraće valne duljine pojavljuju ljubičasto, a duže valne duljine crveno. Osim vidljivog spektra, kraće valne duljine uključuju i UV zrake, koje su važne za procese poput sinteze vitamina D, a također mogu biti štetne za žive organizme u prevelikim dozama. S druge strane, duže valne duljine uključuju infracrveno zračenje koje se koristi u aplikacijama kao što su termografija i daljinska detekcija. Sposobnost otkrivanja i manipuliranja različitim valnim duljinama u elektromagnetskom spektru ključna je za različite tehnologije. Znanstvenici i inženjeri razvijaju posebne alate i uređaje za korištenje određenih područja spektra za specifične primjene. To uključuje dizajn senzora, kamera, teleskopa i komunikacijskih sustava koji su prikladni za različite raspone valnih duljina. [4]

Pažljivim odabirom specifičnih valnih duljina u elektromagnetskom spektru, multispektralno snimanje može selektivno uhvatiti vrijedne informacije zapisane unutar uzorka. Izbor valne duljine za multispektralno snimanje ovisi o čimbenicima kao što su željeni ciljevi snimanja, karakteristike objekata i korištene tehnike analize. Na primjer, multispektralni satelitski senzori u aplikacijama za daljinsko očitavanje dizajnirani su za prikupljanje podataka u određenim opsezima kao što su vidljiva svjetlost, bliska infracrvena i termalna infracrvena radi prikupljanja informacija o pokrovu zemlje, statusu vegetacije ili oceanografskim parametrima. U medicinskim slikama, multispektralne tehnike koriste specifične valne duljine za poboljšanje vizualizacije i diferencijacije tkiva

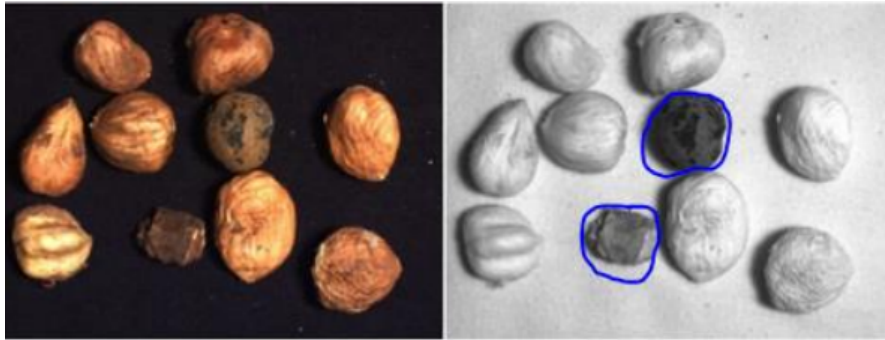
ili za otkrivanje specifičnih značajki ili anomalija. Korištenjem različitih valnih duljina u elektromagnetskom spektru, multispektralno snimanje može otkriti suptilne razlike u sastavu tkiva, protoku krvi ili funkcionalnim svojstvima. [5]

Razumijevanje elektromagnetskog spektra i njegovog odnosa s valnom duljinom temeljno je za mnoge znanstvene i inženjerske discipline. Omogućuje nam proučavanje i korištenje širokog raspona elektromagnetskog zračenja za mnoge različite svrhe, od medicinskog snimanja i telekomunikacija do praćenja okoliša i istraživanja svemira. [5]

2.1.3. Komponente multispektralnog sustava

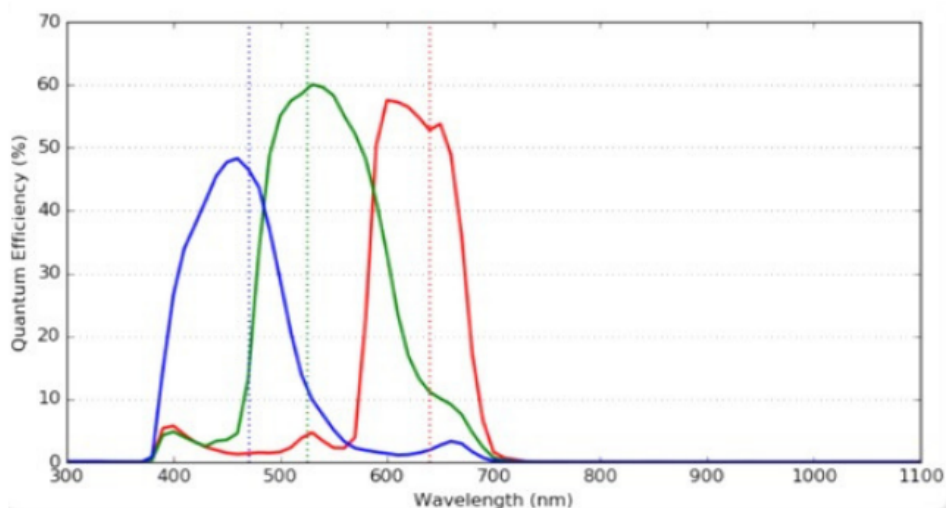
Multispektralnim snimanjem može se otkriti i ono što nije vidljivo golim okom. U silikonskom senzoru, bilo CCD ili komplementarnom metal-oksidnom poluvodičkom senzoru (CMOS) filtri u boji općenito su crvene, zelene i plave (RGB) boje. Optičke slike, snimljene red po red na tim valnim duljinama, se zatim koriste za identifikaciju specifičnih objekata od interesa. Prostorna korekcija omogućuje fotoaparatu da poravnava sve kanale boja na istoj točki objekta s subpikselnom preciznošću. Prednost skeniranja linija u odnosu na skeniranje područja za slike u boji je u tome što pruža tri izvorne RGB boje bez Bayerovog dekodiranja, što daje najbolju kvalitetu slike u boji. [5]

Za određene primjene slika u boji više nije dovoljna. Sofisticiranije multispektralne slike uključuju inspekciju valuta, proizvodnju elektronike i sortiranje hrane. Za to su potrebne specifične valne duljine koje su ili izvan vidljivog spektra ili između RGB boja, a te valne duljine stvaraju jedinstvene optičke karakteristike za predmet interesa. Multispektralno snimanje koristi isti koncept kao i slikanje u boji, ali proširuje raspon korištenih valnih duljina od konvencionalnog vidljivog spektra (RGB trake boja) do, u većini slučajeva, NIR ili ultraljubičastih područja. Nedavno razvijena tehnologija primjene interferencije na tankim filmovima omogućuje napredne dizajne kamere koje daju spektralno neovisne izlaze RGB+NIR u faktoru malog oblika, otvarajući mogućnosti za aplikacije strojnog vida.



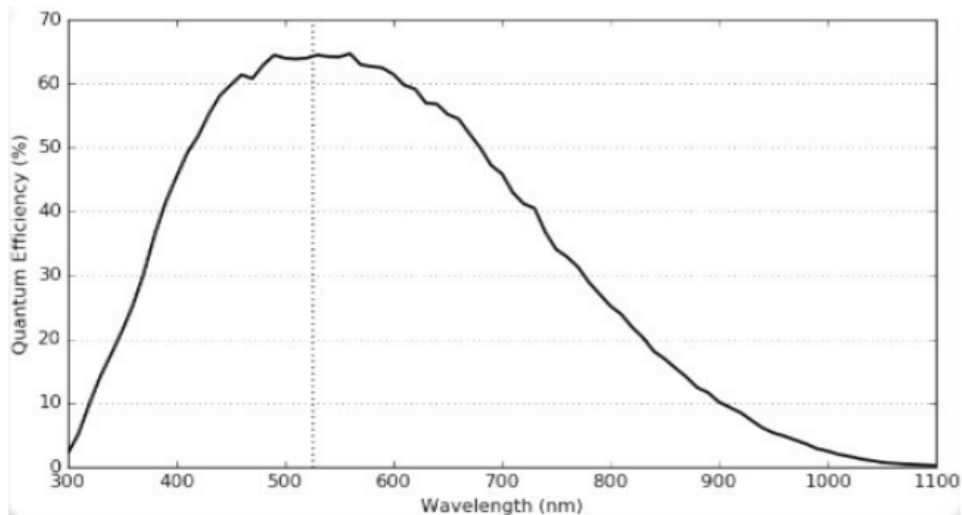
Slika 1: Izdvajanje stranih objekata od lješnjaka u NIR području
(Izvor: <https://www.jai.com/multispectral-imaging>)

Kamera, jedna od komponenti multispektralnog sustava, snima istu scenu u više spektralnih kanala rotiranjem diska s filterima postavljenog ispred senzora ili objektivu, tvoreći tzv. multispektralnu kocku podataka. Takvi diskovi mogu sadržavati i do dvanaest filtera. Prednost ovakve kamere je potpuna prostorna rezolucija po opsegu valne duljine. Filteri se mogu prilagoditi po potrebi te također izmijeniti. Nedostaci ovakvog sustava su spora i dugotrajna akvizicija slika, složene geometrijske distorzije i visoka cijena potrebnih filtera.



Slika 2: Osjetljivost senzora klasične kamere (RGB)

(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 3: Spektralna osjetljivost korištenog senzora

(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)

Jedna od glavnih komponenti su filteri koji se postavljaju ispod kamere. Svaki filter emitira približne valne duljine. Njihovo korištenje ovisi o vrsti multispektralnog snimanja koje se provodi. Kod snimanja multispektralne kocke provelo bi se snimanje kroz sve prisutne filtere, dok kod manje zahtjevnih snimanja dovoljno je provesti snimanje kroz nekoliko odabranih filtera.

Osvjetljenje igra važnu ulogu u multispektralnog snimanju. Danas su LED diode najčešći i najučinkovitiji izvori svjetlosti. Za vidljivu svjetlost, bijele LED diode prvenstveno se koriste za crno-bijele slike i slike u boji. Budući da svjetlost bijele LED diode sadrži vrlo malo IR komponente, NIR LED mora se dodati za RGB+NIR sliku. Izbor valne duljine također je važan za otkrivanje specifičnih značajki od interesa. Može se koristiti NIR svjetlo s valnim duljinama od 780 do 1050 nm, ovisno o zahtjevima primjene. U određenim primjenama, UV pobuda se koristi za pregled fluorescentnih tinti, druge vrste sigurnosne tinte. Filtar Piranhe4 je dizajniran da pažljivo odsiječe UV svjetlo ispod 380 nm, tako da pobuda ne može procuriti u vidljive slike. [4]

2.1.4. Prednosti i nedostaci multispektralnog snimanja

Multispektralno snimanje postalo je vrlo vrijedan i nezamjenjiv alat u raznim područjima. Međutim, kao i svaki tehnološki napredak, multispektralno snimanje ima i prednosti i ograničenja. Multispektralno snimanje ima mnoge prednosti koje pridonose njegovoj širokoj upotrebi i učinkovitosti. Neke od glavnih prednosti multispektralnog snimanja su:

1. Povećana osjetljivost
2. Karakterizacija materijala
3. Otkrivanje skrivenih značajki
4. Nedestruktivno

Multispektralno snimanje omogućuje snimanje podataka u više spektralnih pojaseva, povećavajući osjetljivost na specifične značajke ili materijale. To omogućuje otkrivanje suptilnih razlika koje možda nisu vidljive golim okom ili tradicionalnim tehnikama snimanja. Analizom specifičnih valnih duljina, multispektralno snimanje može otkriti skrivene informacije i pružiti vrijedne uvide. [2]

Ovim snimanjem može se analizirati spektralni odgovor različitih materijala. Ono može pomoći u identificiranju, klasificiranju i karakterizaciji materijala ispitivanjem njihove jedinstvene refleksije ili apsorpcijskih svojstava. Osobito je korisno u područjima kao što su geologija, poljoprivreda i restauracija umjetnina, gdje je razumijevanje sastava materijala kritično. [2]

Također, moguće je otkriti skrivene značajke ili informacije koje su nevidljive ljudskom oku ili konvencionalnim tehnikama snimanja. Hvatajući podatke izvan vidljivog spektra moguće je otkriti skrivene oznake, izmjene ili slojeve u umjetninama, dokumentima i povijesnim artefaktima. [2]

Multispektralno snimanje također je i nedestruktivna i bezkontaktna tehnika jer ne zahtijeva fizički kontakt s objektom koji se snima. To je posebno korisno u zaštiti kulturne baštine, gdje je zaštita osjetljivih i vrijednih predmeta od iznimne važnosti. [2]

Iako multispektralno snimanje ima mnoge prednosti, važno je priznati njegova ograničenja i potencijalne nedostatke. Razumijevanje ovih nedostataka ključno je za istraživače kako bi donosili informirane odluke u vezi s primjenom multispektralnog snimanja. Neki od značajnih nedostataka su:

1. Cijena i složenost opreme
2. Obrada i analiza podataka
3. Ograničena prostorna razlučivost
4. Ograničena dostupnost namjenske opreme

Implementacija multispektralnog sustava snimanja može biti skupa i zahtijeva specijaliziranu opremu kao što su multispektralne kamere, filtri i rasvjeta. Početna ulaganja i tekući troškovi održavanja mogu biti prepreka, posebno za male organizacije ili istraživačke projekte s ograničenim proračunom. [3]

Multispektralno snimanje generira velike količine podataka koje može predstavljati izazov za pohranjivanje, obradu i analizu. Obrada složenosti multispektralnih skupova podataka zahtijeva napredne računalne tehnike i stručnost, što može zahtijevati dodatne resurse i specijalizirani softver. [3]

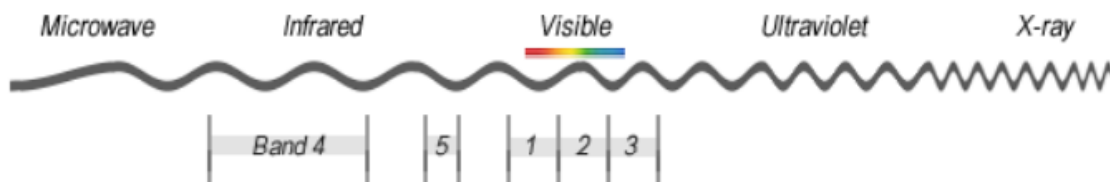
Postizanje visoke prostorne razlučivosti u multispektralnog snimanju može biti izazovno pa tako upotreba optičkih filtara i potreba za snimanjem slika na različitim valnim duljinama smanjuje ukupnu rezoluciju u usporedbi s konvencionalnim tehnikama snimanja slike visoke rezolucije. Ovo ograničenje utječe na razinu detalja i finih značajki koje se mogu vidjeti na snimljenoj slici. [3]

Pristup visokokvalitetnoj multispektralnoj opremi i objektima za snimanje može biti ograničen, osobito za istraživače ili organizacije s ograničenim resursima ili smještene u udaljenim područjima. To može ograničiti široko usvajanje i korištenje multispektralnih tehnika snimanja. [3]

Razumijevanje ovih nedostataka ključno je za istraživače koji razmatraju izvedivost, isplativost i primjenjivost multispektralnog snimanja za njihove specifične primjene. Unatoč ovim ograničenjima, prednosti i potencijalne primjene multispektralnog snimanja čine ga neprocjenjivim alatom u raznim područjima, pružajući vrijedne uvide i doprinoseći napretku znanstvenih istraživanja, dijagnostike i konzervatorskih nastojanja.

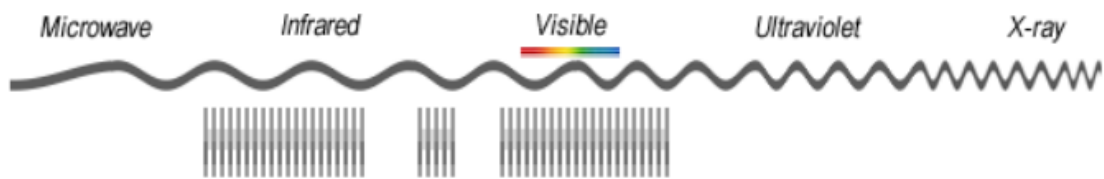
2.2. Razlika između MSI i HSI

Glavna razlika između multispektralnog i hiperspektralnog je broj pojasa te koliko su uski pojasevi. Hiperspektralne slike sastoje se od mnogo užih pojasa koji su debljine od 10 do 20 nm-a. Takva slika može imati od stotinu do nekoliko tisuća pojasa. Kako ima više spektralnih detalja na hiperspektralnim slikama tako ima i bolju mogućnost da se vidi nevidljivo. Hiperspektralno snimanje nudi veliki potencijal na svim područjima snimanja i obrade slika. Usprkos potencijalu ovakve tehnologije, nije uspjela postići mnogo pomaka u industrijskim primjenama. Veliki broj poljoprivrednih, industrijskih i medicinskih aplikacija ne treba veliki broj spektralnih pojasa koji su dostupni pomoću skupe hiperspektralne tehnologije. S toga se često u tu svrhu koristi multispektralni pristup koji podržava visok stupanj prilagodljivosti. [5]



Slika 4: Primjer broja i širine valnih pojasa kod multispektralnog snimanja

(izvor: <https://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>)



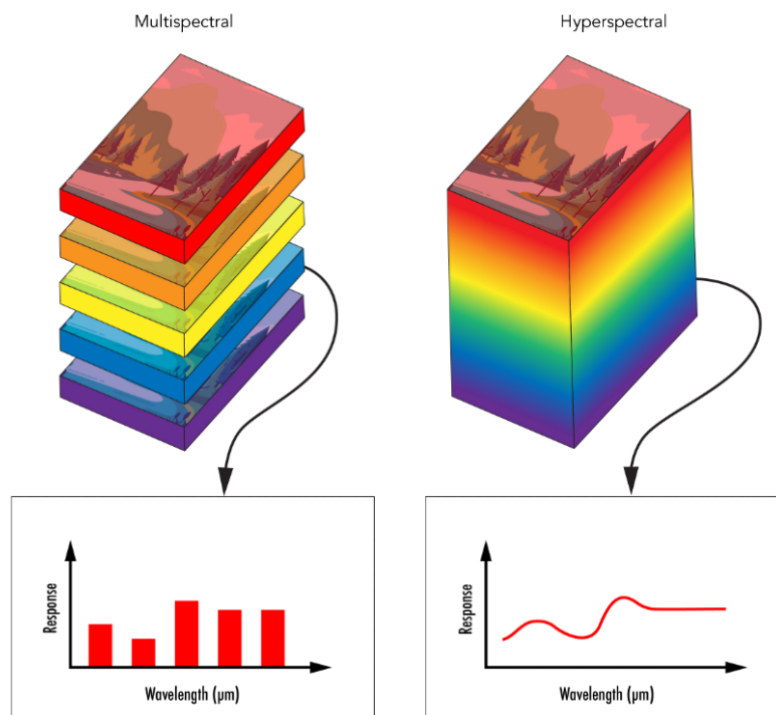
Slika 5: Primjer broja i širine valnih pojasa kod hiperspektralnog snimanja

(izvor: <https://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>)

Viša razina spektralnih detalja u hiperspektralnim slikama daje bolju mogućnost da se vidi nevidljivo. Hiperspektralne i multispektralne slike imaju mnoge primjene u stvarnom svijetu, a postoje još stotine aplikacija u kojima nam multispektralno i hiperspektralno omogućuje razumijevanje svijeta.

2.2.1. *Hiperspektralno snimanje (HSI)*

Hiperspektralno snimanje (engl. Hyperspectral Imaging - HSI) kombinira snagu digitalnog snimanja i spektroskopije. Kao i drugi oblici spektralnog snimanja, hiperspektralno snimanje skuplja, klasificira i procesira informacije velikog dijela elektromagnetskog spektra. Cilj hiperspektralnog snimanja je dobivanje spektra za svaki pojedini pixel unutar neke snimke u svrhu pronalaska objekata, identifikacije materijala ili detekcije procesa. Za razliku od ljudskog oka koje ima mogućnost registra samo vidljivog dijela svjetlosti unutar tri valne duljine zvane RGB. Hiperspektralnim se snimanjem može osim vidljivog dijela spektra registrirati ultraljubičasto (engl. UltraViolet - UV) i infracrveno (engl. InfraRed - IR) područje elektromagnetskog zračenja. Na taj način, hiperspektralnim snimkama je moguće razlikovati različite nijanse boja koje bi inače ljudskome oku djelovale kao jedna boja. Kako bi podaci o zapisu elektromagnetskog zračenja uspješno doveli do prikaza gotove snimke, može se figurativno reći da hiperspektralni senzori takve informacije prikupljaju i tretiraju kao kolekciju slika. Svaka snimka individualno predstavlja uski pojas elektromagnetskog spektra, a kombinacija više takvih snimki tvori trodimenzionalnu (S_x , S_y , S_λ) hiperspektralnu kocku podataka gdje prostorne koordinate x i y predstavljaju dimenziju scene, a spektralna os λ predstavlja dimenziju sastavljenu od valnih duljina.



Slika 6: Razlika između multispektralnog i hiperspektralnog snimanja
 (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)

Nedavni napredak u dizajnu i brzini obrade senzora za hiperspektralna snimanja pripremio je put za širok raspon primjena koje koriste hiperspektralno snimanje. Taj raspon varira od satelitskog i zrakoplovnog daljinskog istraživanja i vojnih ciljeva pa sve do industrijske kontrole kvalitete i laboratorijskih primjena u modernoj medicini i biofizici. Zbog bogatog sadržaja informacija u hiperspektralnim slikama, one su prikladne za automatiziranu obradu slike, bilo da se radi o industrijskom nadzoru na mreži ili za daljinsko očitavanje.

2.3. Područja interesa i primjena

Multispektralno snimanje postalo je naširoko korišten alat u raznim područjima, uključujući poljoprivredu, medicinu, proizvodnju, ekologiju, vojsku, itd. S brzim rastom stanovništva, postoji goruća potreba za učinkovitijom i učinkovitijom kontrolom kvalitete poljoprivrednih proizvoda. Vizualna inspekcija bila je tradicionalna metoda izbora većine poljoprivrednika za praćenje rasta i kvalitete njihovih usjeva, ali multispektralne slike pokazale su se kao vrlo učinkovita alternativa za procjenu produktivnosti tla i analizu zdravlja biljaka. Ova tehnologija pruža daleko sveobuhvatniji pogled od onoga što može vidjeti ljudsko oko, omogućujući pregled oštećenih područja i upravljanje rastom polja. Rano otkrivanje bolesti, korova i štetnika postaje sve popularnije s multispektralnim slikama, pružajući vrijedan uvid i omogućujući uzgajivačima odabir najboljih metoda za optimalan rast. Dodatno, može pomoći u brojanju biljaka i određivanju gustoće polja. Multispektralno snimanje ima mogućnost analiziranja vanjskih značajki kao što su boja, tekstura, oblik, veličina i oštećenje površine kombiniranjem vidljivih i nevidljivih valnih duljina. Štoviše, također može ponuditi uvid u svojstva poput sadržaja suhe tvari i zrelosti. Multispektralno snimanje ima praktičnu primjenu u medicini, posebice u nekim kirurškim zahvatima. Kombinacija RGB i NIR valnih duljina pomaže u prepoznavanju tumora i njihovom razlikovanju od susjednih tkiva. U proizvodnji i pakiranju farmaceutskih proizvoda korištenje RGB i NIR valnih duljina omogućuje snimanje kroz omote, što omogućuje identifikaciju, brojanje i analizu kvalitete, uz pregled površine. U industrijskim postavkama, kao što je inspekcija PCB-a (engl. PCB, *printed circuit board*), istovremeno snimanje RGB i NIR valnih duljina vrlo je korisno za ispitivanje površinskih komponenti i vodova. UV svjetlo je učinkovit alat za identifikaciju površinskih komponenti na PCB pločicama zbog svoje ograničene sposobnosti prodiranja. Nasuprot tome, prelaskom na infracrveni spektar možemo pregledati ploču i identificirati sve nedostatke ili lomove. Multispektralno snimanje pokazalo se korisnim u vojnom sektoru, gdje se vojska suočava s brojnim prijetnjama. Ova tehnologija može pomoći u otkrivanju eksploziva, navigaciji tijekom noći i mjerenju dubine bunkera. Osim toga, može se koristiti za dešifriranje starih papirusa i drugih dokumenata korištenjem infracrvenog raspona. Dok ljudi mogu vidjeti samo ono što je vidljivo na površini, tehnike snimanja koje koriste različite valne duljine mogu "bušiti" i vidjeti što je skriveno na

različitim dubinama. Tehnike snimanja detektiraju optičke refleksije od površina, čija optička svojstva značajno variraju s valnom duljinom izvora svjetlosti. Dubina prodiranja svjetlosti mnogih materijala ovisi o valnoj duljini, tako da se valne duljine mogu odabrati za snimanje slika značajki na različitim dubinama. Proizvodnja elektroničkih sklopova počela je snimati na različitim dubinama korištenjem multispektralnih tehnika. Tinte u boji često se koriste kao završni premazi na gotovim tiskanim pločama (PCB). Sve bakrene žice i boje moraju se pregledati tijekom procesa proizvodnje. Danas je slikanje u boji primarni alat za konačnu inspekciju PCB-a.

2.3.1. Digitalizacija i analiza kulturne baštine

Osim prije navedenih primjera, spektralno snimanje može se koristiti za određivanje starosti i svojstava rukopisa i ukrasnih elemenata, identifikaciju vodenih znakova, određivanje površinskih svojstava materijala, provjeru autentičnosti, detekciju promjena tijekom vremena ili tijekom prethodnih konzervatorsko-restauratorskih postupaka, itd. Multispektralno snimanje sve je više dio digitalizacije kada je potrebno detektirati prekriveni, izbledjeli ili izbrisani tekst, ali i kao način dokumentiranja kulturne baštine zbog svoje nenametljive prirode. [8]

Stanje rukopisa može se zabilježiti i mijenjati tijekom vremena, a može se pratiti tijekom konzervacije usporedbom uzastopnih slika iste veličine i dubine boje za određeno područje od interesa. Velik dio rukopisne baštine kritično je ugrožen zbog očite degradacije nestabilnih kiselih tinti korištenih za pisanje. Oštećenja su različita: boja tinte se mijenja iz plavo-crne u smeđu, spojevi tinte se otapaju i stvaraju aureole - UV fluorescentne aureole, krvarenja tinte kroz papir, promjene boje papira, promjene teksture tinte, gubitak tinte i kristalizacija soli na papiru. Oštećenja u začetku, postaju vidljivija pod UV svjetlom. Na isti način mogu se proučavati i štete uzrokovane vodom i mikroorganizmima. Spektralno oslikavanje koristi se za razlikovanje različitih materijala (tinte, pigmenti, ljepila) jer različiti materijali apsorbiraju i/ili reflektiraju različite valne duljine na različite načine. Samo određeni materijali fluoresciraju, što je jedinstveno svojstvo koje omogućuje njihovu identifikaciju. [9]

2.3.2. *Povijesni razvoj detekcije vodenih znakova*

Znanstveno istraživanje vodenih znakova, njihovo sustavno prikupljanje, klasifikacija i analiza, započelo je već u početkom 19. stoljeća, čime su prekretnice postavljene glavnim djelima Briqueta i Piccarda [10]. Mogućnosti koje vodeni znakovi nude za povijesna istraživanja prije svega su povezane na pitanja koja se tiču povijesti papira. Korištenje određenih vodenih znakova ne samo da omogućuje određivanje gdje je papir proizveden, već i njihovo širenje svjedoči o distribuciji papira: trgovini papirom i srodnim obrtima. Maria Zaar-Görgens [10] uspjela je mapirati, na temelju vodenih znakova, širenje papira iz tvornica papira u Lorraine-Gornjoj Rajni između 1385. i 1600. pokazujući ne samo impresivno povećanje proizvodnje papira, ali i razvoj u trgovini papirom i ekonomsku situaciju jugozapadne Njemačke tijekom vremena. Vodeni znakovi su od posebne metodološke važnosti za opisivanje rukopisa, što uključuje i analizu papira na kojem su napisani kao i natpisi i sami tekstovi. Stvarna povijesna pitanja koja se tiču nedatiranih rukopisa i otisaka se obično mogu odrediti na temelju njihovih vodenih znakova. Istraživanje vodenog znaka posebno je značajan jer pruža mnogo točniju pomoć za povijesno datiranje od, na primjer, paleografskih analiza. Preduvjet tome je postojanje identičnog, datiranog vodenog znaka koji predstavlja određeno vremensko razdoblje za proizvodnju papira. [10]

Tehničke mogućnosti za kopiranje ili reprodukciju vodenih znakova sa izvornih dokumenata kreću se od crtanja do skupih modernih tehnika kao što je beta radiografija, koja ima iznimnu točnost. Analiza vodenih znakova postala je standard u opisivanju rukopisa te se postiglo neprestano povećanje zbirke vodenih znakova i njihova dostupnost na internetu. Vodeni znakovi dijele se na one koji su identični jedni drugima i na njihove varijante. Oni znakovi koji se smatraju identičnim su isti u svim detaljima tako da su savršeno usklađeni. Za razliku od njih pod vodene znakove koje spadaju pod varijante jasno se ističe da su napravljene od iste žičane figure ali se tijekom proizvodnog procesa oblik figure promijenio, stvarajući vodene znakove koji se razlikuju jedan od drugoga. Tijekom mehaničkog trošenja i habanja prilikom proizvodnje papira dijelovi žice mogu olabaviti, savinuti ili puknuti. Kada se kalup popravi pričvršćene žice se ne nalaze na potpuno identičnom mjestu kao prije šivanja ili lemljenja. Također, moglo je doći do toga

da pojedini elementi žičanih figura otpadnu te se ne pričvrste ponovno ili se proizvoljno poprave tako da se početni kalup krene deformirati. Kao rezultat, pronalaze se listovi papira koji sadrže iste vodene znakove sa istih kalupa ali se razlikuju u određenim stupnjevima te tako dolazi do varijanti vodenih znakova. Na prvi pogled se često ne može reći jesu li dva vodena znaka identična ili su varijante. Crteži mogu biti previše neprecizni da bi se ustanovile razlike između dvije ili više figura. Zbog toga je potrebno digitalizirati sve varijante te usporediti fotografije i oznake na ekranu. Softver za fotografije omogućuje polaganje fotografija s različitim odstupanjima postavljanje znakova jedan poviše drugoga te se mogu uočiti i suptilne razlike među njima. [10]

Za kronološki slijed nedatiranog papira bitno je i posložiti takve varijante kako bi se moglo odrediti potječu li od istog kalupa za papir. Varijante koje su prepoznate kao takve, ne tretiraju se kao različiti znakovi jer bi se tada izgubio kronološki proces proizvodnje papira.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Svrhe i ciljevi eksperimentalnog rada

Svrha eksperimentalne faze je istražiti primjenu multispektralnog snimanja u detekciji vodenih znakova. Vodeni znakovi, koji se često koriste kao oznake autentičnosti i/ili identifikacije, mogu pružiti vrijedan uvid u podrijetlo i kvalitetu uzorka. Međutim, nekada ih je teško otkriti ili protumačiti zbog njihove suptilne prirode ili degradacije tijekom vremena. Korištenjem multispektralnog snimanja, koje hvata elektromagnetsko zračenje izvan vidljivog spektra, cilj je poboljšati vidljivost i jasnoću vodenih žigova, čime se omogućuje točnija identifikacija i analiza. To uključuje korištenje naprednih tehnika snimanja i analizu vodenih znakova prisutnih na različitim uzorcima poput povijesnih dokumenata ili umjetničkih grafika. Primarni cilj je poboljšati otkrivanje i vidljivost vodenih znakova koje je teško uočiti u vidljivom dijelu spektra ili tradicionalnim metodama snimanja. Ciljevi eksperimentalne faze uključuju:

1. Procjenu učinkovitosti multispektralnog snimanja u poboljšanju vidljivosti i jasnoće vodenih znakova
2. Usporedba korištenja različitih filtera i uvjeta osvjetljenja u preciznom snimanju vodenih znakova
3. Utjecaji različitih čimbenika, kao što su složenost, veličina vodenih znakova, debljina papira prilikom detekcije
4. Istraživanje potencijalnih primjena i ograničenja multispektralnog snimanja u detekciji vodenih znakova za očuvanje kulturne baštine, provjeru autentičnosti dokumenata i druga relevantna polja.

Slijedeći ove ciljeve, nastoji se doprinijeti napretku tehnika detekcije vodenih znakova, poboljšati sustav multispektralnog snimanja koji se pokazao kao vrijedan alat u analizi materijala. Rezultati dobiveni ovim eksperimentalnim radom pružit će uvide istraživačima, konzervatorima, povjesničarima i stručnjacima koji rade na području očuvanja kulturne baštine i analize dokumenata.

3.1.1. Pregled primjene metodologije i tehnika

Proces dobivanja slike multispektralnim snimanjem vodenih znakova uključuje niz slika pomoću konfiguriranog multispektralnog sustava snimanja. Prvi korak je postavljanje sustava i snimanje fotografija pomoću specijalizirane kamere koja može uhvatiti svjetlost i izvan vidljivog raspona. Izbor kamere ovisi o specifičnoj primjeni i spektralnim pojasevima od interesa. Na kameru se postavljaju i filteri koji dopuštaju prolaz samo željenim valnim duljinama dok blokiraju neželjene valne duljine. Odabir filtera ovisi o ciljevima istraživanja. Odgovarajuće osvjetljenje bitno je za multispektralno snimanje. Izbor osvjetljenja ovisi o spektralnim rasponima od interesa i specifičnim zahtjevima postava snimanja. Pažljivo se određuje osiguranje ujednačenog i kalibriranog osvjetljenja u cijeloj sceni kako bi se smanjile varijacije u snimljenim fotografijama.

Multispektralno snimanje često uključuje uzastopno snimanje slika u različitim spektralnim pojasima. Kako bi se osiguralo točno poravnanje i registracija ovih slika, koriste se tehnike registracije slika. Ove tehnike uključuju poravnavanje slika na temelju zajedničkih značajki ili korištenje referentnih oznaka za postizanje preciznog poravnanja na razini piksela. Pravilna registracija slike ključna je za točnu analizu i usporedbu slika snimljenih u različitim spektralnim pojasima.

Nakon što se multispektralne slike pohrane one se podvrgavaju obradi i analizi slike. Ova faza uključuje primjenu različitih algoritama i tehnika za poboljšanje kvalitete slike, uklanjanje šuma i izdvajanje vrijednih informacija. Kalibracija slike, normalizacija i tehnike mapiranja boja koriste se kako bi se osigurala dosljedna reprezentacija u različitim spektralnim pojasima. Posljednji korak u metodologiji je interpretacija i vizualizacija prikupljenih multispektralnih podataka. To uključuje razna mjerenja, algoritme računalnog vida ili specijalizirane softverske alate koji se koriste za procjenu jasnoće i vidljivosti vodenih znakova snimljenih multispektralnim snimanjem.

3.2. Komponente multispektralnog sustava

Glavne komponente unutar sustava multispektralnog snimanja su kamera, filteri i rasvjeta.

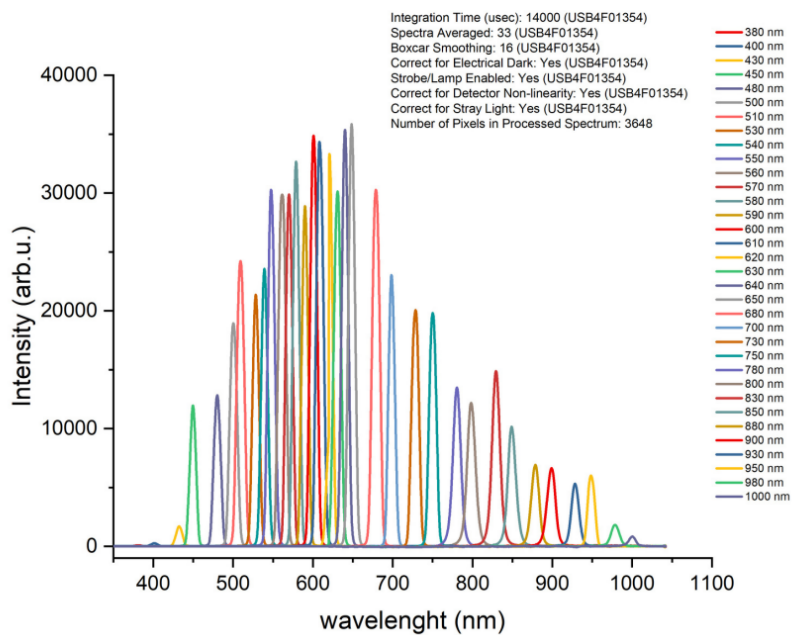


Slika 7: Kamera, objektiv i filteri

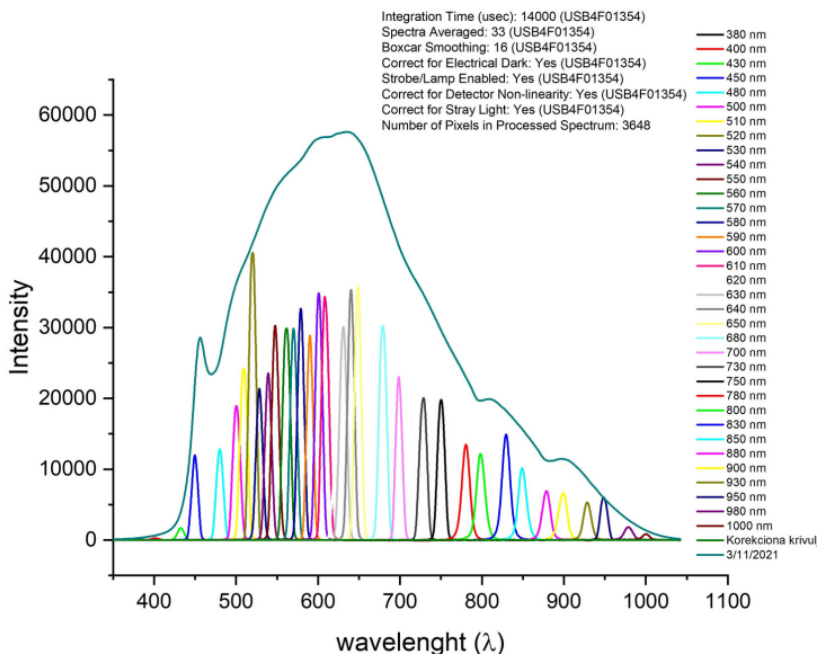
(izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr. sc. Vladimir Cviljušac, prof. dr. sc. Damir Modrić, dr. sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)

Korištena je kamera sa monokromatskim senzorom rezolucije 20 MP (5472 x 3648 px) sa spektralnim rasponom 300 – 1100 nm sa objektivom žarišne duljine 25mm i kutom snimanja 27.4 (dijagonalno).

Za potrebe eksperimentalnog rada korišteni su spektralni filteri od 380 do 1000 nm, spektralne širine 10 nm i debljine filtera 6,5 mm.

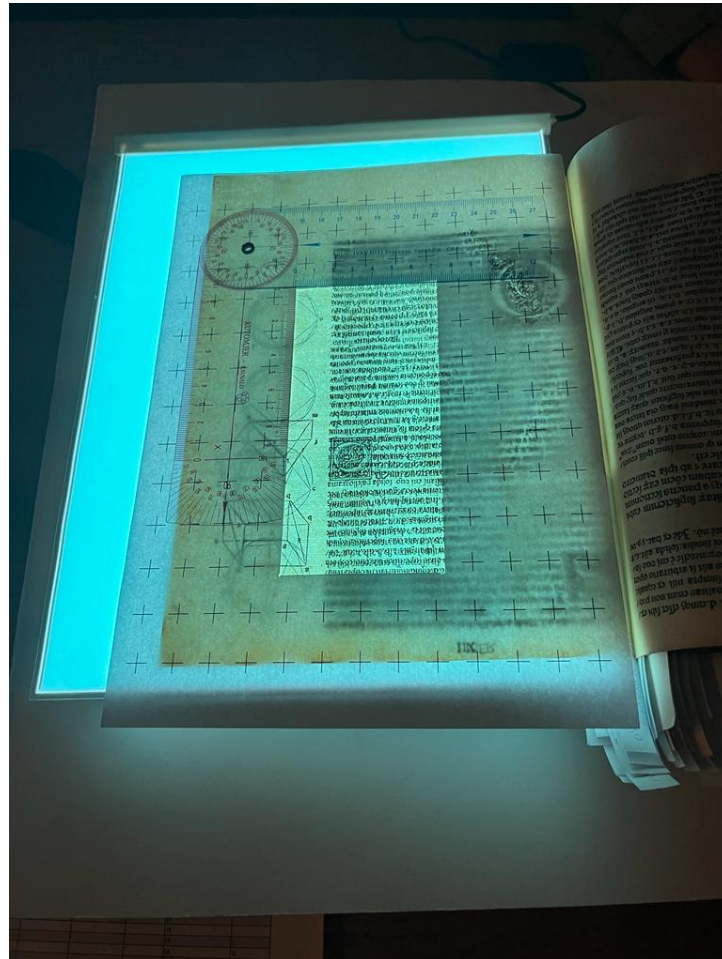


Slika 8: Krivulje intenziteta spektralnih filtera na odgovarajućim valnim duljinama (izvor: Multispektralna slikovna analiza pisane kulturne baštine dr. sc. Vladimir Cviljušac, prof. dr. sc. Damir Modrić, dr. sc. Alan Divjak 6.9.2022. Hrvatski državni arhiv)



Slika 9: 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)

Uz to, odgovarajuće osvjetljenje bitno je za multispektralno snimanje. Izbor osvjetljenja ovisi o spektralnim rasponima od interesa i specifičnim zahtjevima postava snimanja. Korištena je svjetlosna ploča za snimanje vodenih znakova u transmisiji.



Slika 10: Svjetlosna ploča

Za prikupljanje podataka korišten je touchscreen zaslon osjetljiv na dodir s više aktivnih točaka te računalo sa procesorom i5 2,4 GHz, 16 GB RAM Win operativnim sustavom uz software razvijen u C# jeziku (SDK).

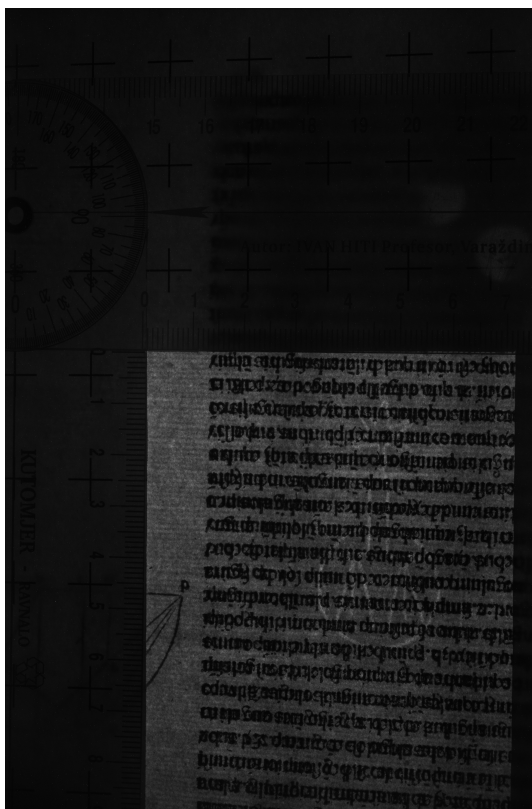
Multispektralni sustavi zahtijevaju automatsko prikupljanje podataka i kontrole. To uključuje snimanja slika na određenim valnim duljinama, sinkronizaciju kamere s izvorom osvjetljenja i veliku preciznost. Nakon toga slijedi obrada i analiza prikupljenih podataka.



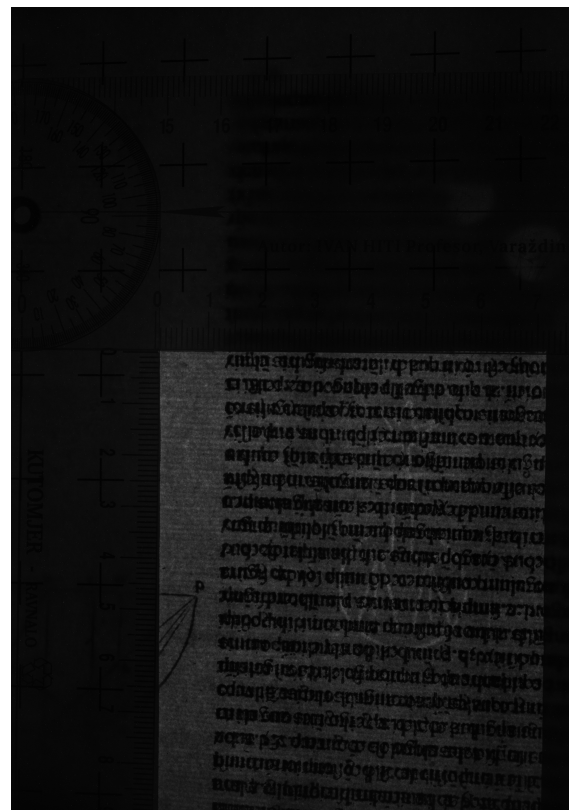
Slika 10: Sustav multispektralne kamere

3.3. Prikupljanje podataka – postupak snimanja vodenih znakova

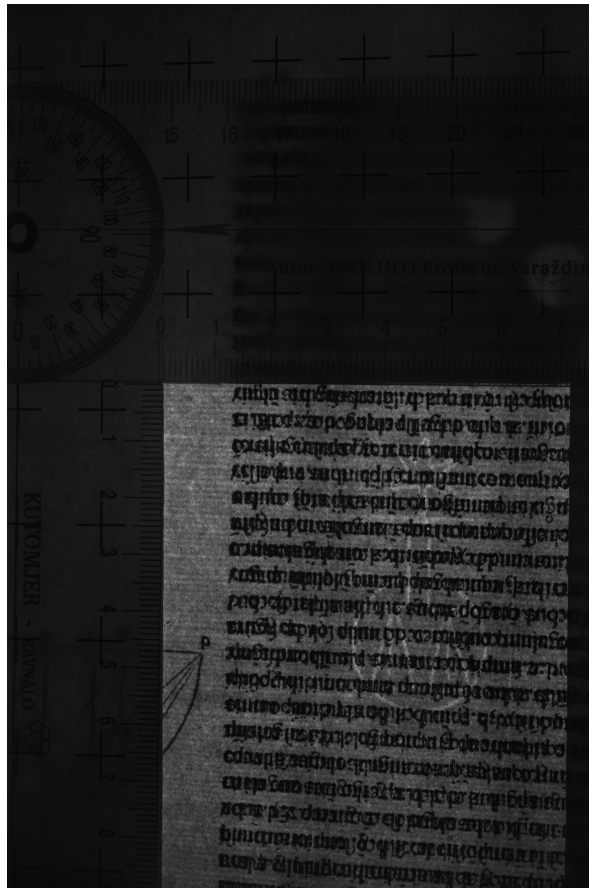
Za postavljanje sustava multispektralne kamere potrebno je postaviti kameru na stativ te dodati objektiv ispod kojeg se postavljaju filteri. Odabrana knjiga sa vodenim znakovima postavljena je na udaljenosti od 33 cm ispod kamere. Ispod odabrane stranice postavljena je svjetlosna ploča kojom se postiže prosvjetljivanje papira kako bi se pomoću filtera koji emitiraju različite valne duljine postigao najbolji rezultat. Prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela rada utvrđeno je da se rezultati najbolje prikazuju korištenjem dva filtera valnih duljina 430 i 450 nm. Svjetlosna ploča svijetlila je plavo svijetlo te su se najbolji rezultati postizali upravo u valnim duljinama plave svjetlosti. Iz tog razloga fokus je pao na valne duljine 430 i 450 nm te se za svaku od njih snimilo po tri uzorka različitih ekspozicija kako bi se osigurala pouzdanost rezultata.



a)

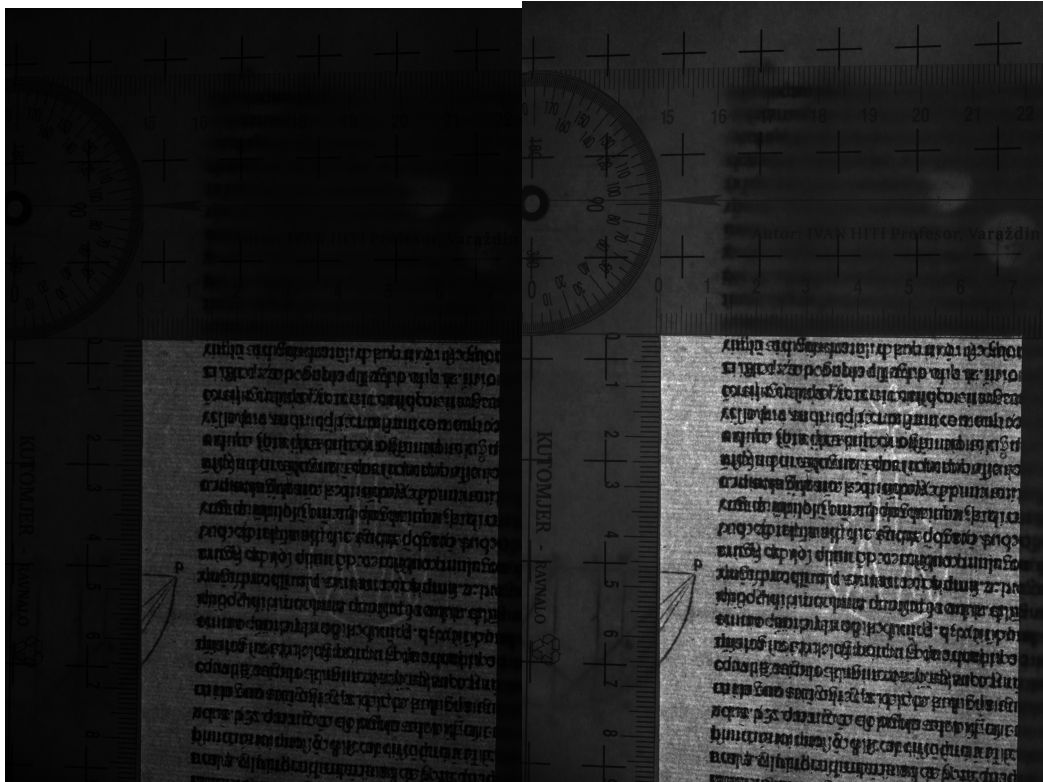


b)



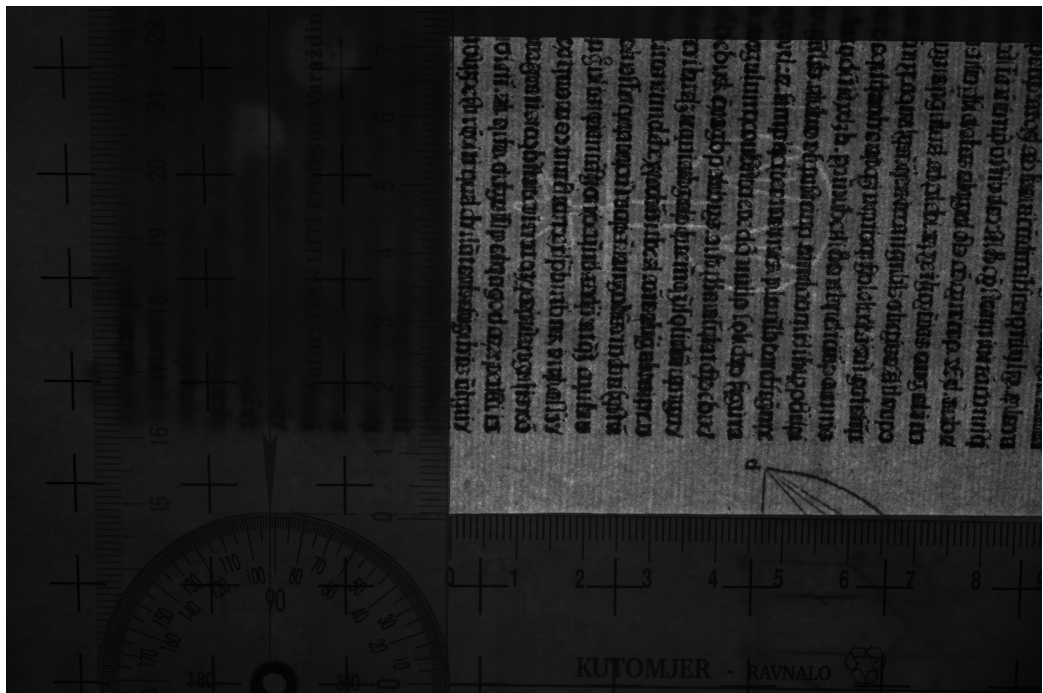
c)

Slika 11: uzorci snimljeni na 430 nm; a) uzorak 1 b) uzorak 2 c) uzorak 3



a)

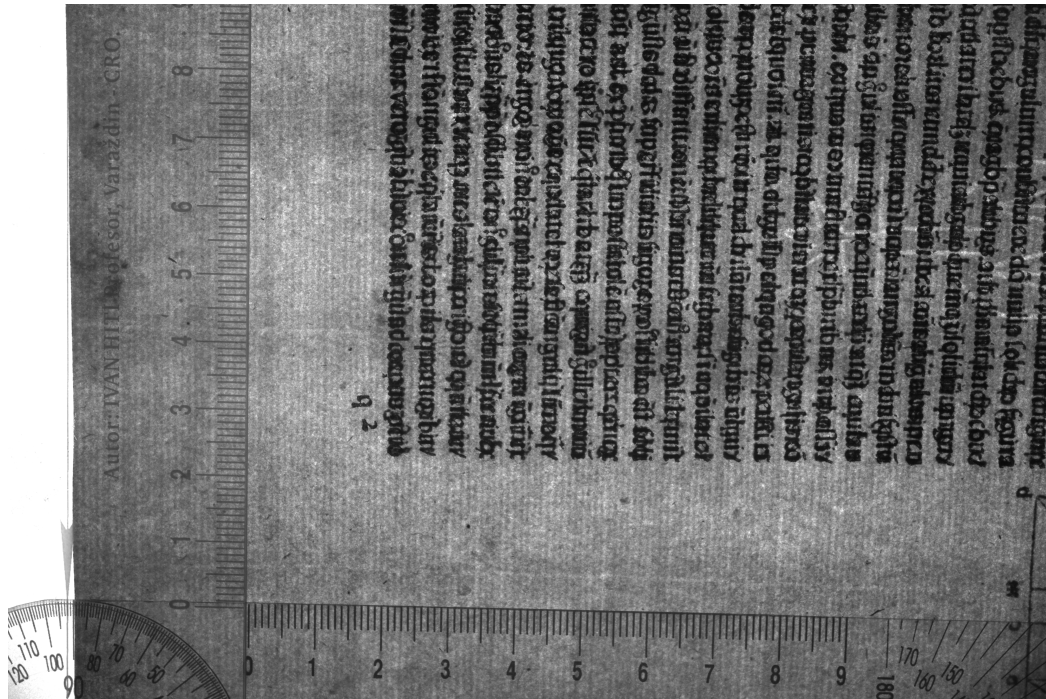
b)



c)

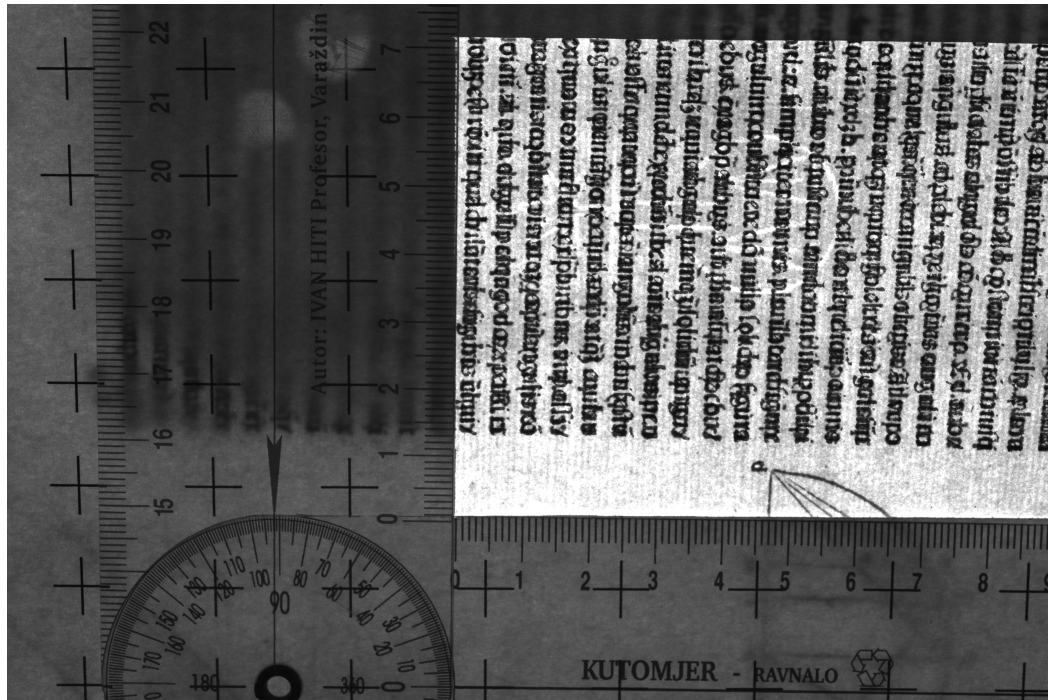
Slika 12: uzorci snimljeni na 450 nm a) uzorak 1 b) uzorak 2 c) uzorak 3

Uz to, kako bi se osiguralo točno pozicioniranje vodenog znaka između linija sita i kako bi se naknadno moglo proučavati i samo sito i njegova geometrija te uzorak njegovog rasporeda, posebno su se snimali rubni dijelovi papira.



Slika 13: Uzorak snimljen na 450nm

Pored svakog uzorka postavljeno je i ravnalo kako bi se u naknadnoj analizi prikupljenih podataka osigurali što precizniji i relevantni podaci. Snimljen je i uzorak bez filtera koji omogućuje detaljnu i potpunu dokumentaciju.



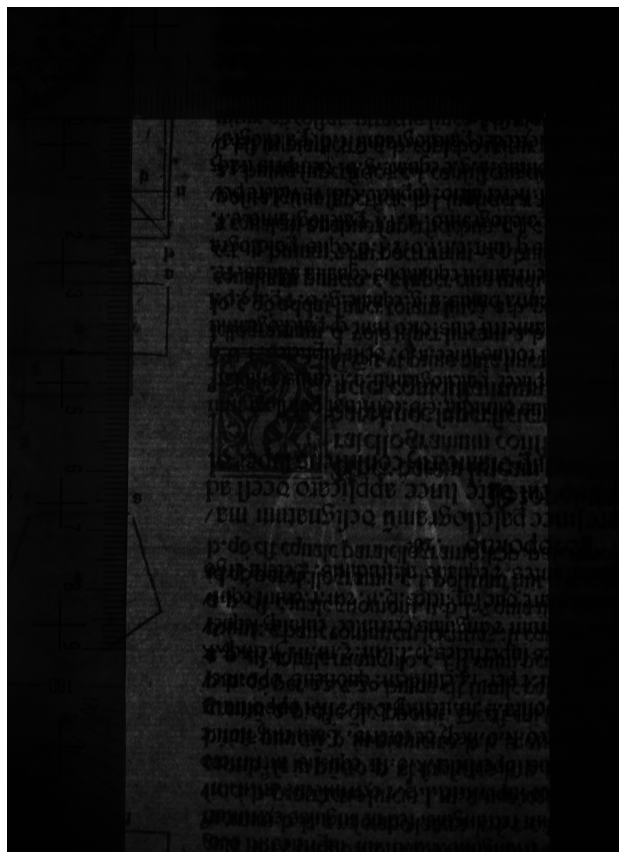
Slika 14: Uzorak snimljen bez korištenja filtera

Kako bi se osigurala dosljednost i minimalna pogreška u eksperimentu, poštovali su se strogi protokoli tijekom cijelog procesa snimanja. Unutar prostorije nije bilo vanjske svjetlosti ni druge rasvjete osim one korištene pomoću svejtlasne ploče. Postiglo se minimalno pomicanje cijelog sustava kako prilikom mijenjanja filtera kao i kod okretanja stranica knjige. Postigla se statičnost cijelog sustava uz minimalno odstupanje.

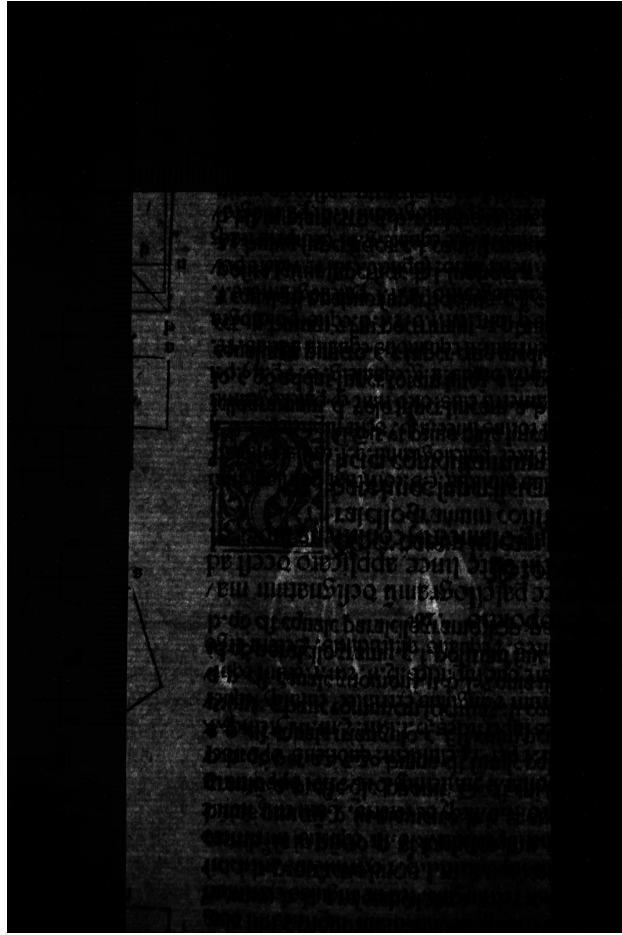
3.4. Obrada podataka

Postobrada prikupljenih uzoraka u ovom diplomskom radu obrađena je korištenjem Adobe programa Photoshop i Illustrator. Prvi korak u postobradi bio je obrada snimljenih fotografija u Photoshopu. Za svaku fotografiju izvršeno je čišćenje šumova kako bi se osigurala jasnoća i kvaliteta slike. Nadalje, primijenjena je izmjena osvjetljenja kako bi se najbolje istaknuo vodeni znak i kako bi se vizualno odvojio od ostatka teksta koji se nalazi preko vodenog znaka.

U postupku obrade korišteni su različiti alati dostupni u Photoshopu, uključujući filter Smart Sharpen za poboljšanje oštrote slike, Brightness/Contrast za prilagodbu svjetline i kontrasta, te alati poput Curves, Exposures i Levels za preciznu kontrolu tonaliteta i ekspozicije. Svaka fotografija se zasebno uređivala kako bi se osigurala optimalna obrada i prilagodba za svaki uzorak te su se za svaku fotografiju koristili odabrani različiti alati.

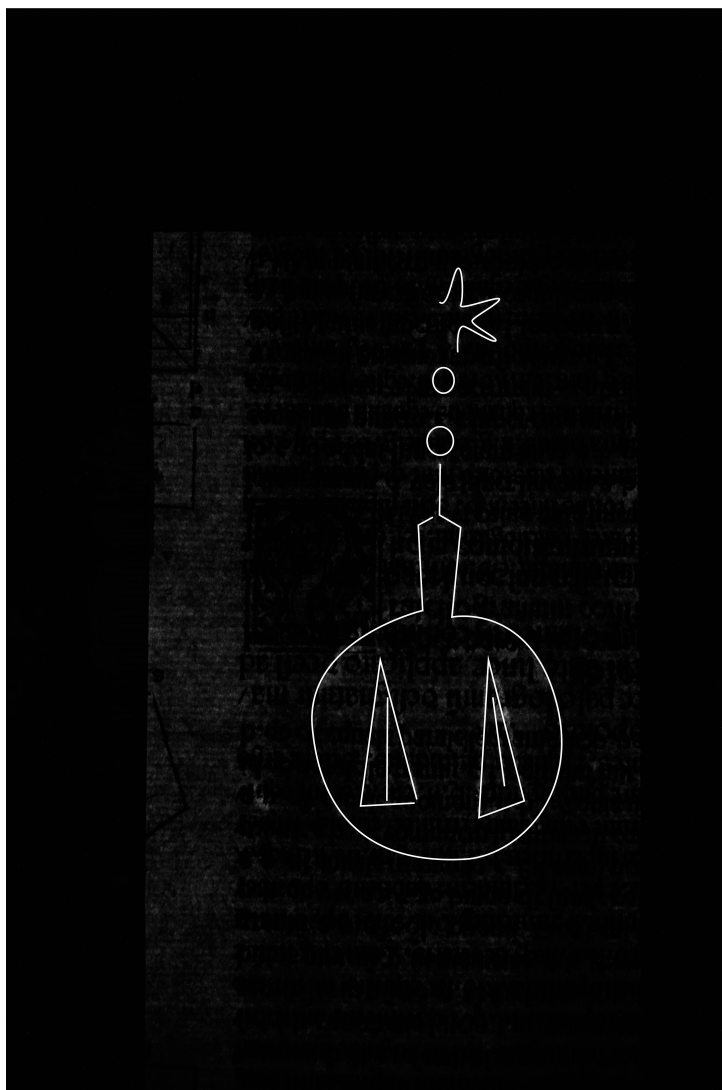


Slika 15: original prije obrade



Slika 16: Uzorak nakon obrade

Nakon završene obrade u Photoshopu, slike su dalje obrađivane u Adobe Illustratoru. U Illustratoru su se fotografije slagale jedna na drugu kako bi se uskladile i omogućilo precizno postavljanje vodenog znaka. Kroz ovaj postupak, vodeni znak je iscrtavan preko složenih slika te su se preko svake zasebne slike nadopunjavali detalji kako bi se što bolje iscrtao vodeni znak. U programu Illustrator korišteni alat je Line Segment tool.



Slika 17: Isertani motiv vodenog znaka

Koristeći Photoshop i Illustrator osiguravamo točnost, profesionalnost i kreativnu fleksibilnost u postobradi prikupljenih uzoraka. Ovi napredni alati omogućuju postizanje najboljih rezultata u analizi i interpretaciji podataka, što je od ključne važnosti za postizanje pouzdanih i relevantnih rezultata u ovom istraživanju.

4. REZULTAT I RASPRAVA

Primjenom multispektralnog snimanja i tehnika slikovne analize dobiveni rezultati omogućuju detaljnije proučavanje tehnologije tiska na poznatim primjercima Hrvatske pisane kulturne baštine. Pomoću ove tehnologije mogu se dublje istraživati i analizirati ključne karakteristike tiskanih dokumenata, kako bi se putem dobivenih rezultata pristupilo identifikaciji i autentifikaciji drugih dokumenata za koje se pretpostavlja da bi mogle potjecati od istih autora, tiskara i proizvođača papira.

Ovim istraživanjem teži se prema boljem razumijevanju tehnologije tiska kroz povijest i njezinih karakteristika koje se često gube s vremenom, vanjskim utjecajima i oštećenjima. Ovom metodom snimanja i prikupljanja podataka mogu se otkriti skrivena obilježja, tajni znakovi i druge komponente koje bi mogle pomoći u razlikovanju originalnih dokumenata od potencijalnih krivotvorina.

Ključna uloga istraživanja je razvoj smjernica za zaštitu fizičkog oblika povijesnih dokumenata i knjiga. Metoda multispektralnog snimanja omogućuje bezkontaktni pristup uzorcima, čime se minimizira njihova izloženost vanjskim utjecajima i potencijalnim novim oštećenjima. Na ovaj način čuva se originalnost i autentičnost kulturne baštine za buduće generacije. Postobradom vodeni znakovi se vektoriziraju te se na taj način digitaliziraju i arhiviraju kako bi se omogućio pristup dokumentima bez potrebe za direktnim rukovanjem originalima. Ovaj pristup pridonosi očuvanju Hrvatske kulturne baštine i zaštiti povijesnih dokumenata.

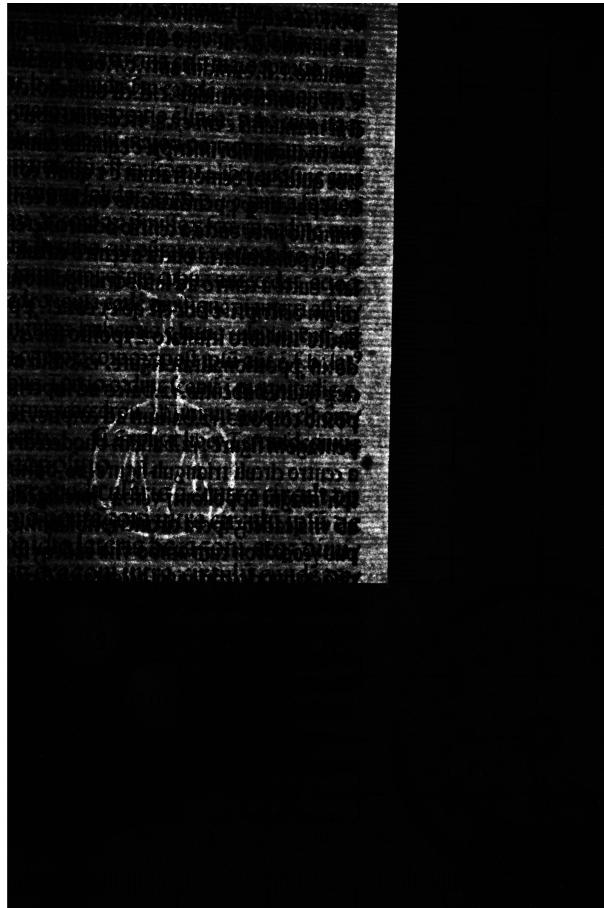
4.1. Evaluacija i rezultati

Krajnji rezultat ovog istraživanja su vektorizirani i digitalizirani vodeni znakovi. Najveća zapreka bila je stvoriti dovoljno dobar kontrast u obradi slike kako bi se vodeni znak istaknuo u odnosu na tiskani tekst koji se nalazi preko njega. Rezultati su dani primjerima nize:

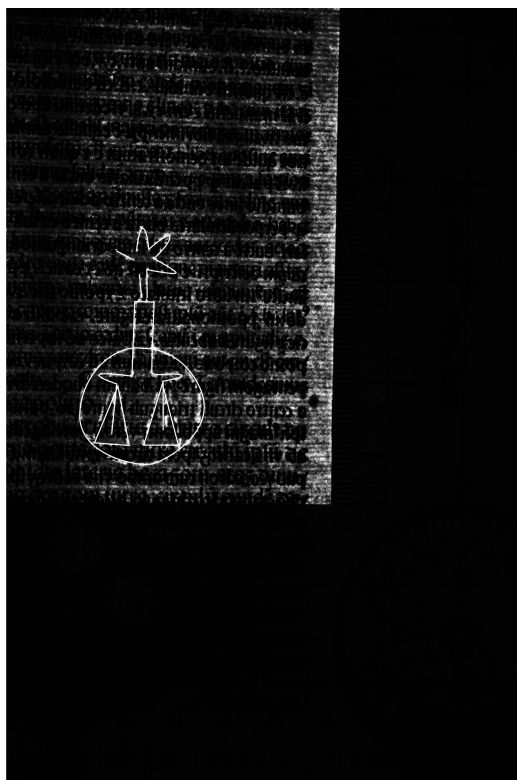
Primjer 1.

Vaga u krugu

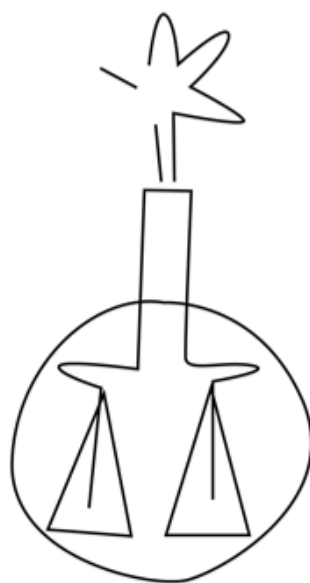
Na slici a) može se uočiti istaknuti vodeni znak prije procesa iscrtavanja. Na nekoliko mjesta uočavaju se prekidi linije vodenog znaka a razlog toga je jer se tiskani tekst preklopio te su se izgubili maleni dijelovi tog znaka. Slika b) prikazuje proces iscrtavanja vodenog znaka. Dijelovi znaka koji se ne vide na samoj slici nisu se iscrtavali do kraja nego se daljnjim istraživanjem i usporedbom iz kataloga vodenih znakova prepoznavali ostale informacije koje nedostaju. Ovaj vektorizirani znak prikazan je na slici c).



a)



b)



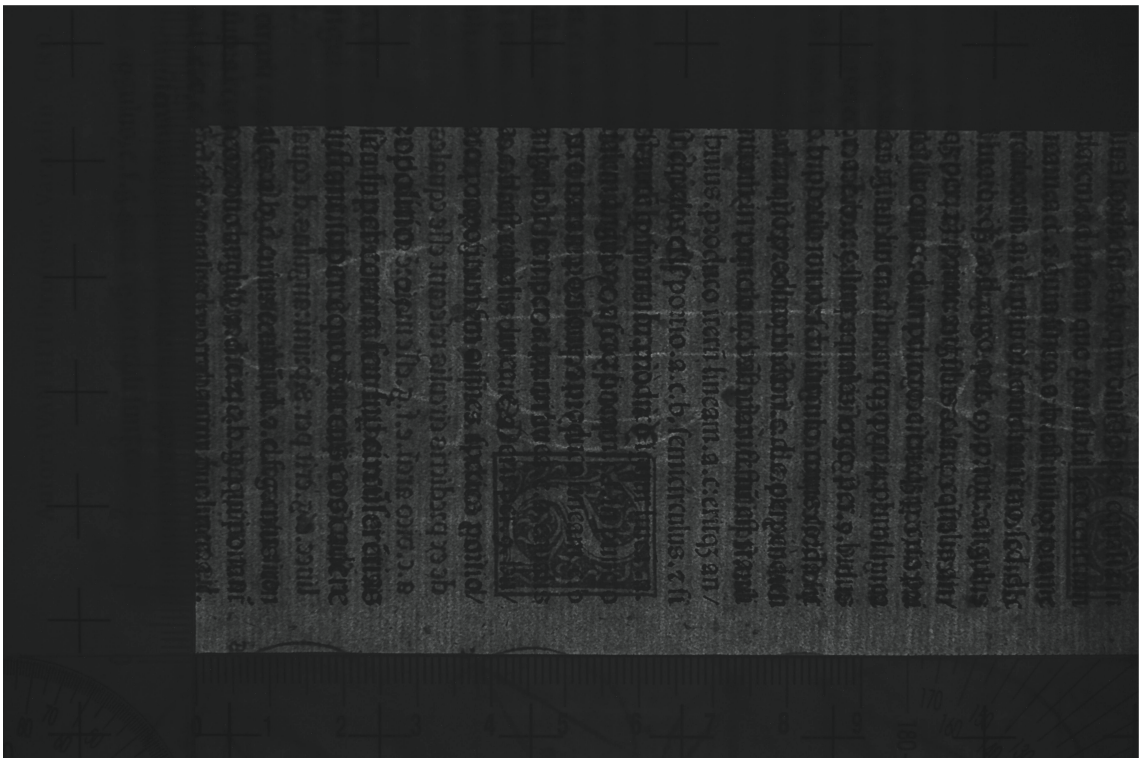
c)

Slika 18: a) uzorak prije iscrtavanja, b) uzorak tijekom iscrtavanja, c) digitalizirani uzorak

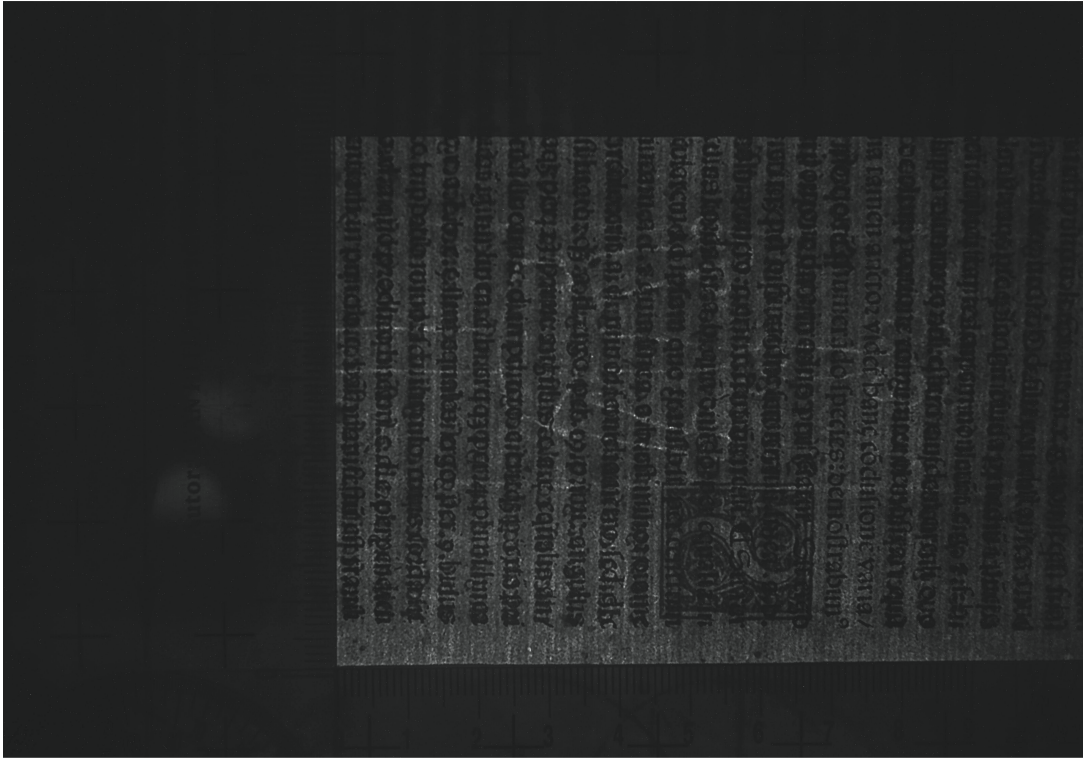
Primjer 2.

Bikova glava

Vodeni znak prikazan na slici () nazvan je „Glava bika“ te prikazuje simbol bika sa krunom. Ovaj vodeni znak ima širinu 159 mm i visinu 35,5 mm. Zbog svoje pozicije i veličine sniman je iz dva dijela. Prvi dio sniman je gornji dio uzorka prikazan na slici 19. Nakon toga uzorak se premjestio kako bi se mogao snimiti donji dio uzorka prikazan na slici 20.

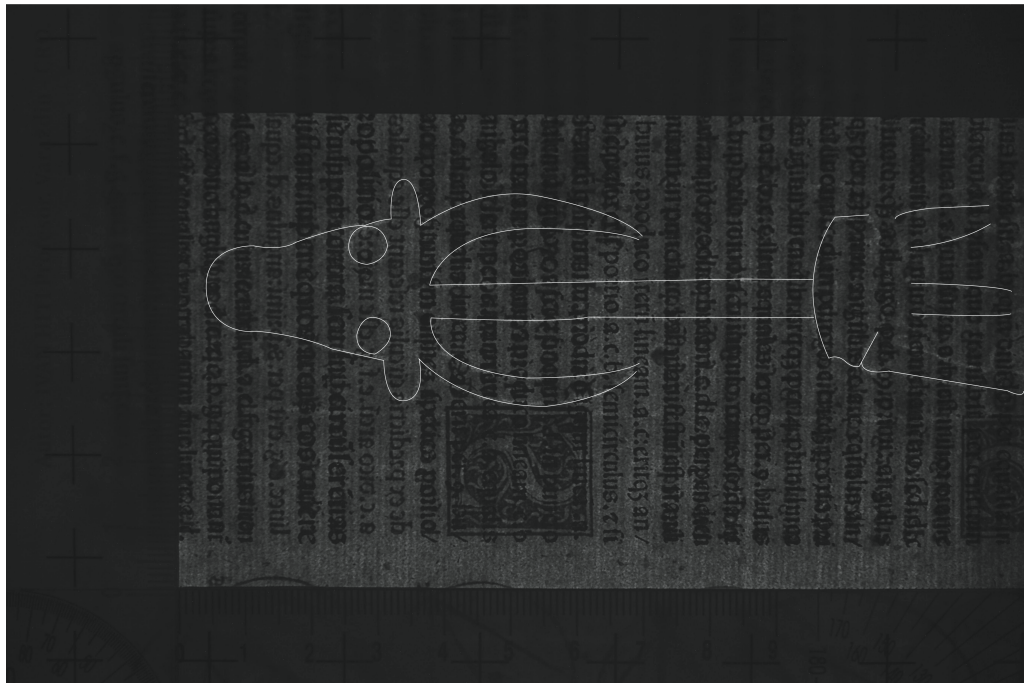


Slika 19: Gornji dio uzorka

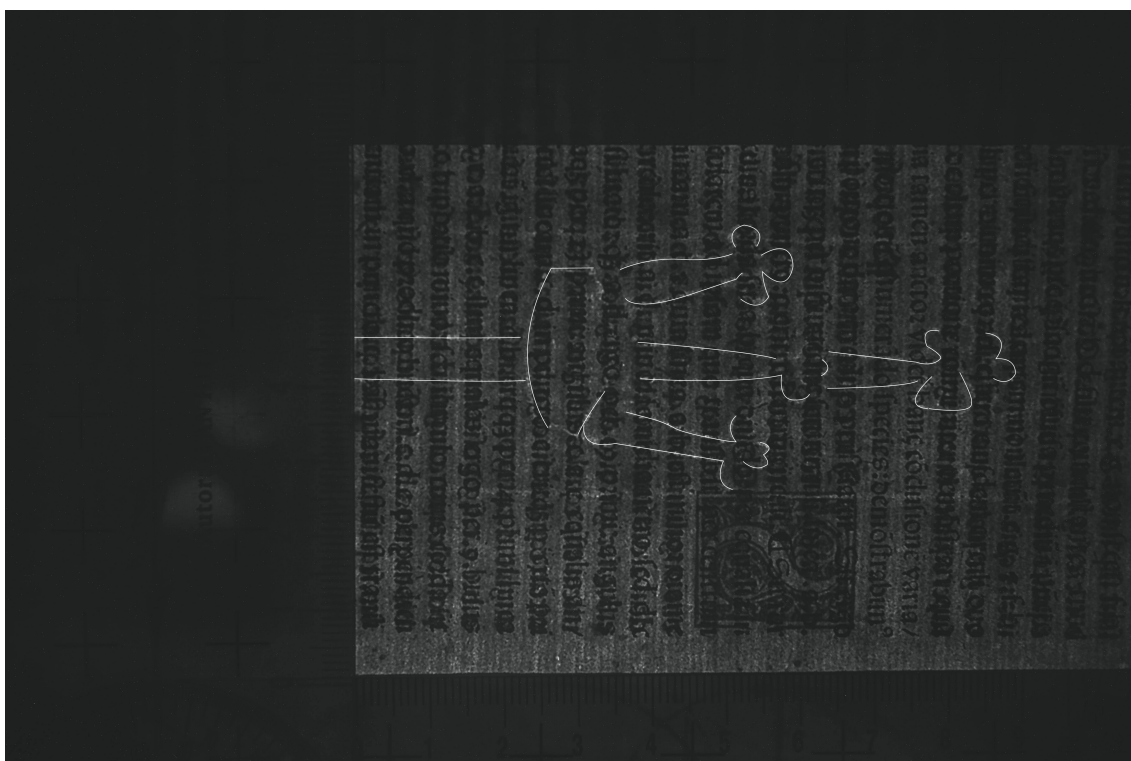


Slika 20: Donji dio uzorka

Uzorak se iscrtavao također iz dva dijela.

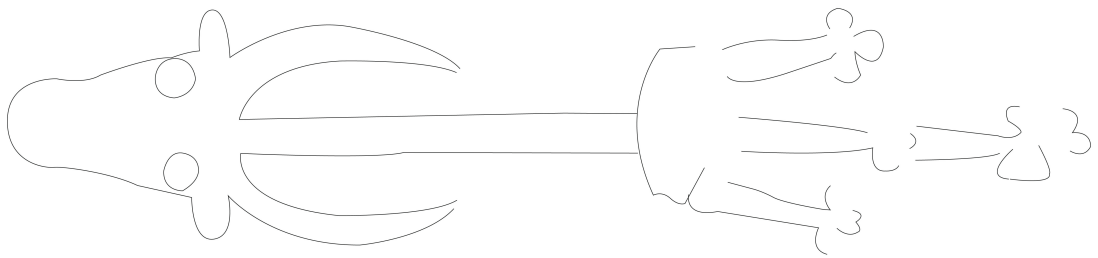
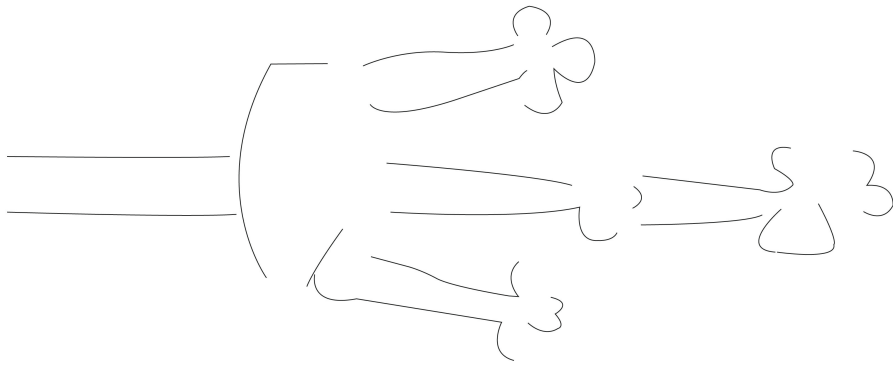
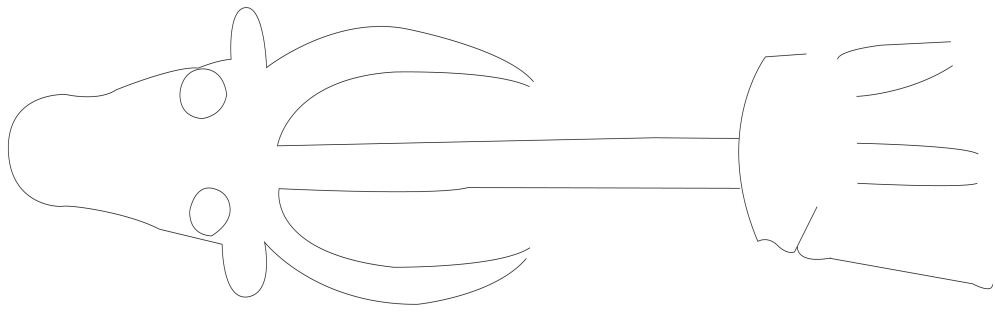


Slika 21: Iscrtani gornji dio uzorka



Slika 22: Iscrtani donji dio uzorka

Konačni rezultat nastao je spajanjem gornjeg i donjeg dijela i prikazan je u narednim slikama.



Slika 23: Prikaz spajanja dva dijela znaka u konačni rezultat

5. ZAKLJUČAK

Multispektralno snimanje predstavlja nezaobilazan alat u procesu digitalizacije, posebno kada je potrebno otkriti skriveni tekst ili dokumentirati kulturnu baštinu. Ova tehnika pruža značajne prednosti kroz svoju sposobnost otkrivanja informacija koje bi bile inače nedostupne ili teško uočljive konvencionalnim metodama. Jedna od ključnih prednosti multispektralnog snimanja je sposobnost otkrivanja teksta koji je precrtan, izbljedio ili čak namjerno izbrisan. Primjenom ove metode nestale informacije mogu se ponovno obnoviti.

Ovaj rad dokazao je da se primjena multispektralnog snimanja može koristiti u očuvanju kulturne baštine. Specifično u ovom radu digitalizirali su se vodeni znakovi i to ne samo oni koji su bili vidljivi golim okom nego i oni koje je bilo teško uočiti bez primjene multispektralnog sustava. Ovaj sustav ima veliku prednost u odnosu na konvencionalni postupak jer nema fizičkog dodira sa uzorcima a samim tim se i smanjuje šansa za fizičko oštećenje uzoraka.

Osim toga, multispektralno snimanje pruža mogućnost detaljne analize uzoraka koji su korišteni u povijesnim dokumentima. To otvara mogućnosti za dublje razumijevanje tehničkih aspekata proizvodnje, evolucije uzoraka kroz vrijeme te omogućuje pristup informacijama koje pomažu u istraživanju povijesti umjetnosti, književnosti i tehničkog napretka.

Kroz ovu tehnologiju, nasljeđuje se bogato kulturno naslijeđe, istražuje se povijest i osiguravaju se vrijedne informacije koje su dostupne za buduće generacije.

6. LITERATURA

- [1] M. Tomić, L. Grzunov, Ž. Eškinja MOGUĆNOSTI I PRETPOSTAVKE FILIGRANOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA U KONTEKSTU ISTRAŽIVANJA ZADARSKE GLAGOLJSKE BAŠTINE, 2020. dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/367425>
- [2] 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
- [3] 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
- [4] V. Zelenčić, Izrada multispektralne kamere, Sveučilište u Splitu, diplomski rad, 2020.
- [5] Hecht, E. (2017). Optics (5th ed.). Pearson.
- [6] A. Tonazzini et al., “Analytical and mathematical methods for revealing hidden details in ancient manuscripts and paintings: A review,” J. Adv. Res., vol. 17, 2019.
- [7] C. Jones, W. A. Christens-Barry, M. Terras, M. B. Toth, and A. Gibson, “Affine registration of multispectral images of historical documents for optimized feature recovery,” Digit. Scholarsh. Humanit., vol. 0, no. 0, pp. 1–14, 2019.
- [8] W. A. Christens-Barry, “Narrowband Multispectral Imaging Light Exposure,” 2019.
- [9] R. Qureshi, M. Uzair, K. Khurshid, and H. Yan, “Hyperspectral document image processing: Applications, challenges and future prospects,” Pattern Recognit., vol. 90, pp. 12–22, 2019
- [10] The History of Paper and Watermarks from the Middle Ages to the Modern Period, Bull’s Head and Mermaid, Vienna 2009
- [10] R. L. Easton Jr., C. F. Carlson, and K. Sacca, “Multispectral Processing Methods to Recover Text from the World Map by Martellus (c . 1491),” in Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 2018, pp. 1–8.
- [11] H. Geismar, Museum Object Lessons for the Digital Age. London: UCL Press, 2018.
- [12] T. Peery and D. Messinger, “MSI vs. HSI in cultural heritage imaging,” in Imaging Spectrometry XXII: Applications, Sensors, and Processing, 2018, no. 107680G, pp. 1– 15.

- [13] Federal Agencies Digital Guidelines Initiative, "Technical Guidelines for Digitizing Cultural Heritage Materials: Creation of Raster Image Files," 2016.
- [14] Technical Guidelines for Digitizing Cultural Heritage Materials Third Edition 2023. https://www.digitizationguidelines.gov/guidelines/FADGI%20Technical%20Guidelines%20for%20Digitizing%20Cultural%20Heritage%20Materials_3rd%20Edition_05092023.pdf
- [15] T. Hanneken, "Integrating Spectral and Reflectance Transformation Imaging Technologies for the Digitization of Manuscripts and Other Cultural Artifacts," *Anc. Worlds Digit. Cult.*, vol. 1, pp. 180–195, 2016.
- [16] I. El-Rifai, H. Mahgoub, and A. Ide-Ektessabi, "Multi-spectral Imaging System (IWN) for the Digitization and Investigation of Cultural Heritage," in *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation and Protection*, 2016, pp. 232–240
- [17] M. Gargano, D. Bertani, M. Greco, J. Cupitt, D. Gadia, and A. Rizzi, "A Perceptual Approach to the Fusion of Visible and NIR Images in the Examination of Ancient Documents," *J. Cult. Herit.*, vol. 16, no. 4, pp. 518–525, 2015.
- [18] L. Pronti, P. Ferrarai, F. Uccheddu, A. Pelagotti, and A. Piva, "Identification of pictorial materials by means of optimized multispectral reflectance image processing," in *2015 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security, WIFS, 2015*, pp. 1–6.
- [19] F. Hollaus, M. Gau, R. Sablatnig, W. A. Christens-Barry, and H. Miklas, "Readability Enhancement and Palimpsest Decipherment of Historical Manuscripts," in *Codicology & Palaeography in the Digital Age 3*, Norderstedt: BoD, 2015, pp. 31–46.
- [20] A. Camba, M. Gau, F. Hollaus, S. Fiel, and R. Sablatnig, "Multispectral Imaging, Image Enhancement, and Automated Writer Identification in Historical Manuscripts," *Manuscr. Cult.*, vol. 7, pp. 83–91, 2015.
- [21] Cosentino, A. Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method. *herit sci* 2, 8 (2014). <https://doi.org/10.1186/2050-7445-2-8>
- [22] Maturi, E., et al. (2017). "Limitations of multispectral imaging for material classification." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1208-1221.
- [23] Li, X., et al. (2020). "Limitations of multispectral imaging in detecting and quantifying chlorophyll content in plant leaves: A case study with green algal cultures." *Remote Sensing*, 12(2), 280.
- [24] Pifferi, A., et al. (2018). "Limitations of multispectral imaging to assess tissue oxygen saturation." *Journal of Biomedical Optics*, 23(1), 016006.

- [25] Targowski, P., et al. (2019). "Limitations of visible-induced luminescence imaging technique for the noninvasive analysis of pigments in works of art." *Applied Spectroscopy*, 73(5), 523-534.
- [26] Yoon, J. (2015). "Limitations of multispectral imaging for cultural heritage imaging." *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 10(6), 97-104.

7. POPIS MANJE POZNATIH RIJEČI I AKRONIMA

MSI Multispektralno snimanje

HSI Hiperspektralno snimanje

IR (eng. Infrared) – infracrveni

UV (eng. ultraviolet) – ultraljubičasto

RGB (eng. Red, Green, Blue) – crvena, plava, zelena

NIR (eng. Near Infrared) – blisko infracrveno

PCB (eng. Printed Circuit Board) – printana matična ploča

LED (eng. Light Emitting Diode) – svjetleća dioda