



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Dinka Radonić

**SUSTAV SIMULTANOGA ZAPISA
MULTISPEKTRALNE
FOTODOKUMENTACIJE I
STEREOSKOPSKE
VIDEODOKUMENTACIJE U
VIZUALNOM I BLISKO INFRACRVENOM
SPEKTRU**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Dinka Radonić

**SUSTAV SIMULTANOGA ZAPISA
MULTISPEKTRALNE
FOTODOKUMENTACIJE I
STEREOSKOPSKE
VIDEODOKUMENTACIJE U
VIZUALNOM I BLISKO INFRACRVENOM
SPEKTRU**

DOKTORSKI RAD

Mentorica:
prof. dr. sc. Jana Žiljak Gršić

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Graphic Arts

Dinka Radonić

**A SYSTEM FOR THE SIMULTANEOUS
RECORDING OF MULTISPECTRAL
PHOTODOCUMENTATION AND
STEREOSCOPIC VIDEODOCUMENTATION
IN THE VISUAL AND NEAR-INFRARED
SPECTRUM**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
prof. Jana Žiljak Gršić, PhD

Zagreb, 2026.

BIOGRAFIJA MENTORICE

Prof. dr. sc. Jana Žiljak Gršić

Rođena je 1972. godine u Zagrebu. Nakon završenog Pedagoškog obrazovnog centra „Bogdan Ogrizović“ diplomirala je na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na Studiju dizajna 1996 godine. Magistrirala je 2005. godine na Grafičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu s temom „Novi višebojni rasterski elementi u dizajnu individualizacije vrijednosnih papira“. Doktorirala je na Grafičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2008. godine s temom „Modeliranje rasterskih elemenata u stohastičkoj višebojnoj reprodukciji“ i stekla akademski stupanj doktorice znanosti iz znanstvenog područja tehničkih znanosti, znanstvenog polja grafičke tehnologije.

Sudjelovala je na ukupno deset znanstvenih, stručnih i tehnoloških projekata odobrenih od strane Ministarstva znanosti i obrazovanja i mladih te Hrvatske zaklade za znanost. Sa suradnicima ima registrirane patente u Državnom zavodu za intelektualno vlasništvo: Zaštita reprodukcije portreta sa sigurnosnim portretom, ZRGB aparatura za dualnu detekciju i Infracrveni tisak s procesnim bojama.

Dekanica je Tehničkog veleučilišta u Zagrebu od 2021. do 2026. godine na kojem je zaposlena je od 2002. godine. Vanjska je suradnica na Sveučilištu Sjever gdje predaje na diplomskom i doktorskom studiju. Kao vanjski suradnik predaje na doktorskom studiju Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Redovita je članica Akademije tehničkih znanosti Hrvatske i tajnica Odjela grafičkog inženjerstva. Osnivačica je i članica uredništva časopisa Polytechnic and Design u izdanju Tehničkog veleučilišta u Zagrebu. Voditeljica je i urednica zbornika stručno-znanstvenog skupa Tiskarstvo i dizajn koji se održava pod pokroviteljstvom HATZ-a. Članica je više stručnih vijeća i stručnih povjerenstava. Redoviti je član Hrvatskog dizajnerskog društva. Stalni je sudski vještak za područje grafičke tehnologije i područje dizajna.

Aktivno je sudjelovala u razvoju nastavnog plana i programa Informatičko-računarskog odjela TVZ-a, koncipirala je program smjera Informatički dizajn na stručnom i diplomskom studiju informatike. Uvela je brojne kolegije iz područja dizajna, sigurnosne grafike, web dizajna, 3D

modeliranja, vizualnog komuniciranja, i inovacija na kojima predaje. Sudjelovala je u pokretanju novog studijskog programa Informacijska sigurnost i digitalna forenzika TVZ-a te na internacionalizaciji navedenog studijskog programa. U dva mandata bila je voditeljica stručnog studija informatike i u dva mandata pročelnica Informatičko-računarskog odjela TVZ-a.

Autorica je udžbenika Sigurnosna grafika u izdanju Tehničkog veleučilišta u Zagrebu i Dizajn vizualnih komunikacija u izdanju Školske knjige, skripte Grafički dizajn u izdanju Tehničkog veleučilišta u Zagrebu i udžbenika Računalna grafika u izdanju Tehničkog veleučilišta u Zagrebu.

Objavila je brojne stručne radove od kojih su i oni u suradnji sa studentima TVZ-a (CROSBİ Profil: 34737, MBZ: 264064), ORCID ID: 0000-0002-1190-5003.

ZAHVALA

SAŽETAK

Mul3spect je sustav za bilježenje multispektralnog i stereoskopskog sadržaja koji omogućuje spektralno i dimenzionalno proširenu reprodukciju stvarnosti. Sustav se sastoji od triju kamera postavljenih na zajedničku nosivu konstrukciju, pri čemu se interesno područje istodobno snima multispektralno u vidljivim i blisko infracrvenim pojasevima te u stereoskopskoj tehnici. Na taj se način isti prizor bilježi kroz više komplementarnih informacijskih slojeva, čime se fotografski i videozapis nadopunjuju podacima koji nisu dostupni uobičajenim metodama snimanja.

Multispektralnim zapisom podataka omogućuje se proširen grafički prikaz materije. Takav pristup može omogućiti izdvajanje detalja koji u standardnom vizualnom prikazu nisu jasno uočljivi ili se dovoljno ne razlikuju od drugih struktura u promatranom području. Stereoskopska komponenta sustava dodatno proširuje dokumentacijski potencijal jer omogućuje doživljaj dubine i prostornosti koji nije ostvariv u dvodimenzionalnom videozapisu. Time se korisniku omogućuje jasnija percepcija prostornih odnosa i struktura unutar snimljenog prizora.

Definirani su procesi izrade multispektralnog fotografskog zapisa i stereoskopskog videozapisa, te mogućnosti njihove obrade i reprodukcije. Na taj se način omogućuje pregled materijala na zahtjev te usporedba istog prizora kroz različite spektralne i prostorne prikaze.

U radu se ispituje primjena dizajniranog sustava u operacijskoj sali te se predstavlja inovativni model dokumentacije kirurških postupaka. Sustav je zamišljen kao alat za stvaranje dopunskog multimedijskog edukativnog materijala koji omogućuje naknadni pregled operacijskog tijeka iz optimalne promatračke pozicije.

Mul3spect se stoga može promatrati kao eksperimentalni sustav koji povezuje multispektralno i stereoskopsko snimanje u svrhu zapisa vizualno i prostorno proširene dokumentacije materije.

Ključne riječi: multispektralno snimanje, stereoskopsko snimanje, fotodokumentacija, videodokumentacija

ABSTRACT

Photography and videography have increasingly become vital tools in modern scientific research, serving as supplementary or even primary methods for data collection and analysis. This doctoral thesis introduces Mul3spect, an innovative system enabling simultaneous multispectral and stereoscopic recording, offering a more comprehensive representation of reality through the integration of spectral and spatial dimensions. The Mul3spect system consists of three cameras mounted on a unified holder, allowing simultaneous acquisition of visual and near-infrared (NIR) photographic imagery, together with stereoscopic video documentation. This enables comprehensive analysis and integration of information from visible and invisible electromagnetic spectra.

Multispectral imaging is the process of acquiring images at various wavelengths to record spectral signatures - endmembers - that uniquely appear as a consequence of reflection, absorption, or emission of electromagnetic radiation depending on the composition of the object. It increases differentiation among various chromophores in biological tissue. Current uses for multispectral imaging are being seen in precision agriculture, art conservation, environmental monitoring, and biochemistry. Recent research has suggested that multispectral recording greatly enhances the detection of subtle spectral differences in tissues, greatly increasing differentiation of skin diseases. It provides accurate, efficient, and non-invasive methods for diagnosing and assessing dermatological diseases.

In addition, studies have shown that the parathyroid gland is autofluorescent when excited by a near-infrared source at 785 nm and has spontaneous autofluorescence emission at wavelengths of 820–830 nm, which improves tissue differentiation compared to surrounding areas. These spectral features highlight the great diagnostic value of multispectral imaging in clinical environments.

Stereoscopy, however, produces the illusion of depth through the presentation of two slightly different images, each relating to the perspective of a single eye. The human brain combines these images by stereopsis to achieve the sensation of depth. In the setting of surgical training, stereoscopic video recording greatly facilitates the comprehension and mastery of complex surgical techniques. Contemporary medical education, especially in surgery, requires innovative methods for acquiring skills due to the restricted nature of operative exposure. Ideal

positioning of assistants in the operating room is often compromised by operating room spatial limitations, with practical observational experiences thus limited to a few trainees simultaneously. Consequently, the utilization of stereoscopic recordings has become an invaluable teaching tool, improving cognitive processing and learning when compared with conventional two-dimensional materials.

The experimental part of this dissertation focuses on the integration of the Mul3spect system into the operating room environment during thyroid surgery. The generated multimedia content serves as supplementary educational material, enabling detailed postoperative analysis from optimal viewing perspectives outside the operating room. The recorded procedures support on-demand, multi-user observation and contribute to a better understanding of surgical complexities.

Initial experiments revealed the necessary modifications in camera configurations for close-range medical imaging. The Survey3N (OCN) and Survey3N (NGB) cameras, which were originally intended for agricultural remote sensing applications, needed modifications like macro filters to reduce minimal focal distances and polarized filters to manage glare. Additional infrared light sources were also added to enhance image quality. The original camera lenses have a horizontal viewing angle of 41 degrees and an equivalent focal length of 47 mm in relation to the standard 35 mm format, with an initial minimal focal distance of 455 cm. To accommodate the limited working distance in the operating environment, macro lenses were used to achieve sharp focus within a range of 10 - 50 cm.

Ultimately, this study proposes a systematic framework - a procedural workflow - for the effective deployment of the Mul3spect system, intended to extend conventional graphical representations through the integration of spectral and stereoscopic information. Although the experimental validation is conducted in the context of thyroid surgery, the Mul3spect system is conceived as a versatile imaging platform applicable across a broad range of disciplines and fields of work.

Keywords: multispectral imaging, stereoscopic imaging, photodocumentation, videodocumentation, Mul3spect system

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	Cilj i hipoteze istraživanja	6
1.2.	Plan istraživanja	7
1.3.	Znanstveni doprinos.....	10
2.	VIZUALNO I PROSTORNO PROŠIRENA DIMENZIJA SNIMANJA	11
2.1.	Multispektralno snimanje u vizualnom i blisko infracrvenom području	15
3.	KAMERE.....	19
3.1.	Kamera 1 (OCN).....	21
3.2.	Kamera 2 (NGB).....	22
3.3.	Kamera 3 (3D)	23
4.	EKSPERIMENTALNA PROBA KAMERA	25
4.1.	Kamera 1 (OCN) / Separacija kanala i analiza podataka.....	26
4.2.	Kamera 2 (NGB) / Separacija kanala i analiza podataka.....	30
4.3.	Kvantitativna analiza kvalitete slike eksperimentalnog snimanja	34
4.4.	Kamera 3 (3D) / Analiza rezultata	40
4.5.	Diskusija rezultata eksperimentalnog snimanja.....	41
5.	TEHNIČKA POSTAVA SUSTAVA MUL3SPECT.....	45
5.1.	Optimizacija tehničke postave sustava	46
5.2.	Oštrina, udaljenosti i ugradnja leća.....	52
5.3.	Rasvjeta.....	55
6.	RAW ZAPIS MULTISPEKTRALNOG MATERIJALA.....	58
7.	OPTIMIZACIJA SUSTAVA I PROTOKOLA SEPARACIJE KANALA	65
7.1.	Izrada kôda.....	67
7.2.	Rezultati probnog snimanja	72
7.2.1.	Kamera 1 (OCN) / 615nm, 490nm i 808nm	73
7.2.1.1.	Kanal O (615nm)	74

7.2.1.2.	Kanal C (490nm).....	75
7.2.1.3.	Kanal N (808nm)	76
7.2.2.	Kamera 2 (NGB) / 850 nm, 550 nm, i 475 nm	77
7.2.2.1.	Kanal N (850nm)	79
7.2.2.2.	Kanal G (550nm)	80
7.2.2.3.	Kanal B (475nm).....	81
8.	PRIMJENA MUL3SPECT SUSTAVA U STUDIJSKIM UVJETIMA	83
8.1.	Kamera OCN	85
8.1.1.	Kompozitna fotografija izravno iz kamere	86
8.1.2.	Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline.....	87
8.1.3.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 490 nm - cijan.....	88
8.1.4.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 615 nm - narančasti	89
8.1.5.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 808 nm - NIR	90
8.2.	Kamera NGB	92
8.2.1.	Kompozitna fotografija izravno iz kamere	92
8.2.2.	Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline.....	93
8.2.3.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 475 nm - plavi	94
8.2.4.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 550 nm - zeleni.....	95
8.2.5.	Spektralno razdvojeni kanal pri približno 850 nm - NIR	97
9.	PRIMJENA OPTIMIZIRANOG MUL3SPECT SUSTAVA U OPERACIJSKOJ SALI.....	99
10.	INTERVJUI	103
10.1.	doc. dr. sc. Krešimir Gršić, dr. med., glavni kirurg.....	105
10.2.	Filip Knezić, dr. med., specijalizant otorinolaringologije.....	108
10.3.	Nikolina Tomičić Šimac, glavna medicinska sestra.....	110
11.	ANKETNO ISTRAŽIVANJE.....	112
11.1.	3D/stereoskopska videodokumentacija.....	114
11.2.	Multispektralna fotodokumentacija	116

12. PRIMJENA U BUDUĆNOSTI I POTENCIJALNI DALJNI RAZVOJ	119
13. ZAKLJUČAK	121
14. POPIS LITERATURE	126
15. POPIS SLIKA	132
16. POPIS TABLICA	134
17. PRILOZI	135
17.1. Anketni upitnik	135
17.2. Prezentacija za anketu	140
18. ŽIVOTOPIS I POPIS RADOVA AUTORICE	142

1. UVOD

U suvremenom znanstvenom i tehnološkom kontekstu fotografski i videozapisi više se ne promatraju isključivo kao sredstva vizualne dokumentacije, nego kao važni istraživački alati koji omogućuju bilježenje, analizu i interpretaciju informacija koje nisu uvijek dostupne neposrednim promatranjem. Razvojem digitalnih slikovnih tehnologija proširene su mogućnosti prikaza prostora, strukture, teksture, boje i spektralnih svojstava snimanog objekta, čime su fotografske i video metode postale primjenjive u različitim znanstvenim disciplinama, uključujući medicinu, biokemiju, restauraciju umjetnina, nadzor okoliša, preciznu poljoprivredu i edukaciju. U tom se okviru posebno ističu multispektralne i stereoskopske tehnike snimanja, jer omogućuju proširivanje standardnog vizualnog prikaza: multispektralno snimanje proširuje informaciju izvan klasičnog RGB prostora, dok stereoskopsko snimanje uvodi prostornu komponentu i omogućuje percepciju dubine.

Ovaj se rad bavi multispektralnom tehnikom snimanja u kontekstu istraživanja razlikovanja informacija u vizualnim i blisko infracrvenim pojasevima, kao i stereoskopskom tehnikom koja omogućuje doživljaj dubine i prostornosti trodimenzionalnim videomaterijalom. Pritom se polazi od pretpostavke da istodobno bilježenje različitih spektralnih i prostornih informacija može proširiti interpretacijsku vrijednost slikovnog zapisa, osobito u situacijama u kojima je vizualna diferencijacija tkiva, površina ili anatomskih struktura ograničena standardnim fotografskim prikazom.

Multispektralno snimanje podrazumijeva snimanje slike u više odvojenih valnih područja elektromagnetskog spektra, pri čemu se bilježe razlike u refleksiji, apsorpciji ili emisiji zračenja ovisno o fizikalnim i kemijskim svojstvima snimanog objekta. Tako nastaju spektralni potpisi, odnosno endmemberi, koji mogu predstavljati jedinstvene obrasce odziva pojedinih materijala ili tkiva [1]. Za razliku od standardnog RGB zapisa, koji informaciju ograničava na tri široka i međusobno preklapajuća kanala vidljivog spektra, multispektralni pristup omogućuje izdvajanje užih spektralnih područja i usporedbu informacija koje se u konvencionalnoj slici stapaju u jedinstveni vizualni dojam.

U medicinskom kontekstu multispektralno snimanje posebno je zanimljivo jer različite biološke strukture i kromofori u tkivu mogu imati različita apsorpcijska i refleksijska svojstva u

pojedinin valnim duljinama. Takav pristup može pridonijeti boljem razlikovanju tkivnih struktura, površinskih promjena i drugih vizualno suptilnih obilježja koja standardnim snimanjem nisu dovoljno naglašena [2]. Multispektralno snimanje već se primjenjuje u brojnim područjima, uključujući preciznu poljoprivredu, nadzor okoliša, biokemijske analize, dermatologiju i restauraciju umjetnina [3–6]. Ta širina primjene pokazuje da se radi o fleksibilnoj slikovnoj metodi koja se može prilagoditi različitim istraživačkim potrebama.

Stereoskopija se temelji na stvaranju iluzije dubine prikazom dviju međusobno blago pomaknutih slika, pri čemu je svaka slika namijenjena jednom oku. Takav prikaz oponaša prirodni binokularni vid čovjeka, u kojem mozak na temelju malih razlika između slike lijevog i desnog oka oblikuje dojam dubine i prostornosti. Stereoskopski ili trodimenzionalni prikaz nastaje fuzijom dvaju slikovnih zapisa, a proces percepcije prostorne dubine naziva se stereopsija [7–9]. U edukacijskom i medicinskom kontekstu takav prikaz ima posebnu vrijednost jer omogućuje razumijevanje prostornog odnosa anatomskih struktura, kirurških instrumenata i operacijskog polja, što je u dvodimenzionalnom videozapisu izgubljeno.

Na temelju navedenih tehnoloških i istraživačkih polazišta, ovaj rad predlaže inovativni sustav za simultano bilježenje multispektralnih i stereoskopskih zapisa pod nazivom Mul3spect. Arhitektura sustava Mul3spect sastoji se od triju kamera postavljenih na zajednički nosač, čime se omogućuje istodobno snimanje istog područja interesa u vidljivim i blisko infracrvenim pojasevima te u stereoskopskoj tehnici. Sustav je zamišljen kao eksperimentalna platforma koja povezuje dvije komplementarne slikovne metode: multispektralnu, koja proširuje informaciju po spektralnoj osi, i stereoskopsku, koja proširuje informaciju po prostornoj osi. Takav pristup omogućuje detaljniju analizu sadržaja snimljenog prizora, uključujući informacije vidljive ljudskom oku, ali i informacije iz blisko infracrvenog područja koje standardna vizualna percepcija ne obuhvaća.

U eksperimentalnom dijelu rada sustav Mul3spect primjenjuje se za dokumentaciju kirurškog zahvata operacije štitnjače. Odabir ovakvog operacijskog konteksta temelji se na činjenici da kirurgija vrata uključuje anatomske složeno područje u kojem je prostorna orijentacija, razlikovanje tkiva i praćenje operacijskog tijeka od iznimne važnosti. Dobiveni slikovni i videomaterijal može se koristiti kao dopuna postojećim metodama dokumentacije i edukacije kirurških postupaka. Definiranjem radnog okvira i tehničkih specifikacija sustava omogućuje se višekorisničko promatranje operacijskog polja iz optimalne promatračke pozicije, izvan

operacijske sale i na zahtjev. Time se otvara mogućnost naknadne analize kirurškog postupka, edukacije studenata i specijalizanata te usporedbe različitih slojeva slikovnih informacija.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da snimanje slikovnih podataka u više valnih duljina može omogućiti detekciju suptilnih spektralnih varijacija u tkivima i time poboljšati diferencijaciju različitih stanja kože [10]. U području dermatologije multispektralno snimanje prepoznato je kao neinvazivna metoda koja može pridonijeti procjeni i prepoznavanju promjena povezanih s kožnim bolestima [11]. Iako se primjena u ovom radu ne odnosi izravno na dermatološku dijagnostiku, navedena istraživanja potvrđuju osnovno načelo relevantno za ovaj rad: različita tkiva i površine mogu se u pojedinim spektralnim područjima prikazivati drugačije nego u standardnom vidljivom prikazu. Upravo ta razlika čini multispektralno snimanje potencijalno vrijednim alatom za istraživanje dodatnih vizualnih informacija u kirurškom okruženju.

Posebno je važno istaknuti dosadašnja istraživanja vezana uz blisko infracrveno područje i endokrinu kirurgiju. Pokazano je da doštitne žlijezde mogu pokazivati autofluorescenciju kada se pobuđuju blisko infracrvenim izvorom svjetla valne duljine približno 785 nm, pri čemu se bilježi spontani signal u području oko 820–830 nm, često izraženiji od signala okolnog tkiva [12,13]. Iako sustav Mul3spect u ovom istraživanju ne zamjenjuje specijalizirane medicinske blisko infracrvene - NIR (eng. *Near Infra-red*) - fluorescencijske sustave, navedeni nalazi potvrđuju relevantnost blisko infracrvenog spektralnog područja u kontekstu operacija štitnjače i doštitnih žlijezda. Zbog toga uključivanje NIR kanala u eksperimentalni sustav može imati istraživačku vrijednost za procjenu mogućnosti dodatnog razlikovanja tkiva i površinskih struktura u operacijskom polju.

U suvremenom visokoškolskom medicinskom obrazovanju postoji izražena potreba za unaprjeđenjem metoda kojima se studentima i specijalizantima omogućuje usvajanje složenih praktičnih vještina. Specijalizacija iz opće kirurgije zahtjevnija je i uključuje svladavanje teorijskih znanja, tehničkih postupaka, prostorne orijentacije i donošenja odluka u realnim kliničkim uvjetima [14]. Kirurške vještine ne obuhvaćaju samo poznavanje anatomije i operacijskih postupaka, nego i sposobnost precizne manipulacije tkivom, razumijevanje odnosa među strukturama i primjenu uvježbanih motoričkih postupaka u dinamičnom operacijskom okruženju [15]. Međutim, neposredno sudjelovanje studenata u operacijskoj sali često je ograničeno organizacijskim, sigurnosnim i prostornim čimbenicima.

Problem ograničene vidljivosti operacijskog polja posebno je izražen u situacijama u kojima samo mali broj promatrača može zauzeti povoljan položaj uz operacijski stol. U idealnim uvjetima asistent bi se nalazio nasuprot glavnom kirurgu, što bi omogućilo optimalno praćenje operacijskog tijeka, ali u praksi položaj kirurga, asistenta, medicinske sestre, anesteziološkog tima i opreme često kompromitira vidljivost za dodatne promatrače [16]. U kontekstu operacije štitnjače to znači da samo ograničen broj studenata može istodobno pratiti rad glavnog kirurga iz položaja koji omogućuje razumijevanje operacijskog polja. Takvo ograničenje upućuje na potrebu za razvojem kvalitetnih, prostorno i spektralno informativnih audiovizualnih materijala koji se mogu koristiti u nastavi izvan same operacijske sale.

Učenje putem videozapisa u medicinskom obrazovanju bilježi značajan porast, osobito u posljednjem desetljeću [17,18]. Videoobrazovanje ima potencijalnu vrijednost u kirurškoj edukaciji jer omogućuje ponovljeno promatranje postupka, analizu pojedinih faza operacije, zaustavljanje i komentiranje ključnih trenutaka te dostupnost materijala većem broju korisnika. Sustavni pregledi pokazuju da video može biti učinkovit dodatak standardnim metodama poučavanja u kirurgiji te da može pridonijeti boljem usvajanju znanja u odnosu na isključivo tradicionalne oblike nastave [19,20]. U tom smislu, dokumentacija kirurškog zahvata ne predstavlja samo arhivski zapis, nego i potencijalno strukturiran edukativni materijal.

Dodatnu vrijednost imaju sustavi koji kombiniraju videozapis s prostornim ili trodimenzionalnim prikazom. Istraživanja pokazuju da hibridni edukacijski modeli, koji povezuju video i 3D animacije, mogu poboljšati ishode učenja u području ortopedske kirurgije, osobito u razumijevanju složenih anatomskih i proceduralnih odnosa [21]. Iako se navedeni primjer odnosi na ortopedsku kirurgiju, osnovno načelo primjenjivo je i na druge kirurške discipline: prostorno informativniji prikaz može smanjiti kognitivno opterećenje i olakšati razumijevanje operacijskog postupka. U tom se kontekstu stereoskopski zapis operacije štitnjače može promatrati kao važan doprinos edukacijskom potencijalu sustava Mul3spect, jer omogućuje promatranje dubine i odnosa struktura unutar operacijskog polja.

Preliminarni eksperimenti s kamerama integriranim u sustav Mul3spect pokazali su da je za primjenu u operacijskoj sali nužna prilagodba postojeće konfiguracije kamera. Kamere Survey3N OCN (orange/cyan/NIR) i Survey3N NGB (NIR/green/blue) izvorno su konstruirane za primjenu u agronomiji, prvenstveno za snimanje poljoprivrednih površina iz zraka pomoću bespilotnih letjelica i procjenu vegetacijskog stanja biljaka. Njihove konstrukcijske značajke,

uključujući kompaktnost, malu masu i spektralno definirane filtre, pogodne su za eksperimentalno multispektralno snimanje, ali nisu primarno prilagođene snimanju kirurškog polja iz blizine. Objektiv ima horizontalni vidni kut od 41 stupnja i ekvivalentnu žarišnu duljinu od 47 mm u odnosu na 35 mm format [22]. Budući da je minimalna fokalna udaljenost kamere približno 455 cm, a predviđena radna udaljenost u ovom istraživanju približno 10 - 30 cm, uvedene su makro predleće kako bi se područje oštine približilo senzoru i prilagodilo realnim uvjetima snimanja u operacijskoj sali.

Osim prilagodbe fokusa, preliminarni eksperimenti ukazali su i na potrebu kontrole odbljesaka i svjetlosnih uvjeta. Operacijsko polje karakterizira visoko reflektivno okruženje zbog prisutnosti vlažnog tkiva, kirurških instrumenata i snažnih operacijskih svjetala. Zbog toga su u sustav predviđeni polarizacijski filtri, čija je uloga smanjenje neželjenih refleksija i poboljšanje čitljivosti površinskih detalja. Dodatno, budući da standardna operacijska LED rasvjeta često ima ograničen doprinos u blisko infracrvenom području, uvedeni su dodatni infracrveni izvori svjetla kako bi se omogućilo funkcionalno snimanje NIR kanala. Time se sustav prilagođava specifičnim zahtjevima operacijskog okruženja, u kojem snimanje mora biti izvedivo bez narušavanja kirurškog tijeka i bez promjene uvjeta rada kirurškog tima.

U radu su stoga predviđeni multispektralna fotografska dokumentacija i stereoskopsko videosnimanje modificiranim kamerama koje su prethodno ispitane u eksperimentalnim uvjetima. Bilježenjem informacija u vidljivom i blisko infracrvenom području stvaraju se uvjeti za analizu različitih zapisanih spektralnih informacija, dok stereoskopski videozapis omogućuje prostornu interpretaciju operacijskog polja. Takav integrirani pristup ima potencijal proširiti mogućnosti kirurške dokumentacije i edukacije jer objedinjuje spektralnu diferencijaciju, prostorni prikaz i mogućnost višekorisničkog promatranja iz optimalne perspektive. Sustav Mul3spect time se postavlja kao eksperimentalna platforma za istraživanje proširenih oblika medicinskog slikovnog zapisa, s naglaskom na tehničku izvedivost, edukacijsku primjenjivost i mogućnost analize informacija koje nadilaze standardni vidljivi prikaz.

1.1. Cilj i hipoteze istraživanja

Cilj je istraživanja razviti hodogram postavljanja sustava za simultano dokumentiranje stereoskopskog i multispektralnog materijala u svrhu proširenja grafičkog prikaza materije i istraživanja informacija.

Postavljene su sljedeće hipoteze:

H1 Aktivnim upravljanjem sustavom Mul3spect za istodobno bilježenje multispektralnog i stereoskopskog zapisa može se razviti model za prošireni grafički prikaz materije.

H2 Računalnom obradom snimljenih multispektralnih podataka moguće je reproducirati pojedinačne zapise, zabilježene u spektralno izoliranim vizualnim i blisko infracrvenim pojasevima.

H3 Raščlambom podataka snimljenih dizajniranim sustavom omogućena je analiza zapisana multispektralnog sadržaja u vizualnim i blisko infracrvenim spektralnim pojasevima s ciljem uočavanja mogućih razlika u informacijama.

1.2. Plan istraživanja

U istraživanju koristi se sustav Mul3spect, namijenjen bilježenju multispektralnih i stereoskopskih fotografskih i videomaterijala. Sustav je konstruiran kao mobilna jedinica koja se sastoji od triju kamera postavljenih na zajednički nosač, stabiliziran pomoću stativa na kotačićima. Takva konstrukcija omogućuje premještanje sustava unutar prostora operacijske sale, uz zadržavanje stabilnosti i ponovljivosti položaja kamera tijekom snimanja.

Istraživanje je strukturirano u šest međusobno povezanih faza, od projektiranja i tehničke prilagodbe sustava do evaluacije njegove primjenjivosti u medicinsko-edukacijskom kontekstu.

Prva faza istraživanja odnosi se na projektiranje, izradu i preliminarno testiranje sustava za simultano bilježenje multispektralnih i stereoskopskih sadržaja. U ovoj fazi provodi se odabir, postavljanje i fizička integracija kamera na zajednički nosač, kao i simulacija mogućeg položaja sustava u operacijskoj sali. Pritom se određuju ukupne prostorne dimenzije sustava, uključujući njegovu visinu, širinu i radni prostor koji zauzima tijekom snimanja. Posebna pozornost posvećuje se prilagodbi svih triju kamera specifičnim uvjetima intraoperacijskog snimanja, budući da je naknadno podešavanje parametara tijekom operacije vrlo ograničeno ili praktički neizvedivo.

U ovoj se fazi provode preliminarna testiranja izvan operacijske sale, uz simulaciju relevantnih svjetlosnih, prostornih i radnih uvjeta. Takva ispitivanja omogućuju provjeru tehničke izvedivosti sustava, optimizaciju parametara snimanja, ispitivanje različitih izvora osvjetljenja, podešavanje oštine, provjeru sinkronizacije kamera te procjenu stabilnosti cjelokupne konstrukcije.

U prvoj se fazi također uspostavlja i sustav beskontaktnog upravljanja kamerama. Takvo upravljanje omogućuje pokretanje i zaustavljanje snimanja s udaljenosti, čime se smanjuje potreba za fizičkim pristupom sustavu tijekom operacije. To je osobito važno u operacijskoj sali, gdje je nužno očuvati neometan rad kirurškog tima, sterilnost prostora i sigurnost pacijenta.

Druga faza istraživanja obuhvaća optimizaciju pozicioniranja kamera, pripremu sustava za rad u operacijskoj sali i provedbu snimanja. Integracija sustava u operacijsku salu zahtijeva suradnju s medicinskim osobljem i poštivanje propisanih higijenskih i sigurnosnih standarda.

Prije početka operacijskog zahvata sustav se postavlja u položaj koji omogućuje optimalan vidni kut prema operacijskom polju, pri čemu se vodi računa o tome da ne ometa glavnoga kirurga, asistente i ostale članove operacijskog tima. Pozicioniranje se provodi pod nadzorom glavnoga kirurga i specijaliziranog medicinskog osoblja.

Nakon određivanja optimalne pozicije provodi se sterilizacija svih dijelova sustava koji se nalaze u blizini operacijskog polja ili mogu doći u kontakt s radnim prostorom medicinskog osoblja. U ovoj se fazi bilježi fotografski i videomaterijal svim trima kamerama.

Tijekom snimanja sustavom se upravlja s udaljenosti, s druge strane operacijske sale, ali uz zadržavanje dovoljne blizine za eventualnu tehničku intervenciju. Budući da trajanje operacijskog zahvata nije moguće unaprijed precizno odrediti, potrebno je osigurati stabilno napajanje sustava, kako se rad kamera i dodatne opreme ne bi oslanjao isključivo na trajanje baterija.

Treća faza istraživanja odnosi se na obradu prikupljenih multispektralnih i stereoskopskih podataka. Nakon završetka snimanja provodi se organizacija, selekcija i računalna obrada dobivenog fotografskog i videomaterijala. Multispektralni zapis razlaže se na zasebne spektralne pojaseve, dok se stereoskopski zapis priprema za trodimenzionalnu reprodukciju.

Četvrta faza istraživanja obuhvaća montažu fotografskog i videomaterijala te analizu dobivenih rezultata. Obradeni materijali strukturiraju se prema smjernicama glavnoga kirurga, s naglaskom na ključne faze operacijskog zahvata i prikaz relevantnih anatomske struktura. U ovoj se fazi odabiru dijelovi materijala koji imaju najveću dokumentacijsku i edukacijsku vrijednost, a po potrebi se dodaju tekstualne oznake, grafički elementi i dodatni vizualni naglasci na samoj slici.

U procesu montaže izrađuju se natpisi, vizualne oznake i dodatni elementi koji olakšavaju interpretaciju prikazanog sadržaja. Na odabrana mjesta u videozapisu može se dodati i audiozapis s objašnjenjima koji se povezuju s ključnim dijelovima vizualnog materijala kako bi se gledatelju omogućilo lakše razumijevanje prikazanih anatomske odnosa, operacijskih postupaka i specifičnih informacija dobivenih multispektralnim ili stereoskopskim snimanjem.

Peta je faza istraživanja usmjerena na evaluaciju korisničkog iskustva i procjenu edukacijske vrijednosti izrađenih materijala. Evaluacija se provodi među studentima Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, koji nakon prikazivanja fotografskog i videosadržaja u sklopu nastave ispunjavaju anketne upitnike. Upitnik je oblikovan tako da omogući procjenu jasnoće, korisnosti, informativnosti i potencijalne primjenjivosti prikazanih materijala u medicinskoj edukaciji.

Nakon pregledavanja i analize obrađenih materijala, sudionici se ispituju o tehničkoj uspješnosti rada sustava Mul3spect, kvaliteti dobivenih multispektralnih i stereoskopskih zapisa te mogućnostima njihove primjene u edukaciji i dokumentaciji operacijskih zahvata. Uz studentsku evaluaciju provode se i intervjui s glavnim kirurgom te sa specijalizantima/asistentima i članovima medicinskog osoblja koji su bili prisutni tijekom snimanih operacijskih zahvata.

Šesta faza istraživanja obuhvaća analizu prikupljenih anketnih podataka i intervjua te donošenje zaključaka o funkcionalnosti i primjenjivosti sustava. U ovoj se fazi rezultati evaluacije sustavno obrađuju kako bi se omogućila jasna interpretacija korisničkih procjena. Analiza uključuje procjenu uspješnosti tehničke integracije sustava u operacijsku salu, informativnosti multispektralnih zapisa, prostorne vrijednosti stereoskopskog prikaza te ukupnog potencijala sustava kao dodatnog multimedijskog materijala za medicinsku edukaciju.

Na temelju dobivenih rezultata predlažu se mogućnosti daljnje optimizacije sustava Mul3spect za bilježenje multispektralnog i stereoskopskog sadržaja. Završna analiza usmjerena je na utvrđivanje u kojoj mjeri ovakav sustav može doprinijeti dokumentaciji operacijskog zahvata i oblikovanju dodatnih edukacijskih materijala koji studentima i medicinskim stručnjacima omogućuju pristup vizualnim informacijama koje nisu dostupne u standardnom fotografskom ili videozapisu.

1.3. Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinosi ove disertacije temelje se na razvoju i primjeni inovativnog sustava Mul3spect, osmišljenog za simultano snimanje multispektralnog i stereoskopskog multimedijskog sadržaja. Ovaj sustav omogućuje proširenu reprodukciju stvarnosti, čime se ostvaruju nove mogućnosti detaljne analize i interpretacije vizualnih podataka. Njegova arhitektura temelji se na korištenju triju kamera od kojih dvije istodobno fotografski bilježe interesno područje u vidljivim i blisko infracrvenim pojasevima, uz istovremeni stereoskopski videozapis s trećom kamerom. Na taj se način spajaju prednosti spektralne analize s dubinskom percepcijom snimljenog materijala, što klasične metode snimanja ne mogu pružiti.

Praktična primjena sustava predviđena je njegovim korištenjem u operacijskoj sali, čime je omogućeno snimanje kirurških zahvata iz optimalne promatračke pozicije. Nastali multimedijски materijal može služiti kao dopunski edukativni sadržaj, dostupan za pregled i analizu izvan operacijskog okruženja, bez vremenskih i prostorno organizacijskih ograničenja. U sklopu istraživanja definirani su tehnički parametri sustava i specifikacije, kao i radni okviri te hodogrami računalne obrade, što osigurava ponovljivost i implementaciju razvijenih postupaka i u drugim područjima.

Ostvareni znanstveni doprinosi obuhvaćaju:

D1 Arhitekturom sustava za bilježenje multispektralnog i stereoskopskog zapisa izveden je inovativan način produkcije multimedijskog sadržaja.

D2 Definiranjem radnih okvira i specifikacija inovativnog sustava te alata potrebnih za obradu snimljenih podataka utvrđen je hodogram postupaka računalne obrade za reprodukciju multispektralnog fotografskog i stereoskopskog videomaterijala.

D3 Razvojem metode snimanja i definiranjem postupaka obrade podataka zabilježenih sustavom Mul3spect omogućena je analiza dodatnih, oku nevidljivih informacija proširujući poznavanje teme promatrane materije.

2. VIZUALNO I PROSTORNO PROŠIRENA DIMENZIJA SNIMANJA

Dosadašnja istraživanja u području multispektralnog snimanja pokazala su da se vrijednost ove tehnologije ne temelji samo na mogućnosti stvaranja vizualno drugačijih slika, nego prvenstveno na mogućnosti bilježenja informacija koje nisu dostupne standardnim fotografskim postupcima. Za razliku od klasičnog RGB zapisa, koji cjelokupnu svjetlosnu informaciju svodi na tri široka kanala prilagođena ljudskoj percepciji boje, multispektralno snimanje omogućuje registraciju reflektiranog, apsorbiranog ili emitiranog zračenja u više odabranih spektralnih pojaseva. Takav zapis ne predstavlja samo slikovnu reprodukciju promatranog objekta, nego oblik proširenog mjerenja njegovih optičkih svojstava. Svaki spektralni kanal može sadržavati zasebnu informaciju o načinu na koji promatrana površina ili tkivo reagira na određenu valnu duljinu, zbog čega multispektralna slika istodobno ima dokumentacijsku, analitičku i interpretacijsku vrijednost [5,23].

U standardnoj fotografiji informacija se oblikuje prema načinu na koji ljudsko oko doživljava boju, pa se različite spektralne komponente svjetlosti spajaju u vizualno razumljiv, ali informacijski reducirani prikaz. Multispektralno snimanje, naprotiv, razdvaja određene dijelove elektromagnetskog spektra te ih bilježi kao zasebne informacijske slojeve. Zbog toga dva materijala ili dvije površine koje u vidljivom spektru izgledaju vrlo slično mogu pokazivati znatne razlike u drugim spektralnim područjima, osobito u bliskom infracrvenom području. Takve razlike proizlaze iz različite apsorpcije, refleksije i raspršenja svjetlosti, što ovisi o kemijskom sastavu, pigmentaciji, vlažnosti, strukturi površine i drugim fizikalnim svojstvima promatranog objekta [11,23,24].

Posebno je važna činjenica da multispektralno snimanje omogućuje usporedbu informacija koje nastaju u različitim valnim područjima. Vidljivi dio spektra najčešće bilježi informacije koje su povezane s bojom, površinskom teksturom i morfološkim detaljima, dok blisko infracrveno područje može otkriti drugačije odnose, jer se svjetlost duljih valnih duljina drugačije apsorbira i raspršuje. U biološkim uzorcima to može značiti da pojedini kanali bolje prikazuju površinske strukture, dok drugi naglašavaju dublje smještene dijelove tkiva. Stoga multispektralna slika ne treba biti shvaćena kao jedna konačna fotografija, nego kao skup međusobno povezanih zapisa, pri čemu svaki kanal pridonosi drugačijem aspektu interpretacije promatranog sadržaja [5,23].

U tom smislu, informacijska vrijednost multispektralnog snimanja ne proizlazi nužno iz toga da je svaki pojedinačni kanal vizualno atraktivan ili lako interpretabilan. Naprotiv, neki spektralni kanali mogu izgledati slabijeg kontrasta, tamno, šumovito ili udaljeno od uobičajenog fotografskog prikaza, ali i dalje mogu sadržavati mjerljive informacije koje nisu prisutne u RGB slici. Takvi zapisi zahtijevaju drugačiji način interpretacije, jer se njihova vrijednost ne procjenjuje samo prema estetskoj kvaliteti slike, nego prema tome pružaju li dodatnu razliku, kontrast ili signal koji može pomoći u razlikovanju materijala, površina ili tkivnih struktura. Upravo je ta razlika između vizualne kvalitete i informacijske vrijednosti važna pri primjeni multispektralnog snimanja u znanstvenom i tehničkom kontekstu [23].

Primjena multispektralnog snimanja u dermatologiji dobar je primjer načina na koji se izvan standardnog vizualnog prikaza mogu dobiti dodatne informacije o promatranom području. Kod snimanja kožnih lezija različiti spektralni pojasevi mogu naglasiti različite karakteristike lezije, poput površinske pigmentacije i raspodjele kromofora, koje nisu jednako vidljive u konvencionalnom dermoskopskom prikazu [11]. Pritom je važno naglasiti da multispektralni zapis ne djeluje samo kao poboljšana verzija klasične slike, nego kao skup slojeva koji se mogu zasebno analizirati i međusobno uspoređivati. Vidljivi kanali mogu naglasiti morfološke detalje i rubove lezije, dok prošireno blisko infracrveno područje može pružiti drugačiji kontrast i otkriti informacije koje se ne podudaraju u potpunosti s onima koje su dostupne u vidljivom području [24].

Na sličan način, istraživanja blisko infracrvene autofluorescencije paratireoidnih žlijezda pokazuju da određena tkiva mogu imati spektralno specifična optička svojstva koja nisu prepoznatljiva u standardnom vizualnom zapisu. Kada se paratireoidno tkivo pobudi svjetlošću valne duljine približno 785 nm, ono emitira autofluorescenciju s vrhom približno u području od 820 do 830 nm [24]. Iako se u tom slučaju radi o fluorescencijskoj, a ne o refleksijskoj metodi snimanja, primjer je važan jer jasno pokazuje da tkivo može nositi optičku informaciju koja je potpuno izvan dosega standardnog RGB prikaza. Takva informacija postaje dostupna tek kada se sustav snimanja proširi na odgovarajuće valne duljine i kada se koristi optička i senzorska konfiguracija sposobna registrirati taj signal [25,26].

Potrebno je, međutim, razlikovati različite oblike spektralnog bilježenja. Refleksijsko multispektralno snimanje bilježi svjetlost koja se od promatranog objekta reflektira u pojedinim spektralnim pojasevima, dok autofluorescencijsko snimanje bilježi svjetlost koju tkivo emitira

nakon pobude određenom valnom duljinom. U oba slučaja riječ je o informacijama koje nisu dostupne u standardnom vizualnom zapisu, ali se fizikalni mehanizmi njihova nastanka razlikuju. Ta razlika važna je pri interpretaciji rezultata, jer refleksijski NIR zapis ne treba izjednačavati s NIR autofluorescencijom. Ipak, oba pristupa potvrđuju istu osnovnu pretpostavku: proširenje snimanja izvan klasičnog RGB područja omogućuje bilježenje dodatnih optičkih svojstava promatranog objekta [23,25,26].

Iz perspektive dokumentacije, multispektralni zapis ima posebnu vrijednost jer omogućuje naknadnu analizu istog prizora kroz više informacijskih slojeva. Umjesto da se prizor zabilježi samo kao jedna fotografska slika, on se može promatrati kroz pojedinačne kanale, njihove kombinacije, izračunate indekse ili kompozitne prikaze. Time se dobiva fleksibilniji oblik dokumentacije u kojem se iste anatomske ili materijalne strukture mogu analizirati prema različitim optičkim kriterijima. U takvom sustavu jedan kanal može bolje prikazivati površinske detalje, drugi može naglašavati kontrast između različitih tkiva ili materijala, dok treći može sadržavati informaciju koja nije jasno vidljiva u standardnom prikazu. Multispektralna dokumentacija stoga ne predstavlja samo proširenje fotografije, nego promjenu u načinu bilježenja i tumačenja vizualnih podataka [5,23].

Ovakav pristup posebno je važan u situacijama u kojima standardni vizualni zapis ne može u potpunosti prikazati sve relevantne razlike u promatranom prizoru. U biološkim i medicinskim uzorcima pojedina tkiva mogu imati sličnu boju i teksturu u vidljivom spektru, ali se razlikovati u refleksiji ili apsorpciji u drugim valnim područjima. Isto vrijedi i za druge materijale, primjerice biljne površine, pigmente, tragove, premaze ili dokumente, kod kojih se razlike u sastavu mogu jasnije očitovati u nekom od spektralnih kanala nego u standardnom RGB prikazu. Zbog toga se multispektralno snimanje primjenjuje u različitim područjima, od agronomije i ekologije do forenzike, konzervacije kulturne baštine i biomedicinskog snimanja [23]

Uz spektralnu dimenziju, prostorna dimenzija snimanja predstavlja drugi važan aspekt proširene vizualne dokumentacije. Stereoskopska (3D) videodokumentacija omogućuje bilježenje prostornog odnosa među strukturama, odnosno prikaz dubine koji nije dostupan u standardnoj dvodimenzionalnoj slici. Dok multispektralni zapis proširuje informaciju prema spektralnim razlikama, stereoskopski zapis proširuje informaciju prema prostornim odnosima.

U anatomskom i kirurškom kontekstu takav prikaz može biti posebno koristan jer omogućuje realističnije razumijevanje položaja, udaljenosti i međusobnih odnosa struktura [27,28].

Stereoskopska dokumentacija, slično multispektralnoj, ne predstavlja samo vizualno poboljšanje postojeće slike, nego dodavanje nove vrste informacije. Dvodimenzionalni zapis može dobro prikazati boju, konturu i teksturu, ali ne može u potpunosti prenijeti dubinske odnose. Trodimenzionalni prikaz omogućuje promatraču bolju percepciju prostorne orijentacije, što može biti važno u edukaciji, dokumentaciji i naknadnoj analizi složenih prizora [27,29,30]. Istraživanja o primjeni 3D vizualizacijskih tehnologija u učenju anatomije pokazuju da takvi prikazi mogu poboljšati razumijevanje prostorno složenih struktura, osobito kada se koriste kao dopuna, a ne zamjena, drugim oblicima učenja i prikaza [27,28].

Kombiniranje multispektralnog i stereoskopskog snimanja stoga omogućuje razvoj dokumentacijskog sustava koji istodobno bilježi dvije vrste proširenih informacija: spektralnu i prostornu. Multispektralni dio sustava omogućuje razlikovanje struktura prema njihovim optičkim svojstvima u pojedinim valnim područjima, dok stereoskopski dio sustava omogućuje očuvanje dubinskih i prostornih odnosa unutar promatranog prizora.

Na taj način multispektralno i stereoskopsko snimanje zajedno proširuju granice standardne foto i videodokumentacije. Standardna fotografija bilježi ono što je vidljivo ljudskom oku i prikazuje prizor u dvodimenzionalnom obliku, dok multispektralno - stereoskopski pristup omogućuje istodobno bilježenje dodatnih valnih područja i prostornih odnosa. Takav zapis može poslužiti kao bogatiji dokumentacijski materijal, ali i kao osnova za daljnju analizu, usporedbu, edukaciju i razvoj novih metoda interpretacije slikovnih podataka. Njegova glavna vrijednost nije samo u stvaranju vizualno drukčijih prikaza, nego u mogućnosti da se iz istog prizora izdvoje različiti informacijski slojevi koji zajedno daju potpuniji uvid u promatranu strukturu.

2.1. Multispektralno snimanje u vizualnom i blisko infracrvenom području

Razvoj suvremenih tehnologija slikovnih zapisa u velikoj je mjeri promijenio način na koji se mogu bilježiti i analizirati složeni prizori, uključujući kirurško polje. Klasični RGB sustavi i dalje imaju jaku dokumentacijsku vrijednost jer omogućuju jednostavan, razumljiv i vizualno prepoznatljiv prikaz, ali su istodobno ograničeni na široke kanale vidljivog spektra. Takav zapis ne može samostalno izdvojiti informacije koje nastaju u užim spektralnim područjima ili izvan granica vidljivog spektra. Multispektralno snimanje omogućuje proširenje dokumentacijskog zapisa prema odabranim valnim pojasevima u vidljivom i blisko infracrvenom području, čime se povećava količina podataka o refleksiji, apsorpciji i optičkom ponašanju promatranih struktura [31].

Za razliku od hiperspektralnih sustava, koji bilježe velik broj uskih i uzastopnih valnih pojaseva, multispektralni pristup koristi ograničen broj unaprijed odabranih kanala. Time se smanjuje količina podataka, složenost opreme i zahtjevnost obrade, ali se zadržava mogućnost usporedbe ključnih spektralnih razlika. Takav pristup posebno je prikladan za dokumentacijske sustave koji moraju ostati kompaktni, mobilni i primjenjivi u stvarnim uvjetima snimanja. U operacijskom okruženju, u kojem su važni brzina postavljanja, stabilnost sustava, minimalno ometanje radnog procesa i mogućnost snimanja bez znatne promjene standardnih uvjeta, manji broj odabranih valnih pojaseva može predstavljati praktičniji kompromis od cjelovitog hiperspektralnog sustava.

U ovome se radu polazi od pretpostavke da se vrijednost multispektralnog zapisa ne očituje samo u mogućnosti dobivanja slike drugačijeg vizualnog izgleda, nego u mogućnosti sustavnog bilježenja razlika koje proizlaze iz interakcije svjetlosti i promatrane materije u točno određenim valnim područjima. Zbog toga se istražuje upotreba sadržaja zabilježenog u spektralnim pojasevima unutar vidljivog područja, odnosno pri približno 475 nm, 490 nm, 550 nm i 615 nm, kao i u području bliskog infracrvenog zračenja pri približno 808 nm i 850 nm. Navedene valne duljine ne promatraju se kao zamjena za standardni fotografski prikaz, nego kao dodatni informacijski slojevi koji mogu proširiti mogućnost razlikovanja struktura prema njihovim optičkim svojstvima.

U takvom pristupu svaki spektralni pojas ima ulogu zasebnog načina promatranja istog prizora. Plavi i cijan pojas, približno 475 i 490 nm, nalaze se u dijelu vidljivog spektra kraćih valnih duljina te su zbog manjeg prodora u tkivo i izraženije interakcije s površinskim strukturama prikladni za bilježenje površinskog kontrasta, teksture, rubova i sitnih morfoloških razlika [32,33]. Budući da hemoglobin snažno apsorbira svjetlost u zelenom dijelu spektra, zeleni pojas (~550 nm) može omogućiti izraženiji prikaz krvnih žila, krvnih tragova i razlika u prokrvljenosti tkiva [32,34]. Narančasti pojas, približno 615 nm, pripada duljem dijelu vidljivog spektra i može dati drugačiji odnos između površinske boje, apsorpcije i refleksije, osobito u usporedbi s kraćim valnim duljinama, jer se optička svojstva bioloških tkiva mijenjaju s valnom duljinom [32,33]. Blisko infracrveni pojasevi pri približno 808 nm i 850 nm omogućuju bilježenje informacija koje se ne podudaraju u potpunosti s vizualnim izgledom promatranog područja, jer se svjetlost tih valnih duljina drukčije raspršuje i apsorbira u biološkom tkivu te u pravilu postiže veći prodor u odnosu na kraće vidljive valne duljine [32,33].

Takva organizacija snimanja osobito je važna jer omogućuje usporedbu različitih prikaza istog anatomskog ili biološkog sadržaja. Izdvajanje pojedinih spektralnih informacija omogućuje da se ista struktura promatra kroz više optičkih odnosa. Struktura koja je u jednom pojasu slabo kontrastna može u drugom pojasu postati jasnije vidljiva, dok se pojedini detalji koji dominiraju u vidljivom području mogu smanjiti ili potpuno promijeniti u blisko infracrvenom zapisu. Upravo te razlike čine osnovu za procjenu informativne vrijednosti multispektralne dokumentacije.

Literatura iz područja hiperspektralnog snimanja endokrinih tkiva pokazuje da žljezdana tkiva, poput štitnjače i doštitnih žlijezda, mogu pokazivati razlikovne spektralne značajke u određenim područjima spektra. Istraživanja su pokazala razlike u informacijama zabilježenih u srednjim apsorpcijskim spektrima štitnjače i doštitne žlijezde, osobito u području između 600 i 700 nm te oko 760 nm i 960 nm [31]. Ti rezultati ne znače da se svaki multispektralni sustav s manjim brojem kanala može izravno usporediti s hiperspektralnim uređajem, ali potvrđuju važnu polaznu pretpostavku: biološka tkiva mogu imati mjerljive i vizualno iskoristive razlike u spektralnom odzivu. U kontekstu ovoga rada ta je činjenica važna kao teorijska i eksperimentalna osnova za provjeru mogu li se odabrani vidljivi i NIR pojasevi upotrijebiti za proširenje dokumentacijskog zapisa.

Rezultati prethodnih istraživanja također pokazuju da se spektralni podaci mogu koristiti za računalno razlikovanje više vrsta tkiva. Na hiperspektralne slike endokrinih tkiva primijenjene su metode strojnog učenja kako bi se prikazala mogućnost razlikovanja štitnjače, doštitnih žlijezda, živaca, kože, mišića i drugih anatomske struktura unutar kirurškog polja [35]. Rezultati su prikazani kao klasifikacijski sloj preko stvarne slike kirurškog prizora, čime je demonstrirano da spektralna informacija može biti prevedena u vizualno razumljiv prikaz. U ovom radu takav se pristup ne preuzima kao dijagnostički ili klasifikacijski model, nego kao potvrda da spektralni zapis može sadržavati informacije koje nisu jednako dostupne u standardnom RGB prikazu.

Stoga se cilj ovoga rada ne usmjerava prema automatiziranoj dijagnostici ili kliničkom odlučivanju, nego prema procjeni mogućnosti proširene fotodokumentacije. Drugim riječima, istražuje se može li sustav koji bilježi odabrane pojaseve vidljivog i blisko infracrvenog spektra proizvesti dokumentacijski materijal u kojem su određene razlike među tkivima, površinama i strukturama izraženije nego u standardnoj slici. Takav materijal može imati vrijednost za naknadnu analizu, usporedbu i edukaciju, čak i onda kada ne služi kao samostalni dijagnostički alat. Time se naglasak premješta s pitanja može li sustav prepoznati tkivo na pitanje može li sustav zabilježiti dodatne optičke informacije koje proširuju razumijevanje promatranog prizora.

Upravo zato se odabrani sustav može promatrati kao most između standardne fotografske dokumentacije i složenih hiperspektralnih metoda. S jedne strane, zadržava se relativna jednostavnost i mobilnost fotografskog snimanja; s druge strane, uvodi se mogućnost bilježenja dodatnih spektralnih slojeva. Takav pristup omogućuje izradu materijala koji može biti razumljiv korisniku jer zadržava vezu sa stvarnim izgledom prizora, ali istodobno omogućuje izdvajanje informacija koje nisu sadržane u uobičajenom RGB prikazu. To je osobito važno za edukacijske i dokumentacijske svrhe, gdje cilj nije nužno automatska klasifikacija, nego povećanje opažajne i analitičke vrijednosti zabilježenog materijala.

Kombinacija valnih duljina od približno 475 nm, 490 nm, 550 nm, 615 nm, 808 nm i 850 nm stoga se u ovom radu promatra kao eksperimentalni okvir za procjenu informacijske vrijednosti multispektralne fotodokumentacije. Takva kombinacija ne iscrpljuje sve moguće spektralne informacije, ali omogućuje praktičnu i usmjerenu procjenu razlika koje se mogu zabilježiti sustavom ograničenog broja kanala.

Na temelju toga, multispektralna dokumentacija u ovom radu ne promatra se kao zamjena za postojeće medicinske slikovne metode, nego kao dopunski oblik bilježenja koji proširuje informativnost standardne foto i videodokumentacije. Njezina se vrijednost nalazi u mogućnosti da se istom prizoru pridruže dodatni spektralni slojevi, da se omogući usporedba vidljivog i blisko infracrvenog zapisa te da se stvore materijali pogodniji za edukaciju, analizu i razumijevanje razlika među biološkim strukturama. U tom smislu, cilj nije samo prikazati tkivo drukčijom bojom ili kontrastom, nego dokumentirati kako se različite strukture ponašaju u odabranim područjima spektra i kako se te razlike mogu iskoristiti za bogatiji, višeslojni zapis promatranog kirurškog prizora.

3. KAMERE

Kamere koje se koriste za multispektralni zapis, kao što su modeli MAPIR Survey3N OCN i Survey3N NGB, posebno su dizajnirane za primjenu u agronomskoj praksi i istraživanjima. Njihova osnovna svrha jest daljinsko snimanje poljoprivrednih površina korištenjem bespilotnih letjelica (dronova), što omogućuje procjenu zdravstvenog stanja biljaka na temelju različitih spektralnih svojstava vegetacije. Naime, biljke reflektiraju specifične valne duljine elektromagnetskog spektra koje ljudsko oko ne može zabilježiti, posebice u području infracrvenog spektra. Upravo korištenje multispektralnih kamera omogućuje detekciju tih nevidljivih promjena, čime se omogućuje rana dijagnostika stresa, nedostatka hranjivih tvari, bolesti ili napada štetnika u usjevima [36,37].

Na primjer, zdrava vegetacija intenzivno reflektira blisko infracrveno zračenje, dok se oštećena vegetacija ponaša drugačije, a što omogućuje generiranje NDVI indeksa (Normalized Difference Vegetation Index) za kvantifikaciju vitalnosti biljaka. Upravo ta sposobnost prikupljanja nevidljivih informacija o organskoj materiji - biljkama - potaknula je početnu hipotezu ovog istraživanja.

Temeljem ovih spoznaja, inicijalno je postavljena pretpostavka da bi se ista multispektralna tehnologija mogla primijeniti i u području medicinske dijagnostike, konkretno na ljudskom tkivu, s obzirom na organsku prirodu tkiva i njegovih bioloških svojstava. Na temelju ove premise, razvijen je sustav Mul3spect, koji koristi iste multispektralne kamere za snimanje tijekom operativnih zahvata, primjerice operacija štitnjače.

Cilj primjene ovog sustava u medicinskom okruženju bio je detektirati spektralne razlike među tkivima koje nisu vidljive ljudskim okom, ali se mogu razlikovati na temelju specifičnih refleksijskih karakteristika u različitim valnim duljinama.

Međutim, tijekom prvih praktičnih testiranja Mul3spect sustava ustanovljen je značajan tehnički izazov povezan s optičkim svojstvima korištenih kamera. Kamere koje su inicijalno razvijene za agronomsku primjenu optimizirane su za snimanje objekata na velikim udaljenostima, obično većima od 10 metara. Optički sustavi ovakvih kamera imaju objektivne prilagođene fokusiranju na beskonačnu udaljenost ili udaljenosti mnogo veće od one potrebne

u kirurškim uvjetima, gdje je područje interesa udaljeno između 10 i 30 centimetara od senzora kamere. Zbog toga je dolazilo do izrazitog pada oštine snimljenih slika na kratkim udaljenostima.

Kako bi se riješio ovaj problem, pristupilo se detaljnoj optičkoj analizi i ugradnji dodatnih optičkih elemenata u postojeći sustav kamera. Konkretno, korištene su makro leće ili makro predleće, koje djeluju na način da prilagođavaju fokalnu duljinu optičkog sustava za snimanje na vrlo kratkim udaljenostima. Temeljni princip rada makro objektiva jest promjena efektivne udaljenosti između senzora kamere i objektiva, omogućujući tako fokusiranje na znatno bliže udaljenosti nego što to standardni objektivi mogu ostvariti [38].

Makro objektivi razlikuju se od standardnih objektiva po svojoj specifičnoj optičkoj konstrukciji. Imaju izraženiju zakrivljenost leća, a njihova optička struktura optimizirana je za smanjenje minimalne udaljenosti fokusa, odnosno za povećanje efektivnog povećanja slike na kratkim udaljenostima. Također, karakteristično za makro objektivne jest izuzetno smanjena dubina polja (eng. *DOF - depth of field*), što znači da će objektivi oštru sliku pružati u vrlo uskom rasponu udaljenosti od senzora. Takva optička svojstva, iako često ograničavajuća u konvencionalnoj fotografiji, u medicinskoj primjeni pokazuju se kao prednost jer omogućuju jasno razlučivanje fokusiranog područja interesa od pozadinskih elemenata koji nisu predmet analize.

Primjena makro predleća omogućila je prilagodbu optičkog sustava kamera za optimalnu oštrinu slike upravo u području od 10 do 30 centimetara od senzora. Naime, bez preciznog fokusiranja, multispektralni podaci, ma koliko bili bogati informacijama, bili bi beskorisni. Uspješnom implementacijom makro predleća, sustav Mul3spect je postao potpuno funkcionalan za prikupljanje visoko-rezolucijskih multispektralnih slika ljudskog tkiva, otvarajući time nova vrata za istraživanje i razvoj inovativnih metoda zapisa u medicini. To dokazuje kako se interdisciplinarnim pristupom i inovativnim rješavanjem tehničkih prepreka, tehnologije razvijene za jednu specifičnu domenu mogu uspješno primijeniti i u potpuno različitim područjima, nudeći potencijal za značajna unapređenja u drugim praksama.

3.1. Kamera 1 (OCN)

Multispektralna kamera 1 (Mapir Survey3N, OCN) bilježi spektralno izolirane pojaseve uključujući vidljive pojaseve narančastog područja sa spektralnim vrhom na 615 nm, cijan područja sa spektralnim vrhom na 490 nm te blisko infracrvenog pojasa sa spektralnim vrhom na 808 nm, izvan vidljiva spektra (slika 1).

Istraživajući multispektralno snimanje u medicinskoj domeni, pretpostavljeno je da bi kamera ovih karakteristika mogla pokazati informacije nevidljive golom oku u kontekstu snimanja operacije štitnjače.

Specifikacije kamere su sljedeće:

Razlučivost slike: 12 megapiksela (4.000 x 3.000 px)

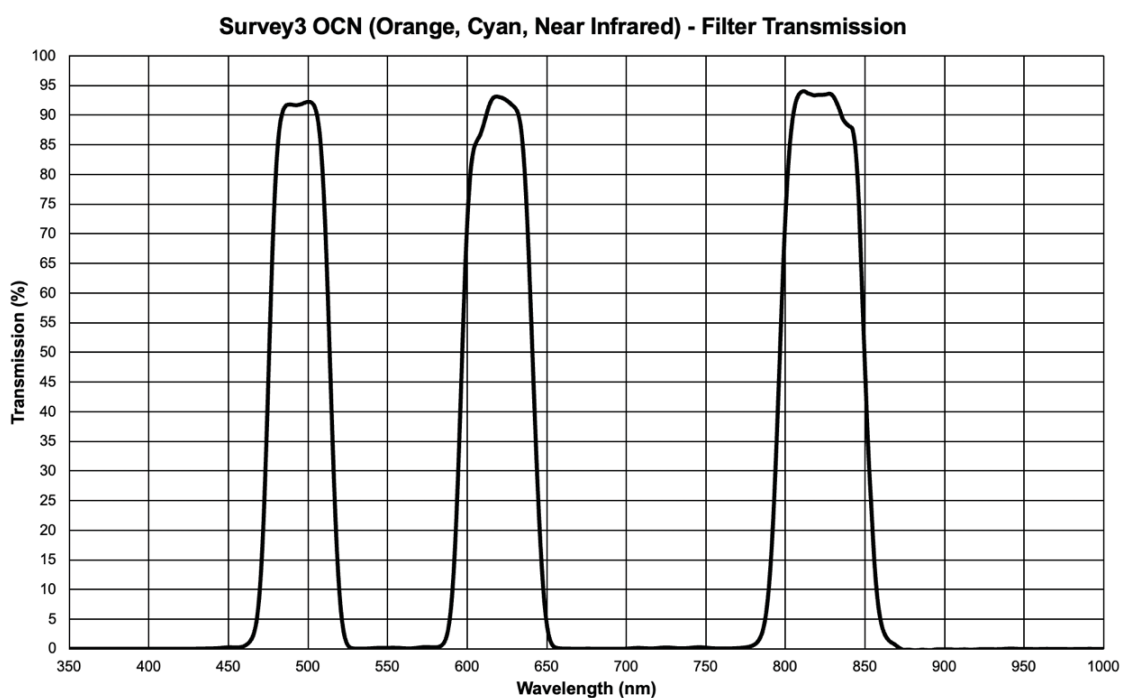
Format slike: RAW+JPG, JPG (RAW ima dubinu od 12 bita po kanalu, JPG ima dubinu od 8 bita po kanalu)

Razlučivost videozapisa: 2160p24, 1440p30, 1080p60, 720p60

Format videozapisa: MP4 (H.264)

Optika objektiva: Survey3N: Kut vidnog polja od 41° (HFOV), žarišna duljina 47 mm, otvor blende f/3,0, objektiv staklenih leća s izrazito niskom distorzijom (-1 %, bez efekta ribljeg oka)

Propusnost filtra: OCN (narančasta + cijan + blisko infracrvena): 490 nm / 615 nm / 808 nm



Slika 1 - Spektrogram propusnosti filtera OCN kamere (izvor: www.mapir.com)

3.2. Kamera 2 (NGB)

Multispektralna kamera 2 (NGB) bilježi spektralno izolirane pojaseve obuhvaćajući blisko infracrveni pojas sa spektralnim vrhom na 850 nm, izvan vidljiva spektra, te vidljive pojaseve zelenog područja sa spektralnim vrhom na 550 nm i plavog područja sa spektralnim vrhom na 475 nm (slika 2).

Specifikacije kamere su sljedeće:

Razlučivost slike: 12 megapiksela (4.000 x 3.000 px)

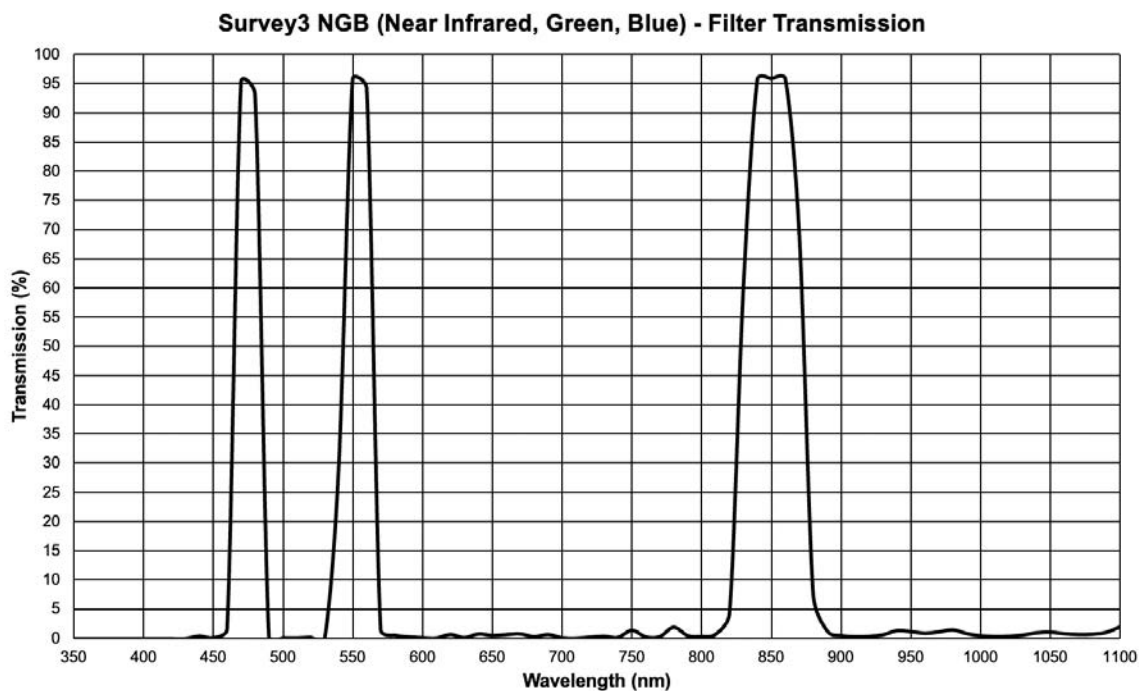
Format slike: RAW+JPG, JPG (RAW ima dubinu od 12 bita po kanalu, JPG ima dubinu od 8 bita po kanalu)

Razlučivost videozapisa: 2160p24, 1440p30, 1080p60, 720p60

Format videozapisa: MP4 (H.264)

Optika objektiva: Survey3N: Kut vidnog polja od 41° (HFOV), žarišna duljina 47 mm, otvor blende f/3,0, objektiv staklenih leća s izrazito niskom distorzijom (-1 %, bez efekta ribljeg oka)

Propusnost filtra: NGB (blisko infracrvena + zelena + plava): 475 nm / 550 nm / 850 nm



Slika 2 - Spektrogram propusnosti filtera NGB kamere (izvor: www.mapir.com)

3.3. Kamera 3 (3D)

Kamera 3 (QooCam Ego) je stereoskopska kamera s dva objektiva koja omogućuje snimanje i reprodukciju foto i videodokumentacije u 3D tehnici.

Specifičnost ove kamere jest da su dva integrirana objektiva u razmaku od 65 mm, a koji je jednak prosječnom međuzjeničnom razmaku odrasle osobe (interpupilarna udaljenost, engl. *interpupillary distance – IPD*). Ovaj razmak omogućuje realističnu prostornu percepciju dubine te vjernu reprodukciju trodimenzionalnog prikaza snimljene materije, pružajući gledatelju prirodnije i ugodnije vizualno iskustvo bez pojave neugodnih efekata poput vrtoglavice ili zamora očiju koji su često prisutni kod neodgovarajućih stereoskopskih snimaka [39,40].

Sinkronizirano djelovanje dviju kamera osigurava identične uvjete snimanja u oba kanala, odnosno lijevoj i desnoj perspektivi, što je nužno za visoku kvalitetu stereoskopskog prikaza. Zbog toga nije potrebna dodatna tehnička podrška poput instaliranja sinkronizacijskih kabela ili manualnog usklađivanja vremenskih kodova u postprodukciji. To pojednostavljuje proces rada i omogućava brzo dobivanje kvalitetne 3D dokumentacije bez gubitka na kvaliteti ili preciznosti [41]

Primjena stereoskopske 3D tehnologije u medicinskom obrazovanju i dokumentaciji pokazala se izrazito korisnom, posebice u kontekstu izučavanja anatomskih struktura. Znanstvena istraživanja ističu kako trodimenzionalni prikazi poboljšavaju sposobnost studenata medicine za prostornu orijentaciju te razumijevanje složenih anatomskih odnosa, što rezultira boljim akademskim postignućima u usporedbi s učenjem iz tradicionalnih 2D materijala [18,27,42]. Također, prethodna su istraživanja pokazala da korištenje 3D tehnologije u anatomskim laboratorijima dovodi do značajno većeg angažmana studenata te smanjuje vrijeme potrebno za usvajanje kompleksnih anatomskih pojmova [42].

Dokazano je i kako stereoskopski prikaz značajno povećava sposobnost studenata u razumijevanju i interpretaciji prostornih odnosa anatomskih struktura, posebice kod kompleksnih sustava poput neuroanatomije ili mikrokirurgije [27]. Isto tako, u daljnjim su istraživanjima rezultati pokazali kako primjena 3D tehnologije u medicinskom obrazovanju

dovodi i do većeg zadovoljstva i motivacije studenata za učenje, čime se povećava učinkovitost obrazovnog procesa [18,43].

Specifikacije QooCam Ego kamere su sljedeće:

Otvor blende: f/1,8

Žarišna duljina (ekvivalent 35 mm): 28 mm

Vidno polje (FOV): 66° (H) / 52° (V) / 79° (D)

Veličina senzora: 1/2 inča

PPD (piksela po stupnju): 37

Razlučivost videozapisa (jedna leća): 1920 × 1080 pri 60 fps

Razlučivost videozapisa (3D, dvije leće):

- 3840 × 1080 pri 60 fps

- 3840 × 1080 pri 30 fps

Fotografska razlučivost (jedan senzor): 4000 × 3000

Fotografska razlučivost (dvostruko, dvije leće): 8000 × 3000

Format videa: MP4

Format fotografije: JPG, DNG

Format zvuka: AAC (16-bitni, dvokanalni, 48 kHz)

Videokodiranje: H.264

Brzina protoka podataka: 60 Mb/s

Zaslon na dodir: 2,54 inča

Razlučivost zaslona: 1600 × 1440

PPI (piksela po inču): 847

4. EKSPERIMENTALNA PROBA KAMERA

Izvedeni eksperimentalni postupak obuhvatio je inicijalno testiranje mogućnosti multispektralnog i stereoskopskog snimanja u uvjetima operacijske sale, s ciljem definiranja tehničkih i organizacijskih ograničenja koja mogu utjecati na kvalitetu i izvedivost budućih snimanja.

U prvom eksperimentu nisu korištene sve komponente Mul3spect sustava u integriranom obliku, već su pojedinačne kamere primijenjene samostalno, rukovanjem iz ruke, kako bi se ispitala mogućnost reproduciranja slike u različitim spektralnim pojasevima pod postojećim uvjetima osvjetljenja i prostornim ograničenjima operacijskog okruženja. Snimanje je provedeno pomoću dvije multispektralne kamere različitih spektralnih konfiguracija: Kamera 1 (OCN), koja bilježi spektralno izolirane pojaseve u vidljivom i bliskom infracrvenom području na 615 nm, 490 nm i 808 nm, te Kamera 2 (NGB), koja bilježi spektralno izolirane pojaseve na 850 nm, 550 nm i 475 nm [44].

Ovi spektralni pojasevi značajni su zbog njihove specifične uloge u prikazu tkivnih struktura: iz dosadašnjih istraživanja pokazalo da se kraće valne duljine (475 nm) više odnose na zabilježavanje površinskih slojeva tkiva i pigmentiranih područja, srednji spektar (550 nm) dopušta diferencijaciju među tkivima zbog različitih apsorpcijskih svojstava hemoglobina, a najduža valna duljina u NIR području (850 nm) dublje prodire u tkivo omogućavajući registraciju informacija koje su uobičajeno skrivene u vidljivom spektru, poput tragova krvi i otkrivanju položaja doštitne žljezde [45–47].

Paralelno s multispektralnim snimanjem, izvedena je i evaluacija stereoskopskog videozapisa korištenjem Kamere 3 (3D), pri čemu je cilj bio provjeriti kvalitetu dobivenog trodimenzionalnog prikaza nakon računalne obrade te kompatibilnosti s VR naočalama.

Prije početka snimanja testirane su sve procedure potrebne za rad u sterilnom i visokorizičnom okruženju operacijske sale. Navedeno je uključivalo dezinfekciju opreme, oblačenje adekvatne zaštitne bolničke odjeće (sterilne kute, maske, rukavice, zaštitne navlake za obuću) te primjenu svih mjera kojima se minimalizira mogućnost kontaminacije. Tijekom snimanja posebna je pozornost posvećena pravilnom rukovanju kamerama u ograničenom prostoru uz istodobno

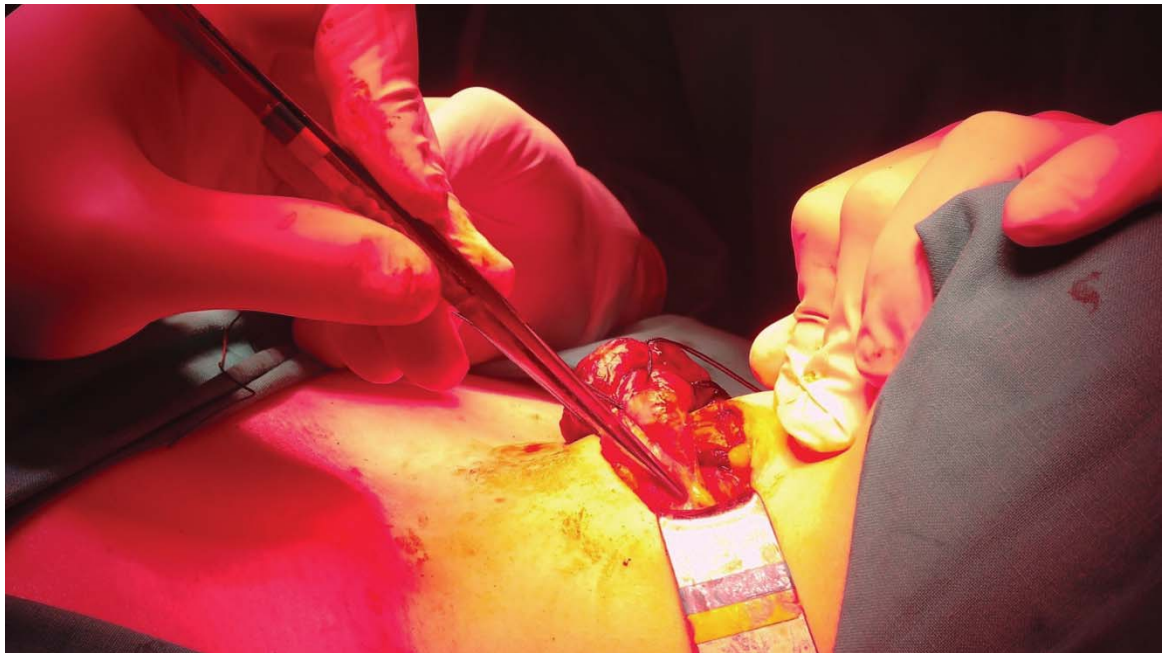
poštivanje stroga pravila ponašanja kako ne bi došlo do narušavanja sterilnog polja same operacije. Snimanje je zahtijevalo visoku razinu koordinacije s medicinskim osobljem, koje je bilo prethodno informirano i dalo pristanak za provedbu ovog postupka. Njihova suradnja pokazala se ključnom za uspješnu realizaciju snimanja, s obzirom na dinamičnost i osjetljivost kirurškog okruženja.

Eksperiment je također imao karakter opservacijskog testiranja, pri čemu su identificirana brojna tehnička i organizacijska ograničenja koja su se morala uzeti u obzir za sljedeće faze istraživanja. Među najvažnijima istaknute su varijacije u intenzitetu i spektralnom sastavu svjetlosnih izvora u operacijskoj sali, ograničeni prostorni uvjeti za pozicioniranje kamera, kao i potreba za stabilizacijom kamera tijekom snimanja. Također je zabilježena potreba za unaprijed definiranom procedurom sterilizacije dodatne opreme te optimizacijom protokola komunikacije s medicinskim timom kako bi se minimiziralo vrijeme pripreme snimanja, kao i samog snimanja bez ometanja kirurškog procesa i medicinskog osoblja.

Sve zabilježene prepreke, tehničke poteškoće i logističke zahtjevnosti detaljno su dokumentirane, a što je sve primijenjeno za izradu revidiranog plana sljedećih eksperimenata. Ovaj korak omogućio je optimizaciju definiranih mjera za povećanje efikasnosti i sigurnosti budućih snimanja, te postizanje što stabilnijih uvjeta za multispektralnu i stereoskopsku dokumentaciju u kirurškom okruženju.

4.1. Kamera 1 (OCN) / Separacija kanala i analiza podataka

Kamera 1 (OCN) omogućuje snimanje u spektralno izoliranim pojasevima vidljivog i bliskog infracrvenog područja, na valnim duljinama od 615 nm, 490 nm i 808 nm. Nakon završenog eksperimentalnog snimanja, svi dobiveni fotografski zapisi sustavno su prebačeni na radno računalo i arhivirani radi daljnje obrade, uz istodobno stvaranje sigurnosne kopije na vanjski tvrdi disk kako bi se minimizirala mogućnost gubitka podataka. Organizacija i arhiviranje podataka provedeni su prema unaprijed definiranom postupku kako bi se omogućila dosljednost u kasnijim fazama obrade i analize.



Slika 3 - Fotografija s Kamere 1 (OCN) direktno iz kamere

Sljedeći korak u obradi bio je separacija (odvajanje) kanala, što je ključni postupak u analizi multispektralnih sadržaja jer omogućuje individualnu evaluaciju svakog zabilježenog spektralnog pojasa, kao i izdvajanje specifičnih informacija koje nisu uočljive u kombiniranim ili kompozitnim prikazima, kao što je onaj koje dolazi direktno iz kamere. Ova procedura provedena je u specijaliziranom računalnom programu Fiji/ImageJ, koji se često koristi u multispektralnim istraživanjima zbog svojih mogućnosti analize digitalnih slika i podrške za obradu multispektralnih podataka. Nakon što su slike otvorene u programu, korištena je funkcija Split Channels kojom se svaka slika razdvaja u pojedinačne kanale na temelju snimljenih valnih duljina (615 nm, 490 nm i 808 nm). Dobiveni zasebni kanali potom su analizirani pojedinačno, s ciljem procjene njihove tehničke ispravnosti, kvalitete ekspozicije i informativne vrijednosti u snimanome području.

Na slici 3 prikazana je fotografija iz Kamere 1 (OCN) koja je dobivena direktno iz kamere. Na njoj su prikazani kanali u svojem izvornom kompozitnom obliku, u kojemu se naziru razlike u boji različitog tkiva, no potrebno je razdvajanje kanala kako bi se razabrale kompletne informacije koje se nalaze u pojedinim spektralnim pojasevima.

Analiza separacije kanala rezultirala je sljedećim opažanjima:

Kanal O, 615 nm (slika 4) pokazao je značajnu preeksponiranost, što je rezultiralo tehnički neupotrebljivom slikom za daljnju analizu. Pretpostavljeno je da je uzrok u postojećim uvjetima osvjetljenja operacijske sale, gdje je dominantni intenzitet vidljivog, bijelog svjetla (5600K) u kojemu je vrlo nizak udio infracrvenog zračenja. Samim time, blenda se automatski otvara, kako bi postigla ispravnu ekspoziciju, na onaj intenzitet svjetla na koji je od navedenih kanala osjetljivost najniža, a to je infracrveni izvor svjetla. Izveden je zaključak da će u budućim eksperimentima biti nužno korigirati osvjetljenje, osobito putem dodavanja izvora infracrvenog izvora svjetla, čime bi se postigla ravnoteža u ekspoziciji svih kanala.



Slika 4 - Kanal O (490nm) OCN

Kanal C, 490 nm (slika 5) dao je iznimno kvalitetne rezultate. Slika je bila tehnički ispravna, s naznakama podekspozicije, no koja se može ispraviti u postprodukciji, te visokom oštrinom i dobro definiranim detaljima. Posebno je značajna bila jasnoća kontrasta između masnog tkiva i tkiva štitnjače, čime su dobivene informacije koje su inače manje uočljive golim okom. Ovi nalazi potvrđuju potencijal ovog spektralnog pojasa u analizi podataka, jer omogućuje diferencijaciju anatomskih struktura koja može biti klinički relevantna.



Slika 5 - Kanal C (615nm) OCN

Kanal N, 808 nm (slika 6) također je dao dobre rezultate. Kao i kod C kanala, slika je nešto podeksponirana (također riješivo u postprodukciji), ali pri čemu je vidljivost specifičnih tragova krvi bila značajno izraženija nego u vidljivom spektru, čak i na područjima koja su prethodno očišćena. Ovaj nalaz jasno pokazuje prednost bliskog infracrvenog snimanja u detekciji informacija koje nisu vidljive golim okom.



Slika 6 - Kanal N (808nm) OCN

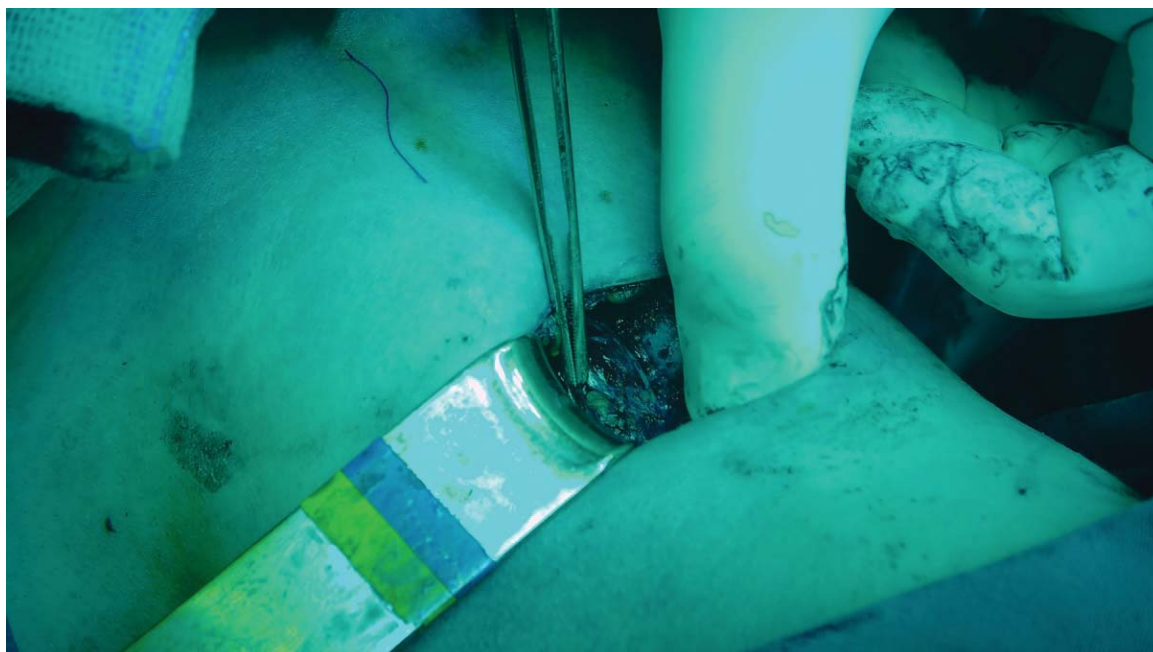
Nakon analize svakog kanala, slike su pohranjene u standardiziranom formatu (TIFF) radi očuvanja kvalitete i pripreme za daljnje korake obrade. Dobiveni rezultati predstavljaju osnovu za optimizaciju svjetlosnih uvjeta i ekspozicijskih parametara u sljedećim eksperimentalnim fazama, s ciljem postizanja maksimalne informativne vrijednosti u svim spektralnim pojasevima.

4.2. Kamera 2 (NGB) / Separacija kanala i analiza podataka

Kamera 2 (NGB) je dizajnirana za snimanje u spektralno izoliranim pojasevima uključujući vidljivo i blisko infracrveno područje - valnih duljina od 850 nm, 550 nm, i 475 nm.

Nakon obrade snimki, provedeni su sistematični organizacijski i arhivni poslovi prema unaprijed određenom protokolu, što je isti onaj koji je korišten za Kameru 1 (OCN).

Sav fotografski i video materijal prebačen je na primarno radno računalo, pri čemu su datoteke strukturirane u hijerarhijsku mapu s jasno definiranim oznakama koje uključuju naziv kamere, datum snimanja, vrstu zahvata i spektralni pojas. Istodobno, izrađene su sigurnosne kopije na vanjski tvrdi disk kako bi se osigurala zaštita podataka od mogućeg gubitka. Ovaj pristup omogućuje jednostavan pregled za kasniju obradu podataka, što je od iznimne važnosti za rad koji zahtijeva ponovljivost postupaka i transparentnost obrade.



Slika 7 - Fotografija s Kamere 2 (NGB) direktno iz kamere

Kao i kod Kamere 1 (OCN), primijenjena je procedura separacije kanala (Split Channels), kojom se svaki snimljeni zapis razdvaja na tri odvojene slike koje odgovaraju pojedinim spektralnim pojasevima. Ovaj korak važan je za daljnju analizu jer omogućuje izolirano ispitivanje informacija koje svaki kanal pruža, čime se dobiva jasniji uvid u informacije koje su vidljive u određenom spektralnom pojasu.

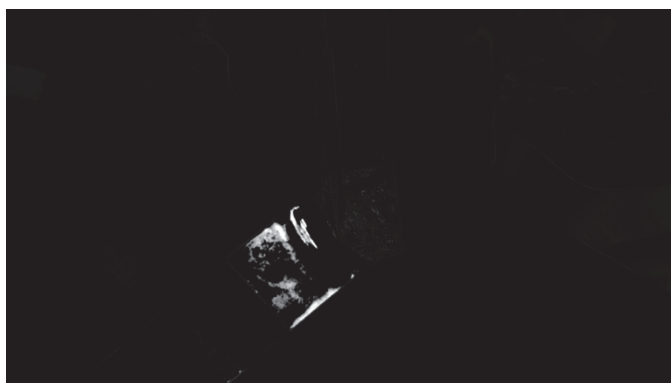
Proces spremanja i izvoza foto i video dokumentacije izveden je prema identičnom protokolu korištenom za podatke s Kamere 1 (OCN), čime je osigurana metodološka konzistentnost i mogućnost komparativne analize između različitih kamera i spektralnih pojaseva.

Slika 7 prikazuje informacije vidljive u kompozitnom obliku sva tri kanala, direktno iz kamere. Iako se naziru razlike u bojama određenih tkiva, nužna je separacija kanala kako bi se omogućilo vizualno razlikovanje cjelovitih informacija u spektralno izoliranim pojasevima N, G i B.

Analiza je informacija u separiranim kanalima rezultirala sljedećim opažanjima:

Kanal N, 850 nm (slika 8) pokazao je najnižu kvalitetu među zabilježenim spektralnim pojasevima, pri čemu je slika bila tehnički neupotrebljiva zbog izrazite podekspozicije. Zbog ekstremno niskog intenziteta zabilježenog signala, na fotografiji nije bilo moguće razlučiti anatomske strukture kao ni osnovne konture snimanog područja. Ova situacija ukazuje na problem nedostatne osvijetljenosti u bliskom infracrvenom području tijekom eksperimentalnog snimanja, što je osobito izraženo u uvjetima standardne kirurške rasvjete koja ne emitira značajne količine zračenja u NIR spektru.

Na temelju komparativne analize s rezultatima Kamere 1 (OCN), kod koje je kanal O pokazao značajnu preeksponiranost, zaključeno je da se u sustavu pojavila neravnoteža u odnosu između vidljivog i infracrvenog spektra osvjetljenja. U slučaju Kamere 2 (NGB), ustanovljeno je da je nedostatak infracrvenog zračenja uzrokovao tehnički neupotrebljivu sliku, obzirom na to da je informacija u potpunosti nevidljiva, što je dodatno potvrdilo potrebu za dodatnim infracrvenim izvorima svjetla.



Slika 8 - Kanal N (850nm) NGB

Predloženo tehničko rješenje za buduće eksperimente uključuje optimizaciju osvjetljenja dodavanjem izvora svjetla koji emitira u bliskom infracrvenom području. Na taj način mogla bi se postići uravnotežena ekspozicija svih spektralnih kanala, uz istodobnu prilagodbu parametara objektiva (otvor blende) i ekspozicijskog vremena, kako bi se osigurala kvaliteta zapisa u spektralnim područjima koja zahtijevaju dodatno osvjetljenje. Ovaj pristup smanjio bi rizik od podeksponiranja i osigurao reprodukciju detalja ključnih za analitičku primjenu multispektralnog snimanja.

Kanal G, 550 nm (slika 9) pokazao je tehnički stabilne rezultate među vidljivim spektralnim pojasevima, s pravilno podešenom ekspozicijom, visokom oštrinom i jasnim prikazom morfoloških detalja. Dobivena slika omogućuje pouzdanu vizualnu analizu tkiva, pri čemu su anatomske strukture jasno diferencirane, što je osobito važno u kontekstu intraoperativne dokumentacije. Dominantni spektar od 550 nm pokazao se informativnim za prepoznavanje osnovnih tkivnih granica i kontrasta između dobro prokrvljenih i manje prokrvljenih struktura u ovom području valnih duljina [48].

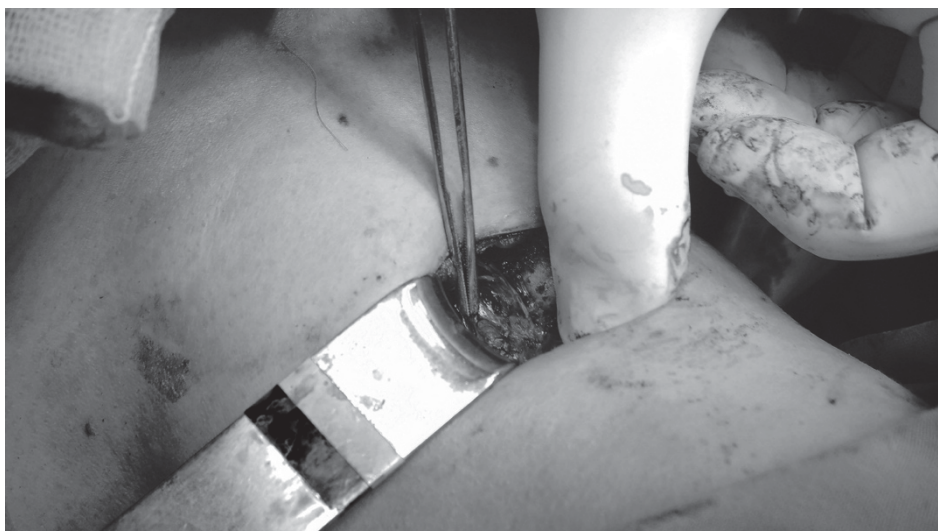
Na zabilježenoj slici uočljivo je i područje doštitne žlijezde, no specifične značajke poput autofluorescencije nisu bile vidljive, što je očekivano s obzirom na to da se taj fenomen pojavljuje u bliskom infracrvenom spektru (850 nm), koji nije pokriven ovim kanalom. U budućim eksperimentalnim fazama planira se integracija dodatnih izvora svjetla za poboljšanje infracrvenog snimanja, no rezultati iz kanala G već sada pružaju solidnu osnovu za detaljnu procjenu morfoloških odnosa tkiva u vidljivom spektru.

Na slici 9 vidi se kako kirurg pokazuje na doštitnu žlijezdu s medicinskim alatom. Također, konac koji je koži pacijenta crne je boje u ovom kanalu sa spektralnim vrhom na 550nm, dok je u drugim kanalima u drugačijim tonovima sive.



Slika 9 - Kanal G (550nm) NGB

Kanal B, 475 nm (slika 10) dao je također visokokvalitetan prikaz, uz pravilno podešenu ekspoziciju, izraženu oštrinu i jasnoću morfoloških detalja, čime se svrstava među tehnički stabilnije rezultate unutar vidljivog spektralnog područja. Ovakva kvaliteta slike omogućuje pouzdanu vizualnu interpretaciju tkiva i jasnu diferencijaciju anatomskih struktura, što je iznimno važno u intraoperativnoj dokumentaciji.



Slika 10 - Kanal B (475nm) NGB

Na slici 10 uočava se da konac unutar ovog kanala ima svjetliju nijansu u odnosu na kanal B, što ukazuje na spektralnu razliku koja bi mogla imati značajnu ulogu u budućoj diferencijaciji

tkiva nakon optimizacije slikovnog prikaza dodatnim izvorima infracrvenog svjetla. Nadalje, zamjetno je da trakice na medicinskom instrumentu u dva različita kanala - B (475 nm) i G (550 nm) - pokazuju različite tonove boje. Ova pojava dodatno potvrđuje kako pojedini spektralni pojasevi mogu pružiti različite informacijske vrijednosti, što otvara mogućnost njihove primjene za preciznije razlikovanje materijala i struktura u kirurškom polju.

4.3. Kvantitativna analiza kvalitete slike eksperimentalnog snimanja

Kvantitativna procjena kvalitete slike provedena je na područjima interesa (ROI – *Region of interest*) veličine 100×100 piksela kroz šest spektralnih kanala: plavi 475 nm, cijan 490 nm, zeleni 550 nm, narančasti 615 nm, NIR 808 nm i NIR 850 nm. Analiza je uključivala srednju vrijednost intenziteta sive razine, standardnu devijaciju, omjer signala i šuma (eng. SNR – *Signal to Noise Ratio*), omjer kontrasta i šuma u odnosu na pozadinu (eng. CNR – *Contrast to Noise Ratio*) te udjele saturacije pri maksimalnoj (255) i minimalnoj (0) vrijednosti intenziteta [44].

SNR je izračunan za svaki ROI kao omjer između srednje vrijednosti intenziteta sive razine u promatranom ROI-ju (μ_{ROI}) i pripadne standardne devijacije (σ_{ROI}), prema formuli:

$$SNR = \frac{\mu_{ROI}}{\sigma_{ROI}}$$

CNR je izračunat u odnosu na ROI pozadine (BG) kao apsolutna razlika između srednje vrijednosti intenziteta ciljnog ROI-ja i srednje vrijednosti intenziteta pozadine, normalizirana standardnom devijacijom pozadine, prema formuli:

$$CNR = \frac{|\mu_{ROI} - \mu_{BG}|}{\sigma_{BG}}$$

SNR je korišten kao pokazatelj stabilnosti signala unutar pojedinog područja interesa. Veća vrijednost SNR-a upućuje na homogeniji i stabilniji signal, odnosno na manji relativni utjecaj šuma. CNR je korišten kao pokazatelj razlikovanja promatranog područja od pozadine. Veća vrijednost CNR-a označava izraženiju razliku između tkiva ili materijala i pozadinskog

područja, što je važno za vizualnu interpretaciju multispektralne slike. Međutim, interpretacija SNR-a i CNR-a ne može se promatrati izdvojeno od podataka o saturaciji. Visoke vrijednosti SNR-a i CNR-a nisu nužno pokazatelj bolje kvalitete slike ako su istodobno povezane s preeksponiranošću ili podeksponiranošću kanala.

Navedene formulacije kvantificiraju stabilnost signala unutar pojedinog područja te mogućnost razlikovanja promatranog ROI-ja od pozadine u prisutnosti šuma. Rezultati su prikazani u tablicama u nastavku (Tablica 1 i Tablica 2).

Tablica 1 – kvantitativna mjerenja OCN kamere

ROI (100x100)	Srednja vrijednost	Stand. dev.	Min.	Maks.	SNR	CNR (ROI vs BG)	Saturacija (255) %	Saturacija (0) %
NARANČASTO (615 nm)								
ŠTITNJACA (2130,1140)	252,188	8,200	167	255	30,755	98,073	77,03%	0,00%
KOŽA (1240,1460)	254,596	2,330	191	255	109,269	99,154	90,66%	0,00%
RUKAVICA (3260,430)	254,967	0,933	207	255	273,277	99,320	99,72%	0,00%
POZADINA (2390,340)	33,681	2,228	28	45	—	—	0,00%	0,00%
SNR kontrola (3250,430)	254,967	0,933	207	255	273,277	—	99,72%	0,00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	26,542%	0,00%
CIJAN (490 nm)								
ŠTITNJACA (2130,1140)	130,057	50,531	0	255	2,574	94,949	0,07%	48,63%
KOŽA (1240,1460)	212,004	12,633	89	255	16,782	163,068	0,01%	0,00%
RUKAVICA (3260,430)	177,083	8,146	123	193	21,739	134,040	0,00%	0,00%
POZADINA (2390,340)	15,833	1,203	10	21	—	—	0,00%	0,00%
SNR kontrola (3250,430)	179,674	7,049	123	195	25,489	—	0,00%	0,00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	0,20%	5,81%
NIR (808 nm)								
ŠTITNJACA (2130,1140)	77,779	33,706	0	230	2,308	51,234	0,00%	3,26%
KOŽA (1240,1460)	129,056	13,555	23	183	9,521	93,647	0,00%	0,00%
RUKAVICA (3260,430)	106,510	3,749	50	120	28,410	74,998	0,00%	0,00%
POZADINA (2390,340)	15,837	1,209	10	21	—	—	0,00%	0,00%
SNR kontrola (3250,430)	107,337	3,708	50	120	28,947	—	0,00%	0,00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	0,35%	0,68%

U Tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja za kanale dobivene OCN kamerom, odnosno za narančasti kanal pri 615 nm, cijan kanal pri 490 nm i NIR kanal pri 808 nm. Tablica obuhvaća vrijednosti izmjerene u ROI-jima štitnjače, kože, rukavice, pozadine i kontrolnog područja za SNR, kao i udjele saturacije izračunane na razini pojedinačnih ROI-ja i cijele slike.

Tablica 2 - kvantitativna mjerenja NGB kamere

ROI (100x100)	Srednja vrijednost	Stand. dev.	Min.	Maks.	SNR	CNR (ROI vs BG)	Saturacija (255) %	Saturacija (0) %
NIR (850 nm)								
ŠTITNJACA (1930, 1280)	4,590	9,376	0	111	0,490	1,925	0,00%	55,15%
KOŽA (1300,900)	0,000	0,000	0	0	0,000	1,532	0,00%	100,00%
RUKAVICA (3560,660)	0,000	0,000	0	0	0,000	1,532	0,00%	18,05%
POZADINA (2820,790)	2,034	1,328	0	6	1,532	—	0,00%	100,00%
SNR kontrola (3660,790)	0,000	0,000	0	0	0,000	—	0,00%	100,00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	0,008%	86,46%
ZELENO (550 nm)								
ŠTITNJACA (1930, 1280)	89,061	31,672	23	207	2,812	26,969	0,00%	0.00%
KOŽA (1300,900)	203,859	3,669	194	215	55,563	74,544	0,00%	0.00%
RUKAVICA (3560,660)	201,402	4,032	179	210	49,951	73,526	0,00%	0.00%
POZADINA (2820,790)	23,984	2,413	18	31	9,939	—	0,00%	0.00%
SNR kontrola (3660,790)	184,458	5,514	169	199	33,453	—	0,00%	0.00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	2,433%	0.00%
PLAVO (475 nm)								
ŠTITNJACA (1930, 1280)	81,102	23,320	27	201	3,478	28,850	0,00%	0.00%
KOŽA (1300,900)	184,536	3,362	176	197	54,889	83,577	0,00%	0.00%
RUKAVICA (3560,660)	187,946	3,049	175	195	61,642	85,381	0,00%	0.00%
POZADINA (2820,790)	26,575	1,890	21	34	14,061	—	0,00%	0.00%
SNR kontrola (3660,790)	172,404	5,842	156	186	29,511	—	0,00%	0.00%
CIJELA SLIKA	—	—	—	—	—	—	0,877%	0,29%

U Tablici 2 prikazani su rezultati mjerenja za kanale dobivene NGB kamerom, odnosno za NIR kanal pri 850 nm, zeleni kanal pri 550 nm i plavi kanal pri 475 nm. Kao i u prethodnoj tablici, prikazani su intenzitetni pokazatelji, SNR, CNR te udjeli saturacije pri minimalnoj i maksimalnoj vrijednosti intenziteta.

Vidljivi spektralni kanali, posebno plavi, zeleni i cijan kanal, pokazali su uglavnom stabilan i upotrebljiv radiometrijski odziv. Kao što je prikazano u Tablicama 1 i 2, u ROI-ju štitnjače

srednje vrijednosti intenziteta nalazile su se unutar korisnog dinamičkog raspona slike, bez izraženog zasićenja na gornjoj ili donjoj granici intenziteta. Vrijednosti SNR-a u području štitnjače bile su umjerene, što je očekivano s obzirom na teksturu tkiva, lokalne razlike u refleksiji i prisutnost sitnih anatomske detalja. U područjima kože i rukavice zabilježene su znatno više vrijednosti SNR-a, što upućuje na homogeniju refleksiju.

Vrijednosti CNR-a u vidljivim kanalima bile su visoke, što pokazuje da su štitnjača, koža i rukavica bile jasno odvojene od pozadine. Takav rezultat potvrđuje da su ovi kanali prikladni za osnovnu vizualnu diferencijaciju anatomske struktura i okolnih materijala. Niske stope saturacije, prikazane u Tablicama 1 i 2, ukazuju na to da je u tim kanalima očuvan dinamički raspon slike te da nije došlo do značajnijeg gubitka informacijskog sadržaja zbog prekomjernih vrijednosti intenziteta.

Narančasti kanal pri 615 nm pokazao je drukčiji obrazac. U tom su kanalu izmjerene vrlo visoke srednje vrijednosti intenziteta, uz vrlo nisku standardnu devijaciju, što je rezultiralo izrazito visokim vrijednostima SNR-a i CNR-a. Međutim, kako je vidljivo u Tablici 1, velik dio piksela dosegnuo je maksimalnu vrijednost intenziteta 255. To znači da je kanal bio preeksponiran. Zbog toga se visoke vrijednosti SNR-a i CNR-a u ovom slučaju ne mogu tumačiti kao stvarna prednost kanala, nego kao posljedica zasićenja signala i gubitka tonskih informacija. Drugim riječima, signal je numerički stabilan jer su mnogi pikseli dosegнули istu maksimalnu vrijednost, ali upravo zbog toga kanal sadrži manje korisnih slikovnih detalja.

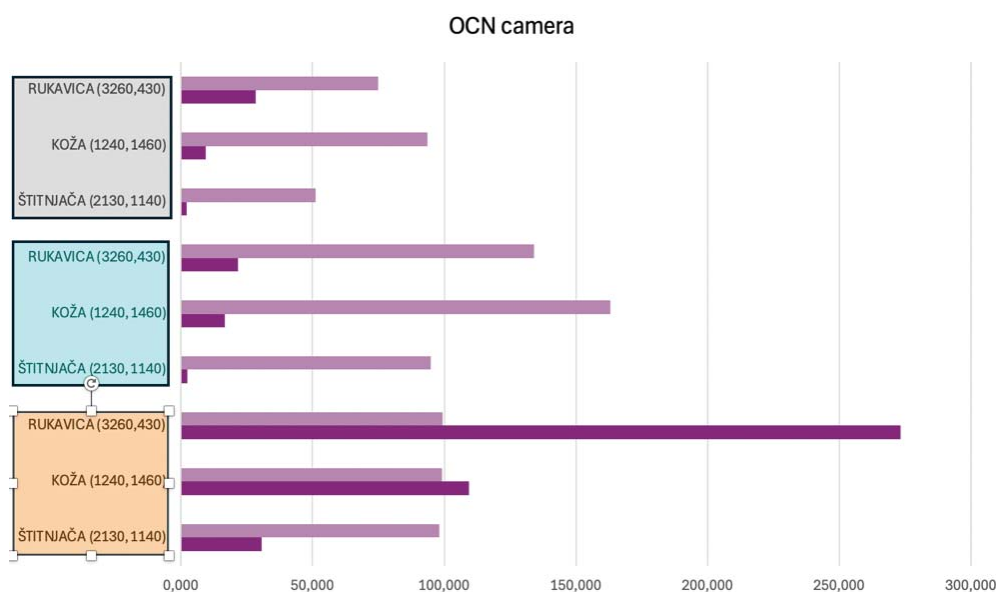
NIR kanal pri 808 nm pokazao je povoljniji rezultat u odnosu na NIR kanal pri 850 nm. U kanalu 808 nm zabilježene su umjerene vrijednosti intenziteta i ograničene, ali još uvijek upotrebljive vrijednosti SNR-a u području štitnjače. U područjima kože i rukavice vrijednosti SNR-a i CNR-a bile su više, što pokazuje da je signal u tim područjima bio stabilniji i jasnije odvojen od pozadine. Važno je da je saturacija pri vrijednostima 0 i 255 bila niska, što znači da je u tom kanalu dinamički raspon u velikoj mjeri očuvan. Kao što je prikazano u Tablici 1, NIR 808 nm stoga se može smatrati tehnički upotrebljivim kanalom za daljnju analizu, iako je signal u području tkiva slabiji nego u pojedinim vidljivim kanalima.

Nasuprot tome, NIR kanal pri 850 nm pokazao je izrazito nepovoljan radiometrijski odziv. Srednje vrijednosti intenziteta bile su vrlo niske, a veliki udio piksela imao je vrijednost 0. To pokazuje da je kanal bio izrazito podeksponiran. U ROI-ju štitnjače zabilježen je vrlo nizak

SNR, dok su područja kože, rukavice i pozadine u velikoj mjeri bila potpuno ili gotovo potpuno crna. Na razini cijele slike također je zabilježen vrlo visok udio saturacije pri minimalnoj vrijednosti intenziteta. Kao što je vidljivo u Tablici 2, takav rezultat upućuje na nedostatnu količinu registriranog signala pri 850 nm, što je zaključeno da je posljedica slabog infracrvenog doprinosa postojeće rasvjete.

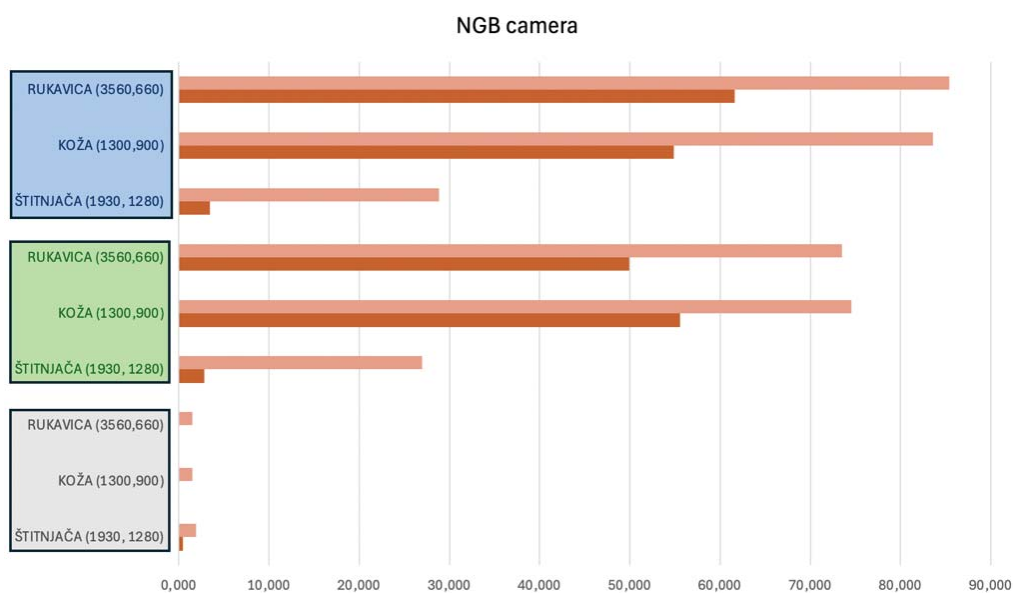
Analiza saturacije na razini svih slojeva dodatno potvrđuje razlike između pojedinih spektralnih kanala. Plavi, zeleni i cijan kanal, kao i NIR kanal pri 808 nm, pokazali su nizak udio zasićenih piksela, što upućuje na očuvan dinamički raspon i stabilnije uvjete ekspozicije. Narančasti kanal pokazao je izraženu saturaciju pri maksimalnoj vrijednosti intenziteta, što potvrđuje preeksponiranost. Suprotno tome, NIR 850 nm pokazao je izrazitu saturaciju pri minimalnoj vrijednosti intenziteta, što potvrđuje podeksponiranost i nedostatak korisnog signala. Ovi su rezultati pregledno vidljivi u redovima koji se odnose na cijelu sliku u Tablicama 1 i 2.

Grafovi 1 i 2 vizualno sažimaju odnose prikazane u Tablicama 1 i 2 te omogućuju bržu usporedbu među spektralnim kanalima i odabranim ROI-jima. Za razliku od tablica, u kojima su prikazane pojedinačne numeričke vrijednosti intenziteta, standardne devijacije, SNR-a, CNR-a i saturacije, grafički prikaz naglašava relativne razlike između kanala te olakšava prepoznavanje kanala s najstabilnijim signalom i najizraženijim kontrastnim odvajanjem od pozadine.



Graf 1 – kvantitativna mjerenja OCN kamere

Usporedba grafova s pripadajućim tabličnim vrijednostima pokazuje da se SNR i CNR moraju interpretirati u odnosu na cjelokupni radiometrijski kontekst. Grafovi jasno ističu kanale s visokim vrijednostima SNR-a i CNR-a, dok tablice omogućuju provjeru jesu li te vrijednosti rezultat očuvanog dinamičkog raspona ili posljedica saturacije na gornjoj odnosno donjoj granici intenziteta. Na taj način tablice i grafovi imaju komplementarnu ulogu: tablice daju precizan numerički uvid, a grafovi olakšavaju interpretaciju ukupnog obrasca ponašanja pojedinog spektralnog kanala.



Graf 2 – kvantitativna mjerenja NGB kamere

Ukupno gledano, rezultati pokazuju da kvaliteta pojedinog spektralnog kanala ne ovisi samo o visokim vrijednostima SNR-a i CNR-a, nego i o tome jesu li te vrijednosti ostvarene unutar očuvanog dinamičkog raspona slike. Najpouzdanijima se mogu smatrati oni kanali koji istodobno imaju dovoljno stabilan signal, dobar kontrast u odnosu na pozadinu i nisku razinu saturacije. U ovom mjerenju takav su obrazac pokazali plavi, zeleni i cijan kanal te djelomično NIR kanal pri 808 nm. Narančasti kanal, unatoč vrlo visokim numeričkim vrijednostima SNR-a i CNR-a, ograničen je zbog preeksponiranosti, dok je NIR 850 nm ograničen zbog izražene podeksponiranosti. Ovi nalazi potvrđuju da se kvantitativni pokazatelji moraju tumačiti zajedno s analizom saturacije i vizualnom procjenom slike, jer tek njihova kombinacija daje realnu procjenu uporabljivosti pojedinog multispektralnog kanala.

4.4. Kamera 3 (3D) / Analiza rezultata

Kamera 3 je stereoskopska kamera opremljena s dva međusobno usklađena objektiva, čime se omogućuje istodobno snimanje dviju perspektivno različitih slika koje odgovaraju lijevom i desnom oku. Ovaj princip rada temelji se na stereopsiji, prirodnom mehanizmu ljudskog vida koji omogućuje percepciju dubine i trodimenzionalnosti [8,9]. Zahvaljujući integriranoj sinkronizaciji između dvaju objektiva, kamera generira par slika koje su međusobno poravnate i spremne za obradu.



Slika 11 – Paralelni zapis iz kamere 3

Nakon pohrane, stereoskopski materijal je importiran na pametni telefon, što je preduvjet za daljnje promatranje videa putem VR naočala. Na samim VR naočalama postoje i regulatori za podešavanje dioptrije, kao i pravilno pozicioniranje dviju slika u skladu s korisnikovom međuzjeničnom udaljenošću. Nakon što se pametni telefon postavi u za to predviđeni prostor VR naočala i izvrše osnovna podešavanja korisnik može promatrati trodimenzionalni sadržaj s izraženim osjećajem dubine. Ovakav način prikaza omogućuje realističan prikaz anatomskih odnosa koji se ne može postići dvodimenzionalnim prikazom, čime se značajno povećava edukativna i dijagnostička vrijednost snimljenog materijala [30,42].

Kvaliteta dobivenog materijala iz Kamere 3 (slika 11) pokazala se vrlo visokom, uz pravilnu reprodukciju prostornog dojma i minimalnu potrebu za dodatnom korekcijom. Jasnoća i oštrina slike, kao i dojam dubine bile su na razini koja zadovoljava zahtjeve za medicinsku primjenu, pa se u ovoj fazi istraživanja daljnja tehnička optimizacija kamere ne smatra potrebnom. Ovi rezultati potvrđuju potencijal stereoskopskog snimanja u kirurškoj sali, te otvaraju mogućnost za integraciju VR tehnologija u edukacijske modele i kiruršku obuku, gdje percepcija dubine može značajno unaprijediti razumijevanje složenih anatomskih odnosa.

4.5. Diskusija rezultata eksperimentalnog snimanja

Provedeno je eksperimentalno snimanje u operacijskim uvjetima kako bi se ocijenile tehničke mogućnosti, kao i ograničenja multispektralnog i stereoskopskog snimanja korištenjem sustava Mul3spect. Ovo, prvo testiranje nije uključivalo cjeloviti integrirani Mul3spect sustav, već je provedeno zasebno snimanje sa svakom kamerom odvojeno, radi ispitivanja njihove primjenjivosti i učinkovitosti u specifičnim prostornim i svjetlosnim uvjetima operacijske sale.

Rezultati multispektralne fotodokumentacije s dvjema kamerama različitih spektralnih konfiguracija Kamerom 1 (OCN) i Kamerom 2 (NGB), jasno su ukazali na različite mogućnosti i izazove ovisno o spektralnom području.

Kamera 1 (OCN) bilježi slike na valnim duljinama od 615nm, 490nm i 808nm. Pri analizi separiranih kanala identificirani su specifični problemi vezani uz ekspoziciju. U kanalu O, pri 615nm utvrđena je izrazita preekspozicija uvjetovanog visokim intenzitetom vidljivog bijelog svjetla operacijske rasvjete (5600K), što je kanal učinilo tehnički neispravnim, te samim time neupotrebljivim. Kanal C na 490nm pružio je visokokvalitetne rezultate, jasno diferencirajući masno tkivo od tkiva same štitnjače, što potvrđuje važnost ove valne duljine za analizu i dokumentaciju anatomskih struktura. Također, kanal N na 808 nm pokazao je vrlo dobre rezultate, osobito u registraciji tragova krvi koji su bili jasno vidljivi, čak i nakon što su prethodno bili počišćeni, što ističe potencijal blisko infracrvenog spektra za identifikaciju informacija koje nisu vidljive golim okom.

Kamera 2 (NGB), koja bilježi podatke na 850nm, 550nm i 475nm, ukazala je na dodatne probleme tehničke prirode. Kanal N (850nm) bio je izrazito podeksponiran, do mjere neprepoznatljivosti područja snimanja, a što je tehnički neupotrebljiva slika. Razlog tome prvenstveno je nedostatak infracrvenog zračenja u standardnoj rasvjeti unutar operacijske sale. Ovaj ishod pokazao je potrebu za dodatnim izvorom infracrvenog osvjetljenja i prilagodbom parametara kamera za buduća snimanja. Kanal G (550nm) i kanal B (475nm) pokazali su visokokvalitetne rezultate s optimalnom ekspozicijom i visokom jasnoćom detalja, kao i velikom općom oštrinom slike omogućavajući kvalitetnu multispektralnu dokumentaciju te jasnu diferencijaciju anatomskih struktura.

Materijal dobiven stereoskopskim snimanjem korištenjem Kamere 3 (3D) također je pokazala obećavajuće rezultate. Ova kamera omogućila je snimanje dviju perspektivno različitih slika, te je pružila visokokvalitetan trodimenzionalni prikaz s minimalnom potrebom za naknadnim postupcima u postprodukciji. Zahvaljujući sinkronizaciji dvaju objektivna, dobivena je dobra kvaliteta slike, točne ekspozicije i oštine što predstavlja značajan korak prema integraciji stereoskopskog snimanja u medicinsku dokumentaciju i edukaciju. Stereoskopski materijal je uspješno prikazan pomoću VR naočala, omogućavajući jasnu percepciju dubine te realističan prikaz anatomskih struktura, čime se potencijalno povećava dijagnostička i edukativna vrijednost snimljenog materijala.

Tijekom provedenog snimanja identificirana su značajna tehnička i organizacijska ograničenja, poput varijacija u spektralnom sastavu rasvjete i prostorne limitacije za pozicioniranje kamere. Zabilježene prepreke i tehnički izazovi omogućili su stvaranje baze informativnih podataka za reviziju i optimizaciju buduće foto i videodokumentacije, s ciljem poboljšanja efikasnosti i sigurnosti provedbe snimanja.

U ovoj, prvoj fazi istraživanja obrada snimljenog materijala provedena je na fotografijama pohranjenima u JPG formatu. Takav je pristup odabran kao početni i tehnički jednostavniji postupak, jer omogućuje brzu vizualnu provjeru sadržaja snimke, osnovnu usporedbu pojedinih kanala i procjenu postoji li uopće razlikovna informacija između kanala dobivenih multispektralnom kamerom. Razdvajanje kanala provedeno je u računalnom programu Fiji/ImageJ primjenom funkcije Split Channels, pri čemu je svaka JPG fotografija rastavljena na tri slikovna kanala. Na taj je način omogućena početna kvalitativna analiza pojedinih komponenti zapisa, odnosno usporedba načina na koji se isti prizor prikazuje u različitim kanalima.

Važno je naglasiti da je ovakav postupak imao prvenstveno eksplorativnu ulogu. Budući da je JPG format već rezultat interne obrade slike unutar kamere, on ne predstavlja izvorni, linearni zapis senzora. Prije spremanja u JPG datoteku slika u kameri prolazi kroz niz postupaka obrade, uključujući *demosaicing*, balans bijele boje, korekcije kontrasta, kompresiju i pretvorbu u 8-bitni prikaz. Zbog toga se razdvojeni kanali dobiveni iz JPG zapisa ne mogu tumačiti kao potpuno neovisni ili fizikalno čisti spektralni kanali. Oni su korisni za vizualnu i orijentacijsku analizu, ali ne omogućuju potpunu kontrolu nad izvornim signalom koji je zabilježen na senzoru.

U sljedećoj fazi istraživanja predviđena je obrada RAW zapisa, jer takav oblik podataka omogućuje izravniji pristup informaciji zabilježenoj na senzoru prije većine internih postupaka obrade slike. Analiza RAW datoteka trebala bi omogućiti preciznije raspakiravanje 12-bitnog zapisa, očuvanje većeg dinamičkog raspona i detaljnije raščlanjivanje strukture multispektralne slike. Time se otvara mogućnost sustavnijeg ispitivanja odnosa između pojedinih kanala, procjene stupnja njihova međusobnog preklapanja te razvoja postupaka kojima bi se dobile pouzdanije i radiometrijski smislenije informacije multispektralnog zapisa.

Poseban je izazov činjenica da upotrijebljene kamere koriste RGB senzor s Bayerovim rasporedom filtarskih elemenata. Iako se ispred senzora nalazi multispektralni filter koji propušta odabrana spektralna područja, sama površina senzora i dalje sadrži informacije preklapljenih crvenog, zelenog i plavog kanala. Zbog toga se signal koji nastaje na pojedinim pikselima ne može promatrati samo kao posljedica vanjskog multispektralnog filtra, nego kao rezultat zajedničkog djelovanja spektralne propusnosti tog filtra, spektralne osjetljivosti senzora i Bayerove filtarske matrice. Drugim riječima, svaki zabilježeni kanal nosi informaciju o određenom spektralnom području, ali istodobno može sadržavati i doprinos drugih područja zbog preklapanja osjetljivosti R, G i B komponenti.

Takvo preklapanje posebno je važno uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata. Informacije koje se nakon jednostavnog razdvajanja prikazuju kao zasebni kanali ne moraju odgovarati potpuno odvojenim spektralnim pojasevima. One predstavljaju kombinirani odziv optičkog sustava, multispektralnog filtra, Bayerove matrice, senzora i naknadne obrade slike. Stoga se u ovoj fazi rezultati dobiveni iz JPG zapisa mogu smatrati preliminarnima, odnosno pogodnima za utvrđivanje vidljivih razlika među kanalima, ali ne i dovoljnima za konačno kvantitativno tumačenje spektralnog sadržaja.

Zbog navedenih ograničenja daljnje istraživanje usmjerava se na RAW zapis i razvoj preciznijeg protokola obrade. Takav protokol treba omogućiti očuvanje izvorne strukture podataka, razdvajanje informacija prije standardne obrade u kameri i procjenu međukanalnog miješanja. Time bi se stvorila čvršća osnova za pouzdaniju analizu multispektralnih informacija te za razlikovanje onih promjena koje proizlaze iz stvarnih spektralnih svojstava promatranog prizora od onih koje nastaju kao posljedica senzorske arhitekture, optičkih ograničenja ili programske obrade slike.

Eksperimentalno snimanje potvrdilo je da multispektralno i stereoskopsko snimanje imaju značajan potencijal za primjenu unutar operacijske sale, ali uz jasno definirane preduvjete u pogledu optimizacije osvjetljenja i tehničkih parametara kamera. Identifikacija konkretnih problema, poput ekspozicijskih izazova u pojedinim spektralnim kanalima, omogućuje usmjeravanje daljnjih istraživanja na praktična rješenja koja će osigurati maksimalnu informativnu vrijednost dobivenih snimaka u budućim fazama istraživanja.

5. TEHNIČKA POSTAVA SUSTAVA MUL3SPECT

Sustav snimanja Mul3spect sastoji se od triju kamera postavljenih na zajedničku nosivu konstrukciju. Kamera 1 u OCN konfiguraciji i Kamera 2 u NGB konfiguraciji namijenjene su multispektralnom snimanju u različitim spektralnim pojasevima, dok Kamera 3 omogućuje stereoskopsko, odnosno 3D videosnimanje. Kamere su pričvršćene na nosivu metalnu šipku pomoću prilagodljivih *magic arm* držača, koji omogućuju precizno pozicioniranje i stabilizaciju pojedinih elemenata sustava, uključujući i dodatnu rasvjetu. Cjelokupna konstrukcija postavljena je na stativ s kotačićima, čime se omogućuje stabilnost sustava tijekom snimanja, ali i njegova lakša prilagodba položaju u prostoru.



Slika 12 - Sustav Mul3spect

Na slikama 12 i 13 prikazani su pojedinačni dijelovi sustava, kao i cjelokupna postava Mul3spect koja je dizajnirana za provedbu eksperimentalnog snimanja u operacijskim uvjetima. Sustav je koncipiran tako da integrira tri kamere različitih tehničkih odnosno spektralnih karakteristika, uz dodatne strukturalne elemente koji omogućuju stabilno pozicioniranje i upravljanje tijekom snimanja. Na slikama 12 i 13 prikazani su *magic arm* držači, koji omogućuju precizno podešavanje položaja svake kamere u odnosu na polje snimanja, stabilan stativ koji osigurava čvrstu osnovu za cijelu konstrukciju te kotačići koji omogućuju jednostavno premještanje sustava unutar ograničenog prostora operacijske sale bez potrebe za rastavljanjem.



Slika 13 - *magic arm* držači

Za potrebe ovog eksperimentalnog postava, sa stativa je uklonjena standardna video glava te je umjesto nje postavljena čelična šipka pod kutom od 90° u odnosu na glavnu os vertikalnog nosača. Takva konfiguracija omogućuje postavljanje kamere u strogo paralelni položaj prema ravlini snimanog polja, čime se izbjegavaju izobličenja perspektive. Održavanje savršene paralelnosti od presudne je važnosti ne samo za postizanje optimalne oštrote slike, nego i za pravilnu rekonstrukciju trodimenzionalnog prikaza, gdje čak i minimalna devijacija može rezultirati smanjenom percepcijom dubine ili neugodnim vizualnim efektima pri stereoskopskom gledanju. Na taj način omogućena je vjerodostojna reprodukcija snimanog područja, nužna za postizanje tehnički optimalnog prikaza.

5.1. Optimizacija tehničke postave sustava

S obzirom na rezultate dobivene tijekom prvog eksperimentalnog snimanja, provedena je analiza učinkovitosti sustava te su doneseni zaključci o nužnim modifikacijama radi optimizacije tehničkih performansi. Kao ključna izmjena identificirana je potreba za ugradnjom dodatnih rasvjetnih tijela koja emitiraju svjetlost u infracrvenom (IR) spektru. Ova nadogradnja bila je neophodna zbog činjenice da je kvaliteta zapisa u određenim spektralnim područjima,

osobito u bliskom infracrvenom području, uvelike ovisna o prisutnosti adekvatnog i kontroliranog izvora zračenja, što posebno dolazi do izražaja u uvjetima rasvjete u operacijskim salama, gdje je IR zračenje minimalno ili odsutno.

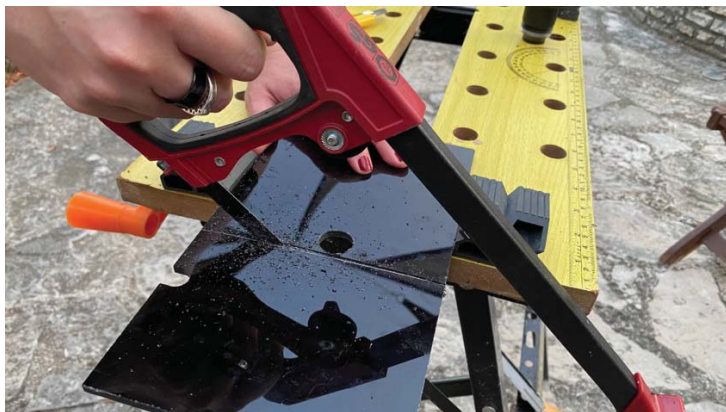
Za tu svrhu pribavljena su rasvjetna tijela namijenjena sigurnosnim kamerama, optimizirana za rad u uvjetima potpunog mraka. Iako je njihova osnovna namjena osiguravanje vidljivosti u niskim svjetlosnim uvjetima, u ovom kontekstu prilagođena su za preciznu kontrolu IR osvjetljenja. Kako bi se omogućio rad tih rasvjetnih tijela i u već rasvijetljenom okruženju, bilo je potrebno onemogućiti rad ugrađenog senzora za automatsko uključivanje pri niskoj razini svjetla. Taj je problem riješen jednostavnim, ali učinkovitim postupkom - senzor je prekriven crnom izolacijskom trakom, a svaki je izvor dodatno presvučen crnim materijalom, čime je sustav zadržao funkcionalnost neovisno o razini ambijentalnog osvjetljenja.

Uz implementaciju rasvjetnih tijela, sustav je nadograđen i većim *magic arm* držačima, čime je omogućeno sigurno i fleksibilno pozicioniranje izvora svjetla u odnosu na kamere. Pri tome je zadržana modularna struktura postava pa su rasvjetna tijela postavljena na konstrukciju istim principom kao i kamere, što osigurava dobar kut osvjetljenja te samim time minimizira neželjene sjene ili refleksije.



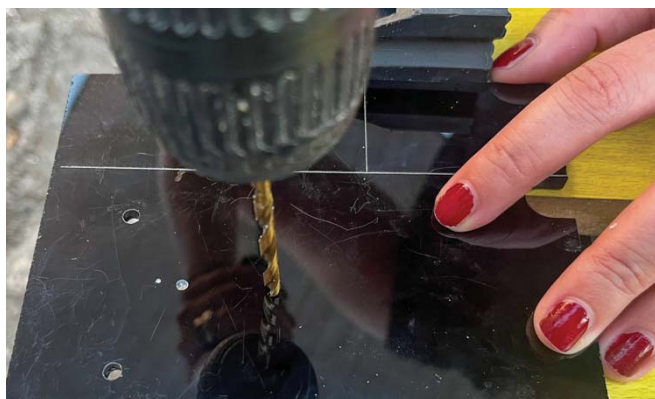
Slika 14 - Infracrveni izvori svjetla na sustavu

Iako su rasvjetna tijela dimenzijski i svojom težinom prihvatljiva s aspekta ukupnog opterećenja sustava, kao problematičan se pokazao način njihove ugradnje na *magic arm* nosače koji bi bio trajan svojom mehaničkom stabilnošću i siguran u radu. Stoga su projektirana i izrađena dva prilagođena adaptera od crnog polimetil-metakrilata (PMMA, pleksiglas) koji čine spoj između kućišta rasvjetnog tijela i kuglasto-zglobnog sustava *magic arm* te omogućuju fiksiranje samog rasvjetnog tijela na nosivu metalnu šipku sustava.



Slika 15 - Izrada adaptera za rasvjetna tijela

Geometrija adaptera definirana je tako da ravnomjerno raspodijeli opterećenje na kontaktne plohe te minimizira lokalne koncentracije naprezanja u području pričvrstnih točaka. Rubovi su zaobljeni kako bi se smanjila mogućnost oštećenja kabela i olakšalo čišćenje, a funkcionalne površine izvedene su dovoljno kruto da ograniče mikro-pomake pod dinamičkim utjecajima, poput vibracija i pomaka pri uporabi zglobova nosača.



Slika 16 - Bušenje rupa na adapteru

Radi povećanja pouzdanosti spojeva, u PMMA pločicama strojno su izbušene rupe odgovarajućeg promjera, uz ugradnju rasječenih elastičnih podložaka (opružnih podložaka) i

pripadajućih matica na svakoj točki pričvršćenja. Takva konfiguracija povećava otpornost na samootpuštanje navoja uslijed vibracija i ponovljenih manipulacija položajem rasvjetnih tijela, istodobno zadržavajući mogućnost servisnog podešavanja bez oštećenja osnovnog materijala. Odabir PMMA-a kao materijala za adaptere omogućuje dobar omjer mase i krutosti te glatke, neporozne površine pogodne za rutinsko brisanje i održavanje u kliničkom okruženju.



Slika 17 - Brušenje rubova adaptera

Ugradnja je izvedena tako da osi opterećenja ostaju unutar stabilnog raspona rada zglobova *magic arma*, čime se smanjuju mehanička naprezanja središnjih spojnica te osigurava precizno pozicioniranje rasvjete u odnosu na operativno polje. Kabliranje rasvjetnih tijela usmjereno je uzduž nosača s dodatnim rasterećenjem naprezanja na priključcima kako napetost kabela ne bi inducirala pomake adaptera ili zglobova. Tijekom završne montaže provedena je kontrola priteznih momenata vijaka i provjera mehaničke stabilnosti svih spojeva, uz vizualni pregled površina PMMA-a radi uočavanja mogućih mikropukotina oko otvora. Za češću upotrebu definirana je procedura periodičke provjere steznih spojeva i vizualne kontrole integriteta adaptera, s mogućnošću brze zamjene potrošnih elemenata (podložaka i matica) bez demontaže cijelog sustava.

Posebna je pažnja usmjerena na statičku i dinamičku ravnotežu cjelokupne konstrukcije. Postavljanje izvora svjetla na istu stranu metalne šipke na kojoj su smještene kamere stvara dodatno opterećenje, čime se povećava rizik od mikropomaka u zglobovima i postupnog otpuštanja vijčanih spojeva uslijed vibracija. Radi stabilizacije sklopa i uravnoteženja težišta, na suprotnu stranu šipke postavljeni su *sandbagovi* (vreće s pijeskom) kao pasivni protutezi. Njihov položaj translacijski je prilagođavan duž osi šipke sve do postizanja približno neutralne

ravnoteže, uz sigurnosnu rezervu koja uzima u obzir promjene konfiguracije sustava, poput promjene kuta rasvjetnih tijela ili dodatne opreme na kamerama.

Sandbagovi su postavljeni na nosivu šipku i osigurani sigurnosnim vezicama kako bi se onemogućilo klizanje ili pomicanje pri manipulaciji sustavom. Na taj je način postignuta ravnomjernija raspodjela mase te su smanjeni mehanički stresovi na spojeve i držače, što posljedično reducira kumulativni umor materijala i produljuje vijek trajanja spojeva. U postupku balansiranja, nakon inicijalnog pozicioniranja rasvjete i kamera, provodi se fino podešavanje položaja protuutega i provjera stabilnosti laganim pobuđivanjem sustava (simulacija dinamičkog poremećaja), uz kontrolu povratka u zadani položaj bez trajnih pomaka.

Također, na sustav je dodan izvor struje koji može služiti za sve funkcionalne dijelove sustava (kamere i izvore svjetla), kao i za druge uređaje.



Slika 18 - Optimiziran Mul3spect sustav

Radi pojednostavljenja napajanja i smanjenja broja zasebnih pretvarača, na sustav je integriran centralizirani izvor električne energije u obliku letvice sa šest ulaza, koji napaja sve funkcionalne dijelove sustava (kamere i rasvjetu), uz mogućnost priključenja dodatnih perifernih uređaja. Vodovi su označeni i mehanički rasterećeni, s vođenjem kabela uz konstrukcijske elemente kako bi se izbjegla interferencija s radnim prostorom i smanjio rizik od nenamjernog povlačenja.

Za potrebe nadzora i upravljanja kamerama izrađena je kontrolna ploča od PMMA-a (istog materijala kao i adapteri za rasvjetna tijela), na koju su fiksirana tri pametna telefona koja služe za praćenje tijeka snimanja i podešavanje parametara kamera. Ploča je projektirana s glatkim, zaobljenim rubovima i dovoljno krutim materijalom kako bi se spriječili mikro-pomaci zaslona pri manipulaciji te olakšalo čišćenje. Pametni telefoni učvršćeni su vakuumskim adhezivnim elementima, s ograničenjem pomaka i mogućnošću brze demontaže radi održavanja i punjenja. Raspored zaslona usklađen je s tipičnim tijekom rada: omogućeno je istodobno praćenje prikaza uživo, kao i pristup osnovnim kontrolama ekspozicije, balansa bijele, osjetljivosti i stanja snimanja. Napajanje upravljačkih uređaja izvedeno je iz vanjskog punjača baterija, koji se nalazi s donje strane ploče.



Slika 19 - Kontrolna ploča

5.2. Oštrina, udaljenosti i ugradnja leća

U primjeni multispektralnih kamera tipa MAPIR Survey3N u intraoperativnim uvjetima uočen je značajan nesklad između tvorničkih optičkih postavki i praktičnih zahtjeva snimanja. Kamere su projektirane za primjene u agronomiji i zračnom snimanju, gdje se očekuju velike radne udaljenosti, zbog čega je objektiv inicijalno podešen na fokusiranje u području od nekoliko metara. U konkretnom slučaju minimalna udaljenost izoštravanja iznosi približno 4,55 m, što onemogućuje izravnu primjenu u kirurškom okruženju. Dok su se pri ručnom snimanju kamere uobičajeno nalazile na udaljenosti od približno 10 do 30 cm od operativnog polja, primjena Mul3spect sustava zahtijeva radne udaljenosti od približno 30 do 70 cm kako bi se omogućio stabilan položaj sustava i neometan rad kirurškog tima. Takva razlika između minimalne udaljenosti izoštravanja objektiva i potrebnih radnih udaljenosti u kirurškom okruženju zahtijeva dodatnu optičku prilagodbu sustava.

Rješenje se postiglo primjenom dodatnih konvergentnih leća – makro leća, odnosno *close-up* filtera, kojima se smanjuje minimalna udaljenost izoštravanja. Time se efektivno pomiče područje izoštravanja bliže senzorskoj ravnini, pri čemu se odnos između originalne udaljenosti izoštravanja objektiva s_0 , nove udaljenosti s i dioptrijske vrijednosti filtera D može opisati jednostavnom relacijom:

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{s_0} + D$$

Ova relacija proizlazi iz osnovnih zakonitosti geometrijske optike i zbrajanja optičkih jakosti leća [49,50]. Pritom oznaka s predstavlja udaljenost objekta od optičkog sustava, odnosno udaljenost na kojoj se nalazi ravnina u kojoj je slika oštra. Drugim riječima, s je radna udaljenost fokusa - udaljenost između kamere (točnije, njezine glavne ravnine) i snimanog objekta. U praksi to znači da veća dioptrijska vrijednost filtera dovodi do fokusiranja na manjim udaljenostima, dok manja dioptrijska vrijednost zadržava fokus na većim udaljenostima.

Osim pomicanja same ravnine fokusa, primjena *close-up* filtera utječe i na dubinsku oštrinu. Kada je na objektivu postavljen fokusiran na beskonačnost, najveća udaljenost na kojoj je moguće postići oštru sliku određena je ponajprije dioptrijom primijenjenog *close-up* filtera. Ta

udaljenost približno odgovara recipročnoj vrijednosti dioptrije filtera ($1/D$). Minimalna udaljenost izoštravanja pritom ovisi o kombinaciji tvornički definirane minimalne udaljenosti objektiva i primijenjenog filtera. Povećanjem dioptrije fokus se pomiče prema manjim udaljenostima, ali se istodobno značajno sužava i dubinska oštrina, odnosno raspon udaljenosti unutar kojeg je moguće postići oštru sliku. [49–51].

U tablici su prikazani izračuni raspona izoštravanja za odabrane vrijednosti dioptrije, uz pretpostavku minimalne udaljenosti objektiva od 4,55 m:

Tablica 3 - izračuni udaljenosti oštrine

Dioptrija (D)	Početak oštrine (cm)	Kraj oštrine (cm)	Raspon (cm)
+1	82,0	100	82 – 100
+2	45,0	50,0	45 – 50
+3	31,1	33,3	31,1 – 33,3
+4	23,7	25,0	23,7 – 25,0
+10	9,8	10,0	9,8 – 10,0

Dobiveni rezultati pokazuju kako se dioptrijska vrijednost povećava, radna udaljenost se smanjuje, ali se istovremeno drastično sužava dubinska oštrina. Kod viših dioptrija (npr. +3 i više), raspon oštine postaje vrlo uzak, što znači da fokusiranje u praksi zahtijeva pomicanje cijelog sustava kamera u prostoru. Takav ishod posebno je važan za uzeti u obzir kada je riječ o dinamičnim uvjetima unutar operacijske sale, gdje stabilnost sustava i ponovljivost geometrije snimanja imaju ključnu ulogu. Izrazito plitka dubinska oštrina uvjetuje da samo vrlo tanak sloj prostora ostaje u fokusu, dok sve izvan te ravnine brzo izlazi iz fokusa [49,50]. Ovakav plitki fokus može biti koristan za naglašavanje određenih struktura, ali istovremeno otežava održavanje konzistentne oštrine tijekom snimanja, osobito u dinamičnom okruženju gdje može doći do mikro-pomaka kamere ili objekta snimanja. Posljedično, izbor dioptrije predstavlja kompromis između željene radne udaljenosti i prihvatljive dubinske oštrine, koja mora biti dovoljna za pouzdanu vizualizaciju relevantnih detalja.

Važno je dodatno naglasiti da uvođenje *close-up* filtera ne utječe isključivo na geometriju fokusa, već može modificirati i optička svojstva sustava, uključujući kontrast i aberacije, što je osobito relevantno u multispektralnim sustavima gdje je očuvanje spektralne informacije od velike važnosti [49,50].

Na temelju prikazanog sklopa na slici 20 vidljivo je da je prilagodba kamere izvedena mehaničkim proširenjem prednjeg optičkog sustava kako bi se omogućila integracija standardnih fotografskih filtera. Budući da izvorni objektiv kamere nema navoj kompatibilan s uobičajenim promjerima filtera, uveden je među-komponentni element - adapter - koji služi kao prijelaz između tvorničkog promjera objektivna i standardnog navoja (u ovom slučaju 37 mm). Time je omogućeno korištenje komercijalno dostupnih *close-up* i polarizacijskih filtera bez trajnih modifikacija same kamere.



Slika 20 – dijagram optičkog sklopa

Adapter je mehanički pričvršćen na prednji dio objektivna, čime se definira nova referentna ravnina za montažu dodatne optike. Na tako pripremljen sustav sukcesivno su dodani makro (*close-up*) filteri različitih dioptrija, koji preuzimaju funkciju pomicanja fokusa prema manjim radnim udaljenostima.

Dodatno, kao završni element optičkog sklopa uveden je cirkularni polarizacijski filter, postavljen nakon makro leća, čija je primarna funkcija kontrola refleksija odnosno odblijesaka s površine tkiva i kirurških instrumenata. Polarizacija omogućuje selektivno smanjenje površinskih refleksija, dok se difuzno raspršena svjetlost, koja nosi informaciju o strukturi tkiva, u većoj mjeri zadržava, čime se poboljšavaju kontrast i čitljivost snimke. [51,52]. U multispektralnom kontekstu to je posebno važno jer odblijesci mogu maskirati suptilne razlike u refleksiji između spektralnih kanala, osobito u vidljivom području. Postavljanje polarizacijskog filtera kao završnog elementa optičkog lanca omogućuje da njegov učinak bude primijenjen na cjelokupni modificirani snop svjetlosti nakon prolaska kroz makro optiku, čime se osigurava konzistentna kontrola refleksija bez dodatnog utjecaja na geometriju fokusiranja.

Ovakva konfiguracija omogućuje modularnost sustava, odnosno brzu izmjenu dioptrijskih vrijednosti ovisno o potrebnoj radnoj udaljenosti, uz istovremeno zadržavanje mogućnosti kontrole refleksija i odsjaja na površini tkiva.

Važno je istaknuti da ovakav način prilagodbe ne mijenja unutarnju konstrukciju kamere, već djeluje isključivo na ulazni optički put, čime se očuva integritet izvornog senzorskog i filtracijskog sustava. Time se osigurava da promjene u snimljenom signalu proizlaze primarno iz kontrolirane modifikacije geometrije fokusiranja i optičkih svojstava ulazne svjetlosti, a ne iz intervencija u samoj kameri, što je posebno važno za ponovljivost i standardizaciju eksperimentalnih uvjeta.

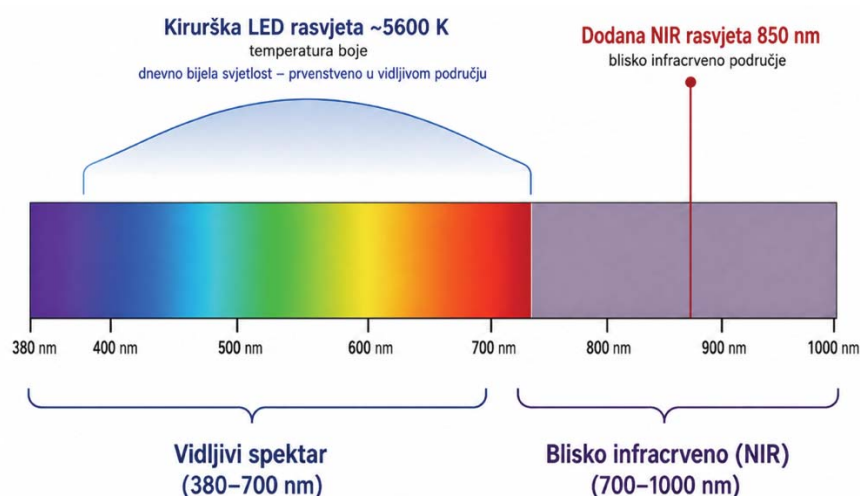
5.3. Rasvjeta

U operacijskoj sali snimanje je provedeno u uvjetima intenzivne postojeće kirurške rasvjete, koja je nužna za sigurno izvođenje operacijskog zahvata i na koju tijekom snimanja nije bilo moguće izravno utjecati. Riječ je o snažnim LED izvorima svjetla približno dnevne temperature boje (5600K), prilagođenima vizualnoj percepciji kirurškog polja i razlikovanju tkiva u vidljivom dijelu spektra. Takva rasvjeta osigurava vrlo dobru osvijetljenost za ljudsko oko i za standardne RGB zapise, ali istodobno ne osigurava jednak intenzitet zračenja u bliskom infracrvenom području. Zbog toga je odnos između vidljivih i infracrvenih kanala tijekom multispektralnog snimanja bio izrazito neuravnotežen: vidljivi kanali bili su snažno pobuđeni,

dok je odaziv u NIR području, osobito oko 850 nm, bio vrlo slab ili u pojedinim snimanjima gotovo potpuno odsutan.

Ovaj je problem bio posebno izražen u prvim fazama snimanja, u kojima su razlike u spektralnom sastavu rasvjete dovele do neujednačene ekspozicije između pojedinih kanala. Kanali povezani s vidljivim dijelom spektra mogli su biti pravilno eksponirani ili čak preeksponirani zbog jakog intenziteta operacijske rasvjete, dok su infracrveni kanali istodobno ostajali podeksponirani. Posljedično, u kanalu od približno 850 nm nije bilo moguće dobiti dovoljno korisnih slikovnih informacija, jer postojeći izvori svjetla u sali nisu stvarali dostatan podražaj senzora u tom spektralnom području. Time je potvrđeno da kvaliteta multispektralnog zapisa ne ovisi samo o karakteristikama kamere i filtara, nego i o spektralnom sastavu rasvjete kojom je scena osvijetljena.

Kako bi se umanjila ta neravnoteža, u sustav su naknadno uvedena dodatna rasvjetna tijela u bliskom infracrvenom području, s nominalnom valnom duljinom od 850 nm. Njihova je uloga bila dopuniti postojeću operacijsku rasvjetu u dijelu spektra koji nije dovoljno zastupljen u standardnim LED kirurškim izvorima. Na taj se način nastojalo postići funkcionalno izjednačavanje uvjeta osvjetljenja između vidljivih kanala, koji su bili pobuđeni glavnom rasvjetom operacijske sale, i infracrvenih kanala, osobito onih oko 808 nm i 850 nm. Cilj nije bio mijenjati standardne uvjete operacije, nego dodati kontrolirani infracrveni izvor koji ne ometa vizualni rad kirurškog tima, a istodobno omogućuje registraciju informacija izvan vidljivog spektra.



Slika 21 – postojeća kirurška rasvjeta i dodana NIR rasvjeta nm

Dodatni tehnički problem proizlazio je iz same konstrukcije korištenih infracrvenih rasvjetnih tijela. Budući da su ona izvorno namijenjena za sigurnosne sustave, predviđena su za automatsko uključivanje pri smanjenoj količini ambijentalnog svjetla. U uvjetima operacijske sale, gdje je razina osvjetljenja vrlo visoka, ugrađeni senzori nisu registrirali potrebu za aktivacijom, pa se lampe nisu automatski uključivale. Zbog toga je bilo potrebno fizički onemogućiti prodor svjetla do senzora na kućištu lampe. To je izvedeno postavljanjem crnih zaštitnih navlaka preko kućišta, a preko njih su, radi dodatnog prekrivanja i prilagodbe uvjetima rada u sali, postavljene sanitarne rukavice. Takva improvizirana, ali funkcionalna prilagodba omogućila je kontinuirano uključivanje infracrvenih izvora tijekom snimanja.

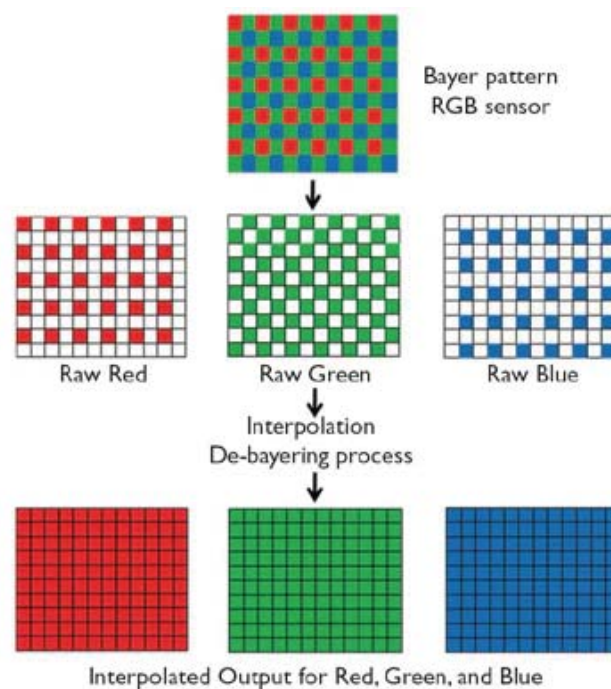
Infracrvene lampe usmjerene su prema istom području operacijskog polja koje je bilo osvijetljeno glavnim kirurškim svjetlima. Time se nastojalo postići što veće prostorno preklapanje vidljive i infracrvene rasvjete, odnosno osigurati da isti anatomske detalji budu osvijetljeni u oba spektralna područja. Takav raspored bio je važan zbog kasnije usporedbe pojedinih kanala, jer bi različit smjer ili raspodjela svjetla mogli proizvesti promjene u sjeni, refleksiji i lokalnom kontrastu koje nisu posljedica spektralnih svojstava tkiva, nego same postavke rasvjetnih tijela. Stoga je dodatna NIR rasvjeta postavljena kao dopunski izvor, u kombinaciji s postojećim osvjetljenjem operacijskog polja, kako bi se povećala količina korisnih informacija u infracrvenim kanalima bez narušavanja standardnog kirurškog tijeka rada.

6. RAW ZAPIS MULTISPEKTRALNOG MATERIJALA

Korištene multispektralne kamere se, u svojoj osnovnoj optičko-elektroničkoj arhitekturi, sastoje od senzora, multispektralnog optičkog filtra, objektiva i kućišta. Senzor koji je ugrađen je Sony Exmor R IMX117, CMOS senzor formata 1/2.3", rezolucije 12 MP, odnosno 4000×3000 piksela, s približnom veličinom piksela od $1,55 \mu\text{m}$. Važno je naglasiti da taj senzor nije monokromatski senzor, nego trokanalni Bayer RGB senzor (slika 22). MAPIR u vlastitoj dokumentaciji izričito navodi da Survey3 kamere sadrže 12-megapikselni, trokanalni Bayer RGB senzor te da je iznad senzora postavljen poseban band-pass filter koji propušta samo odabrane valne duljine svjetlosti [53].

Posljedica takve konstrukcije jest da multispektralnost nije ostvarena monokromatskim senzorom s potpuno odvojenim spektralnim kanalima, nego kombinacijom pred-senzorskog optičkog filtriranja i Bayerove filterske matrice. Drugim riječima, svjetlost najprije prolazi kroz MAPIR-ov multispektralni filter, zatim kroz Bayerov CFA (eng. *Color Filter Array*) raspored na senzoru, a tek potom se registrira kao električni signal u pojedinim fotosenzitivnim elementima.

Takva arhitektura ima važne metodološke posljedice za raspakiravanje izvornih podataka. U izvornom RAW zapisu pojedini fotosenzor ne mjeri boju u smislu potpunog RGB podatka za svaku prostornu lokaciju, nego lokalni intenzitet svjetlosti koji je već spektralno modificiran dvama filtarskim sustavima: najprije vanjskim MAPIR *band-pass* filtrom, a zatim Bayerovim RGB filtrom. Bayerov uzorak uobičajeno se sastoji od ponavljajućeg 2×2 rasporeda RGGB, s dvama zelenim, jednim crvenim i jednim plavim filtrom, nakon čega se interpolacijom nedostajućih vrijednosti rekonstruira trokanalna slika [54,55]. Upravo taj postupak interpolacije (*demosaicing* ili *debayering* kod Bayerova rasporeda filtera), pretvara mozaik sirovih vrijednosti u potpunu trokanalnu sliku. Budući da svaki piksel u RAW mozaiku sadrži samo jednu izmjerenu vrijednost pripadajuće filtarske pozicije, preostale dvije kanalne vrijednosti u rekonstruiranoj slici računalno se procjenjuju iz susjednih piksela. Zbog toga *demosaicing* nije neutralan postupak, nego rekonstrukcijski algoritam koji može utjecati na lokalnu oštrinu, rubne prijelaze, teksturu, šum, detalje i relativne odnose među kanalima [55,56].



Slika 22 – Bayer senzor raspodjela vrijednosti piksela (izvor: www.mapir.camera.com)

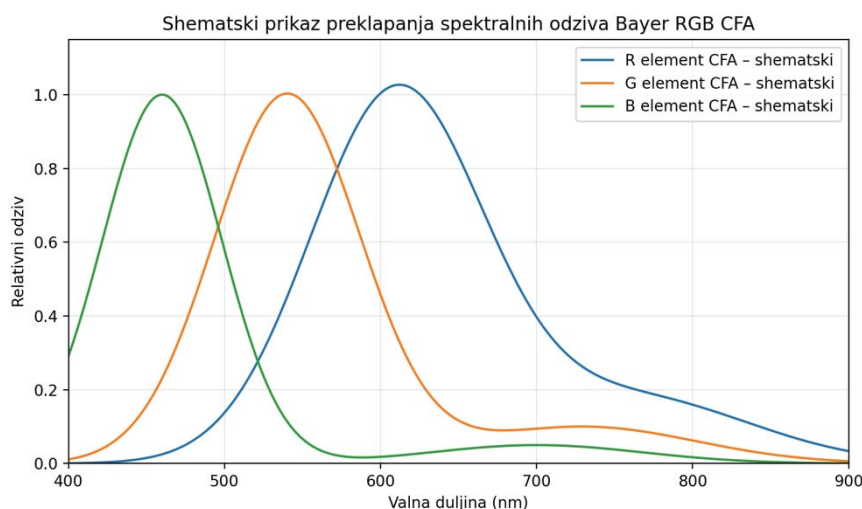
Za znanstvenu interpretaciju MAPIR Survey3N OCN i NGB snimaka osobito je važno razlikovati izvorni Bayer RAW zapis od interpoliranog RGB/TIFF ili JPG izlaza. Najvrjedniji zapis za kvantitativnu analizu jest onaj koji ostaje što bliže izvornom RAW mozaiku, jer taj zapis čuva izvorni prostorni raspored izmjerenih vrijednosti prije interpolacije, balansa bijele boje, tonskih korekcija i kompresije. JPG zapis, iako praktičan za brzu vizualnu procjenu, prolazi kroz interni slikovni procesor kamere, pri čemu se mogu primijeniti *demosaicing*, automatski ili ručni *white balance*, kontrast, oština, gamma krivulja, korekcije boja, kao i *lossy* kompresija (kompresija s gubitkom). MAPIR-ov priručnik potvrđuje da uključivanje RAW načina rada uz JPEG pohranjuje dodatnu RAW fotografiju, dok je JPG namijenjen neposrednom pregledavanju [57]. Zbog toga se JPG ili već interpolirani izlazi mogu koristiti za orijentacijsku vizualnu analizu i kvalitativnu usporedbu, ali nisu optimalni za strogu spektralnu dekonstrukciju.

Korištene MAPIR Survey3N kamere u OCN i NGB konfiguracijama imaju različite pred-senzorske filtre (slika 24 i 25). Za OCN model MAPIR navodi kanale sa spektralnim vrhovima na približno 615 nm, 490 nm i 808 nm, dok za NGB model navodi kanale sa spektralnim vrhovima na približno 850 nm, 550 nm i 475 nm [53]. To znači da se u ovom sustavu ne registrira kontinuirani spektar, nego tri relativno uska spektralna područja odabrana optičkim filtrom.

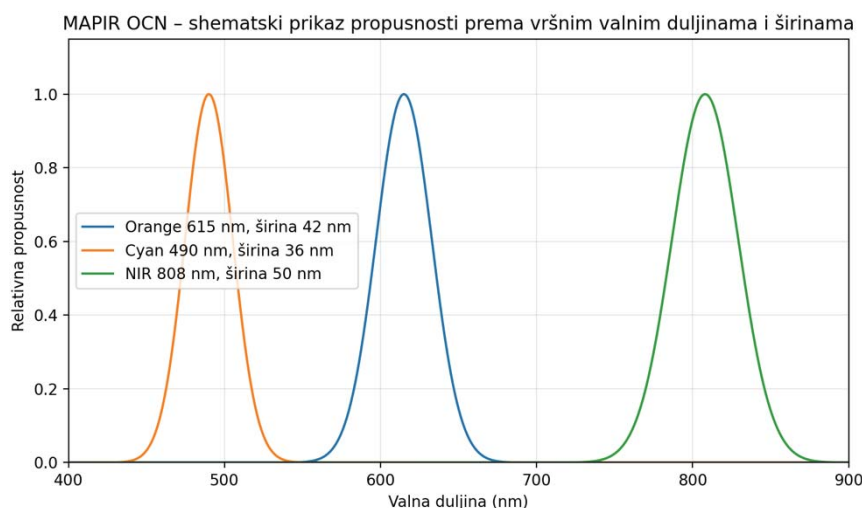
Ipak, zbog činjenice da se ti pojasevi naknadno uzorkuju Bayer RGB senzorom, izlazni kanali ne smiju se tumačiti kao potpuno neovisni monokromatski zapisi. MAPIR dodatno objašnjava da u tradicionalnim RGB kamerama s Bayerovom matricom R, G i B kanali ne propuštaju isključivo svoje idealizirane vidljive boje, nego mogu registrirati i druge valne duljine, uključujući *RED edge* i NIR područje; kod filtera koji propuštaju NIR to znači da se NIR doprinos može pojaviti u više Bayerovih kanala [54]. U praktičnom smislu to objašnjava zašto se NIR dominantne informacije u OCN ili NGB snimkama mogu pojavljivati u više od jednoga izlaznog kanala, a ne samo u nominalnom NIR kanalu.

Takvo međukanalno preklapanje nije nužno pogreška obrade, nego očekivana posljedica optičko-senzorske arhitekture. Bayerovi R, G i B elementi imaju vlastite spektralne krivulje osjetljivosti koje se međusobno preklapaju, a u području bliskog infracrvenog zračenja mogu zadržati određenu preostalu osjetljivost (slika 23). Kada se ispred takvog senzora postavi višepojasni *band-pass* filter, konačni signal u svakom Bayerovu kanalu nastaje kao kombinacija transmisije vanjskog filtera, spektralne osjetljivosti Bayerova kanala, spektra izvora svjetlosti i refleksijskih svojstava snimane površine. U literaturi o multispektralnim filterskim matricama naglašava se da se kod jednosenzorskih multispektralnih sustava spektralna informacija dobiva prostorno-spektralnim uzorkovanjem, pri čemu su rekonstrukcija slike, *demosaiicing* i spektralno međudjelovanje kanala sastavni dio obradnog lanca [58]. Istraživanja su pokazala da kod takvih sustava treba uzeti u obzir karakteristike samih filtera, odziv senzora i moguće *cross-leak* (*crosstalk*) ili interferencijske učinke među kanalima [58].

Zbog toga su OCN i NGB snimke u ovom istraživanju interpretirane kao spektralno selektivni, ali ne apsolutno nezavisni kanali. Preciznije, radi se o Bayer filtriranom multispektralnome zapisu: vanjski MAPIR filter selektivno propušta ciljane valne duljine, ali ih zatim bilježi senzor koji je izvorno projektiran kao RGB Bayer senzor. Stoga kanal označen kao 850 nm, 808 nm, 615 nm, 550 nm, 490 nm ili 475 nm ne predstavlja idealnu monokromatsku spektrometrijsku mjeru, nego relativni slikovni zapis nastao iz poznatog optičkog filtriranja, spektralnog odziva senzora i naknadne digitalne obrade. MAPIR u vlastitoj dokumentaciji navodi da se za dobivanje ispravnih kanalnih vrijednosti mora provesti korekcija senzorskog odziva, jer se u suprotnom u kanalima zadržava interferirajući doprinos, primjerice NIR komponenta u vidljivim kanalima [54]. Time se potvrđuje da sirovi odnos kanala ne treba interpretirati kao idealno razdvojen bez korekcijskog postupka.

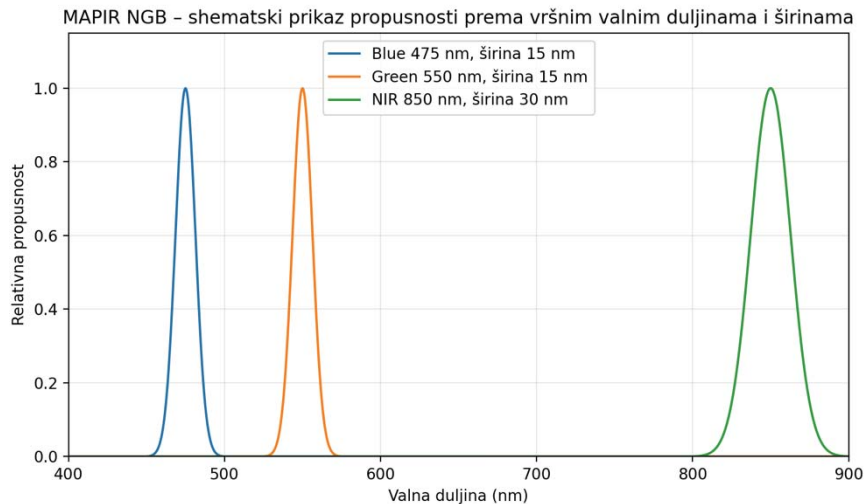


Slika 23 – shematski prikaz preklapanja spektralnih odziva Bayer RGB senzora



Slika 24 – shematski prikaz propusnosti OCN filtera

Raspakiravanje RAW zapisa provedeno je upravo s ciljem očuvanja što izvornije, linearnije i znanstveno korisnije informacije. Budući da je RAW zapis 12-bitni zapis senzorskih vrijednosti, on omogućuje veći dinamički raspon od 8-bitnog JPG-a te zadržava podatke prije većine slikovnih transformacija koje se događaju u internom procesiranju kamere. U postupku raspakiravanja RAW datoteka najprije se čita binarni zapis senzorskih vrijednosti, zatim se rekonstruira 12-bitna vrijednost piksela, a potom se vrijednosti organiziraju u matricu dimenzija 4000×3000 px. Nakon toga se matrica može spremati kao 16-bitni TIFF, pri čemu se 12-bitni podaci čuvaju unutar 16-bitnog spremnika. Takav TIFF ne znači da je izvorni signal postao 16-bitni u fizikalnom smislu, nego da je 12-bitna senzorska informacija pohranjena u formatu prikladnijem za obradu u programima kao što su *Fiji/ImageJ* ili drugi alati za kvantitativnu analizu slike.



Slika 25 – shematski prikaz propusnosti NGB filtera

Nakon raspakiravanja RAW mozaika moguća su dva osnovna pristupa. Prvi pristup jest analiza samog Bayer mozaika, odnosno izdvajanje pojedinih CFA položaja, primjerice R, G1, G2 i B uzorka iz RGGB rasporeda. Taj je pristup najbliži izvornom mjerenju jer izbjegava interpolaciju, ali prostorno razdvaja podatke i zahtijeva oprez pri usporedbi kanala. Drugi pristup jest *demosaicing*, odnosno interpolacija vrijednosti kojom se iz Bayer mozaika rekonstruira trokanalna slika. Taj je pristup pregledniji za vizualnu analizu i omogućuje rad s punim kanalnim slikama, ali uključuje algoritamski procijenjene vrijednosti. U literaturi je dokumentirano da različiti *demosaicing* algoritmi mogu proizvesti različite rezultate, osobito na rubovima, u finim teksturama i u područjima s visokim kontrastom [55,56]. Zbog toga su u ovom radu RAW i 16-bitni TIFF izlazi metodološki važniji za kvantitativnu obradu, dok su interpolirani ili JPEG izlazi korisni kao dopunski vizualni materijal.

Za dodatno razdvajanje spektralnih informacija polazilo se od pretpostavke da vrijednost svakoga slikovnog elementa ne predstavlja potpuno izoliranu spektralnu informaciju, nego zapis koji nastaje zajedničkim djelovanjem filtra, senzora i osvjetljenja. Drugim riječima, vrijednosti zabilježene u pojedinim kanalima slike mogu sadržavati doprinos više valnih područja, osobito zato što korišteni senzor ima Bayerovu RGB strukturu, a njegovi se kanali spektralno preklapaju. Kod OCN kamere promatrani su kanali povezani s približnim područjima od 490 nm, 615 nm i 808 nm, dok su kod NGB kamere promatrani kanali povezani s približnim područjima od 475 nm, 550 nm i 850 nm. Cilj obrade nije bio proizvesti potpuno fizički čiste spektralne kanale, nego procijeniti koliki dio zabilježene slikovne vrijednosti može pripadati pojedinom spektralnom području.

U tom je postupku svaka slikovna vrijednost promatrana kao mješavina više doprinosa. Za svaki piksel analizirane su vrijednosti zabilježene u određenim kanalima, a zatim se pokušalo odvojiti dominantne doprinose pojedinih spektralnih pojaseva. Takav pristup temelji se na činjenici da se kod jednosenzorskih RGB–NIR multispektralnih sustava vidljive i blisko infracrvene informacije mogu međusobno preklapati, pa je za njihovo razdvajanje potreban računalni postupak koji uzima u obzir odziv senzora i propusnost filtra. Prethodna istraživanja opisuju upravo taj problem kod RGBN multispektralnog senzora: bez infracrvenog (IR) *cut-off* filtra NIR komponenta ulazi u RGB kanale, smanjuje zasićenost boje i mijenja zapis vidljivih kanala, zbog čega se primjenjuju postupci spektralne estimacije i spektralne dekompozicije [59].

U ovom istraživanju taj je koncept prilagođen MAPIR zapisima. Transmisijske karakteristike filtara i pretpostavljeni spektralni odziv Bayerovih R, G i B kanala korišteni su kao osnova za procjenu koliko pojedini kanal slike može sadržavati doprinos ciljanog valnog područja. Dobiveni rezultat stoga treba tumačiti kao računalno procijenjenu separaciju kanala, a ne kao izravno snimljene, potpuno neovisne monokromatske spektralne zapise. Ograničenje takvog pristupa proizlazi iz činjenice da se informacije djelomično preklapaju već u trenutku snimanja, pa naknadna obrada može smanjiti miješanje i naglasiti razlike među kanalima, ali ih ne može potpuno ukloniti. U tom smislu *unmixing* može biti vrlo koristan za povećanje razlika među tkivima, izdvajanje NIR dominantnih struktura, usporedbu kontrasta i smanjenje vidljivog međukanalnog preklapanja, ali se njegovi rezultati trebaju prikazivati kao relativni, sustavom uvjetovani spektralni kontrasti.

U kontekstu kirurške dokumentacije takav pristup ipak ima znatnu vrijednost. MAPIR Survey3N OCN i NGB kamere omogućuju istodobno bilježenje vidljivih i blisko infracrvenih komponenti reflektirane svjetlosti u kompaktnom sustavu koji se može prilagoditi radu u operacijskoj okolini. Budući da tkiva, krv, masno tkivo, koža, rukavice i instrumenti mogu imati različita refleksijska svojstva u vidljivom i NIR području, usporedba kanalnih intenziteta, omjera, kontrasta, saturacije te SNR i CNR vrijednosti može otkriti razlike koje nisu jednako izražene u standardnoj RGB fotografiji. Međutim, zbog Bayerove arhitekture i međukanalnog preklapanja, interpretacija se mora temeljiti na relativnim odnosima unutar istog snimateljskog sustava, a ne na tvrdnji da svaki kanal predstavlja potpuno neovisnu fizičku mjeru reflektancije. Takva formulacija omogućuje znanstveno opreznu, ali tehnički opravdanu upotrebu MAPIR kamera u eksperimentalnoj dokumentaciji tkiva.

Stoga se u ovom radu korištene MAPIR Survey3N OCN i NGB kamere mogu opisati kao jednosenzorske multispektralne kamere temeljene na Bayer RGB senzoru, kod kojih se multispektralni zapis ostvaruje kombinacijom vanjskog *band-pass* filtra, Bayerova CFA uzorkovanja i naknadne digitalne rekonstrukcije. Raspakiravanje RAW zapisa predstavlja nužan korak za očuvanje izvornije senzorske informacije i smanjenje utjecaja JPG obrade, dok se interpolacija, kanalno razdvajanje i linearni *unmixing* primjenjuju kao računalni postupci kojima se iz mozaik zapisa nastoje dobiti interpretabilne slike pojedinih spektralnih pojaseva. Dobiveni kanali stoga se ne prikazuju kao apsolutno čisti spektrometrijski zapisi, nego kao spektralno selektivne slike izvedene iz poznate optičko-senzorske arhitekture.

7. OPTIMIZACIJA SUSTAVA I PROTOKOLA SEPARACIJE KANALA

Nakon optimizacije sustava ugradnjom dodatnih izvora infracrvenog (IR) svjetla te prilagodbom držača pomoću izrađenih adaptera za postavljanje rasvjetnih tijela, organizirana je i provedena probna verifikacija sustava u operacijskoj sali, pod istim svjetlosnim i prostornim uvjetima kao pri prethodnom snimanju. Ova probna faza realizirana je bez prisutnosti pacijenta, što je omogućilo slobodniju manipulaciju sustavom i testiranje svih konfiguracija rasvjete bez ometanja kirurškog tima. Primarni cilj ovog testiranja bio je provjeriti može li dodatni IR izvor svjetla doprinijeti izjednačavanju ekspozicije u svim spektralnim kanalima multispektralnih kamera, čime bi se omogućila preciznija analiza podataka iz svakog spektralnog područja zasebno. Time se nastojalo smanjiti oscilacije u ekspoziciji među kanalima koja je u prethodnim snimanjima otežavala usporedbu i obradu dobivenih podataka.

Sekundarni cilj istraživanja bio je ispitati mogućnost razlaganja RAW slikovnog zapisa kao metodološki prikladnijeg i informacijski potpunijeg formata za znanstvenu analizu multispektralnih snimaka. Budući da su se prethodna eksperimentalna snimanja uglavnom provodila u JPG formatu, analiza je bila ograničena komprimiranim i već procesiranim slikovnim zapisom, pri čemu se razdvajanje kanala najčešće izvodilo pomoću funkcije Split Channels. Takav se postupak pokazao korisnim za početnu vizualnu procjenu, ali nedovoljno preciznim za pouzdanu kvantitativnu interpretaciju spektralnih informacija, osobito zbog gubitka dijela spektralnih podataka, utjecaja automatske obrade slike unutar kamere te mogućeg preklapanja informacija između pojedinih kanala.

Zbog toga je u optimiziranoj fazi rada sustava naglasak stavljen na proširenje načina snimanja i obrade, s ciljem očuvanja što većeg opsega izvornih multispektralnih informacija. RAW zapis pritom je razmatran kao pogodnija osnova za daljnju analizu jer sadrži neobrađene podatke senzora prije primjene kompresije, korekcije boje, gama transformacije i drugih internih algoritama kamere. Takav pristup omogućuje preciznije raspakiravanje slikovnog zapisa, izdvajanje informacija iz pojedinih senzorskih elemenata te potencijalno kvalitetnije razdvajanje spektralnih komponenti u odnosu na analizu izvedenu isključivo iz JPG datoteka.

Proba je provedena u praznoj operacijskoj sali, pri čemu je važno naglasiti da takvi uvjeti omogućuju veći stupanj fleksibilnosti u rukovanju sustavom, no istovremeno ne reproduciraju

u potpunosti kompleksnost radnog okruženja tijekom stvarnog kirurškog zahvata. Ipak, ovakav pristup omogućio je detaljno ispitivanje tehničkih parametara, posebno postavki ekspozicije i oštine slike, te uklanjanje rizika od smetnji u radu medicinskog osoblja.

Za razliku od prethodnih snimanja, u ovoj je fazi obrada slikovnih podataka provedena prema izmijenjenom i proširenom protokolu. Umjesto primarne analize JPG datoteka i naknadnog razdvajanja njihovih RGB kanala, postupak je započeo raspakiravanjem izvornoga RAW zapisa. Time se nastojalo pristupiti podacima koji su bliži neobrađenom izlazu senzora, odnosno informacijama zabilježenima prije interne obrade slike unutar kamere.

Nakon raspakiravanja RAW datoteke provedena je separacija kanala u mjeri u kojoj je to bilo moguće s obzirom na tehnička ograničenja korištenog senzora i optičko-filtracijskog sustava. Budući da se multispektralne informacije bilježe preko senzora s Bayerovim rasporedom elemenata, a spektralne osjetljivosti pojedinih kanala nisu potpuno odvojene, pri razlaganju je bilo potrebno uzeti u obzir preklapanje spektralnih područja i pojavu međukanalnog utjecaja, odnosno *cross-talk*. Zbog toga izdvojeni kanali ne predstavljaju potpuno izolirane monokromatske zapise, nego rezultat računalne separacije u kojoj se nastoji što bolje razlučiti doprinos pojedinih spektralnih komponenti.

Kôd za raspakiravanje RAW datoteka izrađen je u programskom jeziku *Python3*, kao i algoritamski postupak razlaganja zapisa na zasebne kanale. Takav pristup omogućio je veću kontrolu nad obradom podataka u odnosu na standardne funkcije za razdvajanje kanala, budući da se svaki korak obrade mogao definirati, ponoviti i prilagoditi specifičnostima snimljenog materijala. Program *Fiji/ImageJ* korišten je za naknadnu vizualnu provjeru rezultata, mjerenja intenziteta i kontrasta u odabranim područjima interesa te za dodatnu obradu u slučajevima kada je ona bila potrebna.

Važno je naglasiti da se pri raspakiravanju RAW zapisa izvorna 12-bitna informacija pohranjivala u 16-bitni slikovni kontejner. Zbog toga su pojedine slike pri prvom prikazu mogle izgledati podeksponirano ili izrazito tamno. Takav izgled nije nužno upućivao na pogrešku u samom snimanju, nego je posljedica načina prikaza i raspodjele vrijednosti unutar širega 16-bitnog tonskog prostora. Drugim riječima, prilikom pohranjivanja iz 12-bitnog u 16-bitni kontejner, informacija nije izgubljena, nego je smještena u veći dinamički raspon, zbog čega je za pravilnu vizualizaciju i analizu bilo potrebno prilagoditi prikazne vrijednosti, primjerice

promjenom raspona prikaza ili normalizacijom intenziteta, bez narušavanja izvornih numeričkih podataka.

7.1. Izrada kôda

Za potrebe obrade RAW zapisa i izdvajanja spektralnih informacija izrađen je računalni kôd u programskom jeziku *Python3*, razvijen uz pomoć alata *Codex*. Kôd je oblikovan tako da omogućuje obradu sirovih slikovnih podataka dobivenih MAPIR Survey3N kamerama te njihovo razlaganje na procijenjene spektralne zapise ovisno o korištenoj filtarskoj konfiguraciji kamere.

Prvi korak u obradi bio je učitavanje izvorne RAW datoteke dobivene MAPIR Survey3N OCN kamerom. Budući da RAW zapis ne predstavlja gotovu fotografiju, nego sirove vrijednosti koje dolaze iz senzora, podaci su najprije morali biti raspakirani u slikovnu matricu. Drugim riječima, datoteka se iz oblika u kojemu su vrijednosti piksela zapisane kao niz bajtova pretvara u dvodimenzionalnu sliku odgovarajuće rezolucije. Kôd pritom prepoznaje standardni MAPIR RAW zapis, kao i RAW/DNG zapis koji se može otvoriti pomoću biblioteke *rawpy*. U slučaju MAPIR zapisa, podaci se preslaguju u očekivanu veličinu slike, najčešće 4000×3000 px, odnosno 2144×1608 px kod digitalno zumiranih zapisa. Time se dobiva početna jednokanalna RAW slika u obliku Bayerova mozaika.

Nakon raspakiravanja provedena je linearizacija slikovnih vrijednosti. To znači da se sirove vrijednosti piksela najprije korigiraju za crnu razinu senzora, a zatim se normaliziraju prema maksimalnoj, odnosno bijeloj vrijednosti. Na taj način slika se prevodi u raspon od 0 do 1, pri čemu 0 označava potpuno crne dijelove, a 1 potpuno bijele dijelove zapisa. Nakon toga Bayerov se mozaik razlaže na četiri osnovne ravnine koje odgovaraju rasporedu piksela u 2×2 bloku senzora: R, G1, G2 i B. U standardnoj fotografiji te bi se ravnine koristile za rekonstrukciju RGB slike, no kod multispektralne OCN kamere njihovo značenje je drugačije. Budući da se ispred senzora nalazi OCN filter, svaka od tih ravnina sadrži mješavinu informacija iz cijan, narančastog i NIR područja. Zbog toga se R, G1, G2 i B ravnine ne promatraju kao konačni kanali, nego kao početne komponente iz kojih se pokušavaju izdvojiti tri korisna spektralna zapisa.

```

def linearize_mosaic(mosaic: np.ndarray, black_level: int, white_level: int) -> np.ndarray:
    x = mosaic.astype(np.float32)
    x = x - float(black_level)
    x[x < 0] = 0.0
    x /= max(float(white_level - black_level), 1.0)
    return np.clip(x, 0.0, 1.0)

def mosaic_to_cfa_planes(mosaic_lin: np.ndarray):
    H, W = mosaic_lin.shape
    H2 = (H // 2) * 2
    W2 = (W // 2) * 2
    m = mosaic_lin[:H2, :W2]

    r = m[0::2, 0::2]
    g1 = m[0::2, 1::2]
    g2 = m[1::2, 0::2]
    b = m[1::2, 1::2]

    clipped = ((r >= 0.995) | (g1 >= 0.995) | (g2 >= 0.995) | (b >= 0.995))
    return r, g1, g2, b, clipped

```

Slika 26 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE

Nakon toga se u obradu uvode informacije o propusnosti OCN filtra i očekivanom ponašanju Bayerova senzora. Kôd može koristiti službenu tablicu propusnosti MAPIR Survey3N OCN filtra ili, ako ona nije dostupna, zamjenski model propusnosti. Iz te se krivulje određuju tri dominantna područja koja se žele izdvojiti: cijan, narančasto i NIR. Time se dobivaju tri zasebne slike koje predstavljaju procijenjeni signal u cijan, narančastom i bliskom infracrvenom području.

Budući da se spektralni odzivi senzora i filtra međusobno preklapaju, postupak separacije ne može biti potpuno mehaničko izdvajanje jednog Bayer kanala u jedan spektralni kanal. Zato se u kôdu koristi pristup koji uzima u obzir očekivano preklapanje signala. Svaka točka slike promatra se kroz četiri početne vrijednosti, odnosno kroz R, G1, G2 i B komponentu, a zatim se procjenjuje koja kombinacija cijan, narančastog i NIR signala najbolje objašnjava opažene vrijednosti u tim četirima ravninama. Pritom se koristi i mekani prior, odnosno blaga pretpostavka (eng. *soft reference*) o tome koji Bayer kanal najviše doprinosi kojem spektralnom području. Ta pretpostavka ne prisiljava rezultat, nego stabilizira razdvajanje i smanjuje mogućnost da se isti sadržaj pojavi u sva tri izlazna kanala.

U finalnoj verziji kôda uveden je stabilniji način razdvajanja kanala nego u ranijim pokušajima. Umjesto da se signal najprije izračuna, a zatim negativne ili nepoželjne vrijednosti jednostavno odrežu, koristi se postupak koji od početka traži samo fizički smisljeno rješenje, odnosno rješenje bez negativnih vrijednosti. To je važno jer spektralni doprinos pojedinog kanala ne može biti manji od nule. Na razini slike to znači da se pokušava smanjiti umjetno miješanje kanala i dobiti čišći prikaz cijan, narančastih i NIR informacija.

```

MAPIR_OCN_CHANNEL_PRIOR = np.array(
    [
        [0.04, 0.78, 0.10], # R: dominant orange
        [0.46, 0.10, 0.12], # G1: dominant cyan
        [0.46, 0.10, 0.12], # G2: dominant cyan
        [0.04, 0.02, 0.66], # B: dominant NIR
    ],
    dtype=np.float64,
)

def compute_a4(t, sr, sg, sb, wl, bands=None, channel_prior_weight=0.0):
    A = np.zeros((4, 3), dtype=np.float64)
    S = [sr, sg, sb] # R, G1, G2, B
    active_bands = list(bands) if bands is not None else OCN_FALLBACK_BANDS.copy()

    for j, (lo, hi) in enumerate(active_bands):
        mask = (wl >= lo) & (wl <= hi)
        tj = np.where(mask, t, 0.0)
        for i in range(4):
            A[i, j] = np.trapezoid(S[i] * tj, wl)

    spectral_only = normalize_columns(A)

    return blend_mapir_channel_prior(
        spectral_only,
        channel_prior_weight
    ), active_bands.copy(), spectral_only

```

Slika 27 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE

Kôd omogućuje dva načina razdvajanja. Zadani način istodobno procjenjuje sva tri izlazna kanala, odnosno cijan, narančasti i NIR. Drugi, stariji način tretira NIR kao zajedničku komponentu koja je djelomično prisutna u svim Bayer ravninama, zatim ga privremeno oduzima i nakon toga razdvaja vidljive cijan i narančaste komponente. Taj stariji način ostavljen je uglavnom radi usporedbe s prethodnim iteracijama kôda.

Nakon osnovne separacije kanala provodi se dodatna obrada radi smanjenja šuma. Budući da se radilo s RAW podacima i izdvojenim spektralnim komponentama, osobito NIR kanal može biti slabiji i šumovitiji, posebno ako tijekom snimanja nije bilo dovoljno infracrvenog zračenja. Vidljivi kanali i NIR kanal mogu se obrađivati različito, jer se ne ponašaju jednako. U zadanim postavkama NIR kanal se dodatno blago zaglađuje kako bi se smanjila zrnatost, ali bez agresivnog gubitka detalja.

Nakon smanjenja šuma može se primijeniti blago lokalno pojačanje kontrasta u NIR kanalu. Taj korak ne stvara novu informaciju, nego pokušava učiniti postojeće NIR razlike vidljivijima. Kôd pritom uspoređuje lokalne razlike u slici s lokalnom pozadinom i pojačava detalje samo u područjima u kojima postoji dovoljno signala. Time se nastoji izbjeći situacija da se jednako snažno pojača i šum u tamnim dijelovima slike. Taj korak ima ponajprije vizualnu funkciju, odnosno služi tome da se NIR zapis lakše pregleda i interpretira.

```

packed, dbg = cfa_aware_ocn_unmix_full(
    Y4,
    A4,
    lam_full=lam_full,
    visible_competition=visible_competition,
)

cyan = packed[0].reshape(Hc, Wc)
orange = packed[1].reshape(Hc, Wc)
nir = packed[2].reshape(Hc, Wc)
rnorm = packed[3].reshape(Hc, Wc)

cyan = postprocess_channel(
    cyan,
    denoise_mode=denoise_visible,
    smooth_radius=visible_smooth_radius,
    blend=smooth_blend,
)

orange = postprocess_channel(
    orange,
    denoise_mode=denoise_visible,
    smooth_radius=visible_smooth_radius,
    blend=smooth_blend,
)

nir = postprocess_channel(
    nir,
    denoise_mode=denoise_nir,
    smooth_radius=nir_smooth_radius,
    blend=smooth_blend,
)

nir = enhance_nir_local_contrast(
    nir,
    radius=nir_local_radius,
    gain=nir_local_gain
)

```

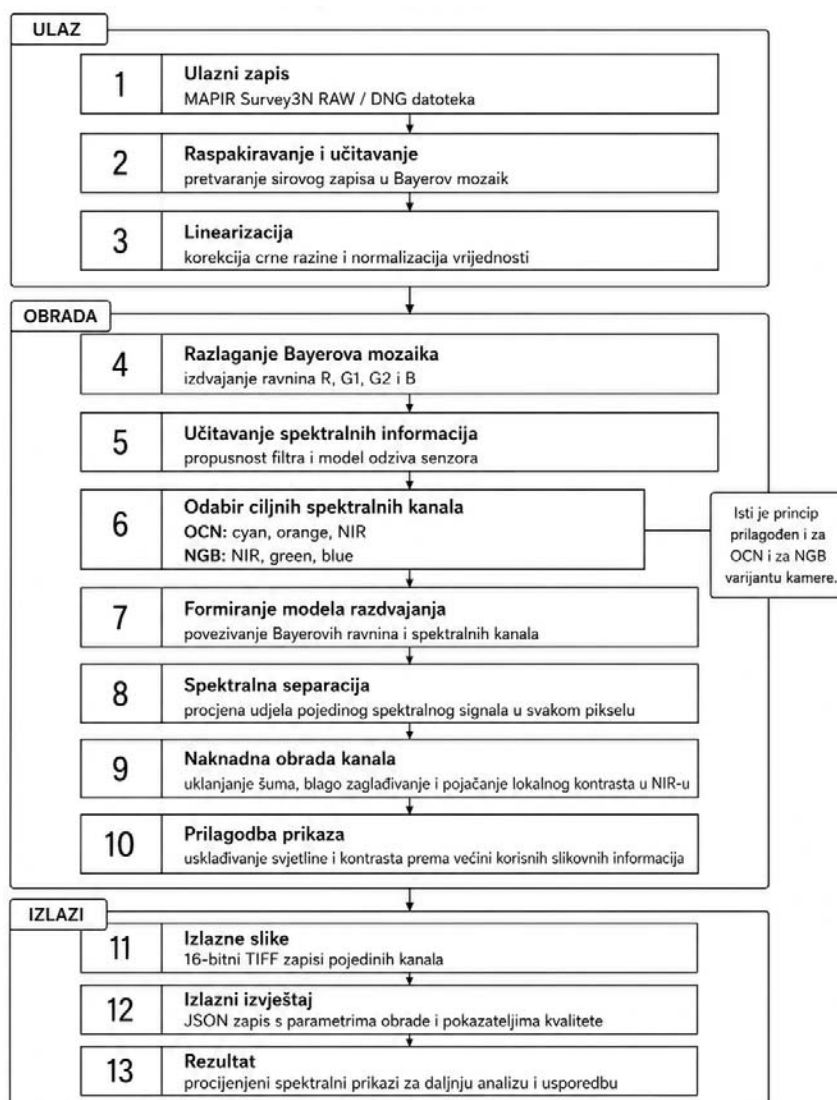
Slika 28 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE

Dobiveni kanali zatim se pripremaju za spremanje kao 16-bitne TIFF slike. Budući da izračunate vrijednosti kanala nemaju nužno isti raspon kao standardna fotografija, provodi se prilagodba svjetline i kontrasta prema većini korisnih slikovnih informacija, umjesto prema pojedinačnim ekstremno svijetlim pikselima. To znači da se vrlo rijetke ekstremno visoke vrijednosti ne uzimaju kao jedina osnova za prikaz, nego se informacije rastežu prema većini korisnih podataka. Time se dobiva bolji vizualni kontrast, osobito kod slabijih kanala. Za NIR kanal se može koristiti zaseban prag skaliranja jer je često slabiji ili neravnomjerniji od vidljivih kanala.

Na kraju se u izlazni direktorij spremaju tri zasebne TIFF slike: *CYAN*, *ORANGE* i *NIR*. One predstavljaju procijenjene spektralne zapise izdvojene iz iste RAW datoteke. Uz slike se sprema i *JSON* izvještaj u kojemu su navedene sve informacije u tekstualnom obliku: ulazna datoteka, korišteni način dekodiranja, dimenzije slike, odabrane spektralni pojasevi, korištene postavke obrade, udio zasićenih piksela, procjene ostatka pogreške i osnovni pokazatelji kvalitete signala. Taj izvještaj je koristan zato što omogućuje ponovljivost postupka i kasniju provjeru istih postavki obrade.

Cjelokupni postupak može se opisati kao *RAW-only* pokušaj razdvajanja multispektralnih informacija iz OCN kamere. Pritom treba naglasiti da dobiveni kanali nisu apsolutna reflektancija tkiva, nego procijenjeni relativni zapisi cijan, narančastog i NIR signala. Njihova vrijednost je ponajprije u usporedbi kontrasta, vidljivosti struktura i razlika među spektralnim područjima, dok bi za strogo kvantitativnu reflektancijsku analizu bila potrebna dodatna radiometrijska kalibracija pomoću referentnih ciljeva i kontroliranih uvjeta osvjetljenja.

Navedeni je kôd, uz odgovarajuće izmjene ulaznih spektralnih parametara, prilagođen i NGB varijanti kamere, pri čemu se umjesto OCN konfiguracije procjenjuju kanali koji odgovaraju NIR, zelenom i plavom spektralnom području. Time je zadržana ista logika *RAW-only* obrade, dok su ciljni izlazni zapisi usklađeni s filtarskom konfiguracijom pojedine kamere.



Slika 29 – Hodogram postupka obrade RAW zapisa

7.2. Rezultati probnog snimanja

Kao testni objekt odabrano je standardno postolje, odnosno jastuk za stabilizaciju glave pacijenta tijekom operacije. Odabir ovog objekta bio je prikladan jer njegova površinska struktura, zakrivljenost, tekstura materijala i prijelazi između osvijetljenih i zasjenjenih dijelova omogućuju procjenu više tehničkih parametara snimanja. Na temelju takvog objekta moguće je analizirati sposobnost sustava da reproducira fine površinske detalje, zadrži geometrijsku stabilnost prikaza te održi ravnomjernu i kontroliranu ekspoziciju u različitim spektralnim kanalima. Osim toga, materijal postolja pokazuje određena refleksijska svojstva, zbog čega je bio prikladan i za uočavanje mogućih odblijesaka ili gubitka detalja u pojedinim dijelovima slike. Takva provjera osobito je važna jer se u stvarnom kirurškom polju također pojavljuju materijali različite refleksivnosti, zakrivljene površine, sjajni instrumenti i promjenjivi odnosi između direktnog i raspršenog svjetla.

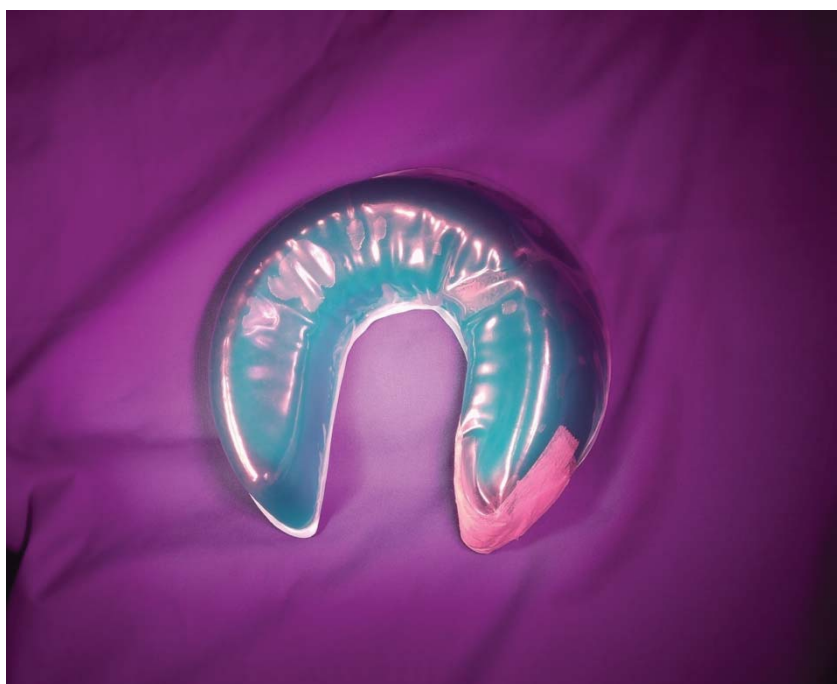
Tijekom probnog snimanja zadržani su uvjeti osvijetljenja koji odgovaraju uvjetima tijekom stvarnog kirurškog zahvata. Glavno operacijsko svjetlo bilo je postavljeno na način koji odgovara standardnom radu u operacijskoj sali, bez promjene njegovog intenziteta i položaja u odnosu na polje snimanja. Time je osigurano da se sustav ne testira u umjetno optimiziranim laboratorijskim uvjetima, nego u uvjetima koji su usporedivi s realnim operacijskim okruženjem. U odnosu na prethodno testiranje, ključna tehnička izmjena odnosila se na uvođenje dodatnog infracrvenog izvora svjetla. Budući da standardna operacijska LED rasvjeta ima vrlo ograničen doprinos u bliskom infracrvenom području, prethodni su rezultati pokazivali neravnomjeran odnos između vidljivih i NIR kanala. Uvođenjem dodatnog IR izvora postignuta je znatno uravnoteženija ekspozicija, osobito u NIR kanalu, ali i stabilniji odnos između sva tri spektralna kanala kamere.

Za razliku od ranije faze istraživanja, u kojoj su se spektralni kanali analizirali jednostavnim razdvajanjem JPG slike, u ovoj je fazi korišten RAW zapis slike.

Rezultati probnog snimanja pokazuju da je ovakav pristup omogućio znatno stabilniji zapis u sva tri kanala i OCN i NGB kamere. Vidljivo je da su nakon uvođenja dodatnog IR osvijetljenja kanali pravilno eksponirani, bez izraženog gubitka informacija u tamnim područjima i bez preespozicije u svijetlim dijelovima slike. Time je riješen jedan od glavnih tehničkih problema

uočenih u prethodnoj fazi snimanja, kada su pojedini kanali bili izrazito neujednačeni zbog spektralnog sastava operacijske rasvjete. U ovom testu dobiveni su kanali koji se mogu uspoređivati na tehnički pouzdaniji način jer su oštrina, kontrast i ekspozicija dovoljno stabilni za daljnju analizu.

7.2.1. Kamera 1 (OCN) / 615nm, 490nm i 808nm



Slika 30 - Kamera 1 (OCN) direktno iz kamere

Nakon raspakiravanja RAW datoteke i primjene postupka razdvajanja spektralnih komponenti dobiveni su zasebni prikazi kanala O, C i N. U usporedbi s ranijim postupkom jednostavnijeg razdvajanja JPG kanala, ovaj pristup omogućuje bolju kontrolu nad izvornim slikovnim podacima i smanjuje utjecaj automatske obrade koju provodi kamera. Dobiveni rezultati zato se mogu smatrati tehnički relevantnijima za procjenu stvarnog potencijala korištene multispektralne kamere.

7.2.1.1. Kanal O (615nm)



Slika 31 - Kanal O (490nm) nakon razdvajanja kanala

Na slici 31 prikazan je kanal O, sa spektralnim vrhom na približno 615 nm. U ovom je kanalu vidljiva dobra ekspozicija i očuvana jasnoća površinskih detalja testnog objekta. Za razliku od prvotnih rezultata istraživanja, u kojima je kanal u ovom dijelu spektra pokazivao sklonost prema preekpoziciji i gubitku tonskih prijelaza, ovdje je zabilježen stabilniji raspon vrijednosti. Površina postolja prikazana je ujednačeno, uz jasne prijelaze između svjetlijih i tamnijih dijelova, što upućuje na bolju kontrolu intenziteta svjetla i bolji odnos između osvjetljenja i odziva senzora.

Ovaj rezultat potvrđuje da uvođenje dodatnog IR izvora nije negativno utjecalo na vidljivi dio zapisa, nego je omogućilo uravnoteženiji rad cijelog sustava. Kanal O zadržao je tehnički kvalitetan prikaz, bez izraženih artefakata i bez izgubljenih detalja. Time je potvrđeno da se nakon prilagodbe osvjetljenja ovaj kanal može koristiti kao stabilan dio multispektralnog zapisa, osobito za usporedbu s kraćim vidljivim valnim duljinama i s bliskim infracrvenim područjem.

7.2.1.2. Kanal C (490nm)



Slika 32 - Kanal C (615nm) nakon razdvajanja kanala

Na slici 32 prikazan je kanal C, sa spektralnim vrhom na približno 490 nm. U ovom kanalu vidljiva je dobra definicija površinske strukture, uz jasnu reprodukciju rubova i lokalnih detalja na testnom objektu. Kanal C pokazuje drugačiji odnos svjetline i kontrasta u usporedbi s kanalom O, što potvrđuje da razdvojeni kanali u vizualnom spektru ne predstavljaju samo ponavljanje iste slikovne informacije, nego sadrže različite spektralne doprinose. Takva razlika važna je jer upućuje na mogućnost da se pojedini spektralni pojasevi i u vizualnom spektru mogu koristiti za naglašavanje različitih vizualnih i površinskih karakteristika snimanog prizora.

U tehničkom smislu, kanal C pokazuje pravilnu ekspoziciju, očuvanu oštrinu i dobru čitljivost detalja. Nisu uočeni izraženi problemi s podeksponiranošću, preeksponiranošću ili gubitkom strukture i detalja, što znači da je postupak snimanja i obrade dao upotrebljiv rezultat. U kontekstu budućih snimanja tijekom stvarnih operacijskih zahvata, ovaj je kanal osobito važan jer kraće vidljive valne duljine mogu naglasiti površinske razlike i teksturu. Dobiveni rezultat stoga predstavlja dobar pokazatelj da bi se kanal C mogao koristiti kao informativan dio multispektralne analize kirurškog polja.

7.2.1.3. Kanal N (808nm)



Slika 33 - Kanal N (808nm) nakon razdvajanja kanala

Na slici 33 prikazan je kanal N, koji odgovara bliskom infracrvenom području sa spektralnim vrhom na približno 808 nm. Ovaj je kanal bio posebno važan za procjenu uspješnosti tehničke prilagodbe sustava, jer su prethodna testiranja pokazala da standardna operacijska rasvjeta ne osigurava dovoljan intenzitet svjetla u infracrvenom području. Zbog toga su raniji NIR zapisi bili skloni podeksponiranosti, slabijem kontrastu i gubitku korisnih informacija. U novom testiranju, nakon dodavanja IR izvora svjetla, kanal N pokazuje znatno bolju ekspoziciju i jasniji prikaz objekta.

Na prikazu se vidi da je površina testnog objekta čitljiva i da su osnovni oblici, rubovi i tonski prijelazi očuvani. To potvrđuje da je dodatni IR izvor uspješno nadopunio spektralni nedostatak postojeće operacijske rasvjete. Posebno je važno da NIR kanal više nije tehnički najslabija komponenta zapisa, nego se može ravnopravno analizirati uz vidljive kanale. Time je omogućena pouzdanija multispektralna usporedba, jer sva tri kanala sada imaju zadovoljavajuću razinu ekspozicije i dovoljnu količinu slikovnih informacija za daljnju obradu.

Dobiveni rezultati pokazuju da je kombinacija prilagođenog osvjetljenja, RAW zapisa i računalnog spektralnog *unmixinga* omogućila značajan napredak u odnosu na raniji postupak

temeljen na JPG slikama. Dok je prethodni pristup bio prikladan za početnu vizualnu procjenu i jednostavno razdvajanje kanala, novi pristup omogućuje tehnički precizniju analizu jer se temelji na izvornijim podacima i na postupku koji je posebno dizajniran za razdvajanje miješanih spektralnih informacija. Na taj je način potvrđeno da Kamera 1 (OCN) može dati upotrebljive i tehnički kvalitetne zapise u sva tri spektralna područja - 615 nm, 490 nm i 808 nm - pod uvjetom da je sustav osvjetljenja prilagođen tako da uključuje i odgovarajući infracrveni doprinos.

Ovo testiranje pokazalo je da su prethodno uočeni problemi s neravnomjernom ekspozicijom u velikoj mjeri bili povezani s nedostatkom infracrvene komponente u operacijskoj rasvjeti, a ne isključivo s ograničenjima same kamere. Uvođenjem dodatnog IR izvora i prelaskom s JPG obrade na RAW zapis stvoreni su uvjeti za pouzdanije razdvajanje spektralnih kanala. Dobiveni prikazi potvrđuju da se sustav može koristiti za daljnja snimanja u operacijskom okruženju, pri čemu će zasebni spektralni kanali omogućiti detaljniju procjenu vizualnih i refleksijskih razlika koje nisu jednako izražene u standardnoj RGB fotografiji.

7.2.2. Kamera 2 (NGB) / 850 nm, 550 nm, i 475 nm



Slika 34 - Kamera 2 (NGB) fotografija dikertno iz kamere

Kompozitna slika dobivena Kamerom 2 (slika 34), koja registrira informacije u spektralnim pojasevima na približno 850 nm, 550 nm i 475 nm, pokazala je tehnički i sadržajno vrlo ohrabrujuće rezultate. Već na početnoj kompozitnoj slici vidljivo je da ova kamera bilježi drugačiji skup informacija u odnosu na Kameru 1 (OCN), što potvrđuje da su dvije korištene spektralne konfiguracije međusobno komplementarne. Drugim riječima, iako obje kamere snimaju isti prizor, raspored odabranih valnih duljina omogućuje registraciju različitih refleksijskih odgovora promatranog objekta. Upravo je ta komplementarnost važna za daljnju primjenu sustava, jer upućuje na mogućnost da se kombiniranjem dviju kamera ostvaruje širi i informativniji multispektralni prikaz nego što bi to bilo moguće uporabom samo jedne spektralne konfiguracije.

Kao i u prethodno opisanom testiranju, i u ovom je slučaju zadržan isti eksperimentalni princip: snimanje je provedeno u uvjetima koji odgovaraju stvarnom operacijskom okruženju, uz zadržavanje osnovnog operacijskog osvjetljenja i uz dodatak infracrvenog izvora svjetla. Na temelju RAW informacija izrađen je i primijenjen kôd dizajniran za spektralni *unmixing*, odnosno za računalno razdvajanje miješanih spektralnih doprinosa koji nastaju zbog preklapanja odziva RGB Bayer senzora i NGB multispektralnih filtara postavljenih ispred senzora.

Dobiveni rezultati pokazuju da je uvođenje dodatnog IR izvora svjetla i prelazak na RAW obradu omogućio bitno uravnoteženiji zapis u sva tri kanala NGB kamere. U prethodnim testiranjima osobito je problematičan bio NIR kanal pri 850 nm, koji je zbog nedostatnog infracrvenog doprinosa operacijske rasvjete bio izrazito podeksponiran, pa time i praktično neupotrebljiv za analizu. U novim uvjetima taj je problem otklonjen, a ekspozicija je postala usporediva između sva tri spektralna kanala. Time su stvoreni uvjeti za pouzdaniju međusobnu usporedbu kanala, ali i za precizniju procjenu dodatnih informacija koje se mogu izdvojiti unutar pojedinog spektralnog pojasa.

Nakon raspakiravanja RAW zapisa i provedbe spektralnog *unmixinga* dobiveni su zasebni prikazi N, G i B kanala. Ti rezultati potvrđuju da NGB kamera ne pruža samo tehnički zadovoljavajući zapis, nego i sadržajno razlikovne informacije koje mogu biti osobito vrijedne pri budućim snimanjima kirurškog polja.

7.2.2.1. Kanal N (850nm)



Slika 35 - Kanal N (850nm) nakon separacije kanala

Na slici 35 prikazan je N kanal, koji odgovara bliskom infracrvenom području sa spektralnim vrhom pri približno 850 nm. Upravo je ovaj kanal u prethodnom snimanju predstavljao najveći tehnički problem, budući da je bio gotovo potpuno podeksponiran te nije sadržavao dovoljno korisnih informacija za daljnju obradu. Uvođenjem dodatnog infracrvenog izvora svjetla postignuta je bitna promjena: kanal je sada pravilno eksponiran, tonški raspon je očuvan, a struktura objekta ostaje jasno vidljiva. To pokazuje da prethodna ograničenja nisu proizlazila iz svojstava kamere, nego iz neodgovarajućeg spektralnog sastava osvjetljenja u operacijskoj sali.

Na slici su vidljivi tamni tragovi i lokalne nepravilnosti na površini jastuka koje nisu jasno uočljive u vidljivim kanalima, niti su bile naglašene u drugim spektralnim prikazima. Ti detalji upućuju na drugačija refleksijska svojstva materijala u području 850 nm i potvrđuju da NIR kanal može otkriti informacije koje ostaju skrivene u standardnom vidljivom prikazu. U tehničkom smislu, kanal N sada pokazuje dostatnu ekspoziciju, čitljive rubove i stabilan prikaz, što ga čini uporabljivim za daljnju kvalitativnu i kvantitativnu analizu.

7.2.2.2. Kanal G (550nm)



Slika 36 - Kanal G (550nm) nakon separacije kanala

Na slici 36 prikazan je G kanal, sa spektralnim vrhom pri približno 550 nm. Dobiveni zapis može se ocijeniti tehnički ispravnim, s očuvanom geometrijom prikaza, jasnim rubovima i dobrom čitljivošću osnovnih strukturnih obilježja objekta. Iako je ukupna svjetlina ovog kanala nešto niža u odnosu na ostale kanale, razina osvijetljenosti i dalje je dostatna za pouzdanu analizu i digitalnu obradu.

Unatoč tomu, ovaj kanal ima posebnu važnost za planiranu kliničku primjenu sustava. Dosadašnja opažanja i prethodna testiranja upućuju na to da zeleni dio spektra može biti izrazito informativan pri prikazu bioloških struktura, osobito zbog odnosa apsorpcije i refleksije vezanih uz hemoglobin i druge kromofore. U ovom probnom snimanju on prvenstveno potvrđuje tehničku stabilnost sustava i pokazuje da je ekspozicija i u tom pojasu dovoljno uravnotežena za daljnji rad.

7.2.2.3. Kanal B (475nm)



Slika 37 - Kanal B (475nm) nakon razdvajanja kanala

Na slici 37 prikazan je B kanal, sa spektralnim vrhom pri približno 475 nm. I u ovom je slučaju dobiven tehnički ispravan zapis, s pravilnom ekspozicijom i očuvanom oštrinom. U odnosu na druge kanale može se uočiti nešto niži opći kontrast, no to se ne mora tumačiti kao nedostatak. Naprotiv, u kontekstu multispektralnog snimanja takva razlika može upućivati na to da kraće valne duljine bilježe drugačiji tip interakcije svjetlosti s površinom objekta, čime se otvara mogućnost izdvajanja dodatnih informacija koje nisu naglašene u drugim dijelovima spektra.

Kod testnog objekta to se očituje u drugačijem odnosu svijetlih i tamnih područja te u suptilnijem prikazu površinskih prijelaza. Takva obilježja mogu biti osobito korisna pri budućem snimanju tkiva, gdje kraće valne duljine mogu naglasiti površinske detalje, teksturu i promjene u gornjim slojevima strukture. Stoga, iako kanal B na ovom objektu djeluje vizualno manjeg kontrasta od ostalih kanala, on može imati značajnu analitičku vrijednost upravo zato što ne ponavlja slične informacije kao G i N kanal.

Ukupno promatrano, rezultati NGB kamere potvrđuju da je primijenjena tehnička prilagodba sustava bila uspješna. Dodatni infracrveni izvor svjetla omogućio je uklanjanje ranije prisutne neravnoteže između kanala, osobito u području 850 nm, dok je uporaba RAW zapisa i

spektralnog *unmixinga* omogućila kvalitetnije razdvajanje spektralnih komponenti nego što je to bilo moguće u ranijim fazama rada, kada se analiza temeljila na JPG slikama i jednostavnom razdvajanju kanala. Dobiveni rezultati pokazuju da su sada sva tri kanala tehnički uporabljiva, dovoljno eksponirana i međusobno razlikovna, što je preduvjet za pouzdanu interpretaciju multispektralnih podataka.

Na temelju ovih rezultata može se zaključiti da je Kamera 2 (NGB) tehnički spremna za daljnju primjenu u stvarnim kirurškim uvjetima. Posebno je važno da kanal od 850 nm sada više ne predstavlja ograničenje, nego vrijedan izvor dodatnih informacija, dok kanali 550 nm i 475 nm doprinose komplementarnom prikazu vidljivih obilježja objekta. U kombinaciji s rezultatima dobivenima OCN kamerom, NGB konfiguracija potvrđuje da višekanalni pristup omogućuje bogatiji i raznolikiji prikaz snimanog polja, što je od posebne važnosti za buduću primjenu sustava u dokumentiranju i analizi operacija, uključujući kirurške zahvate na štitnjači.

8. PRIMJENA MUL3SPECT SUSTAVA U STUDIJSKIM UVJETIMA

Mul3spect sustav razvijen je kao šira eksperimentalna platforma za multispektralno i stereoskopsko bilježenje različitih objekata, materijala i prostornih situacija, dok je njegova primjena u kirurškom okruženju predstavljena kao primjer praktične uporabe sustava. Primjena u operacijskoj sali predstavlja samo jedan, izrazito zahtjevan scenarij uporabe, u kojem se sustav testira u uvjetima ograničenog prostora, intenzivne radne rasvjete, potrebe za stabilnom geometrijom snimanja i nemogućnosti značajnijeg utjecaja na klinički tijek rada. Kako bi se provjerilo ponašanje sustava izvan takvog okruženja, provedeno je dodatno probno snimanje u kontroliranim uvjetima, na objektima čija se optička svojstva razlikuju u vidljivom i blisko infracrvenom području spektra [60].

Cilj ovog probnog snimanja bio je ispitati može li sustav zabilježiti razlike među materijalima i bojilima koje nisu nužno jednako vidljive ljudskom oku, ali postaju izraženije u pojedinim spektralnim kanalima. Time se proširuje interpretacijski okvir sustava: umjesto da se promatra samo kao dokumentacijski alat za medicinsku primjenu, Mul3spect se ispituje kao sustav koji može registrirati informacije o refleksiji, apsorpciji i razlikama u materijalima u više spektralnih pojaseva. Takav pristup posebno je važan zato što različiti objekti mogu imati vrlo sličan izgled u vidljivom području, dok u bliskom infracrvenom području pokazuju drukčiji optički odaziv.

Za snimanje su odabrani objekti koji omogućuju jasnu usporedbu između vidljivog i blisko infracrvenog područja. Korištena je lutka na kojoj su markerima različitih boja - crnom, zelenom i crvenom - ispisani probni natpisi. Time se nastojalo provjeriti kako se pojedina bojila ponašaju u različitim kanalima, odnosno hoće li određene boje zadržati sličnu vidljivost, oslabiti, potamnjeti ili se djelomično izgubiti u NIR prikazu. Ovakav je motiv koristan jer omogućuje jednostavnu vizualnu provjeru razlika među bojilima, ali i procjenu koliko se pojedini kanal može smatrati informativnim za razlikovanje površinskih zapisa i materijala.

U kadar je postavljena i biljka kao primjer živog organskog materijala. Biljni listovi u pravilu imaju snažniji refleksijski odaziv u blisko infracrvenom području nego u vidljivom dijelu spektra, što je povezano s njihovom unutarnjom građom i načinom na koji biljno tkivo raspršuje upadno zračenje. Zbog toga vegetacija u NIR snimkama ima izrazito svijetli, bijeli odaziv u

odnosu na okolne nežive materijale, što je dobro poznat princip u multispektralnom snimanju vegetacije [61].

Kao treći, a posebno važan testni objekt korištena je replika poštanske marke izrađena primjenom InfrareDesign metode. Ova metoda temelji se na oblikovanju dvostruke informacije unutar istog grafičkog proizvoda: jedan dio dizajna vidljiv je u standardnom vizualnom području, dok se drugi dio informacije pojavljuje tek pri promatranju u blisko infracrvenom području. InfrareDesign opisuje se kroz koncept tzv. *twin* bojila ili bojila blizanaca, odnosno bojila koja mogu imati jednak ili vrlo sličan vizualni izgled, ali različit odaziv u NIR području. Time se omogućuje istodobno oblikovanje vidljive i skrivene informacije na istoj podlozi, što se primjenjuje u sigurnosnoj grafici, zaštiti dokumenata i eksperimentalnim grafičkim tehnologijama [62,63].

U ovom je istraživanju takav motiv bio osobito prikladan jer omogućuje izravnu provjeru funkcionalnosti multispektralnog zapisa. Elementi dizajna koji su vidljivi golim okom trebali bi dominirati u vidljivim kanalima, dok bi se skriveni natpis, izrađen bojom koje ima specifičan odaziv u blisko infracrvenom području, trebao pojaviti u NIR kanalu. Na taj se način poštanska marka koristi kao kontrolni i demonstracijski objekt, jer omogućuje procjenu može li sustav razlikovati vizualnu informaciju od informacije koja je namjerno projektirana za infracrveno područje.

Za razliku od snimanja u operacijskoj sali, gdje je dominantna LED rasvjeta *daylight* temperature boje (5600 K) i slabog ili vrlo ograničenog odaziva u blisko infracrvenom području, u ovom je snimanju korištena *Dedolight* rasvjeta s halogenim žaruljama temperature boje približno 3400 K. Halogeni izvori svjetla mogu emitirati značajan dio zračenja koje se, uz vidljivo područje, proteže i u blisko infracrveni dio spektra, zbog čega su prikladniji za eksperimentalno multispektralno snimanje od izvora kod kojih je NIR komponenta vrlo slabo izražena ili odsutna. [64].

Za ovo istraživanje postavljen je cijeli Mul3spect sustav, sastavljen od dviju multispektralnih kamera, jedne stereoskopske kamere i dviju dodatnih infracrvenih izvora svjetla. Sva ostala radna svjetla u prostoru bila su ugašena, a prodor dnevnog svjetla bio je onemogućen. Time se nastojalo smanjiti utjecaj nekontroliranih izvora svjetla i dobiti stabilnije uvjete snimanja. Kontrola rasvjete u ovom je slučaju bila važna jer se intenzitet i spektralni sastav izvora svjetla

izravno odražavaju na zabilježene vrijednosti u pojedinim kanalima, osobito u NIR području. U odnosu na operacijsku salu, ovakav je postav omogućio bolju kontrolu odnosa između vidljive i infracrvene komponente osvjetljenja.

Dodatni cilj probnog snimanja bio je testirati ponašanje sustava pri manjoj udaljenosti od objekta. Zbog toga su korištene *close-up* leće u kombinaciji +1 i +2 dioptrije, odnosno ukupno +3 dioptrije. Takva kombinacija omogućila je smanjenje radne udaljenosti i snimanje manjih objekata u krupnijem planu. Time se provjeravalo može li se sustav prilagoditi situacijama u kojima je potrebno dokumentirati manje površine, fine grafičke detalje, sitne natpise ili lokalne razlike u materijalima. Istodobno, uporaba dodatnih *close-up* leća omogućila je procjenu praktičnih ograničenja sustava, primjerice plitke dubinske oštine, kao i potrebe za preciznim pozicioniranjem kamera te stabilnosti geometrije snimanja [44].

Za razdvajanje spektralnih informacija korišten je isti protokol obrade kao u prethodnim primjerima. Polazni zapis bio je RAW format, iz kojeg su izdvojene i dalje obrađene informacije pojedinih kanala.

Ovakvo probno snimanje ima važnu metodološku ulogu jer uvodi kontrolne motive kod kojih se očekivani spektralni odaziv može unaprijed pretpostaviti. Kod biljke se očekuje svjetliji prikaz u NIR području, kod različitih markera mogu se očekivati razlike ovisno o sastavu bojila, a kod InfrareDesign otiska očekuje se razdvajanje vidljive i skrivene infracrvene informacije. Zbog toga ovi primjeri predstavljaju prijelaz između tehničkog opisa sustava i detaljne analize rezultata.

8.1. Kamera OCN

U nastavku je analiza i interpretacija seta snimaka dobivenih OCN kamerom, pri čemu se analiza odnosi na kompozitnu fotografiju izravno iz kamere, kompozitnu fotografiju nakon korekcije, odnosno ugađanja bijele boje, te na tri spektralno razdvojena prikaza. Pozornost je usmjerena na ponašanje poštanske marke izrađene InfrareDesign postupkom, na promjene vidljivosti natpisa ispisanih markerima te na odaziv biljke kao organskog objekta u različitim spektralnim slojevima [60].

8.1.1. Kompozitna fotografija izravno iz kamere



Slika 38 - Kompozitna fotografija izravno iz kamere

Kompozitna fotografija (slika 38) dobivena izravno iz kamere prikazuje prizor u izraženo obojenom, pseudo-koloriranom zapisu, što je očekivano s obzirom na to da se radi o multispektralnom sustavu koji ne bilježi standardni RGB prikaz nego kombinaciju spektralno selektiranih informacija. Dominantna ružičasto-ljubičasta kromatska komponenta upućuje na činjenicu da odnos među kanalima još nije vizualno uravnotežen, ali je unatoč tome jasno vidljivo da pojedini objekti u kadru reagiraju međusobno različito. Već na ovoj početnoj kompozitnoj slici može se uočiti da marka, natpisi markerima i biljka ne dijele isti tonski odaziv, što potvrđuje da sustav registrira razlike u refleksijskim svojstvima materijala i bojila.

Na poštanskoj se marki u kompozitnom prikazu dominantno opažaju elementi osnovnog, vizualno namijenjenog dizajna, dok skrivena informacija još nije jasno razlučena kao zaseban sloj, no vidljiva jest. Takav je nalaz očekivan jer kompozitni zapis spaja više spektralnih doprinosa u jednu sliku pa još ne omogućuje potpuno odvajanje vizualne i infracrvene informacije. Natpisi markerom na trakama već u ovom prikazu pokazuju različite intenzitete,

pri čemu je crni natpis optički najuvjerljiviji, dok se obojeni natpisi razlikuju po zasićenosti i kontrastu. Biljka je svjetlija od većeg dijela okoline, što već na razini kompozitne slike sugerira prisutnost doprinosa iz područja u kojem organski materijal pokazuje povišenu refleksiju.

8.1.2. Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline



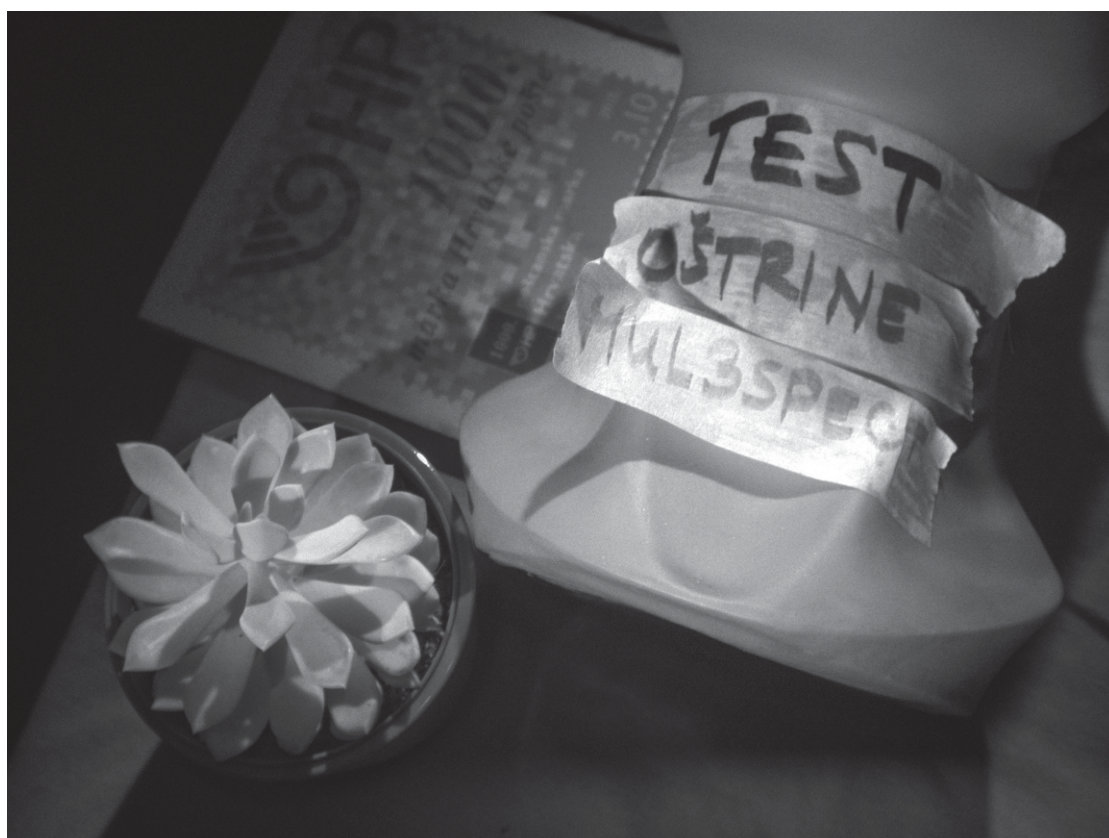
Slika 39 - Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline

Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline, odnosno primjene *white balance*-a daje pregledniji i interpretativno korisniji prikaz scene jer su odnosi boja vizualno uravnoteženiji. Time se jasnije razlučuju granice objekata, površinski detalji i lokalne razlike u tonalitetima, pa prizor postaje pogodniji za usporedbu pojedinih elemenata kadra. Važno je pritom naglasiti da ni ovaj prikaz nije prirodna boja u klasičnom smislu, nego vizualno prilagođena reprezentacija multispektralnih podataka.

Na marki se u ovakvom prikazu bolje razaznaje grafička struktura i osnovni raspored elemenata dizajna, no i dalje se ne može očekivati potpuno čisto razdvajanje između vidljivog i skrivenog sadržaja jer su informacije iz više pojaseva još uvijek spojene. *White balance* pritom ponajprije

poboljšava čitljivost i odnos svijetlih i tamnih površina, ali ne mijenja činjenicu da se prava spektralna interpretacija dobiva tek na razdvojenim kanalima. Kod natpisa markerima uravnoteženiji prikaz omogućuje bolju usporedbu ponašanja crne, crvene i zelene pisane informacije, pri čemu se potvrđuje da različita bojila ne reagiraju jednako u multispektralnom zapisu. Biljka i dalje zadržava relativno svjetliji prikaz, što je u skladu s očekivanim ponašanjem žive organske tvari kada je u zapisu prisutna i blisko infracrvena komponenta.

8.1.3. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 490 nm - cijan

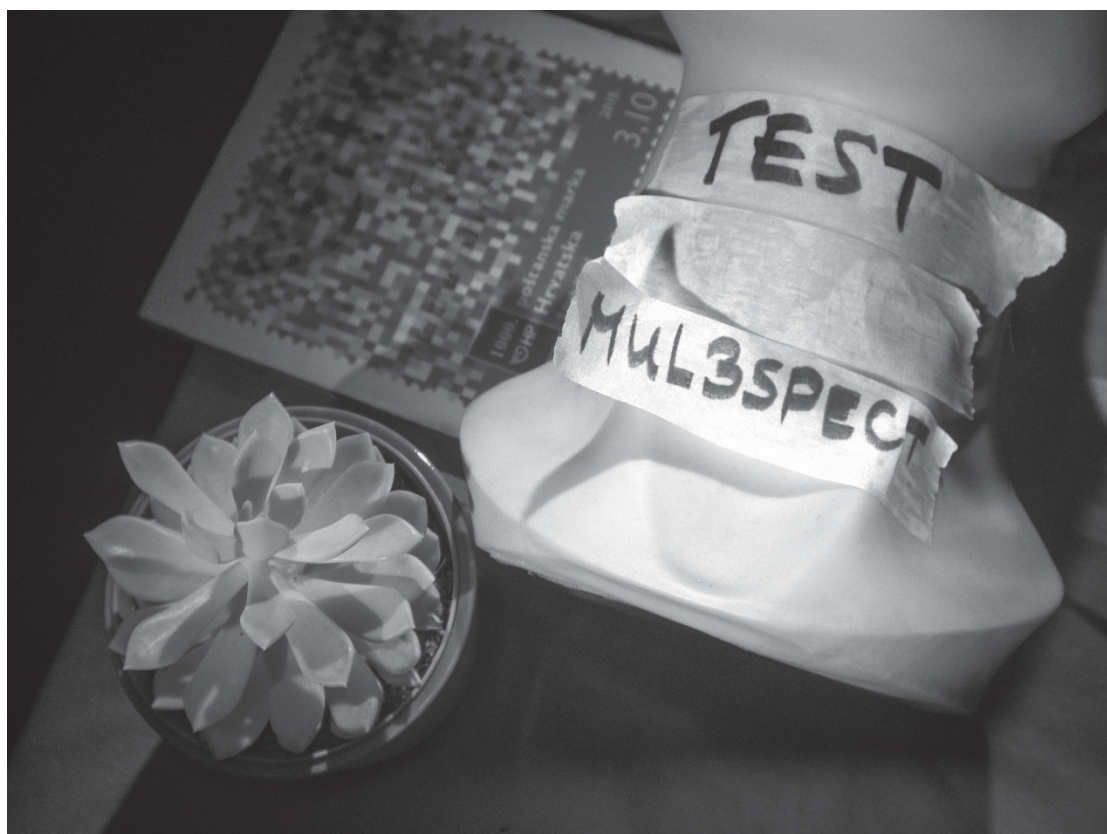


Slika 40 - Cijan kanal (490nm)

Spektralno razdvojeni prikaz u kraćem dijelu vidljivog spektra, odnosno u cijan području, prije svega naglašava površinske informacije, finije rubove i grafičke detalje. U tom sloju na poštanskoj marki dominantno dolazi do izražaja vizualno vidljivi dio dizajna, dok je informacija koja je predviđena za očitavanje u blisko infracrvenom području slaba, ali prisutna. To potvrđuje da ovaj kanal prvenstveno nosi sadržaj iz vidljivog područja te da još ne otkriva skrivenu infracrvenu informaciju iako djelomice propušta NIR informacije.

Kod natpisa markerima u ovom se kanalu dobro opaža da se pojedina bojila ne ponašaju jednako. Razlike u kontrastu između crnog, crvenog i zelenog natpisa ukazuju na to da svako bojilo ima vlastiti apsorpcijsko refleksijski obrazac u ovom spektralnom području. Što znači da čak i kada su natpisi u vizualnom smislu lako čitljivi, njihov tonski odnos u odvojenim kanalima može biti bitno drugačiji. Biljka u ovom sloju ostaje čitljiva i jasno odvojena od pozadine, ali njezin prikaz još uvijek nije toliko karakteristično svijetao kao u blisko infracrvenom kanalu, jer se ovdje još uvijek promatra vidljivo područje spektra.

8.1.4. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 615 nm - narančasti



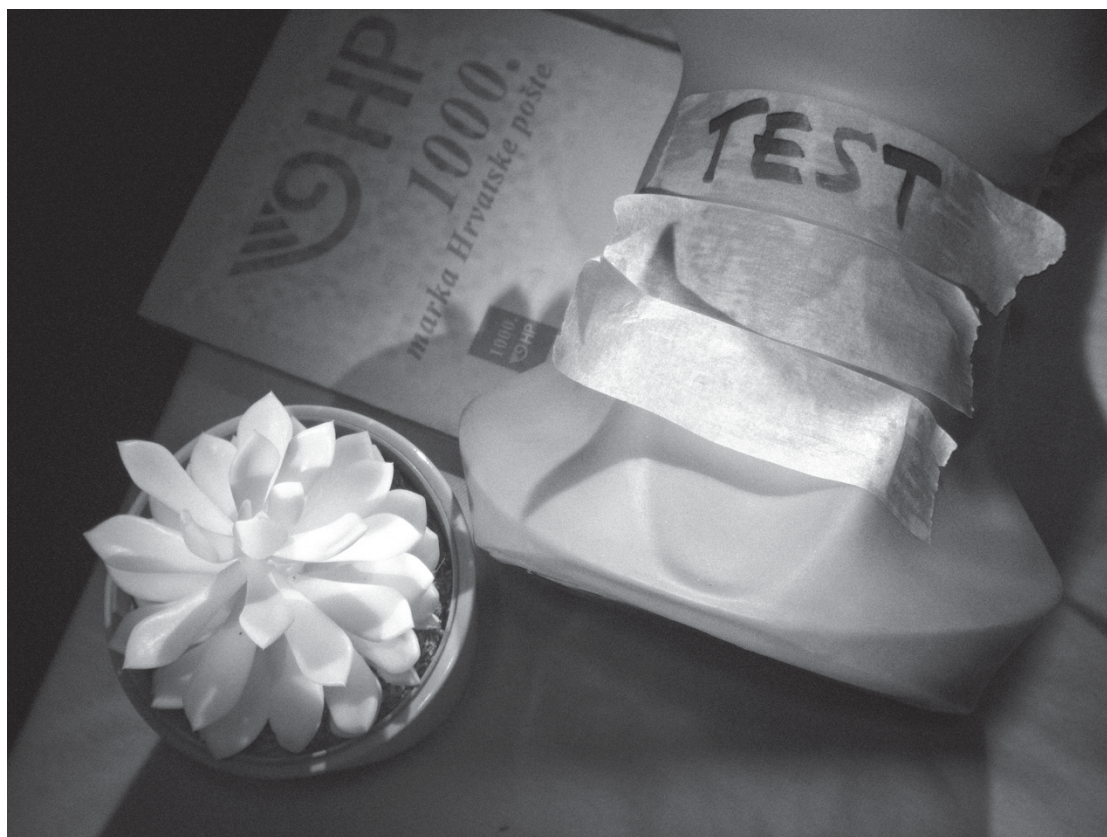
Slika 41 - Narančasti kanal (615nm)

Prikaz u narančastom kanalu (slika 41) donosi drugačiju raspodjelu kontrasta među objektima u kadru. U odnosu na vidljivi pojas kraće valne duljine, ovdje se mijenja odnos između podloge i natpisa markerima, što je osobito korisno za procjenu kako se različita bojila ponašaju u dijelu vidljivog spektra duljih valnih duljina. Crni natpis u pravilu zadržava dobru čitljivost, dok obojeni natpisi pokazuju različite odazive: crveni natpis u potpunosti je nestao, dok je zeleni tamniji i jače izražen nego u cijan kanalu. Upravo ta promjena čitljivosti među

bojama važan je pokazatelj da OCN kamera ne bilježi samo opću luminanciju, nego i spektralno uvjetovane razlike materijala.

Na poštanskoj marki u ovom su sloju prisutni su elementi vidljivog dizajna, ali je NIR informacija nestala, za razliku od cijan kanala koji je propuštao dio jednog i drugog dizajna. Određeni vizualni elementi su oslabili, dok su drugi postali naglašeni, što dodatno potvrđuje da čak i unutar vidljivog dijela spektra dolazi do redistribucije informacije. Skriveni tekst koji je projektiran za NIR područje ovdje nije vidljiv, što potvrđuje da je ovaj kanal još u vidljivom dijelu spektra.

8.1.5. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 808 nm - NIR



Slika 42 - NIR kanal (808)

Blisko infracrveni kanal (slika 42) predstavlja najvažniji sloj u interpretaciji ove scene jer upravo on najjasnije pokazuje dodanu vrijednost multispektralnog sustava. Na poštanskoj marki u tom se prikazu događa ključna promjena: dio informacija koji je dominantan u vidljivim kanalima slabi ili se u potpunosti gubi, dok se pojavljuje tekst i sadržaj koji u vizualnom prikazu

nije bio jasno vidljiv. Takvo ponašanje odgovara konceptu InfrareDesign pristupa, u kojem su pojedini grafički elementi namjerno projektirani tako da budu vidljivi tek u blisko infracrvenom području. Upravo marka u ovom eksperimentalnom postavu djeluje kao vrlo dobar kontrolni objekt jer potvrđuje da sustav može razlikovati vizualno prisutnu informaciju od informacije skrivene za ljudsko oko.

Natpisi markerima u NIR kanalu također pokazuju izrazito korisne informacije. Dok crni natpis zadržava dobru čitljivost, crveno i zeleno obojeni natpisi u potpunosti su se izgubili. To znači da se u NIR prikazu ne reproduciraju boje u klasičnom smislu, nego se registrira odaziv bojila na zračenje valne duljine oko 808 nm. Posljedica toga je da se natpisi koji su u vidljivom spektru izgledali jasno i slično čitljivo, u infracrvenom sloju mogu ponašati posve različito. Takva pojava ima izrazitu demonstracijsku vrijednost jer pokazuje da je moguće razlikovati tiskane i pisane materijale prema njihovim spektralnim svojstvima, a ne samo prema njihovoj vizualnoj boji.

Biljka je u NIR kanalu također važan pokazatelj ispravnosti zapisa. Očekivano, ona pokazuje svjetliji i izraženiji odaziv od okolnih neživih objekata, što je u skladu s dobro poznatim ponašanjem vegetacije u blisko infracrvenom području. Takav rezultat potvrđuje da je NIR kanal funkcionalan i da ne registrira samo šum ili slučajnu luminanciju, nego spektralno smislen signal povezan s organskim materijalom. U kontekstu ove scene biljka stoga ima dvostruku funkciju: ona je vizualno jednostavan objekt, ali i vrlo pouzdan indikator prisutnosti stvarne NIR informacije.

Promatran kao cjelina, ovaj skup snimaka pokazuje da OCN kamera uspješno registrira komplementarne informacije u kompozitnim i razdvojenim prikazima. Kompozitne slike daju opći pregled scene i potvrđuju da objekti imaju različite spektralne odazive, dok spektralno razdvojeni kanali omogućuju precizniju interpretaciju. Rezultat koji se odnosi na poštansku marku izrađenu InfrareDesign tehnikom, jasno demonstrira princip pojavljivanja i nestajanja informacija ovisno o promatranom spektralnom sloju. Natpisi markerima dodatno potvrđuju da se različita bojila ne ponašaju jednako kroz sve kanale, a biljka potvrđuje funkcionalnost NIR sloja svojim karakteristično svjetlijim prikazom. Sve zajedno upućuje na to da sustav nije koristan samo za dokumentiranje prizora, nego i za analizu materijala, grafičkih elemenata i skrivenih informacija raspoređenih kroz različite dijelove spektra [60].

8.2. Kamera NGB

Drugi set snimaka dobivenih NGB kamerom, koja bilježi informacije u približnim spektralnim područjima 475 nm, 550 nm i 850 nm producirala je također zanimljive rezultate. U odnosu na OCN kameru, ovaj set pokazuje drukčiju raspodjelu kontrasta, te se u usporedbi ovih slojeva jasno vidi da isti prizor ne daje jednaku količinu informacija u svim kanalima, nego svaki kanal naglašava drugi aspekt materijala, bojila i površinskih struktura.

8.2.1. Kompozitna fotografija izravno iz kamere



Slika 43 - Kompozitna fotografija iz kamere

Kompozitna fotografija dobivena izravno iz NGB kamere prikazuje prizor u pseudo-koloriranom zapisu u kojem su informacije iz NIR, zelenog i plavog kanala spojene u jednu sliku (slika 43). U odnosu na standardni vizualni prikaz, boje nisu prirodne, nego odražavaju odnos među spektralnim doprinosima. Zbog toga lutka, biljka, papirnate trake i poštanska marka poprimaju neprirodne zelenkasto-ljubičaste tonove.

Na ovoj fotografiji (slika 43) već je vidljivo da poštanska marka ne reagira jednako kao ostali objekti. Njezin se grafički uzorak djelomično razaznaje, ali još uvijek nije jasno odvojen na vidljivi i infracrveni dio informacije. Natpis *HP 1000* naznačen je, ali se ne prikazuje s istom jasnoćom kao u izdvojenom NIR kanalu. To pokazuje da kompozitna slika može poslužiti za opći pregled scene, ali nije dovoljna za pouzdanu interpretaciju skrivenih infracrvenih informacija.

Natpisi markerima na papirnatim trakama dobro su vidljivi, osobito crni natpis TEST, koji zadržava visok kontrast u odnosu na podlogu. Obojeni natpisi, poput crvenog OŠTRINE i zelenog MUL3SPECT, u kompozitnom se prikazu pojavljuju s različitim intenzitetima, što upućuje na različit spektralni odaziv korištenih bojila. Biljka je jasno izdvojena od pozadine i pokazuje svjetliji odaziv, što je očekivano s obzirom na prisutnost NIR komponente u NGB zapisu.

8.2.2. Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline

Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline, odnosno primjene *white balance*-a vizualno je uravnoteženija i pogodnija za usporedbu objekata u kadru. Iako se i dalje ne radi o prirodnoj boji, te je pretežito zelenkasto-roze nijanse, korekcija bijele omogućuje jasnije razdvajanje tonских odnosa. To potvrđuje da *white balance* poboljšava vizualnu čitljivost kompozita, ali ne do mjere prirodne boje standardnog RGB zapisa. Površina lutke i papirnate trake dobivaju ujednačeniji prikaz, dok marka i biljka zadržavaju specifičan odaziv koji ih razlikuje od ostatka scene.

Kod poštanske marke *white balance* olakšava opažanje grafičke strukture, ali i dalje ne daje razdvajanje vidljive i infracrvene informacije. U ovom prikazu vidljiva je složena struktura marke, no skriveni tekst nije izoliran kao zaseban informacijski sloj.



Slika 44 - kompozitna fotografija nakon wb-a

Natpisi markerima u ovom su prikazu (slika 44) pregledniji nego na nekorigiranom kompozitu. Crni natpis ostaje najstabilniji i najkontrastniji, dok se obojeni natpisi prikazuju slabije ili promjenjivo, ovisno o vlastitom spektralnom odazivu. Biljka je i dalje relativno svijetla i dobro odvojena od pozadine, što upućuje na to da NIR komponenta u kompozitnom zapisu značajno utječe na njezin prikaz.

8.2.3. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 475 nm - plavi

Plavi kanal, odnosno sloj pri približno 475 nm, naglašava informacije iz vidljivog spektra kraćih valnih duljina. Prizor je tonski čitljiv, a poštanska marka pokazuje elemente i vidljivog grafičkog dizajna i skrivene NIR informacije. Skrivena infracrvena informacija nije dominantna, no, vidljiva jest, što je očekivano jer se ovaj kanal nalazi u vidljivom dijelu spektra, ali djelomično propušta i NIR informaciju.

Na marki se u plavom kanalu razaznaju dekorativni uzorci i opći grafički raspored, dok se natpis *HP 1000* ne izdvaja kao glavni sadržaj, ali je vidljiv. U tom je smislu plavi kanal koristan kao usporedni sloj jer pokazuje što je u prizoru dostupno u vidljivom spektru prije nego što se uspoređi s infracrvenim prikazom.



Slika 45 - Plavi kanal (475 nm)

Natpisi markerima u plavom su kanalu različito čitljivi (slika 45). Crni natpis TEST ostaje vrlo dobro vidljiv, dok obojeni natpisi pokazuju slabiji ili promjenjiv kontrast. To se osobito vidi kod crvenih i zelenih natpisa OŠTRINE i MUL3SPECT, koji nisu jednako izraženi kao crni marker. Biljka je vidljiva i jasno oblikovno prepoznatljiva, ali njezin prikaz nije maksimalno naglašen kao u NIR kanalu.

8.2.4. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 550 nm - zeleni

Zeleni kanal pri približno 550 nm daje vrlo dobar odnos između opće čitljivosti prizora i kontrasta površinskih detalja. U ovom sloju lutka, papirnate trake i natpisi imaju stabilan

tonski prikaz, a rubovi objekata dobro su definirani. U odnosu na plavi kanal, zeleni kanal djeluje uravnoteženije i daje jasniju separaciju između nekih svijetlih i tamnih površina.

Poštanska marka u zelenom kanalu (slika 46) pokazuje znatno drugačiji izgled nego u plavom kanalu. Dekorativni uzorak postaje izrazitiji, a struktura marke dobiva naglašeniji rasterizirani i teksturalni karakter. Međutim, skrivena informacija je u potpunosti neprisutna, odnosno nevidljiva. To znači da zeleni kanal dobro prikazuje vizualnu grafiku i lokalne razlike u tisku, te je primarni kanal za očitavanje vizualne informacije.



Slika 46 - Zeleni kanal (550 nm)

Kod natpisa markerima zeleni kanal omogućuje dobru usporedbu različitih bojila. Crni TEST ostaje jasno čitljiv, dok se obojeni natpisi mijenjaju u intenzitetu. Crveni natpis OŠTRINE i zeleni MUL3SPECT ne ponašaju se jednako, što potvrđuje da njihova vidljivost ne ovisi samo o vizualnoj boji, nego o spektralnom odazivu pigmenta ili bojila. Biljka je dobro razlučena, ali još uvijek ne pokazuje onoliko izražen NIR odaziv kao u kanalu na 850 nm.

8.2.5. Spektralno razdvojeni kanal pri približno 850 nm - NIR

NIR kanal pri približno 850 nm najjasnije pokazuje razliku između standardne vidljive informacije i informacije koja je projektirana za blisko infracrveno područje. U ovom sloju poštanska marka mijenja izgled: dekorativni elementi koji su bili vidljivi u plavom i zelenom kanalu nestaju, dok se natpis *HP 1000* i dodatni tekstualni sadržaj pojavljuju vrlo jasno. To je ključni rezultat ovog seta snimaka jer potvrđuje da NGB kamera, unatoč tome što je riječ o sustavu temeljenom na Bayer senzoru i naknadnom razdvajanju kanala, uspijeva izdvojiti funkcionalnu NIR informaciju.

Ova promjena na marki posebno je važna jer pokazuje princip pojavljivanja i nestajanja informacije ovisno o spektralnom sloju. Ono što je u vidljivim kanalima prikazano kao dekorativni uzorak ili kompleksna grafička struktura, u NIR kanalu nestaje i otkriva drugačiji sadržaj. Takav nalaz odgovara konceptu Infraredesign tiska, u kojem se jedna informacija oblikuje za vidljivo područje, a druga za infracrveno očitavanje.



Slika 47 – NIR kanal (850 nm)

Natpisi markerima u NIR kanalu pokazuju drukčiji odnos nego u plavom i zelenom kanalu (slika 47). Crni natpis TEST ostaje vrlo čitljiv, dok obojeni natpisi znatno slabe ili nestaju. Posebno je vidljivo da je natpis OŠTRINE oslabio skoro do nevidljivog, dok je donji natpis MUL3SPECT u potpunosti nestao. To pokazuje da pojedina bojila, iako su u vidljivom spektru jasno obojena, u blisko infracrvenom području mogu postati gotovo transparentna ili refleksijski slična podlozi.

Biljka je u NIR kanalu vrlo svijetla i jasno odvojena od pozadine. To je očekivan rezultat jer živo biljno tkivo, osobito listovi, pokazuje visok refleksijski odaziv u blisko infracrvenom području. U ovom setu snimaka biljka zato ima funkciju dodatnog kontrolnog objekta: njezin svijetli NIR prikaz potvrđuje da kanal na 850 nm ne prikazuje samo opću svjetlinu scene, nego nosi spektralno relevantnu informaciju povezanu s organskom strukturom.

Rezultati dobiveni NGB kamerom pokazuju da ova spektralna konfiguracija daje vrlo korisne informacije uparene s prethodno analiziranome OCN zapisu. Plavi kanal pri približno 475 nm naglašava površinske i vizualno dostupne detalje s određenim propuštanjem NIR informacije, zeleni kanal pri približno 550 nm daje uravnotežen prikaz kontrasta i teksture te je primarni kanal za procjenu vidljivih informacija, dok NIR kanal pri približno 850 nm najjasnije otkriva informacije koje nisu dominantne u vidljivom spektru. Najvažniji dokaz funkcionalnosti NGB zapisa vidi se na poštanskoj marki. Natpisi markerima dodatno potvrđuju da različita bojila imaju različit spektralni odaziv, a biljka potvrđuje očekivano ponašanje organskog materijala u blisko infracrvenom području. Ovaj set snimaka stoga jasno pokazuje da NGB kamera ne reproducira samo drukčiju verziju iste slike, nego omogućuje izdvajanje komplementarnih informacija koje u standardnom vizualnom zapisu nisu jednako dostupne.

9. PRIMJENA OPTIMIZIRANOG MUL3SPECT SUSTAVA U OPERACIJSKOJ SALI

Primjena Mul3spect sustava u operacijskoj sali predstavlja završnu fazu praktične provjere razvijenog sustava za bilježenje multispektralnih i stereoskopskih informacija. Cilj ove faze istraživanja bio je ispitati funkcionalnost sustava u realnim kliničkim uvjetima te provjeriti može li se snimanje provesti bez značajnog narušavanja uobičajenog tijeka rada kirurškog tima. Budući da operacijska sala predstavlja izrazito osjetljivo okruženje, svaka dodatna oprema, kretanje osoba ili promjena u protokolu rada mora biti pažljivo usklađena s pravilima sterilnosti i potrebama medicinskog osoblja.

U ranijoj fazi istraživanja, tijekom prve dokumentirane operacije, snimanje se provodilo svakom kamerom zasebno i to ručno, odnosno iz ruke. Iako je takav pristup omogućio osnovnu provjeru funkcionalnosti kamera u realnim uvjetima, pokazalo se da nije prikladan za kontinuiranu primjenu u operacijskoj sali. Ručno snimanje zahtijevalo je fizičko približavanje operaterke sustava sterilnom području operacije, što je moglo remetiti rad kirurškog tima i povećavati organizacijsku složenost postupka. Kirurški tim bio je iznimno susretljiv i omogućio je provedbu početnih testiranja, no zaključeno je da se takva praksa ne može održati u nastavku istraživačkog rada.

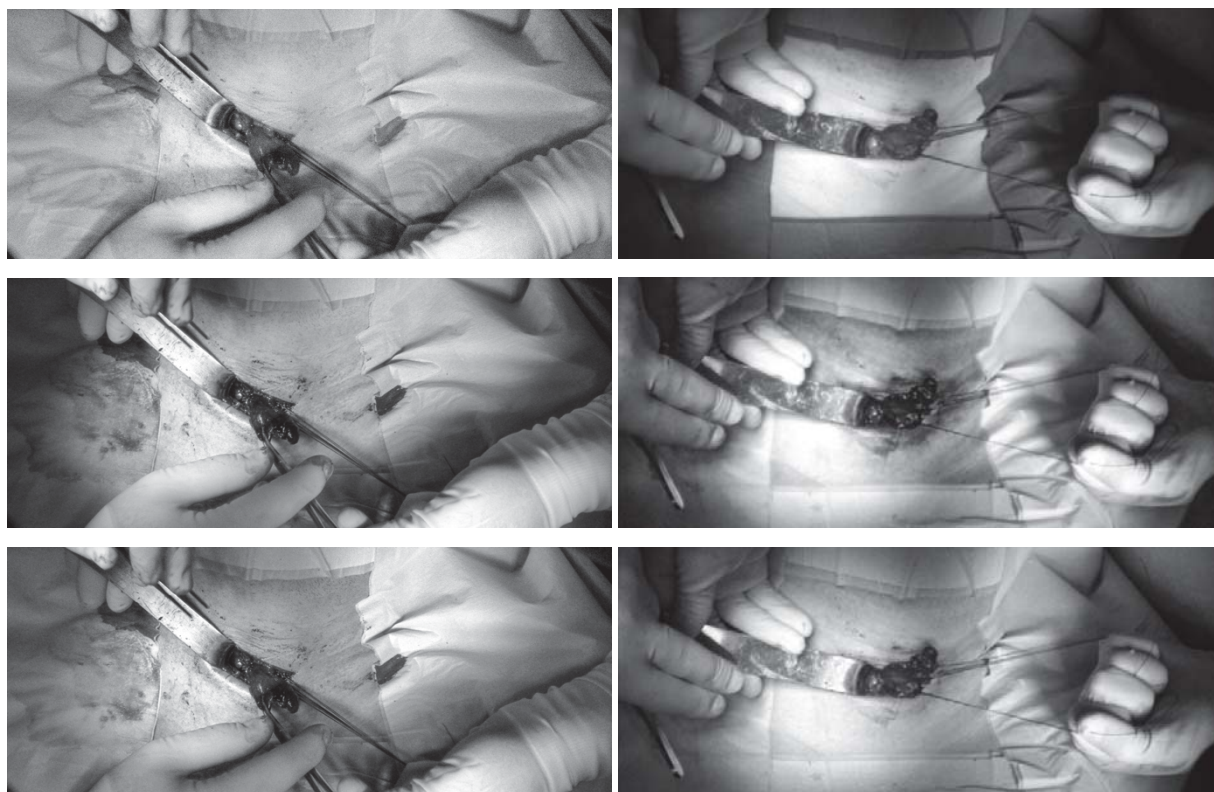


Slika 48 - Snimanje operacije prije i poslije optimizacije

Iz toga je razloga razvijen i uspostavljen protokol snimanja temeljen na daljinskom upravljanju. Nakon uspostavljanja arhitekture sustava s daljinskim upravljanjem, operaterka sustava više se nije približavala sterilnom polju, nego se nalazila unutar operacijske sale na udaljenosti prihvatljivoj kirurškom timu. Snimanjem se upravljalo putem komandne ploče, čime je omogućena veća kontrola nad procesom, smanjena potreba za kretanjem oko operacijskog polja i osigurana bolja integracija sustava u postojeći tijek operacije. Ovakav pristup povećao je ponovljivost postupka snimanja, smanjio mogućnost pogreške te omogućio preciznije vremensko usklađivanje pojedinih snimaka (slika 48).

Prethodno završnom snimanju analiziran je proces rada obje multispektralne kamere, kao i stereoskopske kamere uključene u Mul3spect sustav. Sustav je optimiziran, pri čemu je posebna pozornost posvećena fizičkom pozicioniranju kamera, načinu upravljanja snimanjem, postavljanju cijelog sustava u operacijsku salu, te naknadnoj obradi dobivenih podataka.

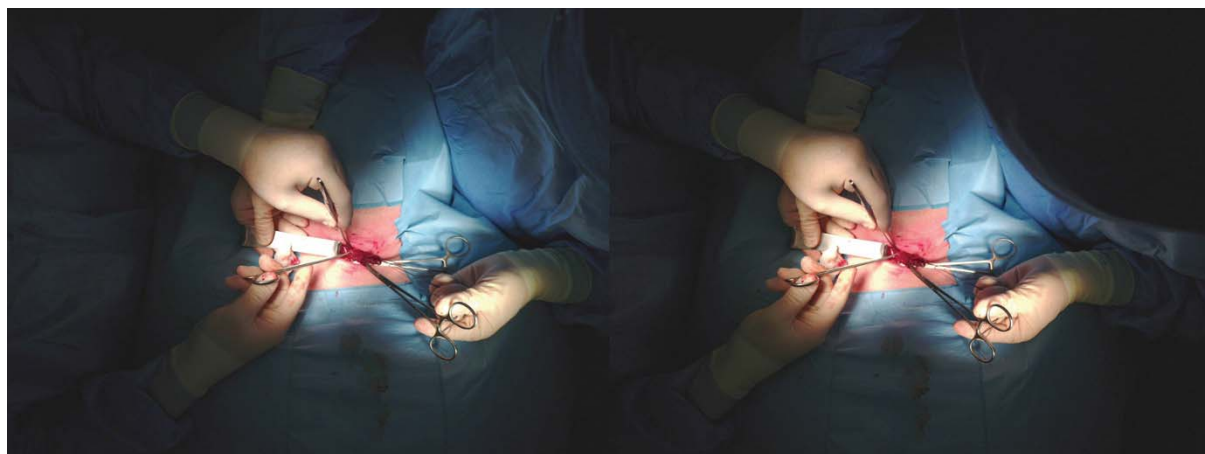
NGB i OCN kamere dale su očekivane rezultate te su zabilježile različite informacije u tri, odnosno šest spektralnih područja (slika 49). Iako cilj ove faze nije bio donošenje dijagnostičkih zaključaka, dobiveni rezultati potvrđuju potencijal multispektralne dokumentacije kao nadopune standardnim oblicima medicinske vizualizacije.



Slika 49 - Kanali iz kamere NGB (lijevo) i OCN (desno)

Osim multispektralnog snimanja, uspješno je provedena i stereoskopska videodokumentacija operacije (slika 50). Dobiveni 3D videozapisi pokazali su zadovoljavajuću kvalitetu te omogućuju prostorni doživljaj operacijskog polja, što predstavlja važnu prednost u odnosu na klasičnu dvodimenzionalnu dokumentaciju. Materijali su pripremljeni za gledanje putem VR naočala s pametnim telefonom, a mogu se dodatno prilagoditi i za prikaz pomoću anaglifnih naočala (slika 51). Time se proširuje dostupnost sadržaja jer se isti materijali mogu koristiti u različitim oblicima 3D vizualizacije.

Stereoskopska dokumentacija osobito je vrijedna u edukacijskom i istraživačkom kontekstu. Budući da kirurški zahvati uključuju složene prostorne odnose, mogućnost prikaza dubine može pridonijeti boljem razumijevanju anatomskih struktura, položaja instrumenata i tijeka operacijskog postupka. Na taj način Mul3spect sustav ne funkcionira samo kao alat za dokumentiranje zahvata, nego i kao potencijalna platforma za izradu naprednijih oblika medicinske edukacije, analize i vizualizacije.

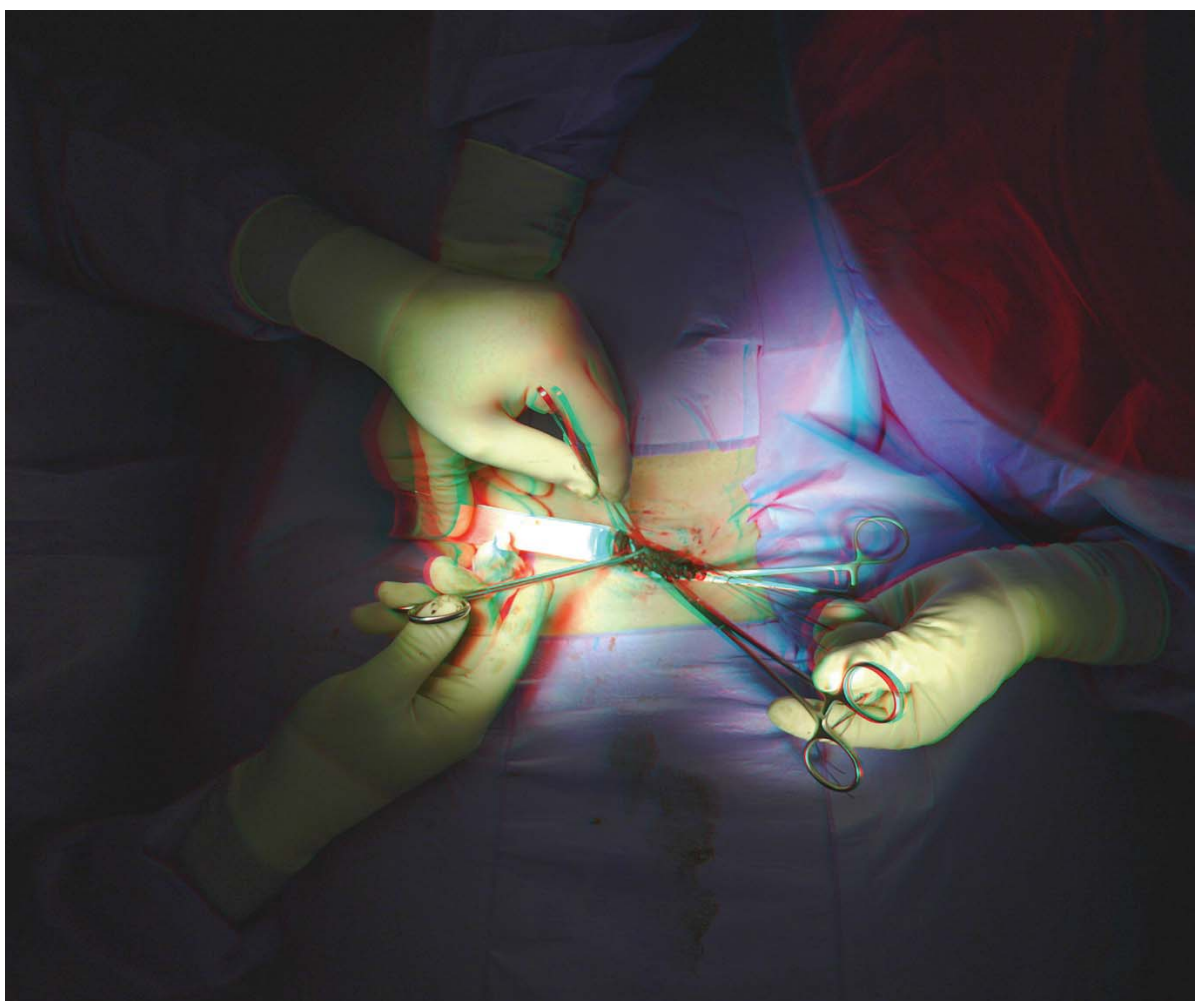


Slika 50 - Slika iz stereoskopske kamere pripremljena za gledanje kroz VR naočale

Završno snimanje operacije provedeno je uspješno i bez pretjeranog ometanja kirurškog tima. Oprema je bila postavljena tako da ne narušava sterilno polje, dok je daljinsko upravljanje omogućilo nesmetan rad medicinskog osoblja. Time je potvrđeno da se Mul3spect sustav može primijeniti u realnim uvjetima operacijske sale, pod uvjetom da su položaj opreme i protokol rada unaprijed jasno definirani.

Na temelju provedenog snimanja može se zaključiti da je Mul3spect sustav uspješno ostvario svoju osnovnu funkciju: bilježenje složenih vizualnih informacija tijekom operacijskog zahvata

na način koji je tehnički izvediv, organizacijski prihvatljiv i prilagodljiv uvjetima rada u operacijskoj sali. Uspješna primjena sustava potvrđuje mogućnost integracije multispektralne i stereoskopske dokumentacije u kliničko okruženje, uz minimalno ometanje kirurškog tima i bez narušavanja sterilnog polja. Time su postavljeni temelji za daljnji razvoj sustava, njegovu primjenu u širem rasponu kirurških zahvata te moguću nadogradnju prema naprednijim modelima kamera, metodama obrade, analize i prikaza medicinskih podataka.



Slika 51 - Slika iz stereoskopske kamere pripremljena za gledanje kroz anaglifne naočale

10. INTERVJUI

Uvođenje novih tehnologija u operacijsku salu predstavlja izrazito osjetljiv i višeslojan proces koji nadilazi isključivo tehničke i metodološke aspekte implementacije. Operacijsko okruženje karakterizira visoka razina standardizacije, strogo definirani protokoli te izrazita potreba za održavanjem sterilnosti i sigurnosti pacijenta, zbog čega svaka intervencija u postojeći radni tijek mora biti pažljivo planirana, evaluirana i validirana u suradnji s medicinskim osobljem. U tom kontekstu, kvalitativna metodologija temeljena na intervjuima s relevantnim sudionicima predstavlja ključan alat za razumijevanje prihvatljivosti, izvedivosti i potencijalnih ograničenja uvođenja eksperimentalnog sustava snimanja u intraoperativne uvjete.

Za razliku od studijskih i/ili kontroliranih eksperimentalnih okruženja, operacijska sala podrazumijeva dinamičan i nepredvidiv radni kontekst u kojem su prioriteti jasno usmjereni na sigurnost pacijenta, učinkovitost zahvata i koordinaciju medicinskog tima. U takvim uvjetima, tehnička ispravnost i inovativnost predloženog sustava nisu dovoljni kriteriji za njegovu uspješnu implementaciju. Jednako važan čimbenik predstavlja percepcija i prihvaćenost sustava od strane medicinskih stručnjaka koji svakodnevno djeluju u tom prostoru. Stoga je nužno sustavno prikupiti mišljenja i iskustva profesionalaca iz medicinskog područja kako bi se identificirali potencijalni izazovi, ograničenja i mogućnosti prilagodbe sustava specifičnostima operacijskog okruženja.

Posebna važnost pridaje se potrebi za osiguravanjem podrške cjelokupnog operacijskog tima. Uvođenje dodatne opreme i prisutnost istraživačkog osoblja može utjecati na prostornu organizaciju, komunikacijske obrasce te dinamiku izvođenja kirurškog zahvata. U tom smislu, neophodno je utvrditi u kojoj se mjeri takve promjene percipiraju kao ometajuće ili prihvatljive, te postoje li specifični aspekti implementacije koji zahtijevaju prilagodbu. Intervjui omogućuju detaljan uvid u subjektivna iskustva članova tima, uključujući percepciju opterećenja, razinu distrakcije, te potencijalni utjecaj na koncentraciju i preciznost tijekom zahvata. Dobiveni uvidi služe kao temelj za optimizaciju načina rada sustava, s ciljem minimaliziranja negativnih utjecaja i postizanja maksimalne integracije u postojeće protokole.

Jedan od najvažnijih elemenata pri implementaciji bilo kakvog dodatnog sustava u operacijskoj sali odnosi se na očuvanje sterilnosti operacijskog polja i operatera. Svako odstupanje od standardnih sterilnih procedura može imati ozbiljne posljedice, zbog čega je nužno osigurati da prisutnost opreme i istraživačkog osoblja ne kompromitira postojeće higijenske i sigurnosne standarde. U tom kontekstu, mišljenje medicinskog osoblja, osobito onih koji su neposredno odgovorni za održavanje sterilnih uvjeta, od presudne je važnosti. Stoga razgovori sa stručnjacima omogućuju identifikaciju potencijalnih rizika, ali i razvoj smjernica za sigurno pozicioniranje opreme, kretanje osoblja te organizaciju radnog prostora u skladu s važećim medicinskim standardima.

S obzirom na specifične uloge članova medicinskog osoblja tijekom kirurškog zahvata, odabrani su reprezentativni ispitanici iz više područja operacijskog okruženja. U istraživanje su uključene tri osobe: glavni kirurg kao centralni nositelj operacijskog zahvata i donositelj svih najvažnijih odluka, asistent (specijalizant) koji aktivno sudjeluje u izvođenju zahvata i ima neposredan uvid u tehničke aspekte rada, te glavna medicinska sestra koja je odgovorna za organizaciju operacijske sale, održavanje sterilnosti i koordinaciju opreme. Ovakav odabir omogućuje sveobuhvatno sagledavanje utjecaja sustava iz različitih funkcionalnih perspektiva, čime se osigurava uravnotežena i relevantna evaluacija.

Metodološki pristup temeljen na polustrukturiranim intervjuima omogućuje kombinaciju standardiziranih pitanja i fleksibilnosti u istraživanju specifičnih tema koje se pojavljuju tijekom razgovora. Na taj način moguće je dobiti detaljne i kontekstualizirane informacije koje nadilaze kvantitativne pokazatelje, te pružaju dublji uvid u stvarne uvjete i potrebe operacijskog okruženja. Analiza prikupljenih podataka omogućuje identifikaciju važnih čimbenika koji utječu na prihvatljivost sustava, kao i razvoj preporuka za njegovu daljnju optimizaciju i potencijalnu širu primjenu.

Uključivanje perspektive medicinskih stručnjaka kroz strukturane intervjuje predstavlja neizostavan korak u procesu validacije predloženog sustava. Takav pristup omogućuje usklađivanje tehničkih mogućnosti sustava s praktičnim zahtjevima operacijskog okruženja, čime se povećava vjerojatnost njegove uspješne implementacije i dugoročne održivosti u kliničkoj praksi.

10.1. doc. dr. sc. Krešimir Gršić, dr. med., glavni kirurg

D: Tokom snimajućih operacija, koliko Vam je smetao sustav za snimanje i moje prisustvo?

„Meni zapravo to jedino malo smeta da budem potpuno opušten, ali ako sam spreman i koncentriran, ne - ta oprema mi ne remeti kvalitetu rada. Mislim da je to najvažnije pitanje. Dakle, odgovor na to smeta li mi oprema za uobičajeno odvijanje operacije jest: naravno da malo smeta, ali ne narušava kvalitetu operacije. Moram biti nešto sporiji i trošim nešto više vremena jer se moram koncentrirati i na to, ali to je sve u granicama razumljivog i prihvatljivo s obzirom na edukacijski benefit. Moju razinu izvedbe operacije nipošto ne smanjuje. Trošim više vremena, ali nemam lošije ishode zbog toga.“

D: Iz pozicije profesora/edukatora na medicinskom fakultetu, na koji način smatrate da je ovaj materijal koristan?

„Dugo vremena je slikovni materijal u dvije dimenzije bio jedini moderni materijal za takvu edukaciju. Ovo otvara potpuno novu razinu edukacije i može značajno ubrzati učenje mladih ljudi jer ne samo da mogu to proučavati, nego se mogu i pripremati za operaciju. Ja vjerujem da ovakvi materijali mogu ubrzati proces učenja i do dvostruko. To je neka minimalna, konzervativna procjena.“

D: Vi imate već iskustva s 3D materijalima iz operacijske sale; mislite li da je dodatak multispektralne fotodokumentacije također koristan?

„2D video je već napravio značajan napredak u edukaciji, ali 3D je *game changer*. To treba naglasiti. Fotografije su izvrsne, 2D video je napredak, ali 3D video je *game changer* jer daje ono što je najvažnije — kliničku anatomiju. To je ono što čini razliku, posebno ako je ta klinička anatomija snimljena otprilike iz pozicije očiju operatera; tada je to nešto sasvim drugo. Mi smo danas koristili ptičju perspektivu, što nije loše, ali može se raditi na tome da bude više iz pozicije očiju. No, to su samo elementi o kojima se može raspravljati.“

D: Smatrate li da bi studentu/specijalizantu koristile multispektralne informacije u kontekstu diferencijacije različitih vrsta tkiva prije nego što se upuštaju u praksu?

„Mislim da je to za studente manje važno, ali multispektralne informacije mogu pokazati određene važne strukture, uz uvjet da se ti podaci koreliraju s krajnjim kliničkim nalazima. No, to je još uvijek određena vrsta eksperimentalnog rada. Trenutno nemamo najtočniju informaciju što nam one zapravo znače. Pokušavamo kroz konačne patohistološke rezultate korelirati njihov značaj i razmišljati o njihovoj kliničkoj primjeni, pogotovo na razini paratireoidnih žlijezda, koje su najviše istraživane.“

D: Zašto smatrate da je ovaj način snimanja važan za usvajanje znanja u kontekstu istovremenog promatranja operacijskih postupaka?

„Problem je sljedeći: na operaciji može biti samo jedan student, eventualno dva. Oni nisu u idealnoj poziciji da kvalitetno vide operaciju; jedino kvalitetno promatranje je s pozicije kirurga. A da bi student nešto razumio, mora to pročitati, razumjeti i dobiti objašnjenje od onoga tko operira. Ako imaju materijal pred sobom, mogu ga pogledati milijun puta i za to se pripremati. Dakle, to je višestruka korist.“

D: Na koji način to onda možete koristiti u predavanjima i općenito u edukaciji?

„Mogu im to zadati kao edukativni materijal. Još jedna važna stvar - što specijalizanti bolje vide, to brže usvajaju gradivo. Na taj način mogu biti korisniji i na operaciji, pa samim time i više naučiti. Operacija se ne uči tako da se na jednoj operaciji savlada sto posto gradiva. To je važno naglasiti. Specijalizanti na jednoj operaciji nauče deset posto, pa deset posto na drugoj i tako dalje. Operacija je mozaik; nije svaka operacija ista. Na svakoj se izvede određeni trik koji je specifičan.“

D: Znači, na taj način se studenti mogu pripremiti za Vaše predavanje, kao u metodi *flipped classroom*?

„Ne samo za predavanje, nego i za buduću operaciju. Puno im je lakše kada unaprijed vide što ih čeka - mogu shvatiti što trebaju raditi i što se od njih očekuje. Ako ne znaju što operiram, ne znaju ni asistirati.“

D: Zapravo je najveći benefit temeljitija i detaljnija priprema.

„Priprema i usvajanje znanja. Kada čovjek čita knjigu, to nije isto kao kada nešto vidi; ta vizualna komponenta je ključna, pogotovo kada postoji element 3D anatomije, gdje se jasno vide prostorni odnosi. To je ključno.“

D: Koji bi bio Vaš zaključak o korištenju ovakvih snimaka u budućnosti?

„Radi se o načinu edukacije mladih specijalizanata i smatram da je ovakav materijal *game changer* u njihovoj edukaciji. Na temelju kvalitetno pripremljenog materijala proces edukacije može se značajno ubrzati. Moguće je brže pripremiti mladog čovjeka za samostalno izvođenje zahvata, što u konačnici dovodi do ušteda u financijskom, ekonomskom i vremenskom smislu. Tako možemo učinkovitije raspolagati resursima kojih imamo vrlo malo - vremenom, potrebnim za savladavanje kompleksnih operacija, kvalitetnim stručnjacima i slično. Na ovaj način ubrzavamo proces edukacije i činimo mlade ljude iskusnijima u najkraćem mogućem vremenu.

Mi živimo u vizualnom svijetu. Multimedija je vizualni svijet, ali taj multimedijalni sadržaj treba proizvesti - on neće nastati sam od sebe. Filmaš ne može ući u operacijsku salu bez podrške nekoga iz struke i obrnuto.“

D: Zaključno, smetnja koja je prisutna tijekom ovakvog načina snimanja manja je od koristi koju ovakav materijal donosi?

„Korist ovakvog materijala puno je veća od rizika koji može donijeti. Benefit je toliko velik da nadmašuje sve ostalo i čini smetnje i usporenje zahvata potpuno prihvatljivima.“

D: Smatrate li da bi se ovakav sustav mogao implementirati u bolnice i ordinacije diljem Hrvatske u različitim područjima medicine?

„U Americi već postoje takvi sustavi edukacije, gdje su se velike klinike organizirale i pokušavaju producirati takve materijale. Mislim da to mora voditi prema tome da fakulteti - ne samo medicinski, nego i drugi koji se bave srodnim područjima razvijaju posebne segmente za njihovu produkciju.

Ovo je *game changing* u medicini jer se radi o izuzetno osjetljivom području — radi se o ljudima, gdje nema prostora za pogrešku. To treba jasno naglasiti. U medicini i kirurgiji nema prava na pogrešku jer nema drugog izbora. Jednom kada se pogreška napravi, ne može se ispraviti. Zato je medicina toliko osjetljiva - jer ja na operaciji nemam pravo na pogrešku. Ne mogu, primjerice, prerezati živac jer to za pacijenta znači trajne posljedice.“

10.2. Filip Knezić, dr. med., specijalizant otorinolaringologije

D: Kao doktor medicine i specijalizant otorinolaringologije, asistirali ste na operacijama koje su bile snimane s Mul3spect sustavom. Koliko vam je smetala naša oprema i prisustvo pri Vašem radu?

„Iskreno, kao asistent sam se baš trudio micati glavu iz polja snimanja. Kod operacije štitnjače operater najviše vidi jer se zapravo operira njegova strana polja. A kako je operacijsko polje određene dubine, da bi asistent vidio što se događa, mora nagnuti glavu nad operacijsko polje. Zbog toga ja u ovoj situaciji nisam imao dobar pregled tijekom operacije.

To nije idealno za mene, ali operateru to nije smetalo. U ovakvim operacijama operater je najvažniji. Čut ćete i kako je docent Grčić to doživio, ali mislim da je njemu bilo u redu. Međutim, iz perspektive asistenta, zbog toga nisam mogao vidjeti neke strukture tijekom operacije.“

D: Ovo istraživanje i sama izgradnja sustava potaknuli su činjenicom da studenti mogu prisustvovati operaciji u vrlo kratkim vremenskim intervalima i u vrlo ograničenom broju, a pritom nemaju dobru poziciju gledanja tijekom zahvata.

„Tako je, ne smiju se približavati niti dirati kolege kako ne bi kompromitirali sterilnost operacijskog polja.“

D: Ideja je bila proširiti krug ljudi koji mogu istovremeno pratiti operaciju. Koje je vaše mišljenje o bilježenju takvog materijala u odnosu na to što smo Vama remetili uobičajeni tijek posla? Smatrate li da je takav materijal koristan?

„Mislim da je definitivno vrlo koristan. I to ne samo za studente, nego i za specijalizante. Edukacija specijalizanata je jako važna. Meni bi, primjerice, bilo izvrsno da kod kuće imam video svake operacije koju ću izvoditi.

Na primjer, mi na Rebru dobijemo raspored navečer za sve operacije koje će se raditi sljedeći dan. Kada bi za svaki tip operacije postojao 3D video, pa da prije toga kod kuće mogu pročitati atlas operacija i pogledati 3D video - to bi bio resurs koji bi mi bio neopisivo vrijedan. Trenutno tako nešto ne postoji, a potreba za time je jako velika. Tražio sam - čak i da se može platiti, ali ne postoji niti za kupiti.“

D: Znači, iz Vaše perspektive je prihvatljivo što smo Vam djelomično poremetili tijek posla, s obzirom na korist koja proizlazi iz toga, odnosno postojanje zapisa operacije u 3D videu i multispektralnim fotografijama?

„Ja najviše učim tijekom operacija kada gledam, zato i guram glavu u operacijsko polje. Ali ako bih zauzvrat - znači, da ne vidim dobro tijekom same operacije - mogao kod kuće dva ili tri puta pogledati i analizirati isti video, prihvatio bih to svaki put.

Vizualno učenje je zapravo osnova kirurgije. To je ono što svima nama treba - što više stvari vidjeti, jer što više vidiš, više naučiš. Jednostavno je tako. Tako da je, po meni, ovo izuzetno vrijedan resurs.“

D: Kada bi postojala baza podataka s različitim operacijama koje se mogu analizirati, smatrate li da bi Vam to pomoglo već kao studentu tijekom učenja anatomije, i prije specijalizacije?

„Mislim da bi. Da se osvrnem na ono što ste ranije spomenuli - kada smo na fakultetu i imamo vježbe u salama, nas je jako puno i borimo se da svatko od nas vidi barem jedan dio operacije. Cijelu operaciju kao studenti praktički nikada ne vidimo.

Ovo bi bio izvrstan način da studenti mogu vidjeti cijelu operaciju. Čak ne nužno kod kuće, nego i da tijekom snimanja postoji ekran u sali na kojem svi ostali mogu pratiti što se događa.

Ja sam imao sreću da sam imao izvrsne predavače iz anatomije. Svaki dio tijela analizirali smo kroz operacije tog područja. Razgovarajući s kolegama, shvatio sam da nisu svi imali takvo iskustvo, ali smatram da je to način na koji anatomija može postati izrazito zanimljiva i upravo zbog toga sam je ja jako dobro naučio.

Primjerice, kada smo radili glavu i vrat, koji su meni najzanimljiviji dio anatomije - pa se zato danas time i bavim - profesori su s nama prolazili operacije, objašnjavali koje su strukture važne i što treba očuvati.

Tako da bih rekao da bi ova metoda bila izvrsna ne samo za otorinolaringologiju, nego i za učenje anatomije ranije tijekom studija.“

10.3. Nikolina Tomičić Šimac, glavna medicinska sestra

D: Vi ste medicinska sestra te ste asistirali operaciji koja je snimana Mul3spect sustavom. Je li Vam oprema ili naše prisustvo smetalo tijekom Vašeg rada?

„Niste mi smetali nimalo. Što se mog posla tiče, najvažnija je priprema. U trenutku kada slažem instrumente i prilazim kirurškom timu, ne smijete biti blizu niti u području koje je sterilno. Ako se toga držite - a držali ste se - ne smetate apsolutno nikome: ni anesteziološkom timu, ni pacijentu, ni operateru, a to je najvažnije.“

D: Snimali smo 3D video i multispektralne fotografije. Smatrate li da bi takav materijal koristio studentima medicine, odnosno specijalizantima pri učenju anatomije?

„Mislim da bi bio izuzetno koristan. Mogućnosti edukacije u praksi za specijalizante su zapravo vrlo ograničene. Teorija i praksa su dvije potpuno različite stvari. Mladi specijalizanti nauče anatomiju u teoriji, ali u praksi je svaki pacijent drugačiji. Svaka operacija je drugačija, anatomija je drugačija, pogotovo kod tumorske kirurgije.“

D: Smatrate li da bi ovakav materijal mogao doprinijeti bržoj pripremi i integraciji studenata i specijalizanata za ulazak u praktičan rad?

„Mislim da sigurno bi. Zato što ta operacija nije ispričana ili prepričana, nego je stvarno snimljena i viđena točno onako kako se odvila. To je stvarna anatomija tog pacijenta, stvarno krvarenje koje je bilo prisutno, cijeli intraoperativni tijek - sve je to vrlo specifično za svaku operaciju. Uvijek se nešto nepredviđeno događa tijekom svake operacije.“

D: U odnosu na knjige i uobičajene materijale za učenje, što smatrate da može doprinijeti multimedijски materijal poput ovoga?

„Medicina ide dalje, a tehnologija s kojom se danas radi bitno je drugačija, što znači da je i sam tijek operacije drugačiji. Kako medicina napreduje, tako mora napredovati i edukacija. Ja već dugo nisam vidjela kirurga koji ima vremena stajati i objašnjavati dok mladi specijalizant uči i gleda operaciju. Kirurg je u tom trenutku fokusiran isključivo na operaciju i ne može se baviti drugim stvarima. Upravo zato je ovo za mene nešto izuzetno - što može jako puno značiti specijalizantima u učenju.“

D: Mislite li da bi se ovakvi sustavi mogli implementirati u praksu u operacijskim salama?

„Ovo je izvrsna metoda jer takva edukacija zapravo još ne postoji. To je razina edukacije koja tek treba zaživjeti. Postoje pojedine snimljene operacije koje se mogu pogledati, ali trebalo bi kontinuirano snimati jer je svaki slučaj drugačiji. To bi bilo posebno korisno za mlade kirurge.

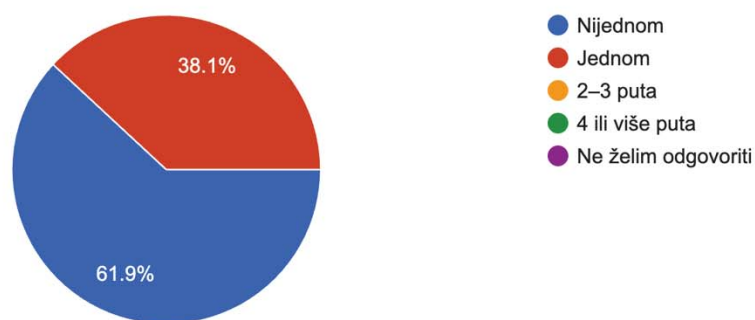
Ishod takve edukacije bio bi sigurno i smanjenje broja komplikacija. Kirurzi i cijeli tim s vremenom steknu iskustvo i vještinu, ali trebalo bi pronaći način da se broj komplikacija smanji i ranije, prije nego što do njih dođe. To su često trajne i nepovratne komplikacije. Smatram da ovaj način učenja ima potencijal da se njihov broj smanji i da bi trebalo učiniti sve kako bi se to postiglo.“

11. ANKETNO ISTRAŽIVANJE

U anketi je sudjelovao 21 ispitanik, pri čemu su svi ispitanici bili studenti pete godine studija medicine. Većina ispitanika navela je da je tijekom studija već odradila kliničku nastavu ili rotaciju iz kirurgije i otorinolaringologije, dok je jedan ispitanik naveo iskustvo samo iz kirurgije. Unatoč tome, neposredno iskustvo s operacijom štitnjače bilo je ograničeno: 13 ispitanika, odnosno 61,9 %, nikada nije promatralo operaciju štitnjače uživo, dok je 8 ispitanika, odnosno 38,1 %, operaciju promatralo jednom. Nijedan ispitanik nije naveo da je asistirao pri operaciji štitnjače, pri čemu je jedan ispitanik odabrao mogućnost „ne želim odgovoriti“. Ovi rezultati potvrđuju da se radi o skupini studenata koja ima određeno kliničko iskustvo u okviru studija, ali uglavnom nema izravno iskustvo sa sudjelovanjem u tiroidektomiji.

4. Koliko ste puta do sada promatrali operaciju štitnjače uživo?

21 responses

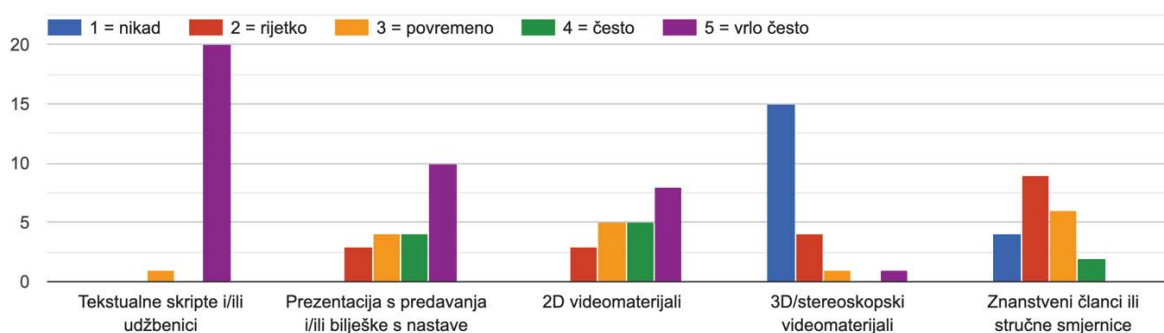


Slika 52 - rezultati pitanja iz ankete - promatranje operacije štitnjače uživo

Samoprocjena predznanja pokazala je razliku između poznavanja anatomskih odnosa i poznavanja samog operacijskog postupka. Poznavanje anatomije štitnjače, paratireoidnih žlijezda i okolnih anatomskih struktura ispitanici su procijenili srednjom vrijednošću 4,29 na ljestvici od 1 do 7. S druge strane, poznavanje osnovnih koraka tiroidektomije procijenjeno je niže, sa srednjom vrijednošću 2,71. Čak 81,0 % ispitanika svoje je poznavanje osnovnih koraka tiroidektomije ocijenilo vrijednostima 3 ili niže. Takav rezultat pokazuje da studenti imaju relativno ograničeno proceduralno predznanje o operaciji štitnjače, što potvrđuje potrebu za dodatnim edukacijskim materijalima koji prikazuju slijed operacijskih koraka i prostorne odnose u operacijskom polju.

U pogledu dosadašnjeg korištenja edukacijskih materijala, najčešće korišten oblik bili su tekstualne skripte i/ili udžbenici, s prosječnom ocjenom 4,90 na ljestvici od 1 do 5. Prezentacije s predavanja i bilješke s nastave također su bile često korištene, s prosječnom ocjenom 4,00, dok su 2D videomaterijali imali prosječnu ocjenu 3,86. Nasuprot tome, 3D/stereoskopski videomaterijali bili su vrlo rijetko korišteni, s prosječnom ocjenom 1,48, pri čemu je 71,4 % ispitanika navelo da ih nikada nije koristilo. Znanstveni članci i stručne smjernice također su bili relativno rjeđe korišteni, s prosječnom ocjenom 2,29. Ovi podaci pokazuju da se studentsko učenje i dalje dominantno oslanja na klasične tekstualne i prezentacijske materijale, dok su napredniji vizualni oblici, osobito stereoskopski sadržaji, u dosadašnjem obrazovnom iskustvu ispitanika bili slabo zastupljeni.

8. Koliko ste često tijekom studija koristili sljedeće oblike edukacijskih materijala za učenje anatomskih, kirurških ili kliničkih sadržaja?



Slika 53 - rezultati pitanja iz ankete - korištenje edukacijskih materijala

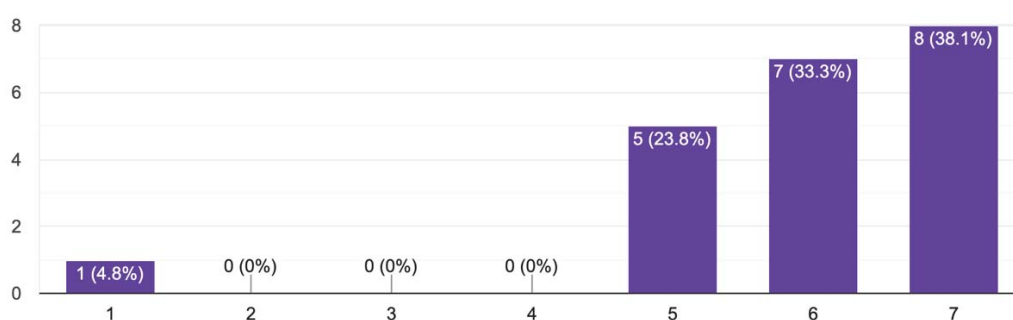
Prezentacija s predavanja ocijenjena je pozitivno, osobito u pogledu razumijevanja glavnih koraka tiroidektomije, gdje je prosječna ocjena iznosila 5,81 na ljestvici od 1 do 7. Razumijevanje anatomskih odnosa uz pomoć prezentacije ocijenjeno je prosječnom vrijednošću 5,52, a ukupna korisnost prezentacije prosječnom vrijednošću 5,62. Međutim, prostorna orijentacija tijekom učenja iz prezentacije dobila je nižu prosječnu ocjenu, 4,38, što upućuje na ograničenje statičnog i/ili dvodimenzionalnog nastavnog prikaza u prenošenju prostornih odnosa unutar operacijskog polja. Zaključeno je da je prezentacija studentima bila korisna za strukturiranje informacija i razumijevanje osnovnog sadržaja, ali je bila manje učinkovita u usvajanju prostorne predodžbe anatomskih struktura i operacijskog prostora.

11.1. 3D/stereoskopska videodokumentacija

U usporedbi s prezentacijom, 3D/stereoskopska videodokumentacija dobila je više prosječne ocjene u svim promatranim aspektima. Poboljšanje prostorne orijentacije ocijenjeno je prosječnom vrijednošću 5,90, razumijevanje anatomskih odnosa vrijednošću 6,00, praćenje slijeda glavnih koraka tiroidektomije vrijednošću 5,95, a ukupna korisnost 3D/stereoskopske videodokumentacije vrijednošću 6,00. Posebno je izražena razlika u procjeni prostorne orijentacije, gdje je prezentacija imala prosječnu ocjenu 4,38, a 3D/stereoskopska videodokumentacija 5,90. Taj rezultat upućuje na to da stereoskopski prikaz studentima omogućuje jasnije razumijevanje dubinskih i prostornih odnosa, što je posebno važno u učenju kirurških postupaka u kojima su međusobni odnosi anatomskih struktura ključni za razumijevanje operacijskog tijeka.

13. 3D/stereoskopska videodokumentacija poboljšala je prostornu orijentaciju prilikom izučavanja operativnih postupaka.

21 responses



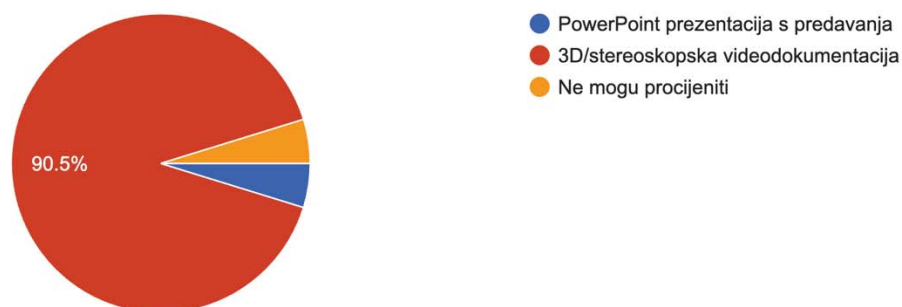
Slika 54 - rezultati pitanja iz ankete - prostorna orijentacija

Izravna usporedba dvaju modaliteta dodatno potvrđuje prednost 3D/stereoskopske videodokumentacije. Na pitanje koji je edukacijski modalitet više pridonio prostornoj orijentaciji, 15 ispitanika, odnosno 71,4 %, odabralo je 3D/stereoskopsku videodokumentaciju, dok su samo 2 ispitanika, odnosno 9,5 %, odabrala PowerPoint prezentaciju. Četiri ispitanika, odnosno 19,0 %, nisu mogla procijeniti razliku. Još izraženiji rezultat dobiven je za razumijevanje slijeda glavnih koraka tiroidektomije: 19 ispitanika, odnosno 90,5 %, odabralo je 3D/stereoskopsku videodokumentaciju, dok je jedan ispitanik odabrao prezentaciju, a jedan nije mogao procijeniti. Ovi rezultati pokazuju da ispitanici stereoskopski prikaz ne doživljavaju

samo kao vizualno zanimljiv dodatak, nego kao modalitet koji konkretno pridonosi razumijevanju operacijskog slijeda i prostorne organizacije zahvata.

18. Koji je edukacijski modalitet više pridonio razumijevanju slijeda glavnih koraka tiroidektomije?

21 responses

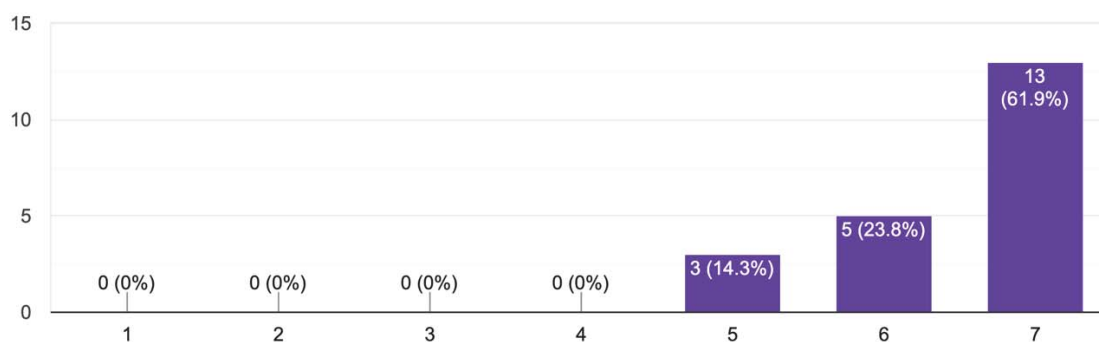


Slika 55 - rezultati pitanja iz ankete - edukacijski modalitet

Kombinacija PowerPoint prezentacije i 3D/stereoskopske videodokumentacije ocijenjena je izrazito pozitivno. Prosječna ocjena korisnosti takve kombinacije iznosila je 6,48 na ljestvici od 1 do 7. Svi ispitanici ocijenili su kombinaciju vrijednošću 5 ili višom, dok je 85,7 % ispitanika dalo ocjenu 6 ili 7. Ovaj nalaz upućuje na to da studenti ne percipiraju 3D/stereoskopski video kao zamjenu za strukturiranu nastavnu prezentaciju, nego kao njezinu vrijednu dopunu. Prezentacija može poslužiti za uvodno objašnjenje anatomije, terminologije i koraka zahvata, dok 3D/stereoskopska dokumentacija omogućuje prostorno i proceduralno razumijevanje prikazanog sadržaja.

19. Kombinacija PowerPoint prezentacija s predavanja i 3D/stereoskopske videodokumentacije bila bi korisna kao nastavna cjelina za učenje o operaciji štitnjače.

21 responses

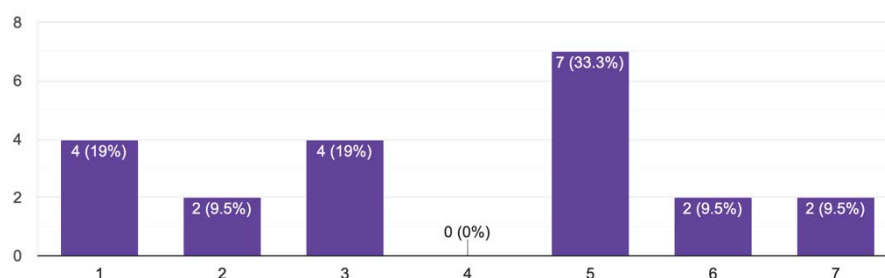


Slika 56 - rezultati pitanja iz ankete - korisnost PPT prezentacije i 3D videodokumentacije

11.2. Multispektralna fotodokumentacija

Rezultati vezani uz multispektralnu fotodokumentaciju također pokazuju pozitivan stav ispitanika, iako je početna upoznatost s konceptom multispektralnog snimanja bila neujednačena. Prosječna ocjena prethodne upoznatosti iznosila je 3,86 na ljestvici od 1 do 7, pri čemu je 47,6 % ispitanika dalo ocjenu 3 ili nižu. Unatoč tome, nakon prikaza materijala ispitanici su multispektralnu fotodokumentaciju ocijenili korisnom.

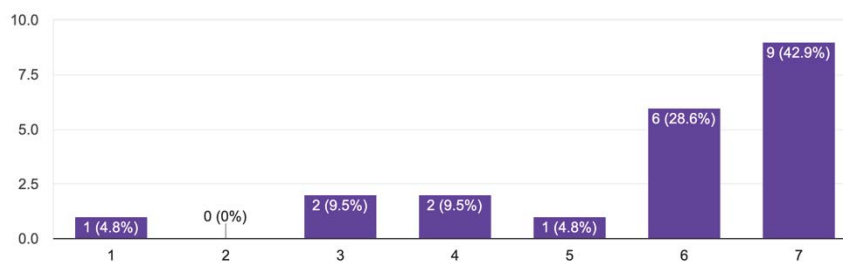
20. Prije ovog prikaza bio/la sam upoznat/a s konceptom multispektralnog snimanja.
21 responses



Slika 57 - rezultati pitanja iz ankete - upoznatost s multispektralnim snimanjem

Tvrdnja da multispektralna fotodokumentacija omogućuje bolju diferencijaciju tkiva nego standardni vizualni prikaz imala je prosječnu ocjenu 5,67, dok je tvrdnja da olakšava uočavanje anatomskih struktura koje nisu jednako jasno vidljive u standardnom prikazu imala prosječnu ocjenu 5,86. Multispektralna fotodokumentacija kao dopuna standardnim vizualnim materijalima ocijenjena je prosječnom vrijednošću 6,24. Time se pokazuje da studenti, iako prethodno uglavnom nisu bili sustavno upoznati s multispektralnim prikazom, prepoznaju njegovu potencijalnu edukacijsku vrijednost nakon što im je prikazan u kontekstu operacije štitnjače.

21. Multispektralna fotodokumentacija omogućila je bolju diferencijaciju tkiva nego standardni vizualni prikaz.
21 responses

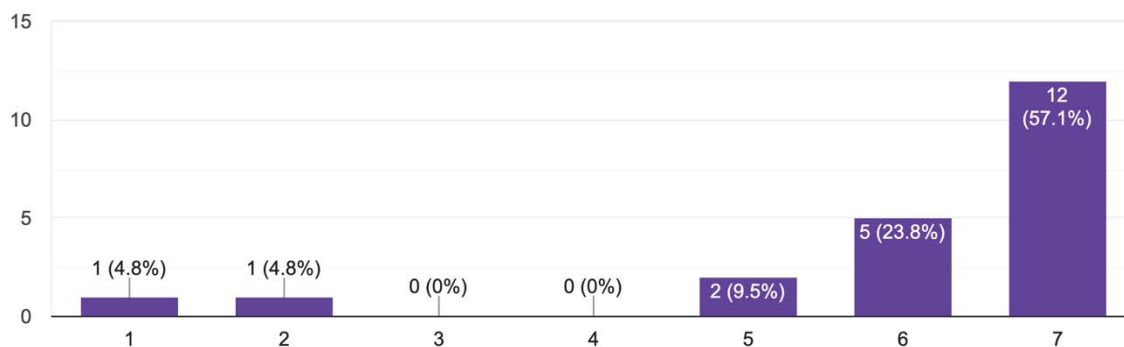


Slika 58 - rezultati pitanja iz ankete - diferencijacija tkiva multispektralnim snimanjem

Preporuke ispitanika za uključivanje novih vizualnih modaliteta u nastavu bile su također pozitivne. Uključivanje 3D/stereoskopske videodokumentacije u nastavu o operaciji štitnjače imalo je prosječnu ocjenu 6,05, dok je uključivanje multispektralne fotodokumentacije imalo prosječnu ocjenu 5,95. U oba slučaja medijan je iznosio 7, što upućuje na snažnu sklonost ispitanika prema uključivanju ovih oblika dokumentacije u nastavni proces. Pozitivna ocjena multispektralne fotodokumentacije osobito je važna jer se radi o modalitetu s kojim je dio ispitanika prethodno bio slabo upoznat, ali ga je nakon prikaza ipak prepoznao kao potencijalno korisnu dopunu standardnom prikazu.

24. Preporučio/la bih uključivanje 3D/stereoskopske videodokumentacije u nastavu o operaciji štitnjače.

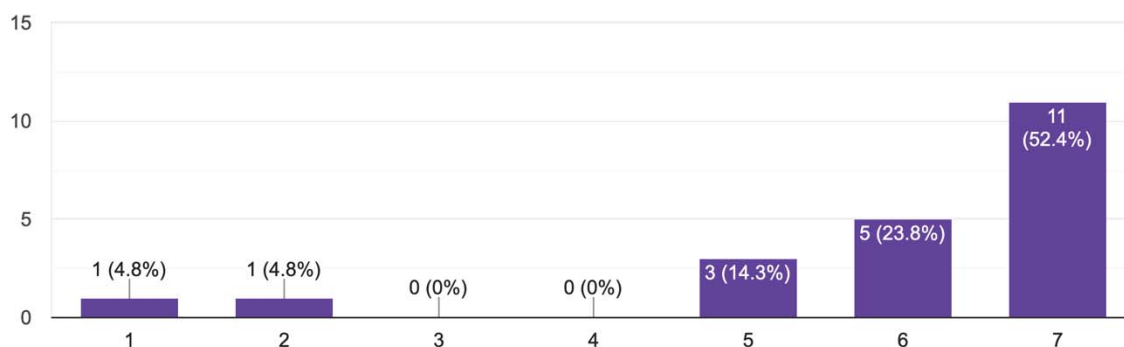
21 responses



Slika 59 - rezultati pitanja iz ankete - uključivanje 3D videodokumentacije u nastavu

25. Preporučio/la bih uključivanje multispektralne fotodokumentacije u nastavu o operaciji štitnjače.

21 responses



Slika 60 - rezultati pitanja iz ankete - uključivanje multispektralne fotodokumentacije u nastavu

Otvoreni komentari ispitanika dodatno podupiru kvantitativne rezultate. U komentarima se ističe da su prikazani materijali „drugačiji od svega što smo dosad mogli vidjeti“, da su „zabavni i poučni“ te da bi ih bilo korisno češće uključivati u nastavu. Jedan komentar posebno ističe potrebu za dodavanjem tekstualnih oznaka ili opisa koraka tijekom videa, kako bi se lakše pratilo u kojem se dijelu operacije student trenutačno nalazi i što se prikazuje. Taj prijedlog ukazuje na mogućnost daljnjeg razvoja edukacijskog materijala kroz kombinaciju stereoskopskog videa, tekstualne navigacije i strukturiranog označavanja operacijskih faza.

26. Dodatni komentari ili prijedlozi za poboljšanje prikazanih edukacijskih materijala:

5 responses

Pohvale profesoru na trudu i zalaganju za studente!

Dodati korake u operaciji štitnjače tekstualno za vrijeme videa kako bi se lakše moglo pratiti u kojem smo dijelu operacije i što točno trenutno gledamo.

Ovo mi se jako svidjelo. Drugačije je od svega što smo dosad mogli vidjeti. Zabavno je i poučno. Mislim da bi bilo super to češće uključivati u nastavu.

Uvažavam svaki trud u nastavi

Sve odlično.

Slika 61 - rezultati pitanja iz ankete - dodatni komentari

Ukupno gledano, rezultati ankete pokazuju da studenti pete godine medicine imaju ograničeno neposredno iskustvo s operacijom štitnjače i relativno skromnu samoprocijenu poznavanje koraka tiroidektomije. Klasični edukacijski materijali, osobito skripte, udžbenici i prezentacije, često su korišteni i ocijenjeni korisnima, ali pokazuju određena ograničenja u području prostorne orijentacije. 3D/stereoskopska videodokumentacija ocijenjena je kao izrazito korisna za razumijevanje prostornih odnosa i slijeda operacijskih koraka, dok je multispektralna fotodokumentacija prepoznata kao vrijedna dopuna standardnim vizualnim materijalima, osobito u kontekstu diferencijacije tkiva i uočavanja struktura koje nisu jednako jasno vidljive u standardnom prikazu. Rezultati stoga podupiru zaključak da kombinacija strukturirane nastavne prezentacije, 3D/stereoskopske videodokumentacije i multispektralne fotodokumentacije može imati edukacijsku vrijednost kao dopunski nastavni materijal za učenje o operaciji štitnjače.

12. PRIMJENA U BUDUĆNOSTI I POTENCIJALNI DALJNI RAZVOJ

Daljnji razvoj predloženog sustava usmjeren je prema njegovoj transformaciji u standardiziranu platformu za foto i videodokumentaciju koja je istovremeno financijski dostupna i tehnički izvediva u različitim okruženjima. Njegova glavna prednost proizlazi iz modularnog pristupa i mogućnosti izrade korištenjem komercijalno dostupnih komponenti, čime se smanjuje potreba za skupom specijaliziranom opremom. U budućnosti se očekuje dodatna optimizacija sustava, posebice u području naprednijih izvedbi kamera, kao i kontrole izoliranosti po spektralnim kanalima te unapređenja rasvjete, osobito u bliskom infracrvenom području. Time bi se postigla veća stabilnost i ujednačenost prikupljenih podataka.

Za širu primjenu sustava nužno je uspostaviti osnovne smjernice za snimanje i obradu podataka. To uključuje definiranje parametara snimanja za pojedine spektralne kanale, način postavljanja opreme te postupke naknadne obrade. Standardizacija bi omogućila usporedivost rezultata između različitih korisnika i institucija, što je važno za daljnju znanstvenu i potencijalnu kliničku primjenu. U tom smislu, budući rad može biti usmjeren na razvoj praktičnih preporuka koje bi olakšale implementaciju sustava u različitim uvjetima.

Edukacijski potencijal sustava predstavlja jedan od njegovih najvažnijih aspekata. Prikupljeni materijali mogu se koristiti kao dodatni izvor učenja za studente medicine i specijalizante, omogućujući prikaz kirurških zahvata na detaljniji i informativniji način. Kombinacija stereoskopskog prikaza i multispektralnih informacija omogućuje bolje razumijevanje prostornih odnosa i karakteristika tkiva u odnosu na klasične i dvodimenzionalne prikaze. U budućnosti je moguće razmotriti i integraciju ovih sadržaja u virtualne ili interaktivne edukacijske sustave.

Uz navedene prednosti, potrebno je uzeti u obzir i etičke te pravne aspekte primjene sustava. Snimanje u operacijskim salama zahtijeva jasno definirane postupke vezane uz zaštitu privatnosti pacijenata, anonimnost podataka i informirani pristanak. Sustav je stoga potrebno razvijati u skladu s važećim propisima i etičkim smjernicama, uz jasno definiranu svrhu korištenja prikupljenih podataka.

Osim medicinske i kirurške primjene, sustav ima potencijal i za širu znanstveno-istraživačku uporabu u područjima u kojima je važna analiza optičkih i prostornih svojstava promatranih objekata. Modularna konstrukcija i mogućnost prilagodbe različitim spektralnim konfiguracijama omogućuju njegovu primjenu u eksperimentalnim istraživanjima iz područja biologije, biomedicine, veterine, forenzike, agronomije, grafičke tehnologije, analize materijala i tehničke dokumentacije.

U području grafičke tehnologije sustav se može koristiti za analizu tiska, pigmenata, zaštitnih elemenata, površinskih oštećenja i spektralnih obilježja različitih tiskovnih i ambalažnih materijala.

Sve navedene primjene moguće su uz preciznu prilagodbu pojedinih elemenata sustava, uključujući odabir kamera, spektralnih filtara, rasvjetnih izvora, optičkih konfiguracija i parametara obrade, ovisno o zahtjevima konkretnog istraživanja i karakteristikama promatranog objekta.

Kontinuiranim prikupljanjem podataka omogućen je razvoj novih metoda obrade i analize te stvaranje zajedničke baze znanja kroz suradnju različitih istraživačkih i stručnih područja i institucija. Dugoročno, takav pristup može doprinijeti razvoju pristupačnih multispektralnih i stereoskopskih dokumentacijskih sustava.

13. ZAKLJUČAK

Provedeno istraživanje potvrdilo je da se aktivnim upravljanjem sustavom Mul3spect može razviti model za prošireni grafički prikaz materije, čime je potvrđena prva hipoteza istraživanja. Sustav je koncipiran kao eksperimentalna platforma za simultano bilježenje multispektralnog fotografskog zapisa i stereoskopskog videozapisa, pri čemu se standardni vizualni prikaz proširuje dodatnim spektralnim i prostornim informacijama.

Takav pristup omogućio je oblikovanje tehničkog i metodološkog modela u kojemu se snimani prizor ne dokumentira samo kao klasična dvodimenzionalna fotografija ili videozapis, nego kao složeniji multimedijski zapis koji objedinjuje informaciju o refleksijskim svojstvima materije u vidljivom i blisko infracrvenom području te informaciju o prostornim odnosima unutar snimanog prizora.

U tom je smislu sustav Mul3spect ostvario prvi znanstveni doprinos disertacije, jer je njegovom arhitekturom izveden inovativan način produkcije multimedijskog sadržaja. Sustav je oblikovan kao cjelina sastavljena od dviju multispektralnih kamera različitih spektralnih konfiguracija, stereoskopske kamere, nosive konstrukcije, stabilizacijskih elemenata, optičkih prilagodbi i dodatne rasvjete. Takva konfiguracija omogućila je istodobno bilježenje istog ili prostorno usklađenog područja kroz više komplementarnih slikovnih modaliteta. Time je potvrđeno da se odgovarajućim povezivanjem dostupnih optičkih, fotografskih i računalnih elemenata može razviti funkcionalan sustav za proširenu reprodukciju stvarnosti, primjenjiv u uvjetima u kojima standardne metode snimanja ne pružaju dovoljno informacija.

Istraživanje je također pokazalo da je za ostvarenje takvog modela nužna tehnička prilagodba sustava stvarnim uvjetima snimanja. Budući da su korištene multispektralne kamere izvorno namijenjene agronomskim i zračnim snimanjima, njihova primjena u uvjetima bliskog snimanja zahtijevala je dodatne optičke i konstrukcijske intervencije. Uvedene su makro predleće radi postizanja odgovarajuće radne udaljenosti, polarizacijski filtri radi smanjenja odblijesaka, dodatni infracrveni izvori svjetla radi poboljšanja odziva u NIR području te mehanički nosači koji omogućuju stabilnost i ponovljivost snimanja. Time je potvrđeno da sustav nije samo skup pojedinačnih kamera, nego funkcionalno oblikovana snimateljska platforma čija izvedivost

ovisi o usklađivanju optike, rasvjete, geometrije snimanja, stabilnosti nosača i zahtjeva specifičnog radnog okruženja.

Druga hipoteza, prema kojoj je računalnom obradom snimljenih multispektralnih podataka moguće reproducirati pojedinačne zapise zabilježene u spektralno izoliranim vizualnim i blisko infracrvenim pojasevima, također je potvrđena, ali uz jasno definirana tehnička ograničenja. Rezultati obrade pokazali su da se iz snimljenih multispektralnih fotografija mogu izdvojiti i reproducirati pojedinačni kanali koji odgovaraju spektralnim područjima definiranim konfiguracijom kamere. Kod OCN kamere ti su zapisi povezani s približnim područjima od 490 nm, 615 nm i 808 nm, dok su kod NGB kamere povezani s približnim područjima od 475 nm, 550 nm i 850 nm. Na taj je način omogućeno promatranje prizora kroz zasebne spektralne slojeve, pri čemu svaki kanal prikazuje različite slikovne karakteristike snimane materije.

Istodobno je utvrđeno da reproducirani kanali ne mogu biti tumačeni kao apsolutno čisti i potpuno izolirani spektralni zapisi. Korištene kamere temelje se na RGB Bayer senzoru, zbog čega zabilježena informacija nastaje kao rezultat odnosa između spektralnih filtara, osjetljivosti senzora, Bayerove strukture, spektralnog sastava rasvjete i refleksijskih svojstava snimane površine. Unatoč postojanju spektralno definiranih filtara ispred senzora, pojedini Bayerovi kanali imaju vlastita područja osjetljivosti koja se međusobno preklapaju, što dovodi do miješanja informacija i pojave spektralnog preklapanja. Zbog toga je računalna obrada imala ključnu ulogu u interpretaciji dobivenog zapisa, ali njezini rezultati moraju biti promatrani kao funkcionalno razdvojeni slikovni prikazi, a ne kao apsolutna radiometrijska mjerenja spektralnih vrijednosti.

U istraživanju je uspostavljen hodogram računalne obrade kojim se snimljeni multispektralni i stereoskopski materijal može reproducirati, analizirati i pripremiti za daljnju interpretaciju. Taj hodogram uključuje razdvajanje slikovnih kanala, obradu kompozitnih fotografija, prilagodbu prikaza, razlaganja RAW zapisa, interpretaciju pojedinih spektralnih slojeva te povezivanje multispektralnih fotografija sa stereoskopskim videozapisom. Time je oblikovan ponovljiv metodološki okvir koji može poslužiti kao temelj za daljnja istraživanja, optimizaciju obrade i primjenu sličnih sustava u drugim područjima. Ovim je potvrđen drugi znanstveni doprinos disertacije, koji se odnosi na definiranje radnih okvira, specifikacija sustava i alata potrebnih za obradu snimljenih podataka.

Treća hipoteza, prema kojoj raščlamba podataka snimljenih dizajniranim sustavom omogućuje analizu multispektralnog sadržaja u vizualnim i blisko infracrvenim spektralnim pojasevima radi uočavanja mogućih razlika u informacijama, također je potvrđena. Analiza dobivenih zapisa pokazala je da pojedini spektralni kanali ne prikazuju snimani prizor na jednak način, nego naglašavaju različite vizualne, refleksijske i strukturne značajke. U vidljivom dijelu spektra pojedini kanali omogućili su bolji prikaz površinske teksture, rubova, lokalnih kontrasta i razlika u boji, dok su blisko infracrveni kanali omogućili uočavanje informacija koje nisu jednako izražene u standardnom RGB prikazu. Time je potvrđeno da multispektralni zapis može proširiti interpretacijski potencijal fotografske dokumentacije jer omogućuje usporedbu istog prizora kroz više spektralnih slojeva.

Posebno je važno što se razlike među kanalima nisu pokazale samo kao estetske ili kolorističke varijacije, nego kao sadržajno relevantne razlike u prikazu materije. Pojedini spektralni slojevi naglašavali su detalje koji su u drugim kanalima slabije vidljivi, prikriveni ili potpuno odsutni. Takav rezultat potvrđuje da multispektralno snimanje može imati istraživačku vrijednost u situacijama u kojima je potrebno proširiti standardni fotografski prikaz i analizirati informacije izvan uobičajenog vizualnog dojma. Iako rezultati ne predstavljaju zamjenu za specijalizirane medicinske ili laboratorijske multispektralne sustave, oni potvrđuju da se i tehnički jednostavnijom, prilagođenom opremom može dobiti dodatna informacija o promatranoj materiji.

Na taj je način ostvaren treći znanstveni doprinos disertacije. Razvojem metode snimanja i definiranjem postupaka obrade podataka zabilježenih sustavom Mul3spect omogućena je analiza dodatnih, oku nevidljivih informacija, čime je prošireno poznavanje promatrane materije. Sustav je pokazao da kombinacija multispektralnog i stereoskopskog zapisa omogućuje slojevitiju dokumentaciju prizora: multispektralna komponenta proširuje prikaz po spektralnoj osi, dok stereoskopska komponenta proširuje prikaz po prostornoj osi. Takvo povezivanje dviju vrsta proširene vizualne informacije predstavlja važan pomak u odnosu na klasične oblike fotografske i videodokumentacije.

Rezultati istraživanja istodobno su jasno ukazali na ograničenja sustava, što je važno za pravilno tumačenje dobivenih podataka. Najvažnija ograničenja odnose se na spektralno preklapanje senzorskih kanala, potrebu za dodatnom infracrvenom rasvjetom, ovisnost rezultata o spektralnom sastavu postojeće rasvjete, zahtjevnost optičke prilagodbe pri snimanju iz blizine,

te potrebu za stabilnim geometrijskim odnosom među kamerama. Ta ograničenja ne umanjuju vrijednost sustava, nego definiraju okvir njegove primjene i upućuju na smjerove buduće optimizacije. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na precizniju radiometrijsku kalibraciju, poboljšanje postupaka spektralne separacije, kontroliranije uvjete osvjetljenja, smanjenje šuma i kvantitativnu evaluaciju kvalitete dobivenih kanala.

Potrebno je istaknuti i medicinsko-edukacijski potencijal sustava, koji proizlazi iz rezultata snimanja, intervju s profesionalcima iz medicinske struke i studentske ankete. Dobiveni rezultati upućuju na to da bi sustav Mul3spect mogao pridonijeti medicinskoj edukaciji kao dopunski nastavni i istraživački materijal. Njegova vrijednost ne nalazi se u zamjeni neposrednog kliničkog iskustva, klasične nastave ili postojećih medicinskih metoda prikaza, nego u njihovu proširenju dodatnim vizualnim, prostornim i spektralnim informacijama. Studentima i specijalizantima takav materijal može omogućiti višekratno promatranje istog kirurškog prizora, analizu pojedinih faza zahvata, usporedbu anatomskih odnosa i povezivanje vizualnih informacija s teorijskim znanjem.

Posebna edukacijska vrijednost sustava proizlazi iz mogućnosti naknadnog pristupa operacijskom polju iz perspektive koja je u stvarnim uvjetima operacijske sale dostupna samo ograničenom broju sudionika. U kliničkom okruženju promatračka pozicija studenata često je ograničena prostornim, organizacijskim i sigurnosnim uvjetima, dok snimljeni stereoskopski i multispektralni materijal omogućuje pristup sadržaju izvan operacijske sale, neovisno o vremenu i mjestu. Stereoskopski videozapis može pridonijeti razumijevanju dubine, položaja instrumenata i međusobnih odnosa anatomskih struktura, dok multispektralni zapis omogućuje dodatno promatranje spektralno različitih informacija. Zajedno, ti zapisi mogu oblikovati dopunski edukativni materijal za pripremu prije nastave, ponavljanje nakon nastave, samostalno učenje i stručno usavršavanje.

Iako je sustav u ovom radu testiran u medicinskom okruženju, njegova se koncepcija ne mora ograničiti samo na kirurgiju ili medicinsku dokumentaciju. Razvijeni model može se promatrati kao prilagodljiva eksperimentalna platforma za prošireno bilježenje vizualnih i prostorno-spektralnih informacija. Takav pristup može biti primjenjiv u istraživanju materijala, konzervaciji i restauraciji, forenzici, biologiji, edukaciji, industrijskoj kontroli, kulturnoj baštini i drugim područjima u kojima je potrebno dokumentirati informacije koje nisu u potpunosti dostupne standardnim fotografskim metodama.

Na temelju svega navedenoga može se zaključiti da je istraživanje ispunilo postavljeni cilj: razvijen je hodogram postavljanja sustava za simultano dokumentiranje stereoskopskog i multispektralnog materijala u svrhu proširenja grafičkog prikaza materije i istraživanja informacija.

Potvrđene su sve tri hipoteze, uz jasno definiranje tehničkih ograničenja i uvjeta primjene. Sustav Mul3spect pokazao je da integracija multispektralne fotografije i stereoskopskog videozapisa može proširiti mogućnosti grafičke, fotografske, istraživačke i edukativne dokumentacije. Time je potvrđena znanstvena i praktična vrijednost razvijenog sustava, kao i potencijal njegova daljnjeg razvoja u medicini, obrazovanju i širem području znanstvenog istraživanja.

14. POPIS LITERATURE

- [1] Ancic M, Pernar R, Bajic M, Krtalic A, Seletkovic A, Gajski D, et al. Spectral signatures (Endmembers) some of forest species in the republic of Croatia. *Sumar List* 2020;144:119–27. <https://doi.org/10.31298/SL.144.3-4.1>.
- [2] Ma F, Yuan M, Kozak I. Multispectral imaging: Review of current applications. *Surv Ophthalmol* 2023;68:889–904. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2023.06.004>.
- [3] Berger K, Machwitz M, Kycko M, Kefauver SC, Van Wittenberghe S, Gerhards M, et al. Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. *Remote Sens Environ* 2022;280. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>.
- [4] Dunker S, Boyd M, Durka W, Erler S, Harpole WS, Henning S, et al. The potential of multispectral imaging flow cytometry for environmental monitoring. *Cytometry Part A* 2022;101:782–99. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.24658>.
- [5] Spreinat A, Selvaggio G, Erpenbeck L, Kruss S. Multispectral near infrared absorption imaging for histology of skin cancer. *J Biophotonics* 2020;13. <https://doi.org/10.1002/jbio.201960080>.
- [6] Corda DN, Grsic JZ. EXTENDED METHOD OF RESTORATION RETOUCHING IN THE NEAR-INFRARED SPECTRUM. 8th SWS International Scientific Conferences on SOCIAL SCIENCES - ISCSCS Proceedings, 2021, vol. 8, SGEM WORLD SCIENCE (SWS) Scholarly Society; 2021, p. 571–84. <https://doi.org/10.35603/sws.iscscs.va2021/s10.65>.
- [7] Abarca-Olivas J, González-López P, Fernández-Cornejo V, Verdú-Martínez I, Martorell-Llobregat C, Baldoncini M, et al. 3D Stereoscopic View in Neurosurgical Anatomy: Compilation of Basic Methods. *World Neurosurg* 2022;163:e593–609. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.04.036>.
- [8] Retno Wulandari L. A COMPREHENSIVE APPROACH INTO STEREOSCOPIC VISION. *MNJ (Malang Neurology Journal)* 2022;8:53–7. <https://doi.org/10.21776/ub.mnj.2022.008.01.11>.
- [9] Vishwanath D. Toward a new theory of stereopsis. *Psychol Rev* 2014;121:151–78. <https://doi.org/10.1037/a0035233>.

- [10] Jiang Z, Gu X, Chen D, Zhang M, Xu C. Deep learning-assisted multispectral imaging for early screening of skin diseases. *Photodiagnosis Photodyn Ther* 2024;48:104292. <https://doi.org/10.1016/J.PDPDT.2024.104292>.
- [11] Ilişanu MA, Moldoveanu F, Moldoveanu A. Multispectral Imaging for Skin Diseases Assessment—State of the Art and Perspectives. *Sensors* 2023;23. <https://doi.org/10.3390/s23083888>.
- [12] Demarchi MS, Karenovics W, Bédard B, Triponez F. Near-infrared fluorescent imaging techniques for the detection and preservation of parathyroid glands during endocrine surgery. *Innov Surg Sci* 2021;7(3-4):87–98. <https://doi.org/10.1515/iss-2021-0001>.
- [13] Solórzano CC, Thomas G, Berber E, Wang TS, Randolph GW, Duh QY, et al. Current state of intraoperative use of near infrared fluorescence for parathyroid identification and preservation. *Surgery (United States)* 2021;169:868–78. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2020.09.014>.
- [14] Yaow CYL, Mok HT, Ng CH, Devi MK, Iyer S, Chong CS. Difficulties Faced by General Surgery Residents. A Qualitative Systematic Review. *J Surg Educ* 2020;77:1396–406. <https://doi.org/10.1016/J.JSURG.2020.06.003>.
- [15] Grsic K, Malic M, Bilos J. 2D and 3D Video of thyroid surgery—right thyroid lobectomy (with Video). *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis* 2021;138:39–40. <https://doi.org/10.1016/j.anorl.2021.03.012>.
- [16] Rajković I, Radonić D, Grsic K, Žiljak Gršić J. 3D VIDEO AS A PRACTICE-LEARNING MODULE IN SURGICAL EDUCATION. *EDULEARN20 Proceedings*, 2020, p. 2871–6. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2020.0862>.
- [17] Hoyek N, Collet C, Di Rienzo F, De Almeida M, Guillot A. Effectiveness of three-dimensional digital animation in teaching human anatomy in an authentic classroom context. *Anat Sci Educ* 2014;7:430–7. <https://doi.org/10.1002/ase.1446>.
- [18] Guo J, Guo Q, Feng M, Liu S, Li W, Chen Y, et al. The use of 3D video in medical education: A scoping review. *Int J Nurs Sci* 2023;10:414–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijnss.2023.06.006>.
- [19] Ahmet A, Gamze K, Rustem M, Karaborklu Argut S. Is Video-Based Education an Effective Method in Surgical Education? A Systematic Review. *J Surg Educ* 2018;75:1150–8. <https://doi.org/10.1016/J.JSURG.2018.01.014>.
- [20] Bordes SJ, Walker D, Modica LJ, Buckland J, Sobering AK. Towards the optimal use of video recordings to support the flipped classroom in medical school basic sciences education. *Med Educ Online* 2021;26. <https://doi.org/10.1080/10872981.2020.1841406>.

- [21] Xue M, Liu P, Zhang J, Sun Y, Fang Y, Yang J, et al. Does a Video-Based and 3D Animation Hybrid Learning System Improve Teaching Outcomes in Orthopedic Surgery? A Randomized Controlled Trial. *J Surg Educ* 2024;81:1305–19. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2024.05.015>.
- [22] mapir.com n.d.
- [23] Ortega S, Halicek M, Fabelo H, Callico GM, Fei B. Hyperspectral and multispectral imaging in digital and computational pathology: a systematic review [Invited]. *Biomed Opt Express* 2020;11:3195. <https://doi.org/10.1364/boe.386338>.
- [24] Rey-Barroso L, Burgos-Fernández FJ, Delpueyo X, Ares M, Royo S, Malvehy J, et al. Visible and extended near-infrared multispectral imaging for skin cancer diagnosis. *Sensors (Switzerland)* 2018;18. <https://doi.org/10.3390/s18051441>.
- [25] Paras C, Keller M, White L, Phay J, Mahadevan-Jansen A. Near-infrared autofluorescence for the detection of parathyroid glands. *J Biomed Opt* 2011;16:067012. <https://doi.org/10.1117/1.3583571>.
- [26] Wang B, Zhu CR, Liu H, Yao XM, Wu J. The Accuracy of Near Infrared Autofluorescence in Identifying Parathyroid Gland During Thyroid and Parathyroid Surgery: A Meta-Analysis. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2021;12. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.701253>.
- [27] Bogomolova K, Hierck BP, Looijen AEM, Pilon JNM, Putter H, Wainman B, et al. Stereoscopic three-dimensional visualisation technology in anatomy learning: A meta-analysis. *Med Educ* 2021;55:317–27. <https://doi.org/10.1111/medu.14352>.
- [28] Yammine K, Violato C. A meta-analysis of the educational effectiveness of three-dimensional visualization technologies in teaching anatomy. *Anat Sci Educ* 2015;8:525–38. <https://doi.org/10.1002/ase.1510>.
- [29] Bogomolova K, van Merriënboer JJG, Sluimers JE, Donkers J, Wiggers T, Hovius SER, et al. The effect of a three-dimensional instructional video on performance of a spatially complex procedure in surgical residents in relation to their visual-spatial abilities. *Am J Surg* 2021;222:739–45. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2021.01.033>.
- [30] Chytas D, Piagkou M, Natsis K. Does 3D stereoscopy support anatomical education? *Surgical and Radiologic Anatomy* 2021;43:545–6. <https://doi.org/10.1007/s00276-020-02588-3>.
- [31] Barberio M, Maktabi M, Gockel I, Rayes N, Jansen-Winkel B, Köhler H, et al. Hyperspectral based discrimination of thyroid and parathyroid during surgery: Hyperspectral imaging for tissue discrimination. *Current Directions in Biomedical*

- Engineering, vol. 4, Walter de Gruyter GmbH; 2018, p. 399–402.
<https://doi.org/10.1515/cdbme-2018-0095>.
- [32] Jacques SL. Erratum: Optical properties of biological tissues: A review (Physics in Medicine and Biology (2013) 58). Phys Med Biol 2013;58:5007–8.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/14/5007>.
- [33] Anderson RR, And BS, Parrish JA. The Optics of Human Skin. vol. 77. n.d.
- [34] Liu P, Zhu Z, Zeng C, Nie G. Specific absorption spectra of hemoglobin at different PO₂ levels: potential noninvasive method to detect PO₂ in tissues 2012.
<https://doi.org/10.1117/1>.
- [35] Maktabi M, Köhler H, Ivanova M, Neumuth T, Rayes N, Seidemann L, et al. Classification of hyperspectral endocrine tissue images using support vector machines. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2020;16:1–10. <https://doi.org/10.1002/rcs.2121>.
- [36] Kulawardhana RW. Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications. By Hamlyn G. Jones and Robin A Vaughan. Journal of Vegetation Science 2011;22:1151–3. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01319.x>.
- [37] Tucker CJ. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sens Environ 1980;10:23–32. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90096-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90096-6).
- [38] Luhmann T., Robson Stuart, Kyle Stephen, Boehm Jan. Close-range photogrammetry and 3D imaging. De Gruyter; 2014.
- [39] Dodgson NA. <title>Variation and extrema of human interpupillary distance</title>. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, vol. 5291, SPIE; 2004, p. 36–46.
<https://doi.org/10.1117/12.529999>.
- [40] Zhongpai Gao AHGZEP. Correcting geometric distortions in stereoscopic 3D imaging 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205032.g001>.
- [41] Kandao Technology Co. Ltd. QooCam EGO – technical specifications. Shenzhen; 2025. n.d.
- [42] Hackett M, Proctor M. Three-Dimensional Display Technologies for Anatomical Education: A Literature Review. J Sci Educ Technol 2016;25:641–54.
<https://doi.org/10.1007/s10956-016-9619-3>.
- [43] Bernard F, Richard P, Kahn A, Fournier HD. Does 3D stereoscopy support anatomical education? Surgical and Radiologic Anatomy 2020;42:843–52.
<https://doi.org/10.1007/s00276-020-02465-z>.

- [44] Radonić D, Žiljak Gršić J, Rajković I, Gršić K. Adaptation of Agronomic Multispectral Cameras for Photodocumentation of Human Tissue During Thyroid Surgery. *Tehnicki Vjesnik* 2026;33:1123–9. <https://doi.org/10.17559/TV-20260116003301>.
- [45] Setchfield K, Gorman A, Simpson AHRW, Somekh MG, Wright AJ. Relevance and utility of the in-vivo and ex-vivo optical properties of the skin reported in the literature: a review [Invited]. *Biomed Opt Express* 2023;14:3555–83. <https://doi.org/10.1364/boe.493588>.
- [46] Colas V, Blondel W, Khairallah G, Daul C, Amouroux M. Proposal for a skin layer-wise decomposition model of spatially-resolved diffuse reflectance spectra based on maximum depth photon distributions: A numerical study. *Photonics* 2021;8. <https://doi.org/10.3390/photonics8100444>.
- [47] Serrage H, Heiskanen V, Palin WM, Cooper PR, Milward MR, Hadis M, et al. Under the spotlight: mechanisms of photobiomodulation concentrating on blue and green light. *Photochemical & Photobiological Sciences* 2019;18:1877–909. <https://doi.org/10.1039/c9pp00089e>.
- [48] Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review. *J Biomed Opt* 2014;19:010901. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.19.1.010901>.
- [49] Hecht Eugene. *Optics*. Pearson; 2017.
- [50] Kingslake Rudolf, Johnson RBarry. *Lens design fundamentals*. Elsevier/Academic Press; 2010.
- [51] Ray SF. *Applied photographic optics : imaging systems for photography, film, and video*. Focal Press; 1988.
- [52] Jacobson. *The Manual of Photography Ninth Edition*. n.d.
- [53] 1_MAPIR Camera_Survey3- Multispectral Reflectance Cameras n.d.
- [54] 2_MAPIR Camera_How do you capture 3 separate multispectral channels (bands) in a traditional RGB color camera n.d.
- [55] Malvar HS, He L-W, Cutler R. HIGH-QUALITY LINEAR INTERPOLATION FOR DEMOSAICING OF BAYER-PATTERNED COLOR IMAGES. n.d.
- [56] Getreuer P. Malvar-He-Cutler Linear Image Demosaicking. *Image Processing On Line* 2011;1:83–9. https://doi.org/10.5201/ipol.2011.g_mhcd.
- [57] 5_MAPIR Camera_Survey3 Manual v3 n.d.
- [58] Lapray PJ, Wang X, Thomas JB, Gouton P. Multispectral filter arrays: Recent advances and practical implementation. *Sensors (Switzerland)* 2014;14:21626–59. <https://doi.org/10.3390/s141121626>.

- [59] Park C, Kang MG. Color restoration of RGBN multispectral filter array sensor images based on spectral decomposition. *Sensors* (Switzerland) 2016;16. <https://doi.org/10.3390/s16050719>.
- [60] Radonić D, Gršić JŽ, Rajković I. Separation of Multispectral Raw Image Data for the Analysis of Visible and Near-Infrared Graphic Information n.d.;43.
- [61] Edward B. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. n.d.
- [62] Žiljak V, Žiljak Gršić J, Jurečić D, Jeličić T. Near-infrared spectroscopy and hidden graphics applied in printing security documents in the offset technique. *Tehnički Glasnik* 2019;13:311–4. <https://doi.org/10.31803/tg-20191004140247>.
- [63] Gršić JŽ. BLISKA INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA U TISKARSKOJ TEHNOLOGIJI NEAR INFRARED SPEKTROSKOPY IN PRINT TECHNOLOGY. *POLYTECHNIC & DESIGN* 2017;5. <https://doi.org/10.19279/TVZ.PD.2017-5-1-05>.
- [64] Spectral Irradiance SECTION ONE FEATURES • Optical Radiation Terminology and Units • Laws of Radiation • Pulsed Radiation • Light Collection and System Throughput • Spectral Irradiance Data • Using the Spectral Irradiance Curves • Calculating Output Power. n.d.

15. POPIS SLIKA

Slika 1 - Spektrogram propusnosti filtera OCN kamere (izvor: www.mapir.com)	21
Slika 2 - Spektrogram propusnosti filtera NGB kamere (izvor: www.mapir.com)	22
Slika 3 - Fotografija s Kamere 1 (OCN) direktno iz kamere	27
Slika 4 - Kanal O (490nm) OCN	28
Slika 5 - Kanal C (615nm) OCN.....	29
Slika 6 - Kanal N (808nm) OCN	29
Slika 7 - Fotografija s Kamere 2 (NGB) direktno iz kamere	30
Slika 8 - Kanal N (850nm) NGB	32
Slika 9 - Kanal G (550nm) NGB	33
Slika 10 - Kanal B (475nm) NGB.....	33
Slika 11 – Paralelni zapis iz kamere 3	40
Slika 12 - Sustav Mul3spect	45
Slika 13 - Magic arm držači.....	46
Slika 14 - Infracrveni izvori svjetla na sustavu.....	47
Slika 15 - Izrada adaptera za rasvjetna tijela	48
Slika 16 - Bušenje rupa na adapteru	48
Slika 17 - Brušenje rubova adaptera	49
Slika 18 - Optimiziran Mul3spect sustav.....	50
Slika 19 - Kontrolna ploča	51
Slika 20 – dijagram optičkog sklopa.....	54
Slika 21 – postojeća kirurška rasvjeta i dodana NIR rasvjeta nm.....	56
Slika 22 – Bayer senzor raspodjela vrijednosti piksela (izvor: www.mapir.camera.com).....	59
Slika 23 – shematski prikaz preklapanja spektralnih odziva Bayer RGB senzora	61
Slika 24 – shematski prikaz propusnosti OCN filtera.....	61
Slika 25 – shematski prikaz propusnosti NGB filtera.....	62
Slika 26 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE	68
Slika 27 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE	69
Slika 28 - snimka zaslona kôda iz programa IDLE	70
Slika 29 – Hodogram postupka obrade RAW zapisa	71
Slika 30 - Kamera 1 (OCN) direktno iz kamere	73
Slika 31 - Kanal O (490nm) nakon razdvajanja kanala	74
Slika 32 - Kanal C (615nm) nakon razdvajanja kanala	75

Slika 33 - Kanal N (808nm) nakon razdvajanja kanala	76
Slika 34 - Kamera 2 (NGB) fotografija dikertno iz kamere	77
Slika 35 - Kanal N (850nm) nakon separacije kanala.....	79
Slika 36 - Kanal G (550nm) nakon separacije kanala.....	80
Slika 37 - Kanal B (475nm) nakon razdvajanja kanala	81
Slika 38 - Kompozitna fotografija izravno iz kamere.....	86
Slika 39 - Kompozitna fotografija nakon ugađanja bjeline	87
Slika 40 - Cijan kanal (490nm).....	88
Slika 41 - Narančasti kanal (615nm)	89
Slika 42 - NIR kanal (808).....	90
Slika 43 - Kompozitna fotografija iz kamere.....	92
Slika 44 - kompozitna fotografija nakon wb-a	94
Slika 45 - Plavi kanal (475 nm)	95
Slika 46 - Zeleni kanal (550 nm)	96
Slika 47 – NIR kanal (850 nm).....	97
Slika 48 - Snimanje operacije prije i poslije optimizacije	99
Slika 49 - Kanali iz kamere NGB (lijevo) i OCN (desno).....	100
Slika 50 - Slika iz stereoskopske kamere pripremljena za gledanje kroz VR naočale	101
Slika 51 - Slika iz stereoskopske kamere pripremljena za gledanje kroz anaglifne naočale.	102
Slika 52 - rezultati pitanja iz ankete - promatranje operacije štitnjače uživo	112
Slika 53 - rezultati pitanja iz ankete - korištenje edukacijskih materijala	113
Slika 54 - rezultati pitanja iz ankete - prostorna orijentacija	114
Slika 55 - rezultati pitanja iz ankete - edukacijski modalitet	115
Slika 56 - rezultati pitanja iz ankete - korisnost PPT prezentacije i 3D videodokumentacije	115
Slika 57 - rezultati pitanja iz ankete - upoznatost s multispektralnim snimanjem.....	116
Slika 58 - rezultati pitanja iz ankete - diferencijacija tkiva multispektralnim snimanjem.....	116
Slika 59 - rezultati pitanja iz ankete - uključivanje 3D videodokumentacije u nastavu	117
Slika 60 - rezultati pitanja iz ankete - uključivanje multispektralne fotodokumentacije u nastavu	117
Slika 61 - rezultati pitanja iz ankete - dodatni komentari	118

16. POPIS TABLICA

Tablica 1 – kvantitativna mjerenja OCN kamere.....	35
Tablica 2 - kvatitativna mjerenja NGB kamere	36
Tablica 3 - izračuni udaljenosti oštine	53

17. PRILOZI

17.1. Anketni upitnik

Evaluacija edukacijske korisnosti stereoskopske videodokumentacije i multispektralne fotodokumentacije u učenju o operaciji štitnjače

Sudjelovanje u istraživanju je dobrovoljno i anonimno. Podatci će se analizirati isključivo u istraživačke svrhe. Nastavkom ispunjavanja potvrđujete da dobrovoljno sudjelujete u istraživanju.

1. Opći podatci i prethodno iskustvo

1. Trenutno sam student/ica studija medicine.

☐

Da

☐

Ne

Ako odaberete "Ne", nemojte nastavljati s ispunjavanjem.

2. Godina studija medicine koju trenutačno pohađam:

☐

1. godina

☐

2. godina

☐

3. godina

☐

4. godina

☐

5. godina

☐

6. godina

3. Jeste li tijekom studija odradili kliničku nastavu ili rotaciju iz kirurgije i/ili otorinolaringologije?

☐

Da, iz kirurgije

☐

Da, iz otorinolaringologije

☐

Da, iz kirurgije i otorinolaringologije

☐

Ne

☐

Ne želim odgovoriti

4. Koliko ste puta do sada promatrali operaciju štitnjače uživo?

☐	Nijednom
☐	Jednom
☐	2–3 puta
☐	4 ili više puta
☐	Ne želim odgovoriti

5. Jeste li ikada asistirali u operaciji štitnjače?

☐	Da, jednom
☐	Da, više puta
☐	Ne
☐	Ne želim odgovoriti

6. Kako procjenjujete svoje poznavanje anatomije štitnjače, paratireoidnih žlijezda i okolnih anatomskih struktura?

vrlo nisko	1	2	3	4	5	6	7	vrlo visoko

7. Kako procjenjujete svoje poznavanje osnovnih koraka tiroidektomije?

vrlo nisko	1	2	3	4	5	6	7	vrlo visoko

2. Dosadašnje korištenje edukacijskih materijala

8. Koliko ste često tijekom studija koristili sljedeće oblike edukacijskih materijala za učenje anatomskih, kirurških ili kliničkih sadržaja?

Edukacijski materijal	1 = nikad	2	3	4	5	6	7 = vrlo često
Tekstualne skripte i/ili udžbenici							
Bilješke s nastave ili seminara							
2D video-materijali							
3D/stereoskopski video-materijali							
Simulacije, radionice ili VR/AR sadržaji							
Znanstveni članci ili stručne smjernice							

3. Učenje iz PowerPoint prezentacije s predavanja

9. Prezentacija s predavanja omogućila je jasno razumijevanje anatomskih odnosa štitnjače, paratireoidnih žlijezda i okolnih anatomskih struktura.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

10. Prezentacija s predavanja omogućila je razumijevanje glavnih koraka tiroidektomije.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

11. Prostorna orijentacija bila je dovoljna tijekom učenja iz prezentacije s predavanja.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

12. Sveukupno, prezentacija s predavanja bila je korisna za učenje o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

4. Učenje iz 3D/stereoskopske videodokumentacije

13. 3D/stereoskopska videodokumentacija poboljšala je prostornu orijentaciju prilikom izučavanja operativnih postupaka.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

14. 3D/stereoskopska videodokumentacija olakšala je razumijevanje anatomskih odnosa štitnjače, paratireoidnih žlijezda i okolnih anatomskih struktura.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

15. 3D/stereoskopska videodokumentacija olakšala je praćenje slijeda glavnih koraka tiroidektomije.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

16. Sveukupno, 3D/stereoskopska videodokumentacija bila je korisna za učenje o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

5. Usporedba edukacijskih modaliteta

17. Koji je edukacijski modalitet više pridonio Vašoj prostornoj orijentaciji tijekom učenja o operaciji štitnjače?

- ☐ PowerPoint prezentacija s predavanja
☐ 3D/stereoskopska videodokumentacija
☐ Ne mogu procijeniti

18. Koji je edukacijski modalitet više pridonio razumijevanju slijeda glavnih koraka tiroidektomije?

- ☐ PowerPoint prezentacija s predavanja
☐ 3D/stereoskopska videodokumentacija
☐ Ne mogu procijeniti

19. Kombinacija PowerPoint prezentacija s predavanja i 3D/stereoskopske videodokumentacije bila bi korisna kao nastavna cjelina za učenje o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

6. Multispektralna fotodokumentacija - razumijevanje i edukacijska korisnost

20. Prije ovog prikaza bio/la sam upoznat/a s konceptom multispektralnog snimanja.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

21. Multispektralna fotodokumentacija omogućila je bolju diferencijaciju tkiva nego standardni vizualni prikaz.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

22. Multispektralna fotodokumentacija olakšala je uočavanje anatomskih struktura koje nisu jednako jasno vidljive u standardnom prikazu.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

23. Multispektralna fotodokumentacija korisna je kao dopuna standardnim vizualnim materijalima za učenje o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

7. Završna procjena

24. Preporučio/la bih uključivanje 3D/stereoskopske videodokumentacije u nastavu o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

25. Preporučio/la bih uključivanje multispektralne fotodokumentacije u nastavu o operaciji štitnjače.

u potpunosti se ne slažem	1	2	3	4	5	6	7	u potpunosti se slažem

26. Dodatni komentari ili prijedlozi za poboljšanje prikazanih edukacijskih materijala:

17.2. Prezentacija za anketu



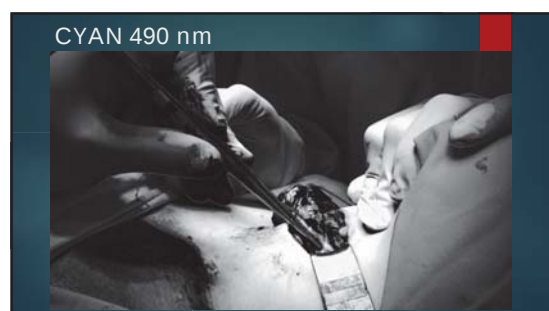
1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

18. ŽIVOTOPIS I POPIS RADOVA AUTORICE

Dinka Radonić rođena je 1984. godine u Zagrebu. Diplomirala je 2009. godine na Akademiji dramske umjetnosti Sveučilišta u Zagrebu, na smjeru Filmsko i TV snimanje, čime je stekla zvanje diplomirane akademske snimateljice. Godine 2021. upisala je doktorski studij Grafičkog inženjerstva na Grafičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od 2005. godine aktivno djeluje kao direktorica fotografije i snimateljica na kratkometražnim igranim, eksperimentalnim i dokumentarnim filmovima, kao i na glazbenim spotovima i reklamnim projektima. Godine 2019. debitirala je kao redateljica dokumentarnog filma *Ikea for YU*. Uz filmski rad, ostvarila je i nekoliko autorskih audio – vizualnih umjetničkih projekata u produkciji Kulture promjene.

Od 2007. godine kontinuirano se bavi edukacijom u području filmskog, televizijskog i multimedijiskog stvaralaštva. Predaje na Školi medijske kulture „Dr. Ante Peterlić” u produkciji Hrvatskog filmskog saveza, na Školi dokumentarnog filma u produkciji Restart te je vodila i realizirala brojne radionice iz područja kamere, snimanja i audiovizualne produkcije.

Godine 2019. izabrana je u nastavno zvanje predavačice za umjetničko područje, polje filmske umjetnosti, na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Na istoj je ustanovi danas zaposlena u nastavnom zvanju više predavačice, gdje održava predavanja i vježbe iz multimedijiskih predmeta. Nositeljica je kolegija Procesi video produkcije, Obrada slike, zvuka i videa, TV i video snimanje, Produkcija digitalnih medija i Digitalna televizija. Aktivno sudjeluje i u programu Erasmus mobilnosti, kroz koji se stručno usavršava u području multimedije na partnerskim veleučilištima i sveučilištima.

U području filmske kulture i edukacije sudjeluje i kroz selekcijski, festivalski i mentorski rad. Od 2018. godine članica je selekcijske komisije Four River Film Festivala u Karlovcu, a sudjelovala je i u radu žirija na festivalima i revijskim programima u produkciji Hrvatskog filmskog saveza.

Sudjeluje na stručnim i znanstvenim skupovima te objavljuje znanstvene i stručne radove u relevantnim publikacijama iz područja grafike, vizualnih umjetnosti, filma, multimedije i obrazovanja. Radove je izlagala i objavljivala u okviru skupova i publikacija kao što su Tehnički vjesnik, Acta Graphica, EDULEARN, Tiskarstvo & Design, Polytechnic & Design, Printing & Design i Hrvatski filmski ljetopis.

POPIS RADOVA

1. Radonić, Dinka; Žiljak Gršić, Jana; Rajković, Ivan; Gršić, Krešimir
Adaptation of Agronomic Multispectral Cameras for Photodocumentation of Human Tissue During Thyroid Surgery // Tehnički vjesnik = Technical gazette, 33 (2026), 3; 1123-1129. doi: 10.17559/TV-20260116003301
2. Radonić, Dinka; Žiljak Gršić, Jana; Rajković, Ivan
Separation of Multispectral Raw Image Data for the Analysis of Visible and Near-Infrared Graphic Information // Acta graphica, 43 (2026), 3;
3. Ivanković, Luka; Remenar, Patrik; Rajković, Ivan; Radonić, Dinka
Percepcija i interpretacija vizualnog sadržaja kreiranog pomoću umjetne inteligencije // Tiskarstvo i Dizajn 2026 / Žiljak Stanimirović, Ivana (ur.).
Zagreb: Fotosoft, 2026. str. 5-9
4. Vranić, Fran; Rajković, Ivan; Radonić, Dinka
Gradnja digitalnih svjetova kroz vizualni dizajn // Abstract proceedings of International conference Printing & Design 2025 / Žiljak Stanimirović, Ivana (ur.).
Zagreb: Fotosoft d. o. o., 2025. str. 73-73
5. Radonić, Dinka; Rajković, Ivan
Uvod u osnove audiovizualne produkcije. Zagreb: Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2024
6. Slade, Patrik; Rajković, Ivan; Radonić, Dinka
Primjena funkcija orijentirane udaljenosti i ray marching tehnike prilikom oblikovanja digitalnih scena // Polytechnic and design, 12 (2024), 3; 164-171. doi: 10.19279/TVZ.PD.2024-12-3-01
7. Slade, Patrik; Rajković, Ivan; Radonić, Dinka
Stvaranje digitalnih scena funkcijama orijentirane udaljenosti i ray marching tehnike // Međunarodni znanstveno-stručni skup Tiskarstvo i dizajn 2024
Zagreb, Hrvatska, 12.06.2024-13.06.2024

8. Dubovečak, Emanuel; Rajković, Ivan; Divjak, Alan; Radonić, Dinka
Izrada 3D modela metodom fotogrametrije // Međunarodni znanstveno-stručni skup Tiskarstvo i dizajn 2024
Zagreb, Hrvatska, 12.06.2024-13.06.2024

9. Dubovečak, Emanuel; Rajković, Ivan; Radonić, Dinka
Usporedba metode fotogrametrije i Gaussovog rasprašivanja kod rekonstrukcije 3D modela // Polytechnic and design, 12 (2023), 2; 131-145

10. Samarin, Nenad; Radonić, Dinka ; Rajković, Ivan
Nadogradnja računalnih komponenti multimedijske radne stanice u svrhu očuvanja okoliša // Polytechnic and design, 11 (2023), 4; 260-268. doi: 10.19279/TVZ.PD.2023-11-

11. Došen, Bruno; Radonić, Dinka; Rajković, Ivan
Utjecaj karakteristika kadra na gledateljevu percepciju audiovizualnog sadržaja // Međunarodni znanstveno-stručni skup Tiskarstvo i dizajn 2023
Zagreb, Hrvatska, 01.06.2023-02.06.2023

12. Radonić, Dinka; Divjak, Alan; Rajković, Ivan; Prigorac, Lana; Franković, Rea; Pavliško, Dominik
Dizajn i 3D print nagrade za međunarodnu konferenciju // Međunarodni znanstveno-stručni skup Tiskarstvo i dizajn 2023
Zagreb, Hrvatska, 01.06.2023-02.06.2023

13. Radonić, Dinka; Rajković, Ivan; Žiljak Gršić, Jana; Divjak, Alan
Optimizacija fotogrametrijskog procesa 3D skeniranja // Međunarodni znanstveni skup Tiskarstvo i dizajn 2022
Zagreb, Hrvatska, 11.05.2022-12.05.2022

14. Rajković, Ivan; Radonić, Dinka; Gršić, Krešimir; Žiljak Gršić, Jana
3D video as a practice-learning module in surgical education // EDULEARN20 Proceedings. International Academy of Technology, Education and Development (IATED), 2020. str. 2871-2876. doi: 10.21125/edulearn.2020.0862

15. Radonić, Dinka; Rajković, Ivan; Savić, Dragan
Infraredesign tehnologija tiska kao komunikacijsko sredstvo oglašavanja filma // Polytechnic and design, 7 (2019), 2; 135-140. doi: 10.19279/TVZ.PD.2019-7-2-07
16. Rajković, Ivan; Radonić, Dinka; Tepeš Golubić, Lidija
Costume design in three spectral areas // Acta graphica, 28 (2018), 4; 123-127. doi: 10.25027/agj2017.28.v28i4.143