

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Parametry hyperspektrálních snímacích systémů

Bc. Miroslav Růžička

Vedoucí: prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
Specializace: Technologie internetu věcí
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Růžička** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **457142**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Technologie internetu věcí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Parametry hyperspektrálních snímacích systémů

Název diplomové práce anglicky:

Parameters of Hyperspectral Imaging Systems

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principem hyperspektrálního zobrazování. Zaměřte se především na parametry těchto systémů a proveďte jejich srovnání.

Podejte přehled v současné době dostupných technologií a srovnajte s kamerou Specim PFD4K-65-V10E. Vytvořte testovací sadu vhodných vzorků pro demonstraci a ověření funkčnosti kamery. Navrhněte sadu algoritmů pro vyhodnocení reflektance nasnímaných dat a vyhodnocení složení vzorku. Navržené postupy a algoritmy ověřte s využitím kamery Specim PFD4K-65-V10E.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BORENGASSER, Marcus; HUNGATE, William S.; WATKINS, Russell. Hyperspectral remote sensing: principles and applications. CRC press, 2007.
- [2] MANOLAKIS, Dimitris G.; LOCKWOOD, Ronald B.; COOLEY, Thomas W. Hyperspectral imaging remote sensing: physics, sensors, and algorithms. Cambridge University Press, 2016.
- [3] BIOUCAS-DIAS, José M., et al. Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges. IEEE Geoscience and remote sensing magazine, 2013, 1.2: 6-36.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **03.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Mgr. Petru Pátovi, Ph.D. za vedení a konzultace při řešení celé práce. Zároveň bych rád poděkoval panu Ing. Lukáši Krauzovi z katedry radioelektroniky za konzultace. Poděkování patří také panu Ing. Janu Kaiserovi, Ph.D. z firmy FOMEI za poskytnutí fotografií vytištěných na profesionálních tiskárnách. Děkuji také rodině za podporu nejen po dobu psaní této diplomové práce, ale i v průběhu celého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 14. května 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce přibližuje téma hyperspektrálního snímání. Zaměřuje se na popis parametrů hyperspektrálních snímacích systémů a zmiňuje jejich možnou aplikaci v praxi. Práce se dále věnuje podrobnému seznámení s hyperspektrální kamerou Specim PFD4K-65-V10E v laboratoři ČVUT. Je popsáno, jak s kamerou pracovat a ověřeno několik jejích parametrů jako je spektrální vzorkování, PSNR, PIQE nebo MTF. Provedeno je také porovnání se spektrometrem. Praktická část se dále věnuje určení vhodných testovacích vzorků a analýzy jejich reflektance. Bylo zjištěno, že mezi vhodné vzorky pro kameru v laboratoři patří například arašidy, ovoce, zelenina, rostliny, maso nebo také displeje či vytištěné fotografie. Z diplomové práce se jeví jako perspektivní a zatím nepříliš prozkoumané využití k rozpoznání inkoustu a tiskárny na základě reflektance. Zároveň byl pro vyhodnocení napsán program s názvem HyperCalib, který umožňuje analýzu hyperspektrálních snímků a integruje několik algoritmů pro porovnání spektrální reflektance.

Klíčová slova: hyperspektrální snímání, parametry hyperspektrální kamery, spektrální reflektance, míra spektrální podobnosti

Vedoucí: prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.

Abstract

This master's thesis deals with the hyperspectral imaging. The focus is on describing parameters of hyperspectral cameras and their possible application. The thesis examines Specim PFD4K-65-V10E hyperspectral camera in the laboratory of CTU. It was presented how to work with this new camera, performed measurement to verify parameters like spectral sampling, PSNR, PIQE or MTF. A comparison with a spectrometer was made. The practical part is further dedicated to determining the test samples and analyzing their reflectance. It has been found that suitable samples for the camera in the laboratory includes peanuts, fruits, vegetables, plants, meat, displays or printed photographs. Application for the recognition of ink and printers based on reflectance seems to be a promising and not yet very explored area. The program called HyperCalib was written for evaluation, which enables the analysis of hyperspectral images and integrates several algorithms for comparing spectral reflectance.

Keywords: hyperspectral imaging, parameters of hyperspectral camera, spectral reflectance, spectral similarity measure

Title translation: Parameters of Hyperspectral Imaging Systems

Obsah

1 Úvod	1	6.5 Těžení surovin.....	38
2 Základní pojmy snímání	3	6.6 Vojenské využití	39
2.1 Elektromagnetická vlna	3	7 Hyperspektrální kamera Specim PFD4K-65-V10E	41
2.2 Elektromagnetické spektrum	4	7.1 Vhodná aplikace	41
2.3 Zrakový systém člověka	6	7.2 Parametry	42
2.4 Prostorové snímání	7	7.3 Sestavení	43
2.4.1 Barevné snímání	7	8 Ovládání a nastavení kamery	45
2.5 Spektroskopie	8	8.1 Zapnutí kamery	45
2.5.1 Refrakce	8	8.2 Záložka Nastavení	45
2.5.2 Difrakce	8	8.3 Záložka Přizpůsobit	46
3 Princip hyperspektrálního snímání	9	8.3.1 Image correction	48
3.1 Multispektrální snímání	9	8.3.2 Kalibrace	49
3.2 Hyperspektrální snímání	9	8.3.3 Scanning speed	49
3.3 Metody snímání	11	8.3.4 Frame rate a expoziční čas ..	51
3.3.1 Whiskbroom	11	8.3.5 Binning	52
3.3.2 Pushbroom	12	8.4 Snímání	53
3.3.3 Staring	13	9 Ověření parametrů kamery	55
3.3.4 Snapshot	13	9.1 Naměřené prostorové rozlišení ..	55
3.4 Metody rozkladu světla	14	9.2 Spektrální rozsah a vzorkování .	55
3.4.1 Monochromátor	14	9.3 PSNR	57
3.4.2 Laditelné filtry	14	9.4 Nereferenční hodnocení kvality .	61
3.4.3 Single shot imagers	15	9.4.1 PIQE	61
3.5 Hyperspektrální kostka	16	9.5 Modulační přenosová funkce....	64
3.6 Reflektance	16	9.6 Velikost snímků	65
3.7 Spektrální podpis	17	9.7 Porovnání se spektrometrem ...	66
4 Parametry kamery	19	10 Algoritmy a software	69
4.1 Prostorové rozlišení	19	10.1 Kalibrace	69
4.2 Spektrální rozsah	19	10.2 Vlastní program HyperCalib ..	69
4.3 Spektrální rozlišení a šířka pásma	20	10.2.1 Základní analýza	69
4.4 Optická část	21	10.2.2 Analýza vzorků	71
4.5 Zorné pole	22	10.2.3 Analýza inkoustu a tiskárny	73
4.6 Frame rate	23	11 Testovací vzorky	75
4.7 Senzor	23	11.1 Displeje	75
4.8 Konstrukční parametry	24	11.1.1 Rovnoměrnost	75
4.9 SNR	25	11.2 Inkoust	77
4.10 Rozhraní	26	11.3 Podzemnice olejná	83
4.11 Formát výstupních dat	27	11.4 Rostliny	84
5 Přehled výrobců	29	11.5 Ovoce a zelenina	87
6 Aplikace hyperspektrálních kamer v praxi	35	11.6 Maso	87
6.1 Lesnictví a pěstování plodin	35	11.7 Ostatní vzorky	89
6.2 Potraviny	36		
6.3 Zdravotnictví	37		
6.4 Třídění odpadů	37		

12 Závěr	91
Literatura	95
A Seznam všech příloh	103
B Inkoust - testovací obrazec - barvy	105
C Ovoce a zelenina - použité algoritmy rozpoznání dle reflektance	109

Obrázky

2.1 Elektromagnetická vlna při šíření směrem k [2]	3	7.1 Kamera Specim PFD4K-65-V10E v laboratoři ČVUT	42
2.2 Elektromagnetické spektrum [3] .	4	7.2 Kamera s posuvným stolkem a počítačem se software nainstalovaná v laboratoři ČVUT	44
2.3 Citlivost lidského oka [7]	6		
2.4 Bayerova maska [9]	7		
		8.1 Lumo Software - záložka Settings, 1.část	46
3.1 Porovnání metod hyperspektrálního snímání, (A) - Whiskbroom, (B) - Pushbroom, (C) - Plane Scanning, (D) - Snapshot [17]	11	8.2 Lumo Software - záložka Adjust - přepal	47
3.2 Ilustrace systému při použití pushbroom metody [1]	12	8.3 Lumo Software - přidání Spectral reference	48
3.3 Ilustrace systému při použití staring metody [1]	13	8.4 Scanning speed - rychlost skenování dle metody	51
3.4 Schéma čtyř různých snapshot multispektrálních rozdělovačů paprsků (a) monolitický rozdělovač paprsků, (b) sekvence spektrálních filtrů, (c) hologramický optický rozdělovač, (d) rozdělení pomocí naklonění spektrálních filtrů [21] ..	15	8.5 Spatial - prostorový binning 2x [75]	52
3.5 Hyperspektrální kostka [14]	16	8.6 Spektrální binning 2x [75]	52
3.6 Příklad spektrální reflektance na suché a zelené vegetaci [1]	17	8.7 Záložka Capture	54
4.1 Full width at half maximum (FWHM) - pološířka maxima [14] .	20	9.1 Graf spektrálního vzorkování bez použití binningu	56
4.2 Full width at half maximum (FWHM) vs. spektrální vzorkování [29]	21	9.2 Graf spektrálního vzorkování s použitím 4x binningu	57
4.3 Flange back distance [33]	22	9.3 Obrazec pro změření PSNR	58
4.4 Použité materiály senzorů na vlnových délkách 200 - 25 000 nm [17]	24	9.4 Graf PSNR při změně frame rate a stejném expozičním času 10 ms ...	59
4.5 OEM vs Cased kamera Specim PFD4K-65-V10E [40]	25	9.5 Graf PSNR při frame rate 25 Hz a změně expozičního času	60
		9.6 Graf PSNR při změně frame rate s maximálním expozičním časem ...	60
5.1 Kamera imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR [53]	30	9.7 Náhled snímku v RGB pro změření PIQE	63
5.2 SPECIM FX Series kamery [32]	31	9.8 Graf PIQE při změně frame rate s maximálním expozičním časem ...	63
		9.9 MTF kamery Specim PFD4K-65-V10E na třech vlnových délkách	65
6.1 Rýže namixovaná s plastem [64]	37	9.10 Spektrální reflektance Apple iPhone XS - modrá	68
6.2 Referenční vzorky uhličitánových a chloritanových minerálů a jejich reflektance [68]	38	9.11 Spektrální reflektance Apple iPhone XS - zelená	68
6.3 Detekce min pomocí algoritmu MUF2 [15]	39	9.12 Spektrální reflektance Apple iPhone XS - červená	68
		10.1 Program HyperCalib	70
		10.2 Program HyperCalib - záložka analýzy vzorků	72

10.3 Program HyperCalib - záložka analýzy inkoustu a tiskárny	74	11.22 Rozpoznání masa a tuku - použití algoritmu SAM s hranicí 0,10	88
11.1 Spektrální reflektance tří telefonů - modrá	76	11.23 Léky použité k analýze	89
11.2 Spektrální reflektance tří telefonů - modrá - výřez	76	11.24 Mince použité k analýze	89
11.3 Spektrální reflektance - rovnoměrnost v pěti oblastech, iPhone XS, modrá	76	11.25 Reflektance léků	90
11.4 Testovací obrazec s barvami . . .	77	11.26 Reflektance mincí	90
11.5 Testovací fotografie, červeně vyznačená oblast je vykreslena na grafu na obrázku 11.9	78	B.1 Spektrální reflektance - inkoust - světle modrá barva (na terči C15)	105
11.6 Spektrální reflektance - inkoust - černá barva (na terči I5)	79	B.2 Spektrální reflektance - inkoust - žlutá barva (na terči J13)	106
11.7 Spektrální reflektance - inkoust - modrá barva (na terči D6)	79	B.3 Spektrální reflektance - inkoust - světle růžová barva (na terči G15)	106
11.8 Fotografie určená k identifikaci inkoustu a tiskárny	80	B.4 Spektrální reflektance - inkoust - šedá barva (na terči H1)	107
11.9 Spektrální reflektance - inkoust - zelená barva (na terči B12)	81	B.5 Spektrální reflektance - inkoust - fialová barva (na terči K3)	107
11.10 Spektrální reflektance - fotografie	81	C.1 Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib - použitá fotka pro následující snímky před segmentací - náhled v RGB .	109
11.11 Reflektance - fotografie motýla k identifikaci a tří tiskárny	82	C.2 Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib - použití algoritmu SID s hranicí 40	109
11.12 Spektrální reflektance - jeden arašíd a jedna skořápka	83	C.3 Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib - použití algoritmu SAM s hranicí 0,13	110
11.13 Rozpoznání arašídů - zelená, skořápky - červená, vykresleno metodou SID v programu HyperCalib	84	C.4 Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib - použití algoritmu SIDSAM s hranicí 5	110
11.14 Vzorky listů	84		
11.15 MCARI na vzorku listů	85		
11.16 PRI na vzorku listů	85		
11.17 Spektrální reflektance - všechny listy zleva doprava	86		
11.18 Spektrální reflektance - ovoce a zelenina	86		
11.19 Rozpoznání ovoce dle reflektance v programu HyperCalib - modře označený je hrozen vína, červeně jablko a zeleně rajče - použití algoritmu SAM s hranicí 0,10	87		
11.20 Reflektance masa a tuku	88		
11.21 Vzorek syrového masa	88		

Tabulky

2.1 Tabulka rozdělení infračerveného pásma [4]	5
3.1 Porovnání snímání [16]	10
5.1 Tabulka vybraných kamer výrobců imec, XIMEA, Photonfocus a Cubert [56, 55, 57, 38]	32
5.2 Tabulka vybraných kamer výrobců Headwall, Resonon, HySpex a Specim [50, 31, 58, 59]	33
7.1 Tabulka s parametry kamery Specim PFD4K-65-V10E [32]	43
8.1 Tabulka Scanning speed	50
8.2 Velikost pixelu ve vztahu k binningu na kameře Specim PFD4K-65-V10E s objektivem OLE 23	53
9.1 Spektrální vzorkování a binning	56
9.2 Škála kvality PIQE [77]	62
9.3 Spektrometr vs hyperspektrální kamera, špička	67

Kapitola 1

Úvod

Tato diplomová práce si klade za cíl v první části přiblížit téma hyperspektrálního snímání. Při něm je na rozdíl od klasické fotografie zaznamenaná kompletní spektrální informace pro každý obrazový bod. Výsledný snímek si lze představit jako 3D kostku se dvěma prostorovými souřadnicemi a se třetí spektrální. To otvírá celou řadou možných aplikací, které se neustále v posledních letech rozvíjí a hledají se nové možnosti využití v praxi. Téma hyperspektrálních snímacích systémů má velký potenciál a je zde stále co objevovat, což bylo také mou motivací k výběru tohoto tématu pro tuto diplomovou práci.

Nejprve bude popsána teoretická podstata, vysvětlen princip snímání a přiblíženy jednotlivé metody snímání. Každá hyperspektrální kamera nabízí určité parametry, které v tomto případě tvoří kombinace parametrů běžných digitálních fotoaparátů a zároveň parametry spektrometrů. Právě na důležité parametry u hyperspektrální kamery bude kladen důraz a bude jim věnována část práce. Nebude chybět ani přehled významných výrobců těchto kamer.

Neméně důležité je najít vhodnou aplikaci hyperspektrálního snímání v praxi. Proto bude podán přehled zajímavých aplikací a využití, které začalo u snímání povrchu země ze satelitů nebo dronů. Hyperspektrální kamera se využívá například při identifikaci zalesněných ploch či rozpoznání stresu stromů a dostalo se třeba i na použití k nalezení min na nepřátelském území. Již delší dobu se však běžně používá v laboratořích nebo průmyslu, kupříkladu pro třídění plastů či odpadů na základě spektrální reflektance, nebo ve zdravotnictví a potravinářství.

Praktická část diplomové práce si klade za cíl nejprve popsat a ověřit vybrané parametry hyperspektrální kamery Specim PFD4K-65-V10E, která byla teprve nedávno instalovaná do laboratoře na ČVUT. Jelikož se jedná o novou kameru, bude kromě ověření parametrů prozkoumán také její snímací software, popsáno, jak s kamerou pracovat, a nalezeno vhodné nastavení pro snímání vzorků v co nejvyšší kvalitě. Zároveň bude ověřeno, zda nedochází při snímání v určitém nastavením k různým anomáliím.

Následně budou hyperspektrální kamerou v laboratoři nafoceny různé vzorky. Z nich bude po zpracování snímků vybráno několik poskytující nejen vhodnou demonstraci pro kameru Specim PFD4K-65-V10E, ale i možné praktické využití do budoucna. Zároveň v rámci řešení budou implementovány vhodné algoritmy pro spektrální analýzu do vlastního programu s uživatelským rozhraním pro základní analýzu snímků a rozpoznání vybraných vzorků na základní spektrální charakteristiky.

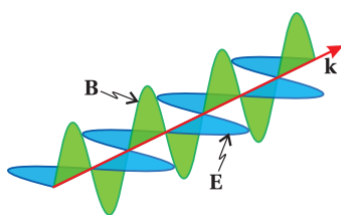
Kapitola 2

Základní pojmy snímání

2.1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetické vlny z hlediska Maxwellovy teorie vznikají, když je elektron uveden do pohybu (změna směru pohybu nebo rychlosti). Elektromagnetickou vlnu tvoří oscilující vektory intenzity elektrického pole E a magnetické indukce B , které jsou na sebe vzájemně kolmé, stejně jako na směr šíření k . Každá elektromagnetická vlna se prostorem šíří s určitou frekvencí f , vlnovou délkou λ a rychlostí c . Záření chovající se jako elektromagnetická vlna vychází z teorie Maxwellových rovnic, kde má vlnový popis. Vlnová rovnice má mnoho tvarů, tvar rovinné harmonické ukazuje vzorec 2.1. Tato rovnice popisuje šíření elektrického vektoru v prostoru a čase. Amplituda je \vec{E}_0 , směr šíření určuje směrový vektor \vec{k} a ω je úhlová rychlost. [1]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp(-\vec{k}_i \cdot \vec{r}) \exp(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Elektromagnetická vlna při šíření směrem k [2]

Pokud uvažujeme elektromagnetické záření jako částicové, pak jej lze popsat jako tok energie částic šířící se rychlostí světla c volným prostorem. V rámci kvantové teorie se jedná o tok fotonů a energii lze popsat podle vzorce (2.2), kde h je Planckova konstanta a f je frekvence.

$$E = hf \quad (2.2)$$

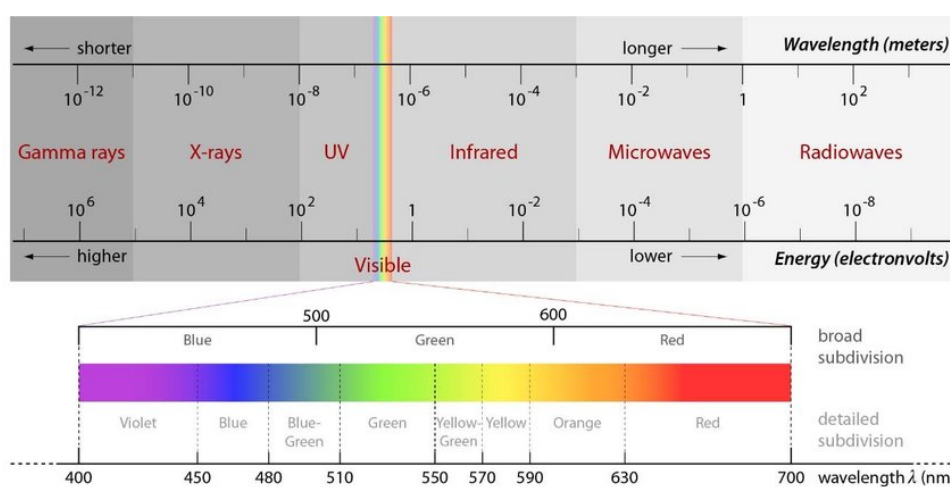
2.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je tvořeno elektromagnetickými vlny na různých frekvencích, respektive vlnových délkách. Spektrum lze obecně rozdělit na rádiové vlny, mikrovlnné vlny, infračervené vlny, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové záření a gama záření. Jako světlo se označuje právě viditelná část spektra lidským okem. Tato část se vymezuje vlnovou délkou 380 - 770 nm. Vlnová délka celého spektra začíná zhruba na hodnotě 10^{-16} metrech, kde nalezneme gama záření a postupně roste až k dlouhým rádiovým vlnám. Naopak frekvence postupně klesá od gama záření až po zmíněné rádiové vlny. Frekvence f a vlnová délka λ spolu souvisí vztahem (2.3), přičemž c je rychlost světla ve vakuu. Tou se v tomto prostředí šíří všechny elektromagnetické vlny.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

Rychlost světla c je ve vakuu stanovena na 299 792 458 m/s. Tato hodnota je určena na základě definice ze vztahu (2.4), kde ϵ_0 je permitivita vakua a μ_0 je permeabilita vakua. Rychlost světla ve vakuu se často zaokrouhluje na $3 \cdot 10^8$ m/s.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.4)$$



Obrázek 2.2: Elektromagnetické spektrum [3]

Pro hyperspektrální snímání je důležité především pásmo viditelného světla a infračerveného záření. Infračervené spektrum začíná na vlnové délce 770 nm a pokračuje až do 1 mm. Dělí se většinou na tři části - krátké, střední a dlouhé vlnové délky. Podle aplikace však rozeznáváme různé dělení tohoto pásma. Standard ISO 20478 rozděluje pásmo na blízké infračervené (Near-Infrared) se zkratkou NIR a vlnovou délkou od 0,78 do 3 μm , střední infračervené (Mid-Infrared) se zkratkou MIR a vlnovou délkou od 3 do 50 μm a na vzdálené infračervené (Far-Infrared) se zkratkou FIR a vlnovou délkou 50 - 1000 μm .

Blízké infračervené záření (NIR)	770 nm - 1,5 μm
Střední infračervené záření (MWIR)	1,5 - 6,0 μm
Vzdálené infračervené záření (LWIR)	6,0 - 40,0 μm
Velmi vzdálené infračervené záření	40,0 - 1000 μm

Tabulka 2.1: Tabulka rozdělení infračerveného pásma [4]

Z pohledu snímání a senzorů pro kamery jsou důležitá pásma rozdělující spektrum detailněji na blízké infračervené záření (Near Infrared - NIR), střední infračervené záření (Mid-wave Infrared - MWIR) a vzdálené infračervené záření (Long-wave infrared - LWIR). Pro snímání infračerveného světla je dále důležité pásmo střední (vlnová délka 3 - 5 μm) a vzdálené (8 - 12 μm), jelikož atmosféra v této oblasti má nižší útlum. [4]

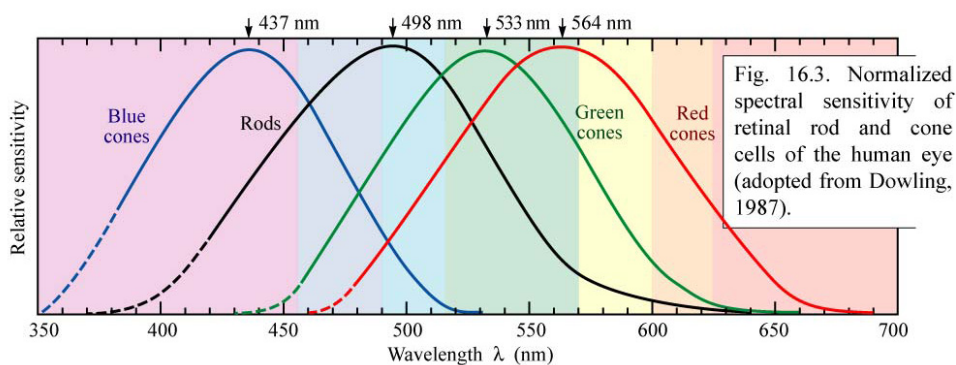
Při pohledu do specifikací jednotlivých kamer se velmi často používá také pojem Short-wave infrared se zkratkou SWIR. Toto pásmo se nachází mezi blízkým a středním infračerveným zářením a obvykle je na vlnové délce od 0,9 do 1,7 μm nebo se definuje od 0,7 do 2,5 μm . [5]

2.3 Zrakový systém člověka

Pro zaznamenání obrazové informace bylo nutné porozumět, jak vidí člověk a jak funguje jeho vizuální vjem. Zrakový systém (v angličtině známý pod pojmem Human Visual System - HVS) se skládá z více orgánů - lidského oka, zrakových nervů a části zpracování v mozku. Zrakové ústrojí lze dále rozdělit na část oddělující ho od vnějšího prostoru, vlastní fotoreceptory a centrální oddíl sensorického systému. Mezi první zmíněnou část patří rohovka, čočka, komorová voda a sklivce. Fotoreceptory jsou tyčinky a čípky. Poslední část zahrnuje výstupy z receptorů, zrakové nervy a příslušná oblast v mozku.

Oko by se dalo také rozdělit na část optickou, kam patří rohovka, čočka a sklivce a část nervovou. Nervovou část tvoří především sítnice, na niž dopadá převrácený a zmenšený obraz. Sítnice je tvořena mnoha nervovými buňkami, z nichž pro naši práci jsou nejdůležitější dva druhy receptorů citlivé na světlo. Těmito fotoreceptory jsou tyčinky a čípky. Tyčinky zajišťují převážně noční skotopické vidění, zatímco čípky se používají při denním fotonickém vidění.[6]

Sítnice obsahuje celkem asi 7 milionů čípků, které se primárně nacházejí v oblasti žluté skvrny ke středu sítnice a zhruba 130 milionů tyčinek soustředěných ke kraji sítnice. Tyčinky také z tohoto důvodu zajišťují periferní vidění a poskytují především jasovou informaci. Čípky jsou tří druhů - citlivé buď na modrou, červenou nebo zelenou barvu. Právě díky čípkům rozezná člověk barvy. Sítnice by se dala nazvat jako ekvivalent senzoru u fotoaparátů.



Obrázek 2.3: Citlivost lidského oka [7]

Lidské oko je citlivé v oblasti elektromagnetického spektra pouze na viditelné světlo, tj. vlnovou délku od 380 do 770 nm. Při fotonickém vidění je oko nejcitlivější oko na vlnovou délku 555 nm, tedy žluto-zelenou barvu. Citlivost při skotopickém vidění nabývá svého maxima na vlnové délce 507 nm (modro-zelená). [4, 8] Odezvu jednotlivých čípků a tyčinek na vlnovou délku popisuje obrázek 2.3.

2.4 Prostorové snímání

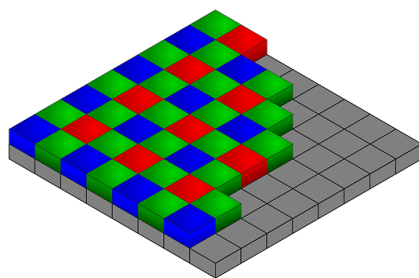
Při záznamu obrazové informace se využívá fotoelektrický jev. Po dopadu částic světla (fotonů), které přesahují energii zakázaného pásma E_g , mění elektrony svůj stav na excitovaný.

Intenzita tohoto napětí odpovídá intenzitě dopadajícího světla. Při standardním prostorovém snímání se obraz zachycuje jako matice x a y obrazových bodů. Každý tento obrazový bod (pixel) obsahuje informaci o intenzitě snímaného světla. Základní snímání je ve výsledku monochromatické, neobsahuje tedy žádná data o snímaných barvách. Z hlediska spektrální informace je zde v podstatě jen jedno pásmo.

2.4.1 Barevné snímání

Pro barevné snímání se dnes nejčastěji používá Bayerova maska. Tento barevný filtr je čtvercová matice, která obsahuje tři různé filtry. Skládá se z filtru na modrou, zelenou a červenou barvu. Díky tomu projde na jeden obrazový bod vždy pouze světlo vlnové délky odpovídající snímané barvě. Červený filtr propustí světlo na délce kolem 700 nm, zelený kolem 500 nm a modrý kolem 450 nm. Bayerova maska přímo vychází z citlivosti lidského oka na barvy. Jelikož je lidské oko nejcitlivější na zelenou barvu, má Bayerova maska dvakrát více zelených filtrů než červených nebo modrých. Celkově tak 50 procent plochy zabírá zelený filtr, 25 procent červený a 25 procent modrý. Výsledná barva jednoho obrazového bodu se posléze zjistí interpolací.

Při barevném snímání získáme obrázek, který má tři barevné složky, což by se dalo interpretovat jako tři spektrální pásma. Podrobnější informace o elektromagnetickém spektru, jako je například jeho průběh, ale ze snímku nevyčteme.



Obrázek 2.4: Bayerova maska [9]

Alternativa k Bayerové masce je snímač Foveon. Struktura jednoho obrazového bodu se v tomto případě skládá ze tří vrstev, kdy každá vrstva je schopna zachytit světlo jiné vlnové délky. Barvy delší vlnové délky dopadnou

hlouběji na červenou, kratší vlnové délky na prostřední zelenou a nejkratší na modrou.

■ 2.5 Spektroskopie

Spektroskopie je věda zabývající se interakcí světla a určité hmoty. Spektroskopie ve výsledku zobrazí graf elektromagnetického záření v závislosti na frekvenci nebo vlnové délce. Díky tomu pak vidíme spektrum daného objektu nebo hmoty. Spektroskopie našla využití prakticky ve všech oblastech vědy. Například ve zdravotnictví slouží k zobrazení magnetické rezonance. Další využití se najde ke zjištění chemického složení hmoty a fyzické struktury, toto odvětví se nazývá optická spektroskopie.

Zkoumaná hmota může záření buď pohltit nebo absorbovat. Na základě toho získáme spektrum dané látky.[10] Při spektrometrii získáme spektrum určité hmoty v jednom bodě, které ale nemá žádnou další informaci o obrazu. Chybí nám tedy prostorová informace.

■ 2.5.1 Refrakce

Refrakce vzniká při přechodu paprsku světla z jednoho prostředí s indexem lomu n_1 do jiného s indexem lomu n_2 , například ze vzduchu do vody. Paprsek světla se zalomí na tomto rozhraní dvou prostředí, přičemž úhel refrakce určuje Snellův zákon známý také jako zákon lomu (rovnice 2.5). Index lomu je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu ku rychlosti světla v daném médiu. Úhel α_1 , pod kterým paprsek dopadá na rozhraní dvou prostředí, se nazývá úhel dopadu. Úhel α_2 , pod kterým je paprsek odražen v druhém prostředí, je označen jako úhel lomu. Při dopadu světla může být část paprsku odražena zpět a část pohlcena druhým prostředím. Pro vakuum je index lomu roven jedna.

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2.5)$$

Refrakce se využívá například při rozkladu světla pomocí hranolu, kde je bílé světlo rozloženo na jeho spektrum. Hranol se běžně nachází v některých typech spektrometrů pro rozklad světla. [11]

■ 2.5.2 Difrakce

Při difrakci dochází k ohybu světelného paprsku na ostré hraně nebo při průchodu štěrbinou díky čemuž se přímočaré záření zakříví. Po ohybu se tak paprsky světla mohou šířit také do oblasti stínu překážky a stín nebude ostrý. Po dopadu na štěrbinu se podle Huygensova principu rovinná přímočará vlna chová jako zdroj nové sekundární kulové vlny. Tento jev je obvykle patrný pouze při splnění podmínky, kdy velikost překážky nebo štěrbinu je řádově stejná jako vlnová délka. Viditelné světlo se tak běžně neohýbá přes velké předměty, jelikož má vlnovou délku ve stovkách nanometrech.[12, 13]

Kapitola 3

Princip hyperspektrálního snímání

3.1 Multispektrální snímání

Před definicí pojmu hyperspektrální snímání je potřeba uvést pojem multispektrální snímání. Multispektrální snímání obsahuje několik nespojitých spektrálních pásem detekovaných na různých vlnových délkách. Těch je většinou od 3 do 7 a jejich šířka se pohybuje od 50 do 120 nanometrů. [14] Většina multispektrálních systémů dokáže snímat od viditelného spektra až po infračervené. Nízký počet spektrálních pásem je nicméně limitující faktor, nelze totiž vytvořit spojitě spektrum bez mezer, a tudíž nelze použít přiřazení materiálu na základě jeho spektra. Pro satelitní snímání prostředí a planety země se nicméně multispektrální snímání používá již od konce 60. let minulého století. [15]

3.2 Hyperspektrální snímání

Při hyperspektrálním snímání je na rozdíl od multispektrálního zachyceno mnohem více spektrálních pásem, většinou se uvádí více než deset. Pásem je obvykle násobně více, mnohdy jich jsou stovky až tisíce, záleží na parametrech daného hyperspektrálního systému. Šířka pásma se pohybuje od 1 do 15 nanometrů. Jednotlivá pásma jsou přilehlá a tvoří tak souvislé spektrum. [14]

Hyperspektrální snímek disponuje jak prostorovou, tak spektrální informací. Prostorové rozlišení je charakterizováno obrazovými body (pixely), zatímco spektrální rozlišení definuje za každým pixelem funkci vlnové délky (spektrum). Hyperspektrální obrázek je tedy tvořen dvěma prostorovými souřadnicemi x , y a jednou spektrální s označením z . Spektrum jednoho obrazového bodu obsahuje mnohem více informace než při běžném obrazovém snímání. Tato informace pak může sloužit například k identifikaci materiálu, který se na daném obrazovém bodě nachází. [15]

Při pohledu na tabulku (3.1) vidíme porovnání jednotlivých způsobů snímání. Při monochromatickém snímání získáme pouze černobílý snímek zcela bez spektrální informace. Při obrazovém snímání RGB dostaneme barevnou

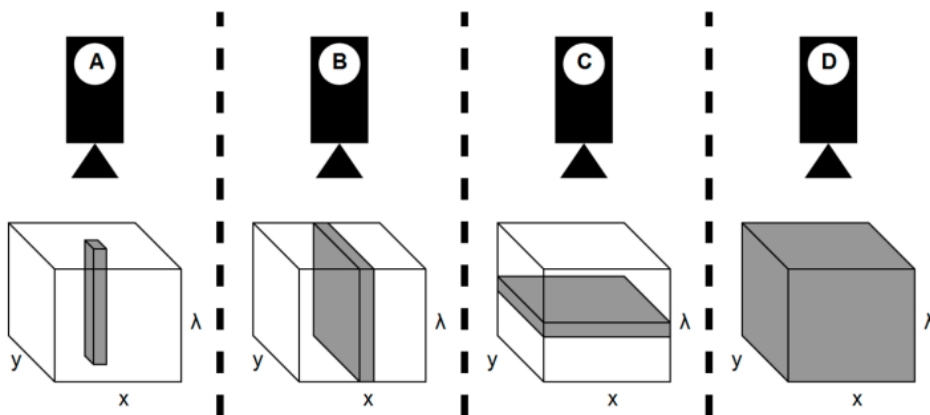
fotku, která má sice tři barvy, ale nezískáme žádnou spektrální informaci pro další použití. Spektrometrem získáme pouze výsledné spektrum snímaného materiálu, které může mít desítky až stovky pásem. Chybí nám ale prostorová informace, máme tak v podstatě snímek pouze jednoho obrazového bodu. Multispektrální snímání již poskytne v omezené podobě spektrální informaci, ale kvůli nízkému počtu pásem nenabídne podrobné spektrum k využití například k identifikaci materiálu. Hyperspektrální snímání poskytne kombinaci podrobného spektra, prostorové informace a počet pásem se pohybuje od desítek do stovek.

	Černobílé	RGB	Spektroskopie	Multi-spektrální	Hyper-spektrální
Prostorová informace	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano
Spektrální informace	Ne	Ne	Ano	Omezená	Ano
Počet spektrálních pásem	1	2	desítky až stovky	3-10	desítky až stovky

Tabulka 3.1: Porovnání snímání [16]

3.3 Metody snímání

Na základě metody můžeme hyperspektrální snímání rozdělit do čtyř hlavních kategorií. *Whiskbroom*, neboli bodové snímání, pořizuje postupně celý snímek bod po bodu pohybem kamery ve směru x a y . Metoda *pushbroom* neboli liniové snímání postupně snímá celý řádek prostorové informace spolu s odpovídající spektrem každého obrazového bodu. Předposlední metoda *plane scanning*, známá také jako *staring*, zaznamená najednou prostorovou informaci, ale zase postupně snímá spektrum. Poslední metoda s názvem *snapshot* pořídí najednou v jeden okamžik celý snímek s kompletní prostorovou a spektrální informací. [17]



Obrázek 3.1: Porovnání metod hyperspektrálního snímání, (A) - Whiskbroom, (B) - Pushbroom, (C) - Plane Scanning, (D) - Snapshot [17]

3.3.1 Whiskbroom

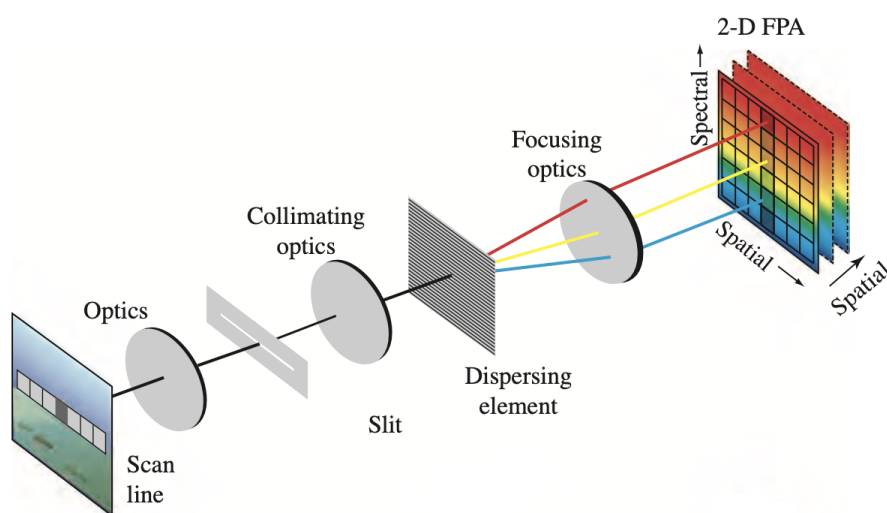
Metoda snímání whiskbroom je známá jako bodové snímání. Byla to první metoda, která se původně používala při hyperspektrálním snímání Země ze satelitů. Touto metodou se zaznamenává vždy jeden obrazový bod (pixel) a jeho spektrální informace. Pro získání celého snímku, tedy prostorové informace (souřadnice x a y), je třeba postupně pohybovat buď kamerou anebo vzorkem. Nad každým obrazovým bodem se světlo rozloží pomocí hranolu, čímž je získána jeho spektrální informace λ . Ta je následně zachycena na „linear array detector“, neboli lineární senzor s jedním řádkem. Snímání metodou whiskbroom je časově náročnější, jelikož je třeba pohybovat se v obou osách (x a y). [16]

Například systém Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) snímá Zemi metodou whiskbroom, konkrétně na vlnové délce od 400 do 2500 nm. Snímací systém je umístěn na různých letadlech, které se pohybují ve výšce od 2 do 20 km nad povrchem země. [18]

3.3.2 Pushbroom

Metoda pushbroom nebo také řádkové/liniové skenování umožňuje oproti metodě whiskbroom snímat v jeden moment celý řádek obrazových bodů a jejich spektrální informaci λ . Při snímání je nejprve scéna rozdělena štěrbinou na jeden řádek. Obraz je posléze rozložen pomocí disperzního prvku tak, aby na jedné ose senzoru byla obrazová informace (souřadnice y) a na druhé potom spektrální informace λ . Stále je nutné, aby se při snímání pohybovala buď kamera nebo vzorek. Pohyb je nutné synchronizovat s frekvencí snímání jednoho řádku, aby nedošlo ke zkreslení. Pushbroom systém dokáže zaznamenat více světla ve srovnání s whiskbroom systémy, protože může na dané oblasti zůstat déle a zajistit tak delší expozici a vyšší spektrální rozlišení. [16]

Charakteristikou této metody je kompaktní velikost systému, nízká hmotnost, jednodušší ovládání a vyšší poměr signálu k šumu. [17]



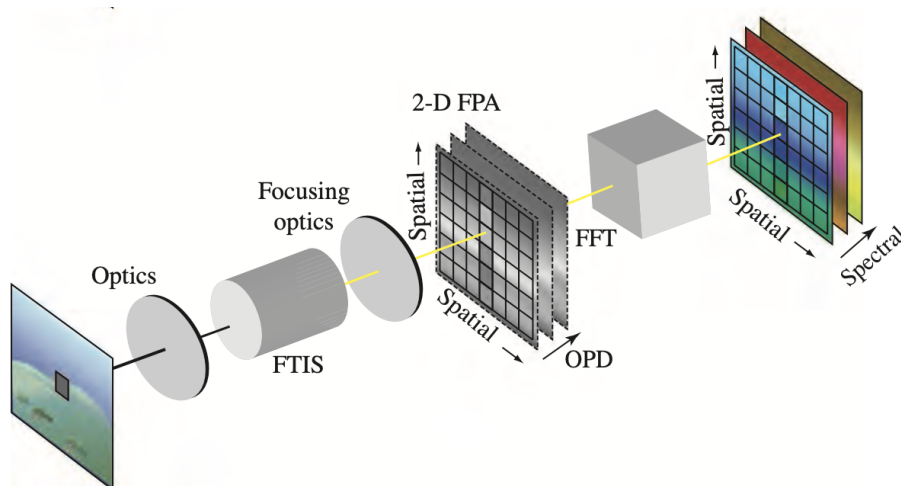
Obrázek 3.2: Ilustrace systému při použití pushbroom metody [1]

Obrázek 3.2 ilustruje součásti systému používající metodu snímání pushbroom. Při snímání nejprve záření projde optickým elementem, kde pak dorazí na štěrbinu. Ta zajistí snímání pouze jednoho řádku a určení okamžitého zorného pole (IFOV). Poté záření prochází dalším optickým elementem (čočkou nebo zrcadlem) na disperzní prvek, který záření rozloží v jedné ose na spektrum. Disperzním prvkem může být hranol, mřížka nebo prvek tzv. hranol-mřížka-hranol (v angličtině prism-grating-prism, zkratkou PGP). Dále před dopadem na 2D senzor prochází záření další optickou částí s účelem zaostření. To může být typicky čočka nebo zrcadlo. Zaostřené záření je v tuto chvíli zaznamenáno 2D senzorem nejčastěji typu CCD nebo CMOS. [19]

3.3.3 Staring

Metoda staring, též označovaná jako plane scanning, pořizuje v jeden okamžik celý černobílý 2D snímek se souřadnicemi x a y spolu se spektrální informací na jedné vlnové délce. Tato metoda používá různé elektricky laditelné filtry pro rozklad světla nebo interferometry. Mezi používané laditelné filtry patří akusto-optický laditelný filtr (AOTF), laditelný filtr s tekutými krystaly (LCTF), kruhové a lineární proměnné filtry (CVF a LVF) a další. Nepoužívá se zde hranol nebo mřížka jako u předchozích dvou metod. Světlo nejprve prochází skrz optickou část. Poté je provedena filtrace, díky čemuž dopadne na výsledný senzor jen jedna vlnová délka. Celý hyperspektrální snímek je pak pořízen postupným měněním propustné vlnové délky neboli měněním filtrů.

Výhodou této metody je fakt, že výběr vlnové délky je zcela na uživateli a lze ji měnit. Plusem je také krátký čas, za který lze jeden hyperspektrální snímek pořídit. Při použití staring metody také odpadá nutnost pohybovat s kamerou či snímaným objektem. Nevýhodou jsou vyšší náklady na pořízení ve srovnání se systémy snímající metodou whiskbroom nebo pushbroom a obvykle nižší spektrální rozlišení. [16]



Obrázek 3.3: Ilustrace systému při použití staring metody [1]

Pro použití této metody především v aplikacích dálkového průzkumu povrchu země lze jako filtr využít Michelsonův interferometr neboli zobrazovací spektrometr s Fourierovou transformací (Fourier Transform Imaging Spectrometer, zkratkou FTIS), jehož konstrukce je ilustrována na obrázku 3.3. [1]

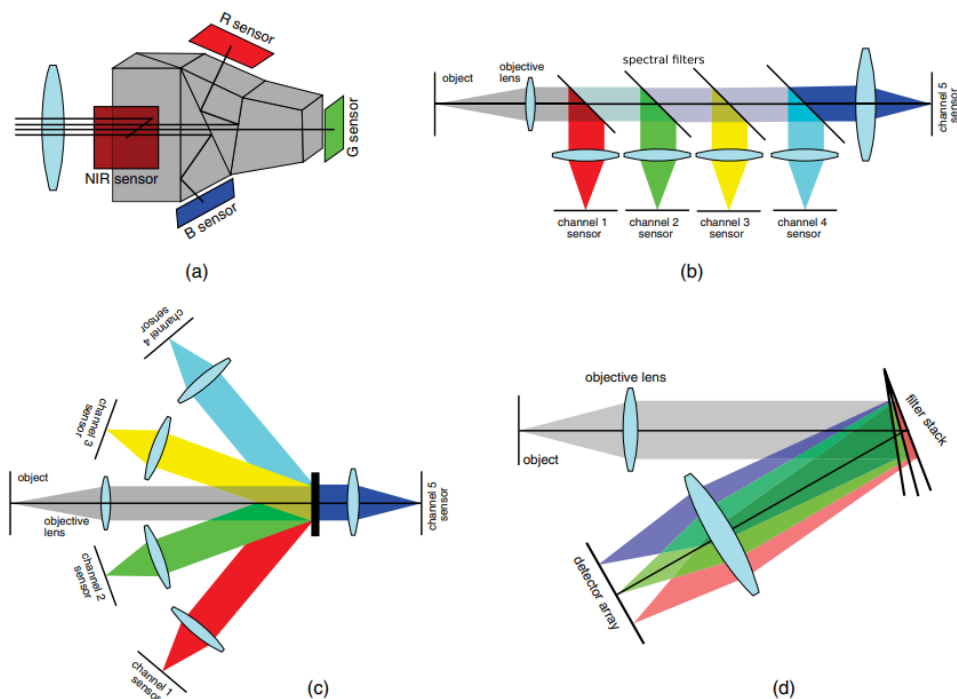
3.3.4 Snapshot

Snapshot metoda dokáže zaznamenat v jeden okamžik kompletní hyperspektrální snímek, který obsahuje jak celou prostorovou, tak spektrální informaci. Není zde třeba provádět žádné postupné skenování, odpadá tedy potřeba

obraz bez zkreslení. Další typem filtrů jsou také interferometry jako například Sagnacův, Michelsonův nebo Fabry-Perotův. [23]

3.4.3 Single shot imagers

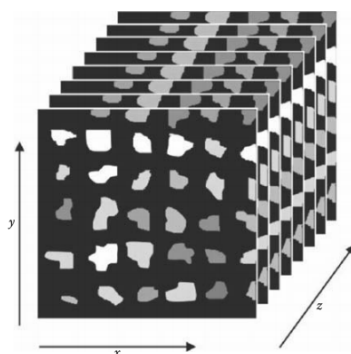
Pro rozklad světla a infračerveného záření u snapshot systémů lze použít multispektrální rozdělovač paprsků, který je však limitovaný počtem spektrálních kanálů. Většina těchto systémů s rozkladem pomocí čoček či hranolu tak dělí světlo na maximálně čtyři kanály. Ilustraci lze vidět na obrázku 3.4. Dále se používají různá pole zrcadel nebo pole mikročoček při snímání u snapshot systémů. [21]



Obrázek 3.4: Schéma čtyř různých snapshot multispektrálních rozdělovačů paprsků (a) monolitický rozdělovač paprsků, (b) sekvence spektrálních filtrů, (c) hologramický optický rozdělovač, (d) rozdělení pomocí naklonění spektrálních filtrů [21]

3.5 Hyperspektrální kostka

Po akvizici hyperspektrálních dat je vytvořena tzv. hyperspektrální kostka (v angličtině hyperspectral cube nebo také hypercube, občas se vyskytuje jen pojem data cube), což je třídímní objekt obsahující prostorovou informaci v souřadnicích x a y a spektrální informaci z . Jedná se o produkt hyperspektrální kamery, obdobu 2D fotografie při pořízení z klasického fotoaparátu. Z hyperspektrální kostky lze extrahovat jednotlivá spektra, tvořit spektrální mapy nebo pracovat dále s celou kostkou. Spektrální odezvu lze pak mapovat barvami na intenzitu různých vlnových délek. [14, 24]

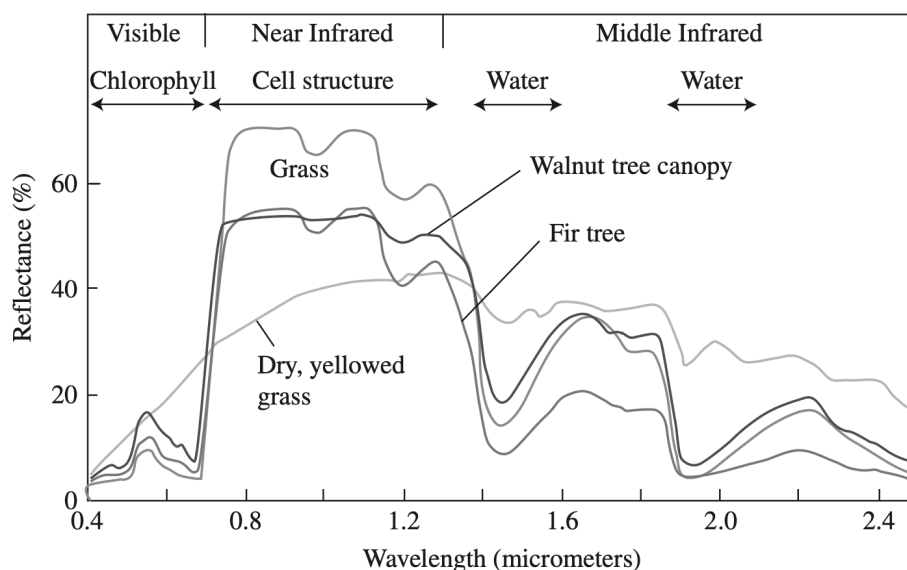


Obrázek 3.5: Hyperspektrální kostka [14]

3.6 Reflektance

Při hyperspektrálním snímání je důležitý pojem spektrální reflektance (neboli spektrální odrazivost). To je poměr odražené energie ku dopadající energii. Reflektance je různá v závislosti na vlnové délce. Na některých vlnových délkách tak může nabývat nižší hodnoty, energie je tam buď absorbována nebo rozptýlena. Tyto části se v grafu často nazývají jako absorpční pásma. Reflektance se často uvádí bez jednotky v rozmezí od nuly do jedné nebo v procentech odraženého záření. Tvar křivky spektrální reflektance v závislosti na vlnové délce určitého materiálu bývá označován jako spektrální podpis a podle něj můžeme v mnoha případech identifikovat snímáný materiál. Při dálkovém průzkumu Země lze odlišit vegetaci, vodní plochy, vlhkou nebo suchou půdu a podobně. Aplikovat lze však použití tvaru a velikosti spektra také v mnoha dalších oblastech, čímž se zabývá kapitola 6. [25]

Pro změření a získání korektní reflektance je nutné kompenzovat v případě snímání Země atmosférické vlivy (rozptyl) a záření slunce. Ty mohou ovlivnit výsledný graf reflektance v závislosti na vlnové délce a znemožnit identifikaci materiálu. Je nutné také provádět kalibraci snímací sestavy. [14]



Obrázek 3.6: Příklad spektrální reflektance na suché a zelené vegetaci [1]

Obrázek 3.6 ukazuje příklad spektrální křivky zelené trávy, suché trávy, korunu stromu ořešáku vlašského a jedle. Na vlnové délce od 400 do zhruba 2400 nm lze pozorovat odlišné křivky. Na vrchu grafu lze vidět, co v dané části spektra ovlivňuje tvar křivky. V pásmu viditelného světla je to chlorofyl, dále v pásmu infračerveného záření je to buněčná struktura a pak na vyšších vlnových délkách voda. [1]

3.7 Spektrální podpis

Spektrum materiálu se označuje také jako jeho spektrální podpis. Čistý spektrální podpis bez jakýchkoliv vnějších vlivů se nazývá jako tzv. endmember (koncový člen) nebo referenční spektrum. Tento endmember lze získat změřením v laboratoři pomocí spektrometru. Posléze se koncový člen využije při analýze hyperspektrálních snímků k identifikaci materiálu pomocí nejruznějších algoritmů. Detekční algoritmus posléze dokáže najít v nasnímaném spektru právě zmíněné endmembers. [25]

Při snímání jednoho bodu na zemi získáme spektrální reflektanci, která se může skládat z více materiálů. V tomto případě hovoříme o tzv. kompozitním nebo složeném spektru. Takový mix spektra můžeme rozdělit dále do dvou kategorií na makroskopické (lineární) a nelineární. První skupina umožňuje jednoduše rozdělit například dva materiály a identifikovat je pomocí křivky referenčního spektra (endmemberu). Výsledné spektrum dvou materiálů je totiž jen součet těchto endmemberů. V případě nelineárního mixu spektra je situace mnohem složitější, jelikož materiál není možné jednoznačně identifikovat. Může se totiž jednat například o mikroskopickou směs minerálů. [14, 24]

Kapitola 4

Parametry kamery

V této kapitole budou popsány klíčové parametry hyperspektrálních kamer a systémů mezi které patří spektrální rozsah, spektrální rozlišení, vzorkování, prostorové rozlišení, časové rozlišení, počet snímků za sekundu, optické parametry, velikost štěrbin, zorné pole, okamžité zorné pole, typ senzoru, provozní teplota, vstupy/výstupy a další. Důležitá je také konstrukce samotné kamery.

4.1 Prostorové rozlišení

Prostorové rozlišení u fotoaparátů je standardně definováno jako nejvyšší prostorová frekvence, kterou dokáže sestava zaznamenat bez jakéhokoliv zkreslení nebo jako nejmenší rozpoznatelná prostorová frekvence. [14] Lze ji zjistit pomocí testovacích obrazců (například ISO 12233), kdy se prostorová frekvence zvyšuje. V určitý moment se začne projevovat zkreslení, což znamená limit tohoto prostorového rozlišení.

Jaké prostorové rozlišení dokáže kamera zaznamenat souvisí s počtem obrazových bodů v matici x a y a na jejich velikosti. V případě hyperspektrálních systémů typu pushbroom se v jeden okamžik zaznamenává pouze jeden řádek, proto se udává pouze šířka jednoho řádku x v obrazových bodech.

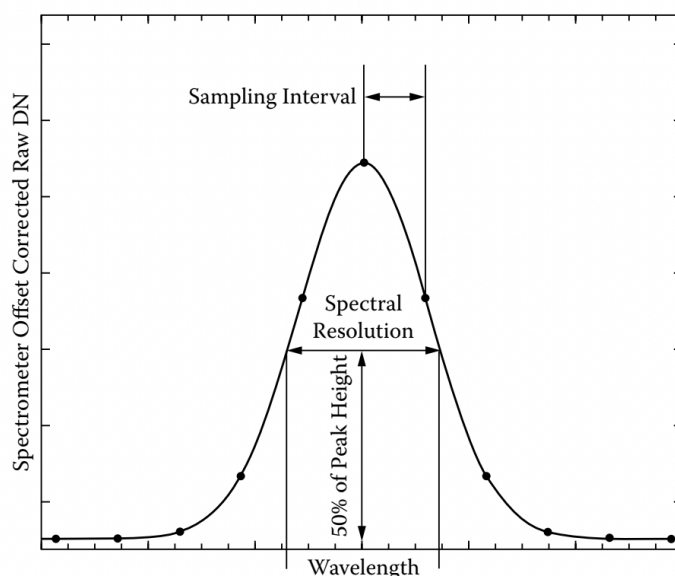
4.2 Spektrální rozsah

Spektrální rozsah lze definovat jako interval vlnové délky, na kterém daná sestava dokáže zachytit elektromagnetické záření. Citlivost na záření přímo souvisí se samotným senzorem kamery a jeho materiálu, které se věnuje sekce 4.7. Pohybuje se dle systému u hyperspektrálních kamer od zhruba 300 až do 25 000 nm . Žádná kamera nenabídne takto velký souvislý spektrální rozsah pomocí jednoho senzoru. Proto se v takovém případě využívá kombinace více senzorů v jednom hyperspektrálním systému jako je například kamera na obrázku 5.1.

4.3 Spektrální rozlišení a šířka pásma

Obecně můžeme u spektrálního rozlišení hovořit jako o nejvyšší spektrální frekvenci, kterou dokáže sestava bez zkreslení zachytit. Spektrální rozlišení tedy charakterizuje, jak detailně lze zachytit elektromagnetické záření snímaného objektu. Pokud bude mít systém s určitým spektrálním rozsahem užší spektrální šířku každého pásma (a tudíž více pásem) než jiný systém se stejným rozsahem, lze hovořit o tom, že má vyšší spektrální rozlišení. [27, 28]

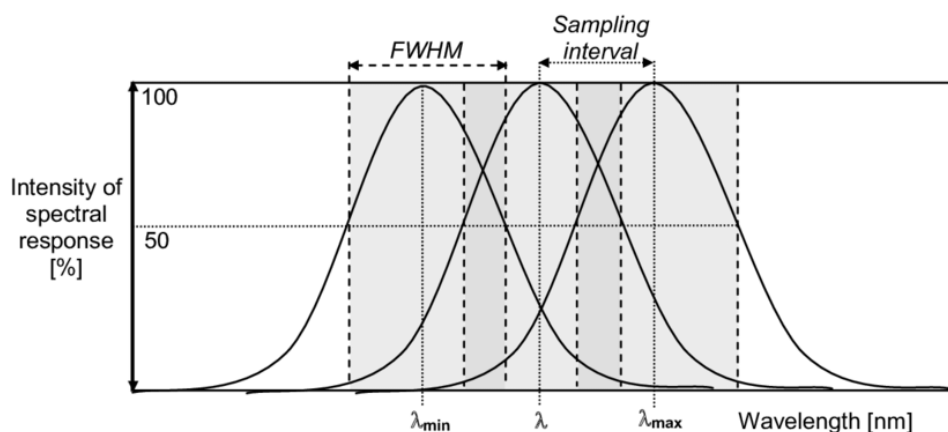
Důležitým parametrem při definování spektrálního rozlišení je Full width at half maximum (FWHM), tedy plná šířka v polovině maxima výšky (pološířka maxima). Odezva jednoho snímaného pásma má v realitě přibližně tvar Gaussovy křivky. Do šířky pásma definované pomocí FWHM se započítá interval, ve kterém je křivka na více než 50 procentech maxima. Spektrální rozlišení je pak určeno parametrem pološířky maxima. Obrázek 4.1 ilustruje tento parametr. Aby bylo možné detekovat spektrální odezvu, musí být větší, než je parametr FWHM systému. [14]



Obrázek 4.1: Full width at half maximum (FWHM) - pološířka maxima [14]

Šířka pásma se podle [14] pohybuje u hyperspektrálních kamer obvykle od 1 do 15 nanometrů. Celkově mají kamery většinou desítky až stovky pásem.

Spektrální vzorkování určuje rozestup mezi jednotlivými vrcholy snímaných vlnových délek. To nejlépe popisuje obrázek 4.2, který porovnává parametr FWHM definovaný výše právě se spektrálním vzorkováním (na obrázku Sampling interval).



Obrázek 4.2: Full width at half maximum (FWHM) vs. spektrální vzorkování [29]

4.4 Optická část

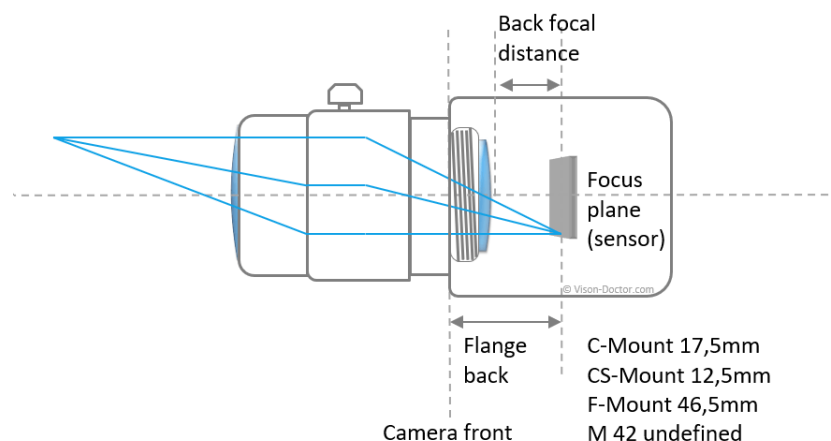
Optická část u hyperspektrálních kamer se příliš neliší od klasických fotoaparátů. Vždy máme před senzorem objektiv s určitou ohniskovou vzdáleností. Každý objektiv přímo určuje parametr zorné pole.

Ohnisková vzdálenost f je vzdálenost od středu čočky k ohnisku. Právě v ohnisku se sejdou všechny paprsky světla procházející objektivem. Udává se v milimetrech a ve většině případů přepočítaný k velikosti obrazového formátu Full Frame (36 x 24 mm), který je stejně velký jako jedno políčko kinofilmu. Předmětová ohnisková rovina se nachází před objektivem kamery směrem ke snímanému objektu a body z ní se zobrazí do nekonečna. Obrazová ohnisková rovina je za objektivem směrem k senzoru, a naopak body z nekonečna se zobrazí do této roviny. Rozlišujeme také předmětové a obrazové ohnisko.

Ohnisková vzdálenost 50 mm odpovídá zhruba záběru lidského oka. Objektivy s nižší hodnotou jsou považovány za širokoúhlé. Vyšší ohnisková vzdálenost znamená menší záběr scény, tedy menší zorné pole. Zpravidla se označují objektivy s ohniskem nad 50 mm jako teleobjektivy. Při pohledu do nabídky objektivů od velkých výrobců hyperspektrálních kamer, tak například firma Resonon a Specim nabízí ve svém katalogu možnost ohniskové vzdálenosti od 9 mm až do 140 mm. [30, 31, 32]

Clonové číslo vyjadřuje poměr f/D , kde D je průměr objektivu a f ohnisková vzdálenost. Průměr D je možné snížit mechanickou clonou v objektivu. Nižší clonové číslo znamená menší hloubku ostrosti. Obvykle se clonové číslo pohybuje od $f/1.4$ do $f/8$. Nejnižší možná hodnota tohoto čísla se označuje jako světelnost objektivu.

Optika objektivu může mít řadu vad mezi které patří chromatické a monochromatické vady. Monochromatickými vady jsou sférická vada, koma,



Obrázek 4.3: Flange back distance [33]

astigmatismus, zklenutí pole a zkreslení (soudkovité nebo poduškovité). Jako vada se uvádí také vinětace, kterou lze stejně jako chromatickou vadu nebo zkreslení opravit softwarově při zpracování.

U hyperspektrálních kamer se nejčastěji využívají objektivy s bajonetem typu C-mount, CS-mount, F-mount nebo používají výrobci své proprietární řešení. Bajonet C je definován ve standardu ISO 10935, kde jsou přesně určené rozměry a poloha obrazové roviny. Poslední verze standardu je z roku 2009 a hovoří o určení pro mikroskopy. Průměr objektivu je stanoven standardně na 1 palec neboli 25,4 mm. C-mount má vzdálenost od senzoru k závitu (přírubě) z vnější strany kamery (tzv. flange back distance) určenou na 17,5 mm. Občas se využívá bajonet CS-mount, který má tuto vzdálenost 12,5 mm a není tak kompatibilní s C-mount. Adaptér C-CS-mount umožňuje použít objektivy určené pro C-mount i na CS-mount bajonetu. Bajonet F je standard od Nikonu s flange back distance stanovenou na 46,5 mm. [34, 33]

4.5 Zorné pole

Zorné pole (neboli anglicky Field of view, zkratka FOV) definuje jaké fotony se po průchodu optickou částí promítnou na obrazový senzor. Zjednodušeně řečeno tak definuje, jaké objekty snímané scény ještě budou zachyceny a jaké se už nezaznamenají. [14] Podle [28] lze úhel zorného pole β definovat pomocí vzorce 4.1, kde r_d je poloměr senzoru (detektoru) a f je ohnisková vzdálenost.

$$\beta = \arctan \frac{r_d}{f} \quad (4.1)$$

Často se také uvádí pojem Instantaneous Field of View (IFOV), který určuje záběr fotonů vzhledem k jednomu obrazovému bodu na senzoru. V

oboru snímání země znamená IFOV právě snímanou část povrchu planety. [14]

4.6 Frame rate

Frame rate neboli snímkovou frekvenci je nutné nastavit tak, aby výsledný obrazový bod byl čtvercový a nedocházelo ke zkreslení. Tento parametr je důležitý především u systémů, kde probíhá snímání metodou pushbroom, jelikož zde dochází k pohybu vzorku nebo kamery při snímání. Snímkovou frekvenci můžeme při lineárním skenování spočítat jako podíl rychlosti pohybu snímaného objektu (většinou v praxi pohyblivého stolku) ku prostorovému rozlišení. Často se v této souvislosti uvádí také časové rozlišení, které určuje, jak dlouho trvá nasnímání jednoho snímku.

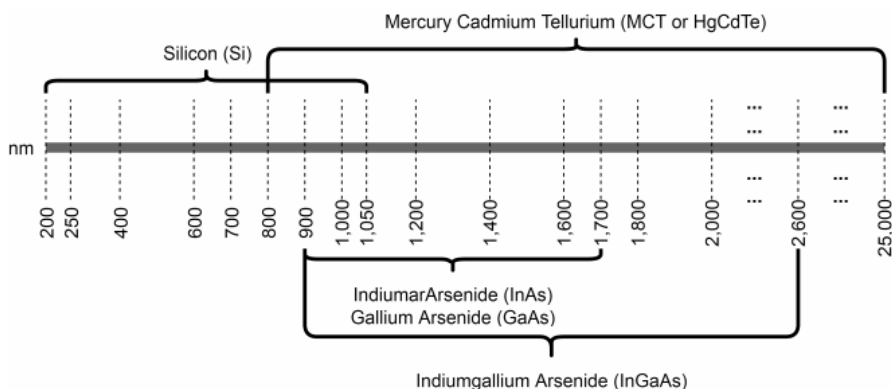
4.7 Senzor

Obrazový senzor dokáže zachytit příchozí elektromagnetické záření na různém spektrálním rozsahu od rentgenových paprsků až po infračervené záření. Vždy záleží na jeho struktuře a materiálu, který je citlivý na požadovanou vlnovou délku. Pro snímání běžných fotografií (viditelného světla) se využívá křemík, který dokáže zachytit světlo ve stejných vlnových délkách jako lidské oko a počátek infračerveného záření. [35]

Pro snímání se nejčastěji využívají dva typy senzoru a to Charge-Couple Device (CCD) a Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS). Pokud jsou senzory vyrobeny z křemíku, tak jsou citlivé na vlnové délky od 400 nm do 1000 nm, dokážou tedy kromě viditelného světla zaznamenat také část blízkého infračerveného záření. Mezní vlnovou délku materiálu λ_{min} , kde je ještě senzor schopný zachytit světlo, lze jednoduše vypočítat. Elektronů se díky vnějšímu fotoelektrickému jevu uvolňují mimo materiál při překonání určité energie E . Pokud tuto energii známe, můžeme za pomoci vzorce 2.2 zjistit frekvenci f , jelikož h je Planckova konstanta. Za frekvenci pak jednoduše dosadíme $f = c/\lambda_{min}$, kde c je rychlost světla. Vztah 4.2 popisuje finální upravený vzorec po vyjádření mezní vlnové délky. Nad ní již nebude senzor zaznamenávat jakékoliv záření.

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{E} \quad (4.2)$$

CCD snímač funguje jako posuvný registr, zjištěná intenzita světla v podobě elektrického náboje putuje postupně přes celý senzor do výstupního zesilovače, kde se hodnota přečte a zaznamená. CMOS senzor má na rozdíl od CCD pod každým obrazovým bodem vlastní zesilovač a hodnota elektrického náboje, respektive napětí je ze všech pixelů získána pomocí sběrnice.



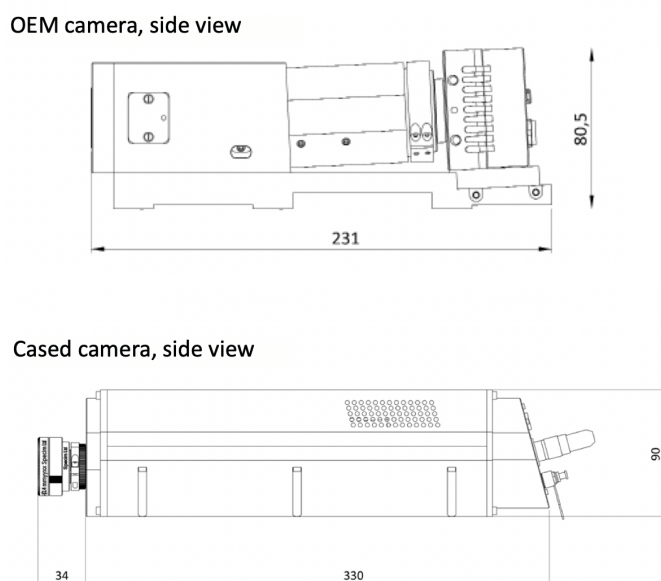
Obrázek 4.4: Použité materiály senzorů na vlnových délkách 200 - 25 000 nm [17]

Pro snímání infračerveného spektra v rozmezí 900 - 2500 nm se používají senzory z dražších materiálů jako je například Indium Gallium Arsenide (InGaAs) nebo Mercury Cadmium Telluride (MCT). [36] InGaAs senzory jsou vyrobené ze slitiny prvků Indium Arsenid (InAs) a Gallium Arsenid (GaAs) a typicky dokáží zaznamenat spektrum na vlnové délce 900 - 1700 nm. Existují ale i specifické případy InGaAs senzorů s citlivostí až do 2500 nm. MCT senzory jsou vyrobeny ze sloučeniny teluridu kadmennatého (CdTe) a teluridu rtuti (HgTe). Pokryjí jak celou vlnovou délku blízkého infračerveného spektra od zhruba 800 do 2500 nm, tak také střední infračervené záření až do délky 25 000 nm. Obrázek 4.4 ilustruje použité materiály na ose vlnové délky od 200 do 25 000 nm. [37, 17]

4.8 Konstrukční parametry

Mezi konstrukční parametry můžeme zařadit rozměry daného zařízení, jeho váhu, materiál, ze kterého je kamera vyrobena, odolnost (včetně případné certifikace) nebo způsob provedení. Odolnost pomocí certifikace IP popisuje stupeň krytí podle normy IEC 529:1989. První číslo za písmeny IP popisuje odolnost vůči vniknutí prachu a cizích předmětů a má stupnici 0 - 6, přičemž nejvyšší číslo značí úplnou odolnost. Druhé číslo značí odolnost proti vniknutí vody a má stupnici 0 - 9. Některé kamery jako například Cubert ULTRIS 20 nabízejí zvýšenou odolnost IP68 a je možné je používat pod vodou až do hloubky 5 metrů. [38] Některé firmy vyrábějí kamery ve dvojitým provedení jako například kamera Specim PFD4K-65-V10E. Ta nabízí konstrukci tzv. OEM (Original Equipment Manufacturer) a "Cased". Cased verze je určená pro koncové zákazníky, zatímco OEM je určena pro další výrobce jako součástka do pokročilejších systémů. Na obrázku 4.5 vidíme rozdíl této kamery mezi verzí OEM a Cased. [39]

Ke konstrukčním parametrům lze zařadit také chlazení. To může být buď pasivní nebo aktivní či kombinace obojího přístupu. Pasivní chlazení nemá



Obrázek 4.5: OEM vs Cased kamera Specim PFD4K-65-V10E [40]

žádnou pohyblivou část a spoléhá na odvod tepla pomocí různých materiálů s vysokou tepelnou vodivostí jako je například měď nebo hliník. Aktivní chlazení spoléhá na pohyblivou část jako je například ventilátor nebo může využívat například termoelektrické chlazení jako je třeba Peltierův článek.

4.9 SNR

SNR nebo Signal to Noise ratio (poměr signálu k šumu) definuje intenzitu přijímaného požadovaného signálu P_S ku šumu na pozadí P_N , což popisuje vztah 4.3, případně vztah 4.4 v decibelech. Šum na pozadí se skládá ze tří složek - šumu temného proudu (dark current), čtecího šumu (readout noise) a fotonového šumu (shot noise). Z těchto tří bývá nejvýraznější šum temného proudu. [41]

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (4.3)$$

$$SNR_{db} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) \quad (4.4)$$

Výrobci kamer udávají SNR rovnou v poměru například 600:1. U nejlepších hyperspektrálních kamer se tento parametr pohybuje na hodnotách 1900:1, jako například u kamery Photonfocus MV3-D320I-T01-40-G2 se SNR 1870:1. [42]

Jedním z dodatečných parametrů je podpora tzv. binningu, který zlepšuje poměr SNR. Při binningu se dva nebo více obrazových bodů spojí a ve výsledku se chovají jako jeden bod.

4.10 Rozhraní

Pro komunikaci a propojení se používá několik různých rozhraní - GigE Vision, FireWire, CameraLink, USB 2.0 nebo USB 3.0 a výjimečné i jiné.

GigE Vision je rozhraní pro přenos videa a ovládání kamer za kterým stojí aliance Automated Imaging Association (AIA). Standard GigE Vision vychází z UDP/IP modelu a používá standardní ethernetové kabely kategorie CAT5e nebo rychlejší CAT6 včetně samotných koncovek s RJ-45 konektorem. Kvůli tomu dle výrobce umožňuje rychlý přenos dat 125 MB/s a zároveň jsou náklady na kabely velmi nízké. Přenos je možný až na vzdálenost 100 metrů. Pro použití standardu GigE Vision je nutné mít jeho licenci. Toto rozhraní má celkem čtyři hlavní prvky. Prvním je GigE Vision Control Protocol (GVCP), který běží na UDP IPv4 a jedná se o řídicí protokol. GigE Vision Stream Protocol (GVSP) popisuje přenos samotných dat, GigE Device Discovery Mechanism definuje přiřazování IP adres kamerám a dalším zařízením, a nakonec XML soubor s popisem služícím pro povolení přístupu ke kameře. [43]

CameraLink je sériové rozhraní využívající signalizaci diferenciálními páry na nízkém napětí (LVDS) s maximálním datovým tokem 850 MB/s, které je spravováno také aliancí AIA. Toto rozhraní nabízí celkem čtyři možnosti implementace - *Base*, *Medium*, *Full* a *Full deca* lišící se datovým tokem. Standard CameraLink používá pro zapojení 26pinový Miniature Delta Ribbon (MDR) konektor, přičemž v novějším standardu od roku 2006 je možné využít také zmenšený SDR konektor. Data se přenáší v základní konfiguraci *Base* disponující jedním Camera Link čipem přes 4 kanály LVDS a časování se přenáší přes pátý LVDS pár. Ve výsledku je tak možné přenést čtyřikrát 7 bitů, tedy 28 bitů dat za jeden cyklus. V případě dalších variant se navyšuje počet čipů a tím pádem i párů pro zvýšení datové propustnosti. Funkce Power over CameraLink (PoCL) umožňuje méně energeticky náročné kamery napájet přes toto rozhraní. [44, 45]

USB (Universal Serial Bus) je sériová sběrnice, která má do verze 2.0 čtyři vodiče, přičemž dva z nich jsou datové. Třetí slouží pro napájení a čtvrtý je země. Novější USB 3 má 9 vodičů se zachováním původních čtyř pro zpětnou kompatibilitu. Jako konektor se může použít buď Typ A, Typ B nebo nejnovější Typ C, který je oboustranný. Výhodou při použití tohoto rozhraní je přítomnost USB konektoru téměř na každém počítači. USB 2.0 nabízí rychlost maximálně 60 MB/s, USB 3.0 rychlost 625 MB/s a nejnovější USB 4.0 rychlost 5 GB/s.

4.11 Formát výstupních dat

Výstupní datový formát dat může mít u hyperspektrálních kamer několik podob. Focení do tzv. RAW formátu znamená, že data nejsou nijak zpracována a jedná se o přímý výstup z kamery. Taková data poskytnou nejvíce informací pro další analýzu, zároveň může mít ale jeden snímek stovky megabajtů a více. Kamery mohou být dodávány již se specializovaným software, který umožňuje použít jen část z obrázku, která nás zajímá - tzv. Region of interest (ROI) nebo záznam ve formátu kompatibilní s ENVI. ENVI je profesionální software určený pro zpracování snímků a jejich následnou analýzu. [46] Možností jako například u kamer BaySpec je export jednoho pásma do formátu obrázku BMP. [47]

Jako výstupní formát zaznamenaných dat u hyperspektrálního snímku (hypercube) lze uvažovat tři možnosti - Band Interleaved by Pixels (BIP), Band Interleaved by Lines (BIL) a Band Sequential (BSQ). Formát BIP obsahuje postupně vždy každý obrazový bod a jeho kompletní spektrální informaci. Formát BIP má postupně datovou informaci o jednom řádku celého nasnímaného spektra. Nakonec BSQ formát má uložený vždy celý prostorový snímek a celou jeho spektrální reflektanci. Formát přímo souvisí s metodou snímání. [48]

Kapitola 5

Přehled výrobců

Na trhu hyperspektrálních kamer se nachází mnoho výrobců z různých koutů světa. Mezi výrobce patří společnosti BaySpec, Cubert, Headwall Photonics, HySpex, imec, Photonfocus AG, Resonon, Specim nebo třeba XIMEA. Všichni vyrábějí kamery pro různé aplikace s různými parametry. Následující odstavce přiblíží jejich zaměření a portfolio. Někteří používají vlastní obrazové senzory, jiní používají senzory vyvinuté jinými společnostmi.

BaySpec je americká společnost se sídlem v San Jose, přičemž jejich výroba probíhá právě v USA. Dle jejich slov se zaměřují na návrh a výrobu spektrometrů s rozsahem od UV po blízké infračervené záření a hyperspektrální snímače. Jejich možná aplikace je od farmacie, chemického a potravinářského průmyslu až po telekomunikace. Nabízejí také přenosné hyperspektrální snapshot systémy jako je například BaySpec's Compact OCI-2000 s hmotností jen 363 gramů nebo drony s hyperspektrální kamerou jako je OCI™ UAV Airborne Hyperspectral Camera, který může být vybaven buď pushbroom nebo snapshot snímáním. [49, 47]

Německá společnost Cubert zaměřující se na hyperspektrální kamery více než dekádu má v nabídce celkem čtyři modely s citlivostí na záření od 450 do 950 nm. Model ULTIS 20 Plus zaujme možností fotit pod vodou až do hloubky 5 metrů. [38]

Headwall Photonics se zaměřuje na hyperspektrální kamery s aplikací v oboru dálkového průzkumu Země, strojového vidění, zdravotnictví a vládní obrany. Jedná se o společnost z USA, která má v nabídce různé hyperspektrální kamery se spektrálním rozsahem od 250 do 5000 nm. Jejich HYPERSPEC kamery používají pushbroom snímání a pro zpracování používají software perClass Mira. Nabízejí také voděodolné snímací systémy s certifikací IP67 nebo drony s hyperspektrálním senzorem. [50]

HySpex je značka norské společnosti NEO, která se zaměřuje na vývoj pro komerční sféru a zároveň pro evropské a norské státní projekty. Nabízejí vlastní hyperspektrální kamery určené pro letecké, laboratorní či industriální použití. V současné chvíli nabízejí celkem 11 kamer se spektrálním rozsahem

do 2500 nm. Řada kamer HySpex Mjolnir je pak určena primárně pro drony. [51]

Firma imec nabízí několik hyperspektrálních kamer pro vlnové délky od 460 do 1650 nm. Nabízejí snapshot systémy, přičemž některé mají dvě kamery svázané v jednom systému pro rozšíření spektrálního rozsahu jako například model imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR pro drony (obrázek 5.1). Výrobce model potenciálním zájemcům umožňuje přizpůsobit dle požadavků na snímanou spektrální oblast. Výsledný snímek z obou kamer je v tomto případě zkombinován v jednu velkou fotku již s provedenou korekcí. Sensory této společnosti využívají ve svých kamerách společnosti Photonfocus a XIMEA. [52]



Obrázek 5.1: Kamera imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR [53]

Photonfocus je švýcarská společnost nabízející různé kamery včetně celkem dvanácti hyperspektrálních modelů. Nepoužívají vlastní senzory, ale spoléhají na jiné výrobce jako například imec, Chunghwa nebo Sofradir. Spektrální rozsah je různý, pohybuje se od UV záření až po SWIR oblast. Počet spektrálních pásem se u pohybuje od 16 do 150. Používají senzor typu CMOS, případně InGaAs. Model Photonfocus MV3-D320I-T01-40-G2 zaujme velmi dobrým odstupem signálu od šumu se SNR 1870:1. [42]

Americká firma Resonon se zaměřuje na pushbroom kamery snímající na vlnových délkách od 350 do 1700 nm. Jejich uplatnění je v laboratořích, ve venkovních podmínkách nebo při snímání Země. Celkem mají v současné době v nabídce pět různých kamer s různým spektrálním rozsahem buď 400 - 1000 nm nebo 900 - 1700 nm případně 350 - 800 nm. Ke kamerám dodávají svůj software Spectronon. Nabízejí také různé objektivy pro své kamery o ohniskových vzdálenostech od 6 do 100 mm. [54]

Specim je finská společnost založená v roce 1995 zaměřující se na spektrální snímání. Jejich hlavní řada jsou hyperspektrální kamery snímající metodou pushbroom pod značkou Specim FX. V nabídce mají celkově devět různých kamer pro vlnové délky od 400 až do 12 300 nm. Portfolio výrobce je široké, základní modely FX nabízejí citlivost na vlnové délky od 400 do 1000 nm

nebo 900 - 1700 nm. Model Specim FX50 zaznamenává v pásmu MWIR (2700 - 5300 nm) a je určený například pro třídění plastů nebo na geologii. Model s označením OWL má spektrální rozsah od 7,6 do 12,3 μm s 96 pásmy a senzor typu MCT. Kamera Fenix nabízí dva senzory a dokáže tak snímat souvisle na vlnových délkách od 380 do 2500 nm. Zajímavostí je Specim IQ, což je celý přenosný hyperspektrální systém s dotekovou obrazovkou a softwarem pro analýzu kdekoliv mimo laboratoř. Kromě samotných kamer SPECIM nabízí také systém pro snímání z letadel nebo dronů a automatizovaný hyperspektrální systém SisuROCK pro skenování geologických vzorků. [32]



Obrázek 5.2: SPECIM FX Series kamery [32]

Výrobce XIMEA se chlubí nejmenší hyperspektrální kamerou na světě pod označením xiSpec. Váží jen 32 gramů a její rozměry jsou 26,4 x 26,4 x 31 mm. Její určení je především do dalších složitějších systémů. V současné době XIMEA nabízí celkem čtyři různé modely kamer, z čehož jedna používá metodu snímání pushbroom a ostatní snapshot. Snapshot kamery mají od 10 do 24 spektrálních pásem, zatímco pushbroom kamera jich nabízí 150. Všechny používají senzor společnosti imec, který využívá Fabry-Perotův filtr integrovaný přímo na obrazové body CMOS senzoru. [55]

Tabulka 5.1 srovnává několik hyperspektrálních kamer od různých výrobců. Byly vybrány kamery s rozsahem ve viditelném světle a blízkém infračerveném záření (VNIR), přičemž se výhradně jedná o malé kamery do 600 gramů snímající metodou snapshot. Kamera Photonfocus v tabulce používá stejný senzor IMEC CMV2K-LS150 jako kamera značky XIMEA. Nejvyšší frame rate má kamera XIMEA xiSpec Linescan s 850 snímky za sekundu, pravděpodobně z důvodu použití metody snímání pushbroom. Naopak velmi nízký frame rate má kamera značky Cubert. Pozorovat můžeme převládající použití rozhraní GigE a USB. Do tohoto srovnání je také zahrnuta velmi malá kamera XIMEA xiSpec Linescan, která vyžaduje další integraci v rámci celého systému, výrobce zmiňuje například do dronů. [55]

	imec SNA-PSCAN VNIR	XIMEA xiSpec Linescan	Photonfocus MV1 D2048x1088 HS05-96 G2	Cubert Ultris 20
Spektrální rozsah [nm]	470 - 900	470 - 900	470 - 900	450 - 850
Počet spektrálních pásem	150+	150	150	100
FWHM [nm]	10 - 15	neuveдено	10 - 12	12
Senzor	neuveдено	CMOS	CMOS	CMOS
Metoda snímání	snapshot	pushbroom	snapshot	snapshot
Prostorové rozlišení	až 3650 x 2048	2048	2048 x 1088	410 x 410
Frame rate (max) [Hz]	neuveдено	850	42	6
Rozhraní	USB 3.0 + GPIO	USB 3.1 a PCIe	GigE	2x GigE
Hmotnost [kg]	0,58	0,032	0,265	0,40
Spotřeba [W]	neuveдено	1,6	5,1	10,0

Tabulka 5.1: Tabulka vybraných kamer výrobců imec, XIMEA, Photonfocus a Cubert [56, 55, 57, 38]

Do tabulky 5.2 byly vybrány kamery s aplikací především do laboratoře, přičemž se jedná o modely podobné kameře Specim PFD4K-65-V10E. Ta je detailně popsána v kapitole 7.1. Všechny kamery v tabulce mají stejný spektrální rozsah 400 - 1000 nm a používají metodu pushbroom. Počet spektrálních pásem se nicméně výrazně liší, kdy kamera značky Specim jich má nejvíce a to 776. Prostorové rozlišení nabízí nejvyšší HySpex VNIR-1800 o hodnotě 1800 pixelů. Výrobce má však v nabídce i model s prostorovým

rozlišením 3000 pixelů, pro účely tabulky byly však hledány kamery co nejpodobnější modelu Specim PFD4K-65-V10E s prostorovým rozlišením 1775. Nejvyšší frame rate nabízí model Headwall Hypespec MV, který má ale naopak nejnižší prostorové rozlišení jen 640 pixelů. Uvedené kamery v tabulce pak jako rozhraní používají výhradně CameraLink.

	Headwall Hypespec MV	Resonon Pika XC2	HySpex VNIR- 1800	Specim PFD4K- 65-V10E
Spektrální rozsah [nm]	400 - 1000	400 - 1000	400 - 1000	400 - 1000
Počet spektrálních pásem	270	447	186	768
FWHM [nm]	6,0	2,3	neuveďeno	3,0
Senzor	CMOS	neuveďeno	neuveďeno	CMOS
Metoda snímání	pushbroom	pushbroom	pushbroom	pushbroom
Prostorové rozlišení	640	1600	1800	1775
Frame rate (max) [Hz]	485	165	260	100
Rozhraní	Base CameraLink	USB 3.0	CameraLink	Base CameraLink
Hmotnost [kg]	1,04	2,57	5,00	2,70
Spotřeba [W]	13	neuveďeno	30	5

Tabulka 5.2: Tabulka vybraných kamer výrobců Headwall, Resonon, HySpex a Specim [50, 31, 58, 59]

Kapitola 6

Aplikace hyperspektrálních kamer v praxi

Hyperspektrální kamery našly uplatnění již v mnoha odvětvích a stále se jejich použití rozšiřuje. Nejčastější využití a zároveň jedno z jejich prvních uplatnění bylo při dálkovém průzkumu Země. Po nasnímání je možné identifikovat podle reflektance objekty na zemi, kvalitu vody, stav lesů a další. Právě při pěstování plodin se využívají například k detekci stresu rostlin nebo napadených stromů, u kterých se to ještě vizuálně neprojevilo. Využití naleznou ale také v potravinářství, při třídění odpadů, forenzních vědách, rozpoznání minerálů nebo také ve vojenství například k detekci min na nepřátelském území. Tím možnosti aplikace zdaleka nekončí a neustále se objevují další možnosti použití. Tato kapitola přiblíží některé konkrétní aplikace v praxi.

6.1 Lesnictví a pěstování plodin

V oblasti pěstování plodin je využití hyperspektrálních kamer velmi rozsáhlé, přičemž kamera se často umísťuje na určité bezpilotní letadlo (anglicky Unmanned Aerial Vehicle) nebo lze hovořit také o pojmu dron. Tento dron pak snímá z určité výšky povrch země, kde může být například pole s plodinou nebo les. Hyperspektrální snímání bylo již využito k detekci nahnilého či mechanicky poškozeného ovoce a zeleniny, pro detekci fekálního znečištění, kontroly poškození okurek chladem, měření pevnosti broskví, měření cukernatosti jablek nebo například ke klasifikaci jader pšenice infikovaných houbami a mnoho dalších aplikací. [23]

Skupina autorů z Finska [60] využila hyperspektrální kameru na bázi rozkladu světla pomocí interferometru a lehkého bezpilotního letadla ke zjištění biomasy a dusíku. Vzhledem k použití rozkladu pomocí interferometru využili metodu snímání s označením staring, která pořídí celý 2D snímek najednou. Při zpracování dat využili normovaný rozdílový vegetační index (tzv. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)), který udává hustotu zeleně na ploše půdy. Jeho výpočet je pomocí vzorce (6.1), kde R_{nir} je reflektance v blízké infračervené části spektra na vlnové délce 816 nm a R_{red} je reflektance na 690 nm.

$$R_{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \quad (6.1)$$

Případně pro absorpci chlorofylu využili tvůrci vegetační index reflektance MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index). Jeho výpočet je ukázán ve vzorci (6.2), opět využívá reflektanci na různých vlnových délkách.

$$R_{MCARI} = (R_{700} - R_{670}) - 0,2 \cdot (R_{700} - R_{550}) \cdot \frac{R_{700}}{R_{670}} \quad (6.2)$$

Pro získání čistého spektra využili lineární a nelineární spectral unmixing. Biomasu a obsah dusíku získali pomocí machine learning přístupu, kde model naučili data z laboratoře. Výzkum potvrdil, že sledované parametry (biomasa a dusík) lze zjistit minimálně na testovaném poli s obilím ve Finsku. [60]

Autoři výzkumu [61] pozorovali pomocí snímání ze vzduchu množství vody v citronových sadech v průběhu ročních období. K dispozici měli sad, kde regulovali závlivku části stromů. Pro měření stresu stromu z nedostatku závlivky lze využít Photochemical Reflectance Index (PRI), jehož výpočet je znázorněn v rovnici 6.3. Právě na vlnové délce 531 nm je pokles reflektance spojen se stavem pigmentů xantofylového cyklu, což souvisí s účinností fotosyntézy. [62] Jako reference se používá vlnová délka 570 nm. Výzkum [61] upozorňuje, že lepší výsledky jsou dosaženy s referencí na 515 nm.

$$PRI = \frac{R_{570} - R_{531}}{R_{570} + R_{531}} \quad (6.3)$$

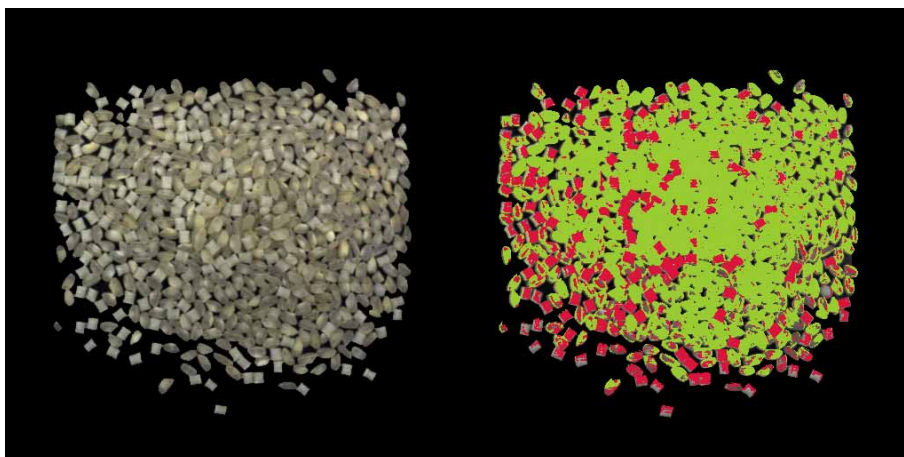
Nakonec jako nejlepší indikátor pro zjištění stresu stromů (v citrusovém sadu) před vizuálním projevením se z jejich práce ukázala fluorescence chlorofylu, teplota koruny a index BGI1, který je počítán jako poměr reflektance modré vlnové délky R_{400} a zelené R_{550} .

6.2 Potraviný

Hyperspektrální kamery lze využít v potravinářství ke kontrole kvality, zjišťování defektů nebo kontaminace ovoce, zeleniny, masa a dalšího jídla. Není tedy nutné zaměstnávat kontrolou lidi nebo používat chemické metody. Využití lze nalézt také pro třídění potravin. Většinou se provádí akvizice dat na vlnových délkách 400 - 1700 nm (viditelné světlo - blízké infračervené záření), výjimečné až do 2500 nm. Metodou snímání bývá buď pushbroom nebo je použit staring systém.

Velkou výhodou pro využití hyperspektrálního snímání v potravinářství je rozeznání složení bez nutnosti použití chemických látek a bez kontaktu se snímanou látkou. Proces je tedy nedestruktivní a neinvazivní. Mezi některé nevýhody patří obrovské množství zaznamenaných dat, které je třeba

zpracovat a nutnost výkonného hardware pro rychlou analýzu dat. Pro určité aplikace v potravinářství lze uvažovat využití pouze multispektrálního systému se správně zvolenou vlnovou délkou. Tu lze nejprve zjistit pomocí hyperspektrálního snímače. Pro rozpoznání kapalných nebo homogenních látek pak vystačí spektrometr. [37, 63]



Obrázek 6.1: Rýže namixovaná s plastem [64]

6.3 Zdravotnictví

Hyperspektrální kamery pomalu nacházejí využití také ve zdravotnictví, kde můžou doplnit dnes běžně používané metody tomografie a magnetické rezonance. Stále častěji se používají jak pro zdravotní diagnózu, tak při operacích. Konkrétní využití spočívá například k detekci biochemické změny v důsledku rakoviny buněk metabolismu, srdečního onemocnění, spálení kůže, nemoci ledvin nebo cukrovky. Detekovat lze například rakovinu děložního čípku v raném stádiu nebo jen identifikovat buňky a tkáň, která by mohla být potenciálně rakovinotvorná. Využití našly kamery také k detekci onemocnění žlučníku pomocí nafocení struktury tkáně. Lze je využít také třeba k pozorování saturace sítnice kyslíkem.

Nevýhoda hyperspektrálních systémů při této aplikaci je nicméně nutnost přímé viditelnosti tkáně či orgánu, jelikož vidíme především spektrum povrchu. Uvádí se, že na vlnové délce 550 nm kamera „vidí“ pod povrch do hloubky 0,48 mm, na vlnové délce 850 nm je to 3,57 mm. [20, 15]

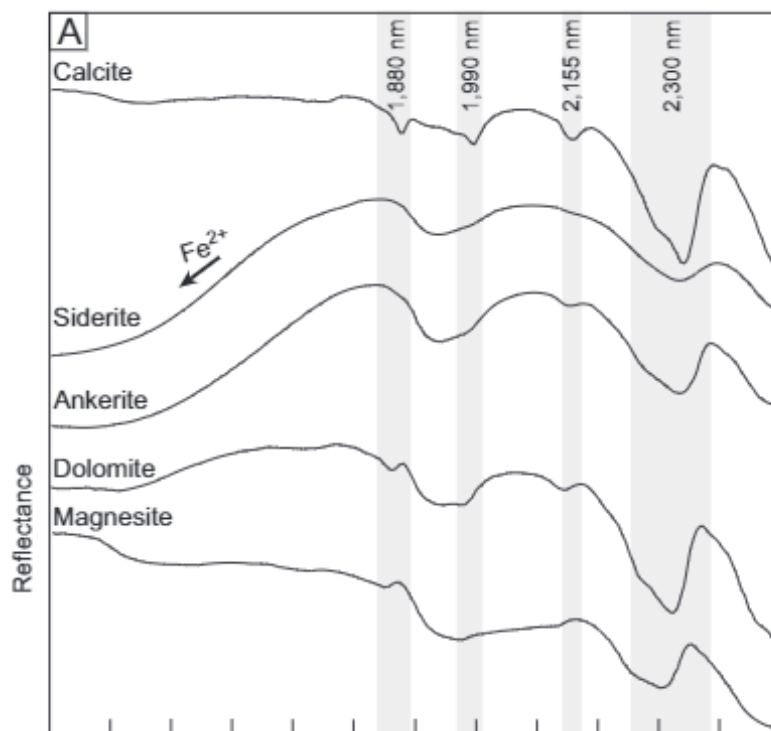
6.4 Třídění odpadů

Pro rozpoznání jednotlivých materiálů při třídění odpadů může být také využita hyperspektrální kamera, lze tak jednoduše třídit plast, papír, kov, sklo a další materiál. Jak ukazuje výzkum [65], je možné třídit a rozlišovat i

jednotlivé druhy plastu při recyklaci za použití hyperspektrálního systému v blízkém infračerveném záření s vysokou, téměř stoprocentní, přesností. Spolehlivé rozlišení plastu typu PET a PLA potvrzuje také práce [66], přičemž právě tyto dva typy plastu se nejčastěji používají na balení jídla. Jejich výsledky ukazují 98procentní přesnost. Výzkum [67] aplikuje třídění nejen na plast ale také na papír, kde je možné spolehlivě třídit materiál z celulózy jako je bílý papír, kartón nebo novinový papír. Použili kamery na vlnové délce 900 - 1700 nm.

6.5 Těžení surovin

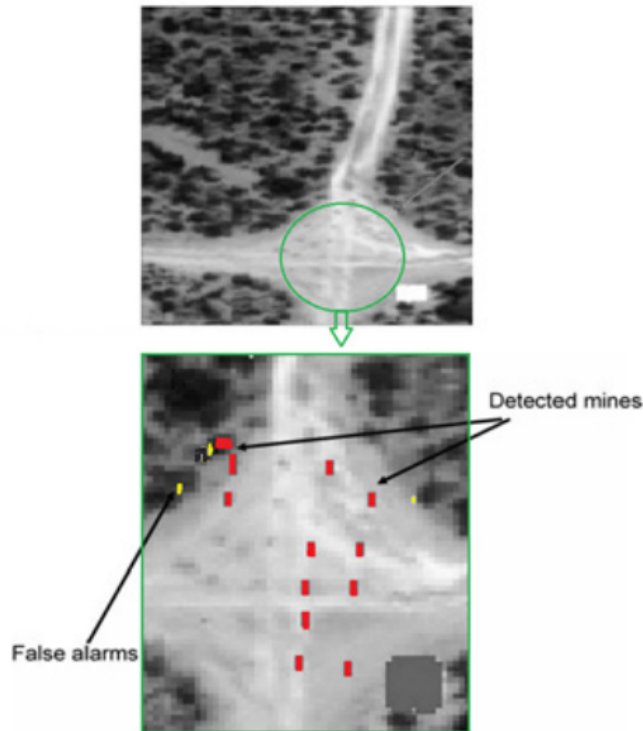
Mnoho využití používá hyperspektrální kamery pro rozpoznání minerálů po vyfocení horniny buď na zemi nebo při snímání z bezpilotního letadla či dronu z nízké výšky. Díky tomu je možné zachytit a určit složení i u těžko přístupných míst. Mezi minerály, které lze pomocí spektra snadno identifikovat, patří například hyllosilikáty (slída, jíl a chloritan), sírany (alunit, sádra a jarosit), uhličitany (kalcit, dolomit, ankerit a magnezit) a hydroxylované silikáty (např. epidot a amfibol) a to v části blízkého infračerveného světla a SWIR. Například minerály postrádající vazbu na hydroxidy mají charakteristikou reflektanci spektra až v oblasti termálního infračerveného záření nad 3 000 nm. [68]



Obrázek 6.2: Referenční vzorky uhličitánových a chloritanových minerálů a jejich reflektance [68]

6.6 Vojenské využití

Uplatnění najdou hyperspektrální systémy také v oblasti vojenského sektoru. Pomocí různých algoritmů lze například na nepřátelském území po naskenování z bezpilotního prostředku najít, kde se nachází maskovaná vojenská vozidla nebo miny, jak ilustruje obrázek 6.3. Detekce odhalení min je například při použití algoritmu MUF2 60 procent. [15]



Obrázek 6.3: Detekce min pomocí algoritmu MUF2 [15]

Článek [69] zmiňuje možné využití celkem v šesti oblastech tohoto sektoru mezi které patří získání informací o bojišti, rozpoznání návnady, odhalení zamaskovaných objektů, varování před raketami dlouhého doletu, detekce zbraní hromadného ničení a detekce nášlapných min. Skvěle hyperspektrální snímání funguje právě při rozpoznání zamaskovaných objektů, které na běžné fotce vypadají například jako zalesněná plocha. Jelikož kamufláž má jiný spektrální podpis než zeleň, lze ji pomocí hyperspektrální kamery odhalit.

Kapitola 7

Hyperspektrální kamera Specim PFD4K-65-V10E

V laboratoři na ČVUT FEL na katedře radioelektroniky v místnosti T2:B3:541 byla v minulém roce nainstalována kamera Specim PFD4K-65-V10E s celou měřicí aparaturou. Tato kapitola se věnuje jejímu popisu. Podle slov Specimu [40] se jedná o kameru s vysokým rozlišením, vysokým frame rate, flexibilním výběrem vlnové délky a robustní konstrukcí.

7.1 Vhodná aplikace

Následující aplikace jsou pro tuto kameru dle výrobce [59] nejvhodnější:

- Kontrola kvality
- Výzkum rostlin a vegetace
- Třídění a sledování kvality na lince
- Výzkum potravin a vegetace
- Monitorování životního prostředí
- Detekce padělků

Stejná kamera byla v praxi využita při výzkumu [70], který se věnuje snímání a analýze jader sedimentů šesti kanadských jezer, konkrétně odvození distribuce velikosti částic (tzv. particle-size distribution) a sledování změn ve vodním prostředí.

Verze kamery s označením PFD-65-V10E s menším prostorovým rozlišením, ale vyšším frame rate byla využita ve výzkumu pro zjištění geometrického zkreslení a optické aberace při snímání kamerou typu pushbroom. Autoři zde použili parametry, které se anglicky označují jako smile a keystone. [71]

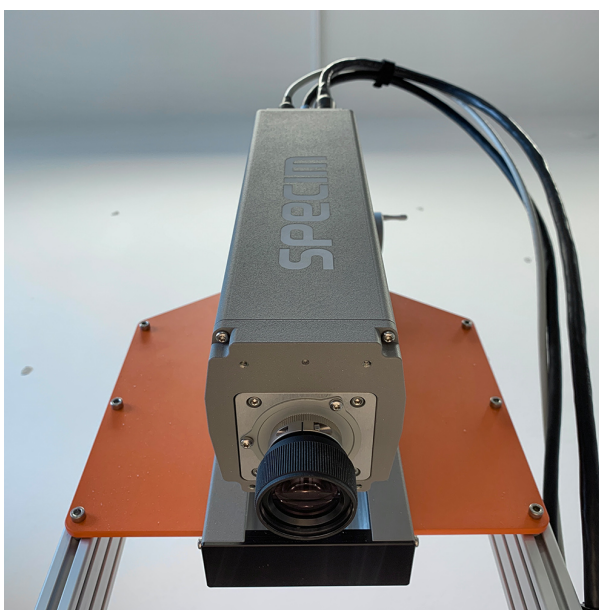
V práci [72] španělská vědecká skupina využila kameru PFD-65-V10E k určení spektrální charakteristiky rostliny Mydlokor tupolistý. Zkoumali zdraví této rostliny,

spektrální vegetační index (SVI) a zda je ve stresu.

Výzkum [73] zase zkoumá použití kamery PFD-65-V10E a dalších v oblasti těžení hornin pro rozlišení rud od odpadních materiálů. V práci [74] se primárně zaměřili na výzkum algoritmů interpolaci barevných filtrů a za použití kamery Specim PFD-65-V10E testují jinou barevnou mřížku než Bayerovu.

7.2 Parametry

Podle specifikací od výrobce [40] má kamera Specim PFD4K-65-V10E spektrální rozsah v oblasti viditelného světla a blízkého infračerveného záření od 400 do 1000 nm. Záření zaznamenává senzor typu CMOS stejně jako většina kamer snímající tento rozsah spektra. Snímání probíhá metodou pushbroom, a proto je prostorové rozlišení 1775. V porovnání s ostatními kamery na trhu se jedná o vysoké rozlišení. Velikost jednoho obrazového bodu je 8,0 x 8,0 mikrometru. Pro následný rozklad světla je u této metody nutné, aby byla integrovaná štěrbinová, která zde má šířku 30 mikrometru. Parametr pološířka maxima má hodnotu 3,0 nm, přičemž spektrálních pásem snímá kamera celkem 768. Maximální frame rate činí až 100 snímků za sekundu. Expoziční čas lze nastavit od 0,1 ms do 100 ms.



Obrázek 7.1: Kamera Specim PFD4K-65-V10E v laboratoři ČVUT

Objektiv je připojen přes standardní bajonet typu C. Naše kamera byla dodána s objektivem OLE 23, který nabízí úhel záběru 34,3 stupně. Clonové číslo je $f/2,4$. Mezi dodatečné funkce patří podpora spektrálního binningu a podpora více oblastí Region-of-Interest (ROI).

Pro komunikaci s počítačem a ovládání se využívá rozhraní CameraLink v základní *Base* verzi. Pro ovládání závěrky slouží propojení přes USB. Spotřeba celého zařízení je do 5 W a napájecí napětí u naší verze činí 24 V. Provozní teplota kamery je od 5 do 40 stupňů Celsia. Rozměry jsou definovány jako 330 x 85 x 90 mm a váha činí 2,7 kilogramu. Tělo kamery kryje eloxovaný hliník s otvory pro montážní šrouby. Všechny parametry přehledně zobrazuje tabulka 7.1.

	Specim PFD4K-65-V10E
Spektrální rozsah	400 - 1000 nm
Počet spektrálních pásem	768
FWHM	3,0 nm
Spektrální vzorkování	0,78 nm
Senzor	CMOS
Metoda snímání	pushbroom
Prostorové rozlišení	1775
Velikost obrazového bodu	8,0 x 8,0 μm
Šířka štěrbin	30 μm
Frame rate (max)	100 Hz
Bajonet	C-mount
Rozhraní	Base CameraLink
Hmotnost	2,70 kg
Rozměry	330 x 85 x 90 mm
Spotřeba	5 W

Tabulka 7.1: Tabulka s parametry kamery Specim PFD4K-65-V10E [32]

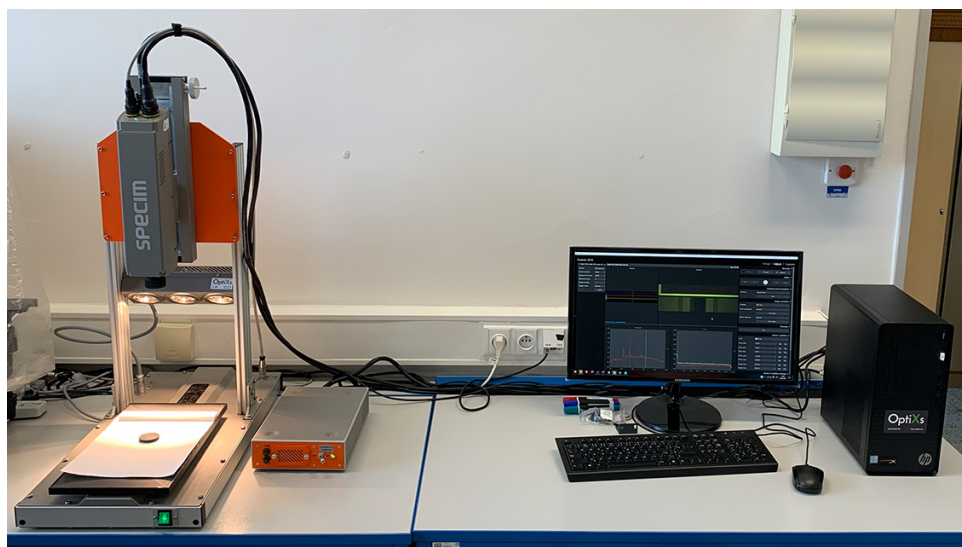
7.3 Sestavení

Hyperspektrální kamera Specim PFD4K-65-V10E byla dodána s napájecí jednotkou, která se nachází hned vedle ní. Pomocí této jednotky se kamera zapíná a napájí.

Kamera je zde nainstalovaná od dodavatele na laboratorní skener Specim LabScanner 40 x 20. Ten nabízí posuvnou plochu o rozměrech 400 x 200 mm, kterou snímá kamera. Rozměry celého posuvného skeneru činí 703 x 335 x 710 mm a váha je 13 kilogramů. Maximální hmotnost snímaného vzorku může být 5 kilogramů. Rychlost posunu lze nastavit v rozmezí od 0,1 mm/s do 99 mm/s. Kvůli omezenému prostoru v laboratoři ČVUT není možné používat posuvný stolek v plném rozsahu. Při úplném posunu za kameru tak narazí do zdi. Dosah je v praxi při používání dostatečný, jen je nutné toto brát v potaz při nastavování počáteční a koncové pozice skeneru.

Skener má integrované osvětlení v podobě tří halogenových zářičů Decostar

51 ALU 36deg GU5.3 s výkonem 20 W. Nainstalovaná sestava má pouze tři tyto zářiče z jednoho směru, výrobce umožňuje používat stejná tři světla také z druhé strany jako dodatečnou výbavu. Pomocí laboratorního skeneru je možné nastavit výšku kamery. Ta je od dodavatele nastavená na 30 cm od objektivu k ploše posuvného stolku, čímž zabírá celou jeho šířku.



Obrázek 7.2: Kamera s posuvným stolkem a počítačem se software nainstalovaná v laboratoři ČVUT

Dodavatel sestavu doplnil stolním počítačem značky HP se software Luma Scanner pro snímání od výrobce Specim. Stolní počítač má procesor Intel Core i5-8400, 32 GB operační paměti, systémový SSD disk o velikosti 256 GB a pro ukládání dat slouží HDD o velikosti 1 TB. Pomalý disk může způsobit při vysokém frame rate vynechané snímky (tzv. dropped frame). Výrobce Specim zároveň doporučuje snímat (a ukládat data) na druhý nesystémový disk, který je navíc typu SSD. Při našem záznamu na nesystémový disk typu HDD však nebyl pozorován žádný problém typu dropped frame pravděpodobně z důvodu nízkého maximálního frame rate kamery (100 Hz). U kamer, které mají frame rate násobně větší, by však problém mohl nastat.

Hyperspektrální kamera je zapojena přímo do počítače přes CameraLink pomocí datového kabelu MVC-1-1-1-5M s MDR konektory na obou stranách. Z hyperspektrální kamery vede HSI kabel do napájecí jednotky. Z ní jde USB kabel do počítače. Posuvný stůl je propojen s kamerou přes AUX kabel (Scannercable). Spolu s kamerou byla dodána také bílá reference o rozměrech 200 x 25 x 10 mm pro účely kalibrace na bílou.

Kapitola 8

Ovládání a nastavení kamery

Tato kapitola popisuje práci s hyperspektrální kamerou Specim PFD4K-65-V10E a jejím příslušenstvím, které se nachází v laboratoři na ČVUT. Kapitola popíše ovládání a nastavení snímání pomocí dodaného software Lumo Scanner.

8.1 Zapnutí kamery

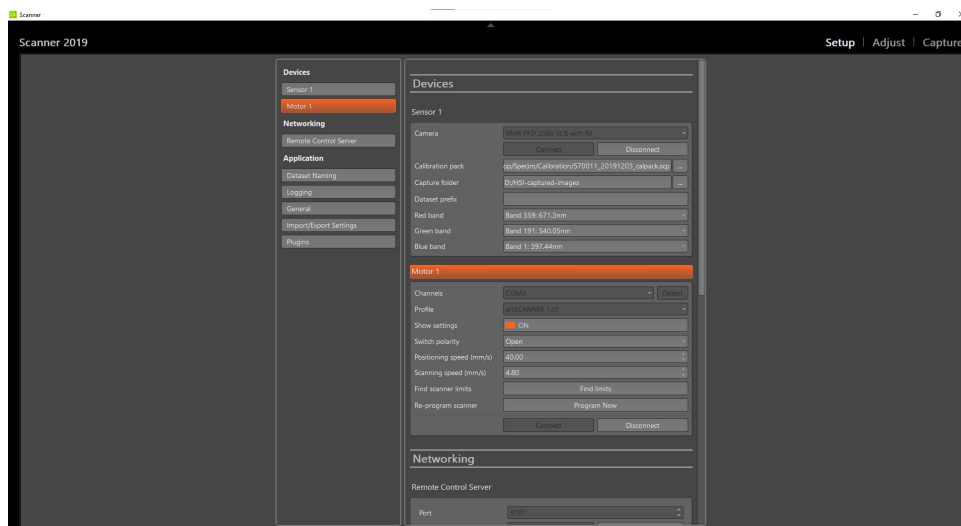
Pro začátek snímání je nutné zapnout samotnou hyperspektrální kameru přes napájecí jednotku vedle posuvného stolku přepínačem ON/OFF. Dále je nutné zapnout samotný posuvný stolek zeleným spínačem a zapnout počítač se snímacím software. Je dobré se ujistit, že posuvné části stolku před zapnutím nic nebrání v posunu (například židle), jelikož stolek po zapnutí sjede do výchozí pozice. Jako další krok je třeba sejmout krytku objektivu a umístit na posuvný stolek bílou referenci na kraj posuvné desky pro pozdější kalibraci. Na počítači je nutné spustit software Lumo Scanner.

8.2 Záložka Nastavení

Po zapnutí software Lumo Scanner je potřeba provést počáteční nastavení na záložce *Setup*. Hyperspektrální kamera by se měla automaticky připojit, pokud se tak nestane, je nutné v sekci *Devices - Sensor 1* vybrat naši kameru a kliknout na tlačítko *Connect*. Dále je zde možné nastavit kalibrační balíček, který by se ale měl automaticky načíst. Jedná se o kalibrační balíček přímo od výrobce kamery Specim s příponou **.scp*, který není třeba měnit a nijak nastavovat. V dalších nastavení jde změnit, kam se budou ukládat pořízené snímky. Nakonec je možné zde upravit prefix v názvu souboru a reprezentaci RGB.

Posuvný stolek se nastavuje v sekci *Motor 1*. Ve většině případů je jeho propojení k počítači automaticky detekováno přes COM3 port. Nicméně je potřeba ho kliknutím na tlačítko *Connect* připojit. Důležitým parametrem zde v nastavení je *Scanning speed (mm/s)* neboli rychlost posuvné plošiny. Tato

rychlost bude při kalibraci pravděpodobně změněna dle dalšího nastavení a kapitoly 8.3.3. *Positioning speed (mm/s)* nastaví rychlost pohybu stolku při manuálním posunu v software. Není potřeba výchozí hodnotu 40 mm/s měnit. Po kliknutí na tlačítko *Find limits* skener projede s posuvnou částí v celém rozsahu, což vzhledem k prostorovému omezení v laboratoři není možné, proto nedoporučuji klikat na toto tlačítko.



Obrázek 8.1: Lumo Software - záložka Settings, 1.část

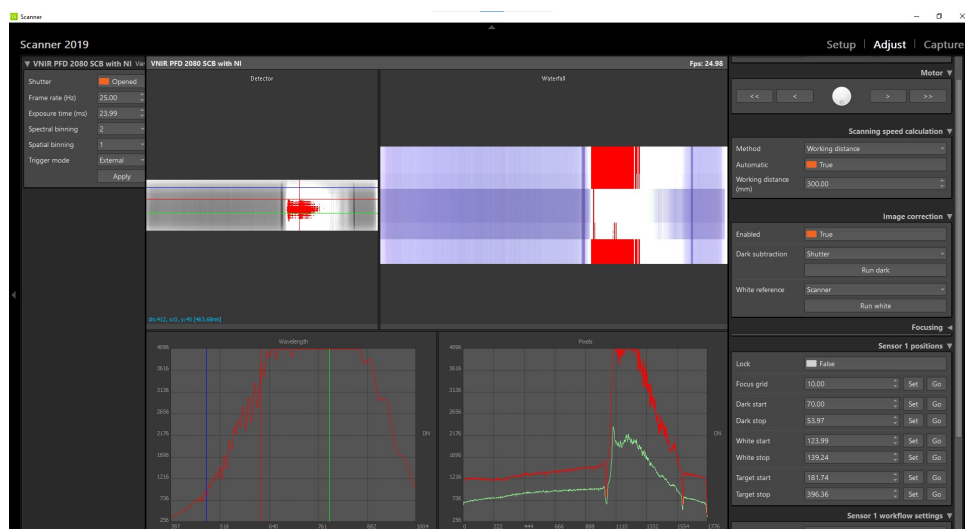
Software Lumo Scanner dále v sekci *Setup* umožňuje nastavit vzdálený přístup a ovládat tak tuto kameru na dálku. To nicméně vzhledem k nutnosti osobně měnit snímané vzorky není nezbytné a jedná se tak spíše o funkci směřovanou pro průmyslové využití, kde může kamera kontrolovat kvalitu na lince a řídicí obsluha se k ní může připojit na dálku.

Podsekcce *Dataset naming* umožňuje nastavit název výsledného souboru. Ve výchozím stavu je zde formát *Timestamp*, který umožňuje do názvu vložit aktuální datum a čas - například 2021-02-25_15-26-01. Formátování lze dále upravit. Místo data a času lze zvolit možnost *Counter*, kdy se číslovka automaticky s každým snímkem zvýší o jedna. Program Lumo Software dále nabízí možnost zapnout záznam informací o běhu (tzv. logging), nastavení minimalizování do oblasti systémových oznámení, běh aplikace přes celou obrazovku, automatické zapínání Lumo Software při zapnutí počítače s možností prodlevy a automatické inicializování zařízení. Nakonec užitečnou funkcí je možnost importovat či exportovat nastavení programu.

8.3 Záložka Přizpůsobit

Po základním nastavení na záložce *Setup* se uživatel přepne na záložku *Adjust*, kde se provádí kalibrace, obrazová korekce a nastavení parametrů samotného snímání.

Ve čtyřech oknech uprostřed obrazovky lze pozorovat aktuální výstup z hyperspektrální kamery. Vidíme celkem čtyři zobrazení - dle výrobce se nazývají widgety - *Detector*, *Waterfall*, *Spectral plot* a *Spatial plot*. Widget *Detector* zobrazuje černobíle prostorové obrazové body v závislosti na vlnové délce. V okně *Detector* můžeme měnit pomocí svislé červené čáry zobrazení vlnové délky na okně *Wavelength* pod ním. Sloupec ukazuje náhled spektra na daném obrazovém bodu. Pokud se na snímku nachází přepal (obrazový bod je satureovaný), zobrazí se červeným zvýrazněním, viz. obrázek 8.2. V tomto okamžiku je pro jeho odstranění vhodné snížit hodnotu expozičního času, dokud nezmizí. Přepal lze pozorovat i na dalších oknech (widgetech).

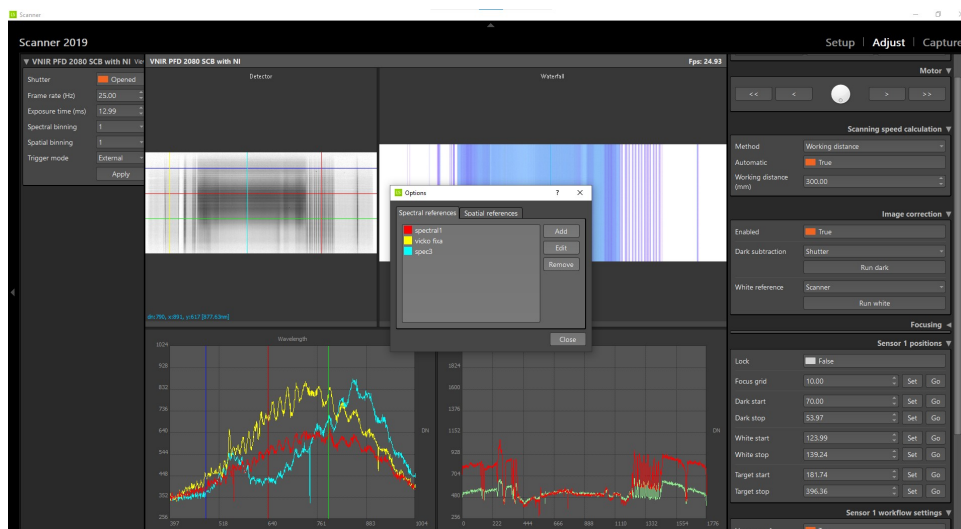


Obrázek 8.2: Lumo Software - záložka Adjust - přepal

Do zobrazení *Detector* lze přidat další svislé čáry - spektrální reference - pro okamžité zobrazení spektra v okně *Spectral plot* pod ním. To se provede kliknutím pravým tlačítkem myši a vybráním možnosti *Option*. Poté je lze libovolně přidávat a odebírat a nastavit jejich barvu. Hodí se to na lepší kontrolu přepalů spektra nebo na porovnání spektra rovnou v reálném čase. Totéž lze provést pro prostorové zobrazení, zde se přidávají vodorovné čáry.

Ve widgetu *Waterfall* se neustále skenuje a zobrazuje jeden řádek obrazu, který se načítá vždy na vrch okna. Toto zobrazení je barevné na základě nastavených RGB pásem v sekci *Setting - Sensor*. Stejně jako ve widgetu *Detector* i zde je vidět přepal, který je červeně zvýrazněný. Pro správné zobrazení je zde nutné provést obrazovou korekci, viz 8.3.1.

Widget *Spectral plot* ukazuje celé spektrum od 400 do 1000 nm na ose x aktuálně vybraného sloupce z okna *Detector*. Ukazuje také tři svislé čáry - modrou, zelenou a červenou. Pomocí nich lze nastavit zobrazení RGB v poli *Waterfall*. Poslední widget s názvem *Spatial plot* ukazuje hodnoty prostorové intenzity světla v jednotlivých obrazových bodech od 0 do 1776 na ose x. Jejich pozici lze ovládat také ve widgetu *Detector*. Osa y v obou případech



Obrázek 8.3: Lumo Software - přidání Spectral reference

ukazuje naměřené hodnoty.

8.3.1 Image correction

Pro následující kroky je třeba mít na posuvném stolku umístěnou bílou referenci. V podsece *Sensor 1 position* je nutné nejprve nastavit pro správnou kalibraci počáteční pozici *White start* a koncovou pozici *White stop*. Pomocí ovládání posuvného stolku vpravo nahoře v podsece *Motor* je potřeba najet na začátek bílé reference a nastavit počáteční pozici a koncovou pozici zhruba o deset větších. V této podsece je možné nastavit začáteční pozici skenování *Target start*, kterou je vhodné nastavit kousek před začátkem skenovaného objektu a koncovou pozici *Target stop* zase kousek za jeho koncem. Pozice *Dark start* a *Dark stop* není třeba nastavovat, jelikož je vhodnější používat kalibraci na uzavřenou závěrku.

- *Target start* - pozice, kde kamera zahájí snímání objektu
- *Target stop* - pozice, kde kamera ukončí snímání objektu

Podsece *Image correction* obsahuje dvě důležitá nastavení, která slouží výhradně pro správné zobrazení ve widgetu *Detector* a *Waterfall*. Nasnímaná data nejsou ovlivněna touto obrazovou korekcí. *Dark subtraction* je vhodné nastavit na *Shutter*, a poté ho provést kliknutím na tlačítko *Run Dark*. U *White reference* je pak vhodné zvolit *Scanner* a opět ho provést kliknutím na tlačítko *Run White*. Po této korekci by se již v polích *Detector* a *Waterfall* měl zobrazovat obraz z kamery v RGB.

8.3.2 Kalibrace

Při snímání hyperspektrálních fotek je důležitá správná kalibrace a pro to slouží záznam bílé a černé reference. Ty jsou přiloženy ke každému hyperspektrálnímu snímku a je nutné je podle rovnice 10.1 odečíst. Pro jejich záznam je nutné nastavit v podsekcí *Sensor 1 workflow settings* parametry *White ref* a *Dark ref*. První zmíněný je možné nastavit buď na Fixed position nebo Area scan, případně na Manual. Fixed position při skenování bílé reference nehýbe s kamerou a zaznamená tak jen jeden její řádek, zatímco při Area scan se nasnímá oblast dle nastavení v sekci Sensor 1 Positions. Počet *Frame* stačí navolit zhruba 150. Dark ref type je vhodné nastavit na Shutter, jiná možnost zde ani není. Postačí nastavit počet *Frame* na 100.

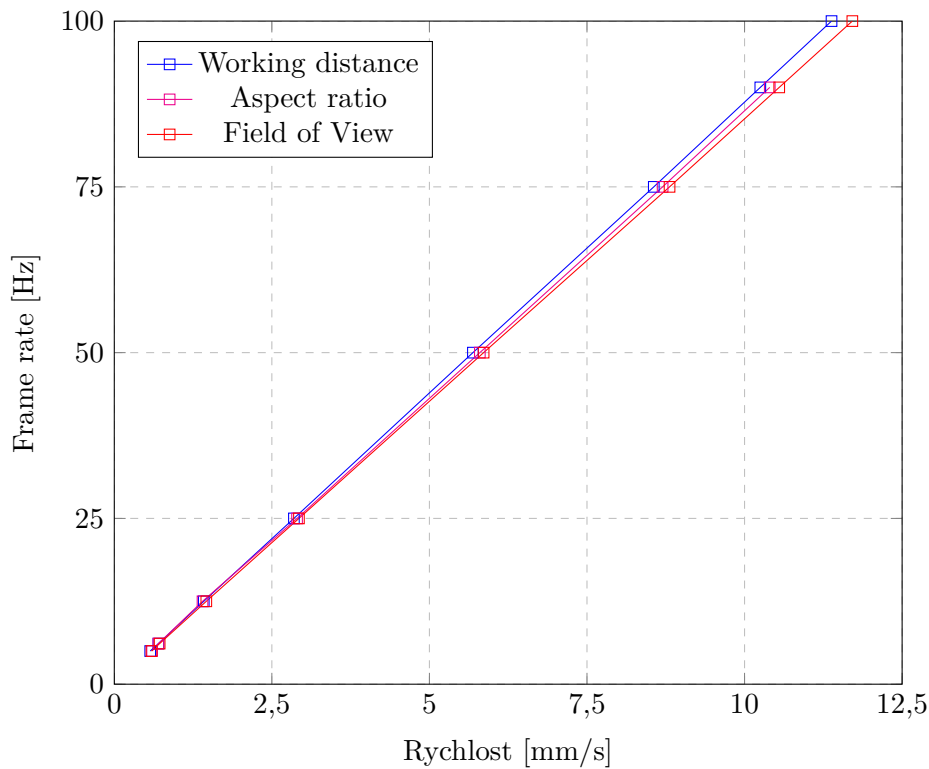
8.3.3 Scanning speed

Pro výpočet a volbu *Scanning speed* neboli rychlost skenování (= rychlost posunu stolku) lze využít celkem tři metody a manuální nastavení. Jedná se u pushbroom systému o velmi důležitou část, jelikož bez správného nastavení by při snímání došlo ke zkreslení výsledného snímku. Nastavení rychlosti skenování je dobré zkontrolovat při každé změně Frame rate.

Metoda *Field of view* spočívá u liniového snímání v nastavení pevné vzdálenosti v milimetrech, kterou kamera snímá. Pro zjištění této vzdálenosti je třeba umístit pravítko či metr na posuvný stůl přes jeho celou šířku a naskenovat jej. Poté z fotky lze vyčíst vzdálenost, kterou nastavíme do programu Lumo software. Ten pak provede výpočet na základě vestavěného vzorce 8.1 a vhodně nastaví rychlost skenování vzhledem k frame rate. Hodnota Horizontal pixels je v našem případě stanovena na 1775 pixelů.

$$Scanning\ speed = \frac{FOV}{horizontal\ pixels} \cdot Frame\ rate \quad (8.1)$$

Metoda *Distance to the Target* využívá vzdálenost od posuvného stolku ke kameře v milimetrech. Tu lze jednoduše změřit pomocí pravítka a v našem případě je to 30 cm. Tato hodnota se následně vloží do programu Lumo, který provede automaticky výpočet rychlosti skenování na základě integrovaného vzorce 8.2. Jedinou proměnou je zde právě Distance (vzdálenost), kterou uživatel zadá. Detector pixel size je velikost obrazového bodu (u této kamery 8 x 8 μm), Spatial binning je použití prostorového binningu, Spectrograph magnification je zvětšení spektrografu, Entrance pupil position je pozice vstupního otvoru čočky a Focal length je ohnisková vzdálenost. V případě obou těchto metod doporučuje výrobce provést sken kulatého objektu pro ověření korektního nastavení. Pro tento náhled nastavení se použije tlačítko Preview.



Obrázek 8.4: Scanning speed - rychlost skenování dle metody

8.3.4 Frame rate a expoziční čas

V levém panelu na záložce Adjust se nachází možnost změny závěrky (Shutter), Frame rate, expozičního času, nastavení binningu a trigger mode. Závěrku je třeba pro snímání ponechat otevřenou (Opened). Lze ji v případě potřeby zavřít.

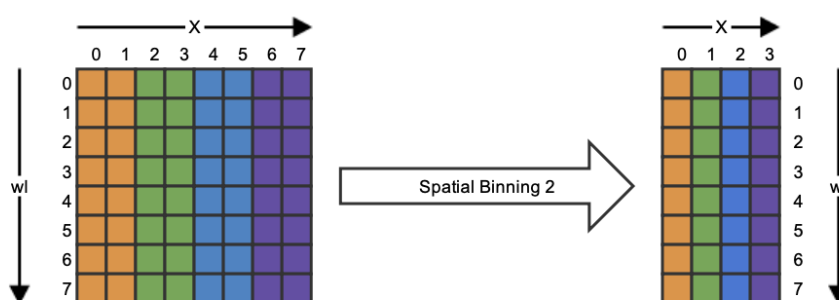
Frame rate ovlivňuje, kolik snímků za sekundu kamera snímá, a je určen v jednotce Hz. Vyšší frame rate znamená více zaznamenaných dat. [40] V případě kamery Specim PFD4K-65-V10E výrobce uvádí maximální frame rate 100 Hz. V praxi lze nicméně v programu Lumo nastavit rozsah od 5 do 199,99 Hz. Po kontaktování výrobce Specim bylo ověřeno, že maximální frame rate kamery je vždy limitující faktor a že je opravdu možné v Lumo software mnohdy nastavit i vyšší frame rate, než kamera zvládá. Nicméně při nastavení frame rate na vyšší hodnotu než 93 Hz ukazovala kamera chybu a výstupní snímání byl vždy poloviční frame rate. Bez chyby lze v našem případě nastavit maximální frame rate na hodnotu 92 Hz, což se blíží výrobcem udávané hodnotě 100 Hz. Vliv různého nastavení frame rate na kvalitu zkoumá následující kapitola 9.

Expoziční čas je možné nastavit podle hodnot frame rate. Jeho hodnota se například na frame rate 25 Hz pohybuje od 2 do 38,99 ms, na nejnižším frame

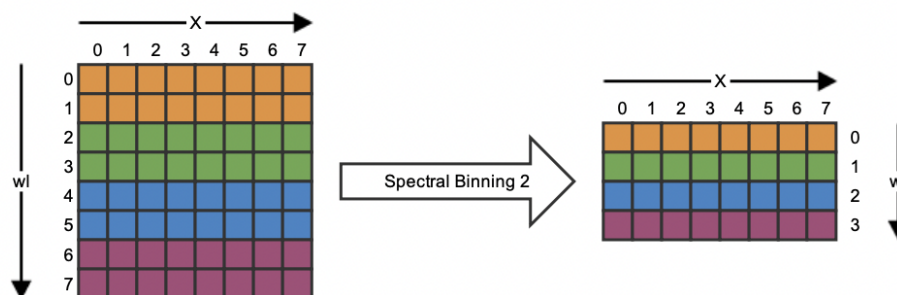
rate 5 Hz je možné nastavit až 198,59 ms. Čím delší bude tato expoziční doba, tím více světla dopadne na senzor.

8.3.5 Binning

Pro zlepšení citlivosti kamery je možné využít tzv. binning, a to jak spektrální, tak prostorový (spatial). V obou případech se jedná o spojení dvou nebo více sousedních bodů, které se pak chovají jako jeden. Prostorový binning ilustruje obrázek 8.5 a spektrální binning ukazuje obrázek 8.6. V případě kamery Specim PFD4K-65-V10E a programu Lumo software lze nastavit také čtyřnásobný a osminásobný binning, přičemž lze kombinovat libovolné hodnoty prostorového a spektrálního.



Obrázek 8.5: Spatial - prostorový binning 2x [75]



Obrázek 8.6: Spektrální binning 2x [75]

Volba binningu pak přímo ovlivňuje, jak moc detailně bude objekt nasnímán. Pokud chceme zjistit velikost jednoho obrazového bodu (pixelu) ve skutečnosti, bude to v našem případě kamery pushbroom šířka záběru / počtem pixelů, viz vzorec 8.3. Bez binningu bude tato velikost (délka jedné strany) jednoho pixelu na vzorku stanovena na $0,117 \text{ mm}$, tedy $0,117 \text{ mm}^2$. Při použití dvojnásobného binningu bude tato velikost dvojnásobná, a stejně tak při čtyřnásobném a osminásobném, viz tabulka 8.2. Při snímání objektu je třeba se zamyslet, jaká přesnost nám stačí a adekvátně navolit binning. Jeho použití totiž ve výsledku rapidně snižuje výslednou velikost hyperspektrálního snímku, což může být pro snazší analýzu velmi žádoucí. Velikostí se zabývá kapitola

9.6. Zároveň bylo vypočteno, kolik pixelů pokryje 1 mm na snímaném vzorku při použití objektivu OLE 23, který je na kameře nainstalovaný v laboratoři. Údaje platí pro vzdálenost 300 mm od snímané plochy k objektivu. Šířka záběru byla změřena nasnímáním pravítka kamerou.

$$\frac{\text{Šířka záběru}}{\text{Počet pixelů}} = \frac{208\,000\ \mu\text{m}}{1775} = 117,2\ \mu\text{m} = 0,117\ \text{mm} \quad (8.3)$$

	Velikost 1 pixelu ve skutečnosti na vzorku	Počet pixelů na 1 mm
Žádný binning	0,117 mm ²	8,55 pixelů
2x binning	0,234 mm ²	4,27 pixelů
4x binning	0,469 mm ²	2,13 pixelů
8x binning	0,938 mm ²	1,07 pixelů

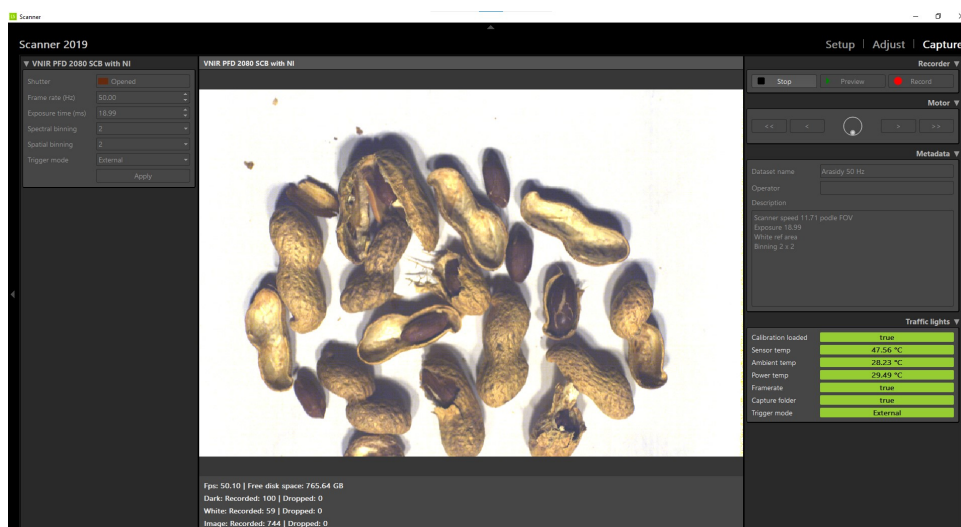
Tabulka 8.2: Velikost pixelu ve vztahu k binningu na kameře Specim PFD4K-65-V10E s objektivem OLE 23

8.4 Snímání

Po nastavení snímání přichází na řadu záložka Capture v Luma software. V tuto chvíli je již vhodné mít umístěné snímané vzorky na posuvném stolku a mít nastavenou správně počáteční a koncovou pozici stolku. Pro kontrolu, zda je vše správně nastaveno a objekty v zorném poli, slouží tlačítko *Preview*. Po jeho kliknutí se provede sken nanečisto bez záznamu dat, přičemž na obrazovce (widget Waterfall) lze sledovat skenování.

Zobrazení dále ukazuje v pravém bočním panelu metadata, kde je možné upravit název souboru, operátora a popisek. Pod ním se pak nachází tzv. semafor, kde jsou ukázané důležité parametry - kalibrace, teplota senzoru a zařízení, správně nastavený frame rate a nastavená složka snímání. Pokud je vše v pořádku, svítí všechny zeleně. V případě varování je řádek oranžový a pokud se jedná o chybu, tak je červený.

Pro zahájení snímání stačí kliknout na tlačítko *Record*. Poté se provede snímání spolu se záznamem černé a bílé reference. Stav včetně počtu vynechaných snímků lze pozorovat pod oknem Waterfall. V ideálním případě nebude žádný snímek vynechán (Dropped: 0). Po dokončení vyskočí upozornění o úspěšném dokončení. Skenování lze zastavit kdykoliv stisknutím tlačítka *Stop*. Na záložce Capture lze také stále ovládat posuvný stůlek manuálně.



Obrázek 8.7: Záložka Capture

Výsledkem snímání ve složce *capture* jsou celkem tři hlavní soubory nesoucí hyperspektrální data pro další zpracování:

- Název souboru.raw
- DARKREF Název souboru.raw - černá reference
- WHITEREF Název souboru.raw - bílá reference

Spolu s nimi výsledná složka obsahuje .log soubory, ve kterém se zapisují případné vynechané snímky (dropped frame) a .hdr soubory (header), které obsahují některá metadata. Pokud má kamera GPS, jsou zde také data navigace .nav. Další metadata včetně nastavení kamery při snímání jsou ve složce *metadata*. Pro náhled hyperspektrální fotky v RGB je zde jeden soubor typu .png. [75]

Kapitola 9

Ověření parametrů kamery

9.1 Naměřené prostorové rozlišení

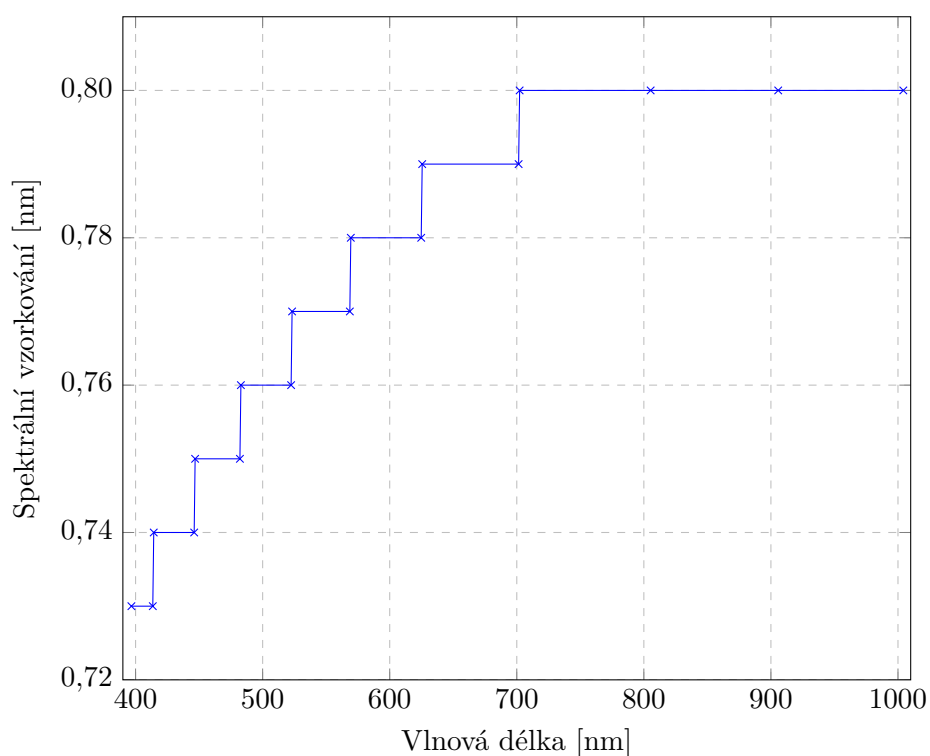
Ukázalo se, že kamera nabízí nepatrně vyšší šířku výsledných snímků, než udává výrobce. Snímky mají šířku 1776 obrazových bodů, zatímco výrobce uvádí 1775 pixelů. Hodnotu 1776 ukazuje program Matlab po načtení hyperspektrální fotky a stejnou hodnotu ukazuje také náhledový snímek v RGB před kalibrací při jeho zkoumání v průzkumníku. Ověření proběhlo na deseti různých hyperspektrálních fotkách bez použitého binningu.

9.2 Spektrální rozsah a vzorkování

Spektrálních pásem má mít kamera dle výrobce 768, nicméně vyfocené snímky mají celkem 776 pásem. Spektrální rozsah má kamera dle výrobce od 400 do 1000 nanometrů. První zachycené spektrální pásmo má vrchol na hodnotě 396,71, poslední pak na 1004,20 nanometrech. Tyto hodnoty byly zjištěny na základě pěti snímků, u všech byly stejné. Rozsah je tak nepatrně větší, než výrobce udává.

Pokud vezmeme v potaz binning, tak se dle očekávání spojí dvě sousední pásma v jedno a vrchol bude přesně mezi nimi. To lze ověřit opět z metadat. Při snímání bez binningu jsou první dva vrcholy na hodnotách 396,71 a 397,44 nanometrů. Při dvojnásobném binningu je první vrchol na 397,08 nm, což je jejich průměr. Celkově kamera při dvojnásobném binningu zachytí 388 spektrálních pásem, při čtyřnásobném 194 a osminásobném 97.

Spektrální vzorkování by podle výpočtu (vydělení rozsahu 600 nm počtem pásem 768) mělo být teoreticky stabilní na hodnotě 0,781 bez použití binningu. Pokud budeme uvažovat skutečně zjištěný mírně vyšší rozsah a vyšší počet pásem, vyjde nám 0,783. Z měření a metadat snímků nicméně vyplynulo, že vzorkování není stabilní, a zatímco v oblasti kolem 400 nm je tento parametr 0,73 nm, na konci rozsahu kamery je již 0,80 nm. Postupně tak roste, přičemž tento růst zobrazuje graf na obrázku 9.1. Spektrální vzorkování bylo porovnáno celkem na pěti různých hyperspektrálních snímcích a



Obrázek 9.1: Graf spektrálního vzorkování bez použití binningu

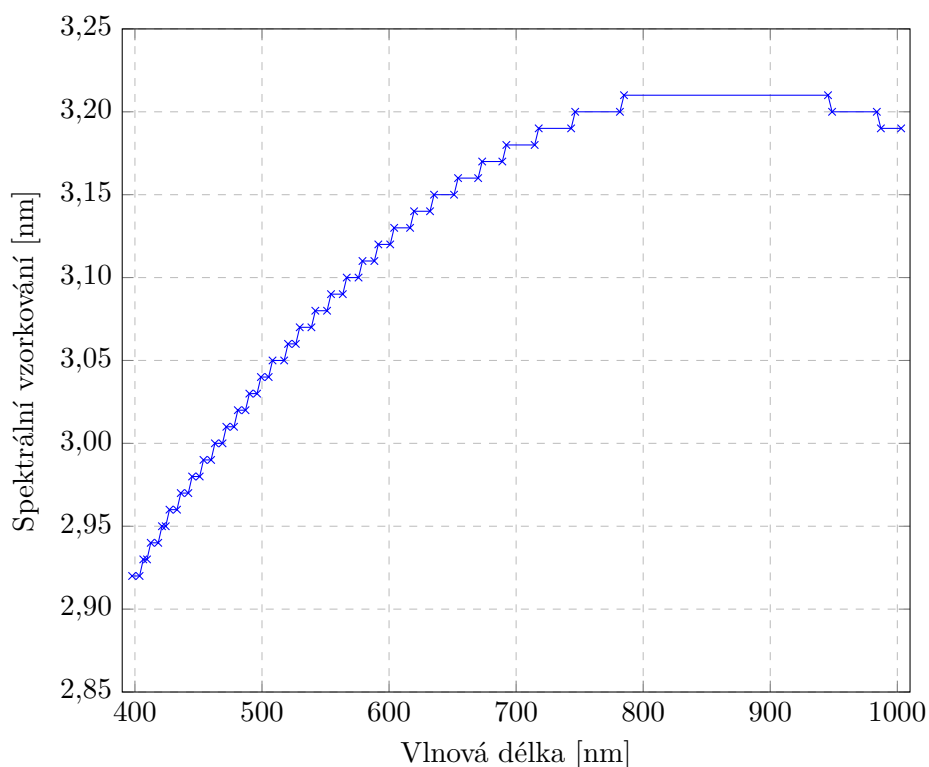
na všech jsou hodnoty identické. Pokud provedeme průměr všech zjištěných hodnot spektrálního vzorkování, dostaneme hodnotu 0,783 nm. Výrobce v parametrech kamery uvádí hodnotu 0,78, čímž je velmi blízko naší zjištěné hodnotě.

Při použití dvojnásobného binningu je teoretická hodnota spektrálního vzorkování na základě parametrů od výrobce 1,546 nm. Naměřená průměrná hodnota spektrálního vzorkování je 1,568 nm. Na počátečních vlnových délkách se pohybuje od 1,46 nm až po maximální hodnotu 1,61 nm. Ta se nachází na vlnových délkách od 811 do 917 nm. Pak začne zase klesat až do vlnové délky 1003 nm, kde má vzorkování hodnotu 1,59.

	Teoretická vypočtená hodnota	Zjištěná hodnota měření
Žádný binning	0,781 nm	0,783 nm
2x binning	1,546 nm	1,568 nm
4x binning	3,093 nm	3,134 nm
8x binning	6,186 nm	6,268 nm

Tabulka 9.1: Spektrální vzorkování a binning

Čtyřnásobný binning nabízí teoreticky hodnotu spektrálního vzorkování 3,093 nm. Naměřená průměrná hodnota činí 3,134 nm, přičemž se opět postupně



Obrázek 9.2: Graf spektrálního vzorkování s použitím 4x binningu

mění od 2,92 na počátku přes své maximum 3,21 na vlnových délkách 788 - 945 nm, až na hodnotu 3,19 na konci snímaného spektra. Osminásobný binning teoreticky nabízí 6,186nm vzorkování, zatímco průměrná hodnota z měření je 6,268 nm. Opět zde pozorujeme nejnižší hodnotu na počátku spektra (5,85 nm), maximum 6,43 na vlnových délkách 841 - 892 nm a posléze pokles na konci spektra na 6,38 nm. Všechny tyto hodnoty lze přehledně vidět v tabulce 9.1.

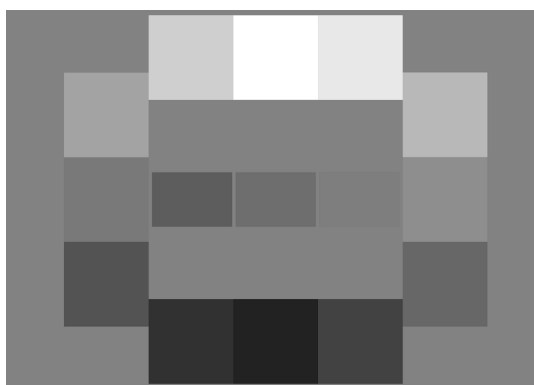
9.3 PSNR

Pro porovnání kvality snímání na jednotlivých vlnových délkách byl vybrán parametr PSNR. Jako reference byla zvolena vlnová délka 700 nm, kde se vizuálně ukazuje snímek jako téměř bez šumu a jedná se téměř o střed spektrálního rozsahu kamery. Hodnota PSNR byla vypočítána podle vztahu 9.1, kde R je nejvyšší hodnota obrazového bodu a MSE je střední kvadratická chyba mezi obrázkem, kde zjišťujeme PSNR a referencí. Ve vzorci 9.2 je MSE mezi dvěma obrázky $I_1(m, n)$ a $I_2(m, n)$, přičemž m a n jsou jednotlivé souřadnice obrazových bodů a M a N je celkový počet řádků, respektive sloupců.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{R^2}{MSE} \right) \quad (9.1)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [I_1(m, n) - I_2(m, n)]^2 \quad (9.2)$$

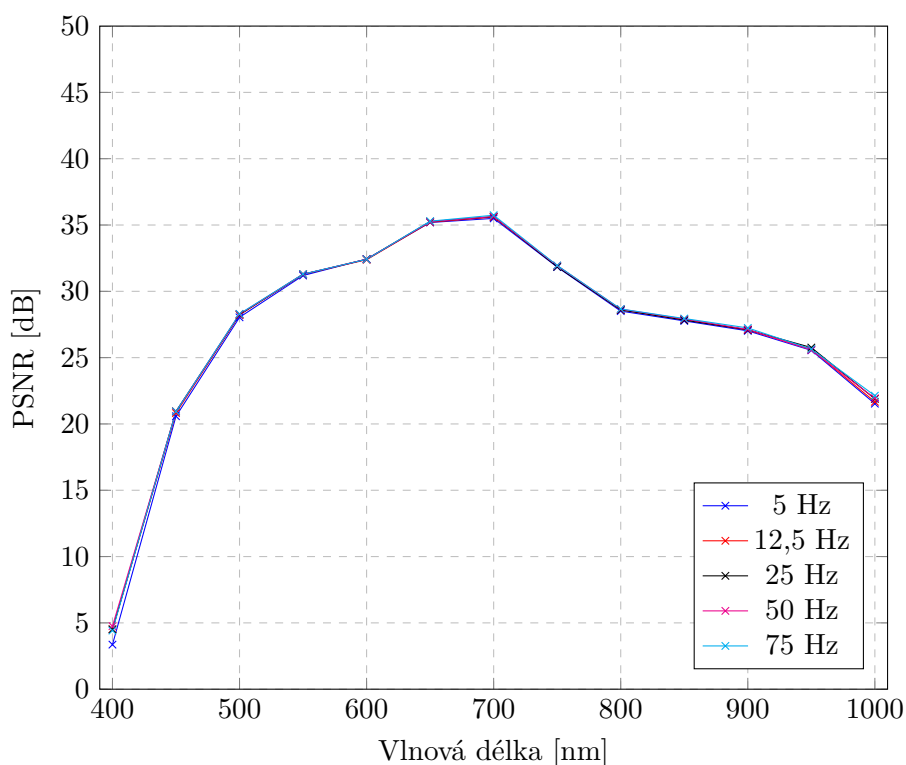
Pro zjištění nejlepšího nastavení kamery bylo PSNR počítáno na různých nastaveních frame rate a expozičního času. Toto ověření zároveň dává smysl k ověření, že nedochází při nastavení určitých frame rate či expozičního času k různým anomáliím. Snímán byl testovací obrazec s dvanácti čtverci bílé, černé a různého odstínu šedé barvy, který vychází ze standardu ISO. Pro účely snímání naší kamerou byl vyroben tento obrazec (obrázek 9.3) v programu Adobe Illustrator, jelikož není volně dostupný ke stažení ve vysokém rozlišení. Na katedře se sice nachází zakoupený obrazec, je nicméně příliš velký. Jako vzor posloužil jeho náhled v nízkém rozlišení. Obrazec byl vytištěn na karton v profesionálním papírnickví o rozměrech přesně odpovídající šířce snímaného stolku. Osvětlení obrazce bylo rovnoměrné z úhlu 45 stupňů, jak je nainstalováno na posuvném stolku a definované v kapitole 7. Při následném zpracování v programu Matlab bylo nejprve spočítáno PSNR každého čtverce vůči zmíněné vlnové délce a posléze byl proveden průměr všech dvanácti čtverců. Bílé čtverce vykazovaly v celém rozsahu nižší PSNR než čtverce tmavší.



Obrázek 9.3: Obrazec pro změření PSNR

Pro vyzkoušení vlivu nastavení různého frame rate bylo provedeno nasnímaní při nastavení 5, 12,5, 25, 50 a 75 Hz při zachování expozičního času na 10 ms. Z grafu na obrázku 9.4 vyplývá, že nastavení frame rate nemá vliv na kvalitu snímku. Křivky jsou pro všechny nastavení v podstatě identické a hodnoty PSNR se liší jen v desetinných místech a nepozorujeme žádnou anomálii při některém z nastavení. Graf vykresluje hodnoty PSNR pro snímek každých 50 nanometrů od 400 do 1000 nm. Na počátku spektrálního rozsahu kamery lze pozorovat velmi nekvalitní výstup, kdy je PSNR rovno téměř nule. Již při pohledu na snímek běžným okem je zřejmé, že se jedná o velmi výrazný šum, což výpočet PSNR potvrzuje.

Při hledání nejlepšího nastavení kamery či anomálií bylo porovnáno také různé nastavení expozičního času. Pro toto měření byl zvolen frame rate 25 Hz.

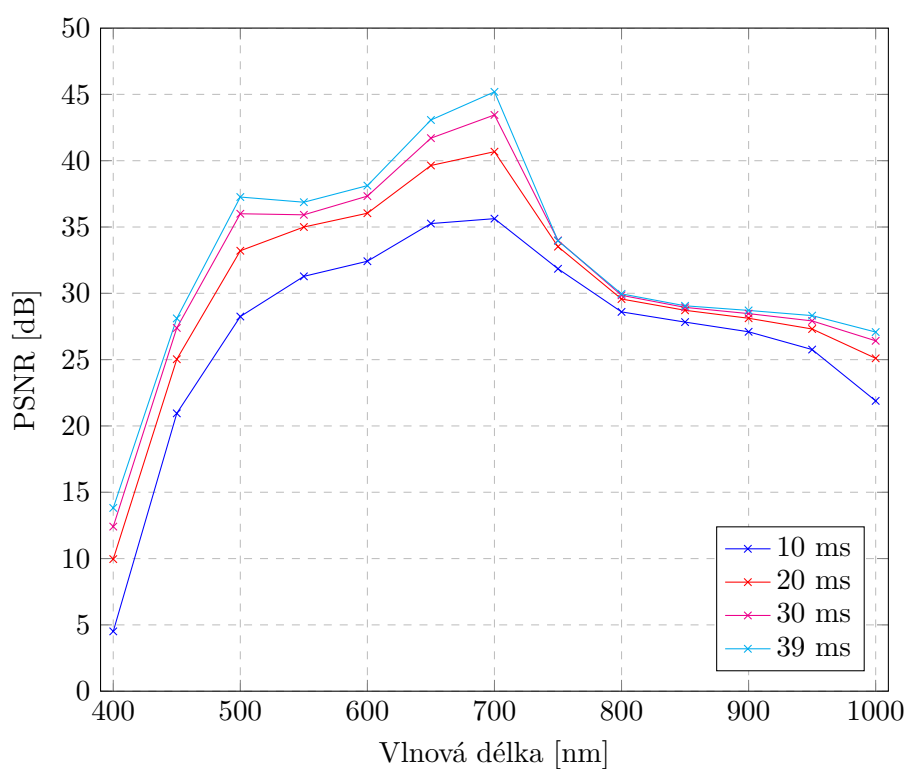


Obrázek 9.4: Graf PSNR při změně frame rate a stejném expozičním času 10 ms

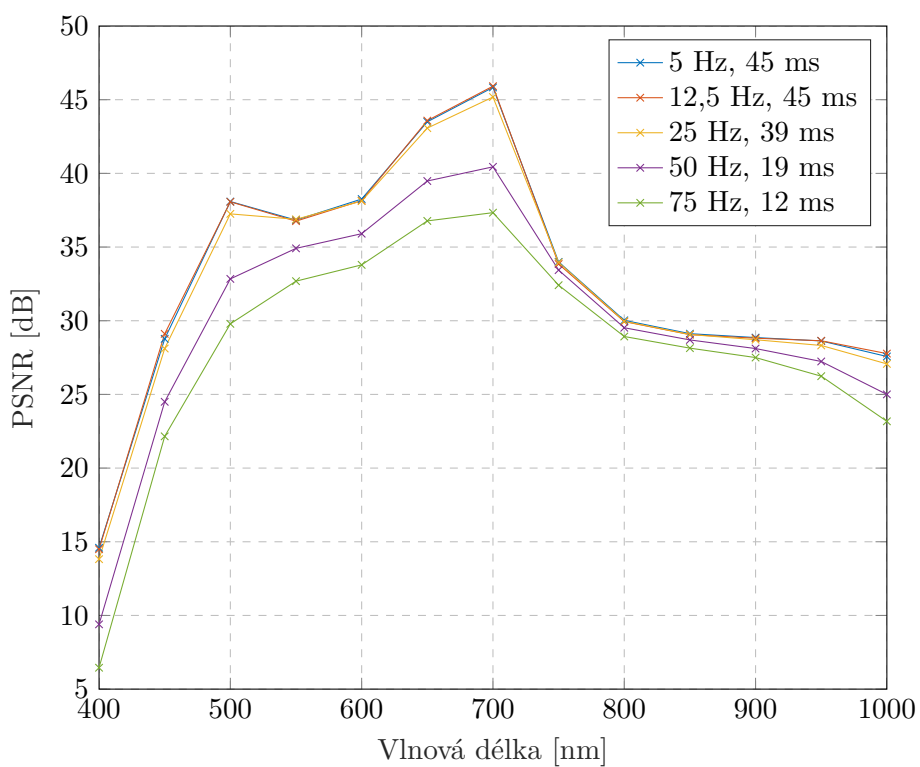
U něj je možné nastavit tento čas maximálně na 38,99 ms.

Z grafu na obrázku 9.5 vyplývá, že čím delší expoziční čas, tím vyšší bude hodnota parametru PSNR, a tedy lepší kvalita. Při snímání je tak dobré nastavit co nejdelší expoziční čas, dokud nebude možné pozorovat na snímku přepaly. Nedochozí zde také k žádnému defektu.

Graf na obrázku 9.6 popisuje měření PSNR při různém nastavení frame rate a různém expoziční času. Právě expoziční čas byl nastavený vždy na maximální možnou hodnotu, kterou program Lumo pro daný frame rate dovolil kromě frame rate 12,5 a 5 Hz. Na těchto dvou nejnižších byl zvolen expoziční čas tak, aby nebyl na snímku žádný přepal, a proto jsou omezené na 45 ms. Výsledky ukazují, že snímání s frame rate 50 a 75 Hz (a pravděpodobně vyšším vzhledem k faktu, že s rostoucím frame rate se snižuje maximální expoziční čas) není vhodné. Použití frame rate 25 Hz a nižší nabízí lepší výsledné hodnoty PSNR. Nejlepší výsledek byl dosažen při nastavení 5 nebo 12,5 Hz, přičemž nastavení s 25 Hz nabízí také velmi podobné hodnoty. Na základě faktu, že snímání s nastavením 5 Hz probíhá zhruba 10 minut, jeví se jako rozumný kompromis používat 25 Hz, které je výrazně rychlejší.



Obrázek 9.5: Graf PSNR při frame rate 25 Hz a změně expozičního času



Obrázek 9.6: Graf PSNR při změně frame rate s maximálním expozičním časem

9.4 Nereferenční hodnocení kvality

Kvalitu snímku lze hodnotit také bez použití reference (na rozdíl od PSNR). To lze provést například pomocí tří metrik:

- BRISQUE - Blind/Referenceless image spatial quality evaluator
- NIQE - Naturalness image quality evaluator
- PIQE - Perception-based image quality evaluator

BRISQUE používá ke stanovení skóre kvality strojové učení na základě metody podpurných vektorů a vlastní databáze snímků se známými vadami. NIQE funguje obdobně na modelu testovacích snímků. PIQE využívá přesný postup a algoritmy. Výhodou PIQE je také stanovená stupnice kvality od 0 do 100, kde vyšší hodnota znamená horší kvalitu. Po prozkoumání a vyzkoušení všech tří metrik na několika testovacích snímků bylo pro další vyhodnocení rozhodnuto použít pouze PIQE. Parametr BRISQUE podával výsledky nekorespondující s ostatními parametry a bez možnosti objasnění vykazoval horší kvalitu na vlnových délkách, kde jiné metriky vykazují přesný opak. NIQE nebyl zvolen z důvodu použití strojového učení, kdy není zřejmé, jak přesně metrika funguje. Zároveň jak BRISQUE, tak NIQE nemají danou stupnici hodnocení. Všechny tři metriky dokážou hodnotit černobílý nebo RGB snímek.

9.4.1 PIQE

Parametr PIQE nejprve pro každý obrazový bod vypočte koeficient s názvem Mean Subtracted Contrast Normalized (MSCN). Ten popisuje vzorec 9.3, kde $I(i,j)$ je jas, a i, j jsou souřadnice obrazových bodů. C je konstanta stanovená na 1 k prevenci nestability. V dalších dvou rovnicích 9.4 a 9.5 se nachází w , což je 2D kruhově symetrická Gaussova váhová funkce, která je vzorkovaná na 3 standardní odchylky ($K = L = 3$) a upravena na jednotkový objem. Nakonec právě transformované jasové hodnoty jsou MSCN koeficienty. [76]

$$\hat{I}(i, j) = \frac{I(i, j) - \mu(i, j)}{\sigma(i, j) + C} \quad (9.3)$$

$$\mu(i, j) = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L w_{k,l} I_{k,l}(i, j) \quad (9.4)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L w_{k,l} (I_{k,l}(i, j) - \mu(i, j))^2} \quad (9.5)$$

Posléze je snímek rozdělen na bloky v matici 16 x 16. Následně jsou identifikovány bloky, které mají vysokou prostorovou frekvenci právě na základě rozptylu koeficientu MSCN. Dále se generuje maska zmíněných bloků a vyhodnotí se zkruslení. Pomocí integrovaných kritérií se bloky rozdělí na

zkreslené a nezkraslené. Následně se pro zkreslené bloky kompresí vyhodnotí zvláště maska *noticeableArtifactsMask* a pro bloky zkreslené šumem *noiseMask*. Množství zkreslení pro daný blok se pak přiřadí ke koeficientu D_{sk} . PIQE skóre se pak spočte jako průměr skóre ve zkreslených blocích podle vzorce 9.6. V tomto vzorci je N počet bloků s vysokou prostorovou frekvencí, C_1 je konstanta stanovená na jedna pro prevenci nestability, když se blíží jmenovatel nule. [76]

$$PIQE = \frac{\left(\sum_{k=1}^N D_{sk} \right) + C_1}{N + C_1} \quad (9.6)$$

Skóre má stupnici od 0 do 100, kde tabulka 9.2 popisuje kvalitu na základě dané hodnoty. [77]

Škála kvality	Rozsah skóre
Excelentní (Excellent)	0 - 20
Dobrá (Good)	21 - 35
Přiměřená (Fair)	36 - 50
Horší (Poor)	51 - 80
Špatná (Bad)	81 - 100

Tabulka 9.2: Škála kvality PIQE [77]

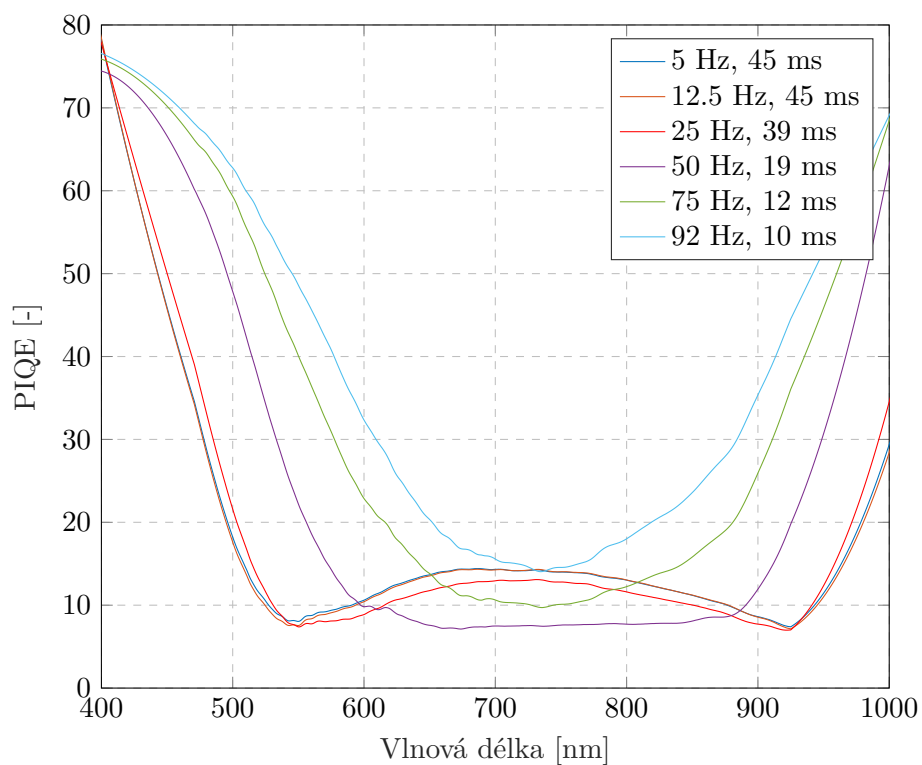
Vyhodnocení proběhlo v programu Matlab, který umožňuje počítat PIQE pomocí vestavěné funkce. Pro změření PIQE byl použit běžný snímek jablek (obrázek 9.7), nikoliv umělý obrazec, který by nebyl tak vhodný. Pro účely vyhodnocení skript nejprve načte snímek, provede jeho kalibraci a následně pro každou zaznamenanou vlnovou délku vypočítá PIQE. Následně je na grafu vykreslena jeho hodnota právě v závislosti na vlnové délce a porovnávána s různým nastavením kamery. Křivky byly před vykreslením vyhlazeny pomocí filtru Savitzky-Golay podle kvadratického polynomu s nastavením velikosti okna 200. Bez vyhlazení vykazovali křivky mírnou oscilaci především v počátku spektrálního pásma. Stejně jako v jednom případě měření PSNR je zde provedeno porovnání při různém nastavení frame rate s maximálním možným expozičním čase bez přepalů. Přepaly se objevily opět pouze u frame rate 5 a 12,5 Hz, zde je tak expoziční čas limitován na 45 ms.

Graf na obrázku 9.8 ukazuje podobný výsledek jako u PSNR. Kamera na vlnových délkách od počátku 400 nm do zhruba 450 nm vykazuje při všech nastavení nejhorší možnou kvalitu s označením špatná. Postupně se nicméně zlepšuje a platí fakt, že čímž vyšší frame rate a zároveň kratší expoziční čas, tím se kvalita zlepšuje pomaleji. Při 92 Hz (maximální použitelný frame rate kamery) a 10ms času je kvalita teprve od vlnové délky zhruba 550 nm označena jako přiměřená. Naopak křivka rychleji roste ke konci spektrálního rozsahu a od zhruba 950 nm je opět skóre nad 51, čímž je kvalita vyhodnocena jako horší.



Obrázek 9.7: Náhled snímku v RGB pro změření PIQE

Nastavení jakéhokoliv frame rate s expozičním časem kolem 40 ms nabízí nejvyšší kvalitu s označením excelentní v nejširším spektrálním rozsahu od 500 do 980 nm. Frame rate 50 Hz s expozičním časem 19 ms nabízí sice nejlepší (tedy nejnižší) hodnoty PIQE, ale pouze v omezenějším spektrálním rozsahu (540 - 940 nm) oproti nižším frame rate.



Obrázek 9.8: Graf PIQE při změně frame rate s maximálním expozičním časem

9.5 Modulační přenosová funkce

Modulační přenosová funkce neboli MTF definuje nejmenší rozpoznatelnou prostorovou frekvenci systému neboli oblast, kdy už není možné čáry na obrazci od sebe rozpoznat. MTF přímo vychází z Optické přenosové funkce neboli OTF (Optical Transfer Function), přičemž se jedná o modul této funkce. OTF je přenosová funkce H vztažená na optické systémy. MTF se definuje podle vzorce 9.7, přičemž se jedná o poměr kontrastu $C(f)$ (neboli modulační kontrast) ku kontrastu $C(0)$. Ve výsledku tak pozorujeme úbytek kontrastu. [78]

$$MTF(f) = \frac{C(f)}{C(0)} \quad (9.7)$$

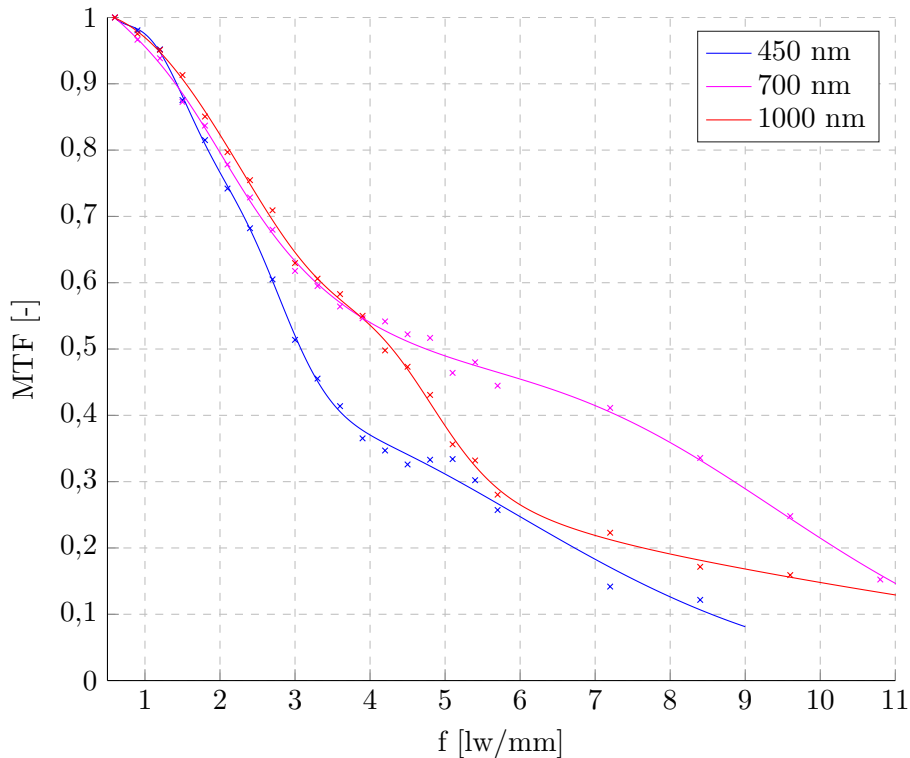
$$C(0) = \frac{L_W - L_B}{L_W + L_B} \quad (9.8)$$

$$C(f) = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (9.9)$$

Pro zjištění MTF je nutné vyfotit kamerou obrazec ISO:12233, přičemž pro další zpracování je klíčová jeho oblast pojmenovaná P1. Ta ukazuje prostorovou frekvenci od 100 do 1000 line width/ picture height (lw/ph), neboli šířku čáry ku výšce obrazce. Pro podrobnější měření MTF byl využit druhý obrazec, který se liší pouze ve vyšší prostorové frekvenci od 1200 do 3000 lw/ph. Prostorová frekvence byla přepočtena na vhodnější jednotku line width/ milimeter (lw/mm), neboli počet čar na jeden milimetr. Při přepočítání byla využita tabulka 8.2, která ukazuje, kolik pixelů je na 1 mm. Na nejnižší frekvenci 100 lw/ph byla pomocí Matlabu zjištěna šířka jedné čáry (14 pixelů). Vydělením 8,55 a 14 pixelů dostaneme hodnotu 0,61 lw/mm. Hodnota 200 lw/ph pak odpovídá v našem případě 1,2 lw/mm a tak dále.

Pro účely zobrazení MTF byly data z obou obrazců spojena do jednoho grafu na obrázku 9.9. Jelikož hyperspektrální kamera Specim PFD4K-65-V10E snímá liniově a nemá tedy žádný poměr stran při snímání, obrazec byl nasnímán jako by měla kamera poměr 1:1. Jelikož je naše kamera pevně umístěna trvale na stojanu tak, aby snímala vždy celý posuvný stolek, je její vzdálenost od něj považována za konstantní (300 mm). Při měření byl využit jediný dostupný objektiv OLE23, který fakulta ke kameře má. Vzhledem k sestavení a pevnému umístění pravděpodobně nebude v budoucnu ani třeba objektiv měnit za jiný.

Při zpracování byly vybrány tři vlnové délky, na kterých byla MTF vykreslena - na počátku spektrálního rozsahu 450 nm, uprostřed 700 nm a na konci 1000 nm. Úplný počátek na vlnové délce 400 nm nebyl zvolen, jelikož snímky zde trpí velmi silným šumem, což znemožnilo vykreslení grafu.



Obrázek 9.9: MTF kamery Specim PFD4K-65-V10E na třech vlnových délkách

Graf na obrázku 9.9 nám ukazuje stabilní pokles a vykreslení prostorové frekvence pro vlnovou délku 700 nm až do hodnoty 11 lw/mm. Pak lze na snímku pozorovat aliasing. Osa y zobrazuje normalizovanou modulaci. Poté již bylo možné pozorovat nekorektní stoupání vlivem aliasingu, který lze pozorovat i okem při přiblížení snímku obrazce. Tyto nekorektní data byla oříznuta a nejsou zahrnuta v grafu. Nejhorší křivka MTF vyšla na vlnové délce 450 nm, což je způsobeno již zmíněným šumem na snímku. Nejméně šumu lze pozorovat na vlnové délce 700 nm, což způsobuje nejlepší výsledek.

9.6 Velikost snímků

Při hyperspektrálním snímání je velikost výsledného souboru důležitá vzhledem k dalšímu zpracování. Pracovat se snímkem o velikosti v řádech jednotek gigabajtů, což je zcela běžná velikost, je velmi náročné na hardware počítače. Proto je dobré velikost souboru snížit například použitím binningu, čímž bude ve výsledku snazší a rychlejší snímek zpracovávat a provádět na něm další analýzu. Pro načtení 7 GB snímku do programu Matlab pomocí funkce

enviread je zapotřebí počítač minimálně s 32 GB operační paměti (RAM). Při vyzkoušení na systému se 16 GB paměti program vypíše chybovou hlášku *Out of memory*, kde požaduje minimálně 26,9 GB. Pro načtení menšího snímku o velikosti kolem 3 GB stačí počítač s 16 GB RAM.

V rámci měření bylo zkoumáno, jaké parametry mají vliv na výslednou velikost jednoho hyperspektrálního snímku. Při nafocení vždy stejného objektu s postupně měnícím se frame rate od 6 do 100 Hz bylo zjištěno, že tento parametr nemá významný vliv na velikost. Výsledný snímek měl vždy od 2,50 do 2,59 GB. Naopak velký vliv má nastavení binnigu, kdy se sníží výsledné rozlišení.

Podle webové stránky výrobce kamery [79] lze velikost výsledného snímku tzv. data cube spočítat podle vzorce 9.10. $M \times N$ jsou obrazové body a B jsou spektrální pásma. Snímek z kamery s prostorovým rozlišením 667×320 a 256 spektrálními pásmy tak bude mít teoreticky velikost 109 281 280 bajtů. Při porovnání vypočtené hodnoty a reálné hodnoty byl tento vzorec ověřen. Námí vyfocený snímek s prostorovým rozlišením 1776×977 a celkem 776 spektrálními pásmy má mít podle vzorce 9.10 velikost 2 692 955 904 bajtů. Reálná velikost na disku zjištěná v průzkumníku Windows je úplně stejná a tedy 2 692 955 904 bajtů, což je v přepočtu 2,508 GB. Lze tak snadno předpovědět výslednou velikost.

$$Velikost = M \cdot N \cdot B \cdot 2 \quad (9.10)$$

Pokud vezmeme v potaz binning, tak v případě 2x prostorové binningu (spatial binning) je výsledná velikost 4x menší. Spektrální binning sníží velikost dvojnásobně. Proto pokud je použit 2x prostorový binning a 2x spektrální binning, má náš výsledný soubor osmkrát menší velikost a to 320 MB (335 585 856 bajtů). Pokud je použit 4x prostorový a 4x spektrální binning, má výsledný soubor opět osmkrát menší velikost a to 39,9 MB (41 862 096 bajtů).

9.7 Porovnání se spektrometrem

Pro ověření měření spektrální reflektance bylo provedeno porovnání s běžným spektrometrem. Jako spektrometr bylo použito zařízení Avantes AvaSpec 3648 s optickým vláknem. Pro záznam je připojen do počítače přes USB 2.0 a ovládání a ukládání informací probíhá přes program AvaSoft. Pro další zpracování byl využit export do formátu JCAMP, který lze importovat do programu Matlab, kde proběhlo následné zpracování a porovnání s hyperspektrálním snímekem a jeho spektrální reflektancí.

Pro porovnání byl zvolen displej mobilního telefonu. Pro nasnímání byly vytvořeny tři obrázky barev modrá, zelená a červená. Pro každý byla zvolena barva, která má nulové složky dvou nevyskytujících se barev. Modrá se tak skládá jen z modré, přičemž červená a zelená není na obrázku vůbec

zastoupena. Jako mobilní telefon bylo zvoleno dostupné zařízení - Apple iPhone XS, který má AMOLED displej. Hyperspektrální kamerou byly nasnímany celkem tři snímky vždy se zobrazenou modrou, červenou nebo zelenou barvou. Spektrometrem byly postupně nasnímané všechny barvy vždy ze středu displeje. Při zpracování hyperspektrálních dat bylo vzato 50x50 bodů ze středu displeje, ze kterých se spočítal průměr. Spektrální reflektance ze spektrometru byla nepatrně vyhlazena filtrem Savitzky–Golay s oknem 50 a kvadratickým polynomem. Obě reflektance byly normalizovány na maximální hodnotu jedna, aby na sebe grafy přesně seděly.

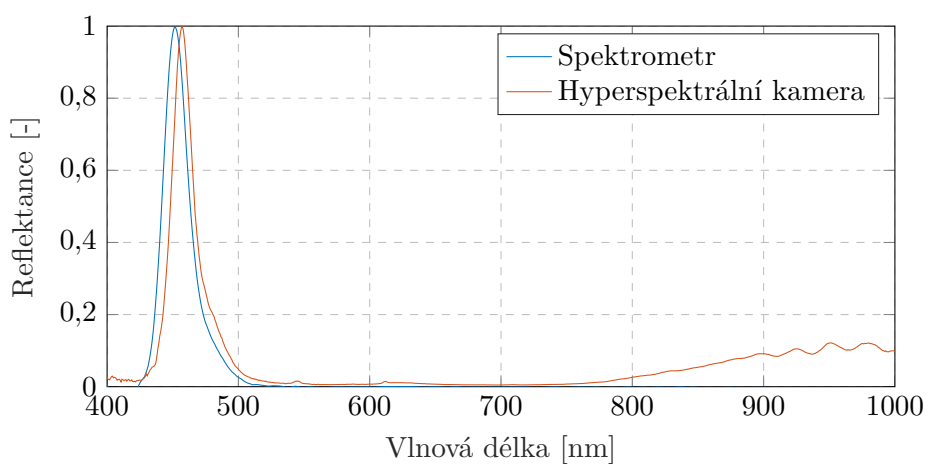
Tabulka 9.3 zobrazuje vrchol křivky spektrální reflektance ve srovnání spektrometru a hyperspektrální kamery na zařízení iPhone XS. Z měření vyplynulo, že vrchol je na hyperspektrální kameře posunutý o 1 - 6 nanometrů dle zobrazené barvy. Graf na obrázku 9.10 zobrazuje celou naměřenou spektrální reflektanci pro modrou barvu. Křivky se téměř shodují. Zajímavostí je postupný nárůst v infračerveném spektru od 800 nm a výše na hyperspektrální kameře. Pro další barvy je tento nárůst intenzivnější, jelikož zaznamenaná intenzita byla menší a proběhlo normování (zvětšení) na hodnotu jedna. Po důkladném zkoumání bylo zjištěno, že za tento nárůst může osvětlení vzorku. To je vždy kalibrováno a odečteno v rámci procesu kalibrace. Bílá reference je nicméně matná, a tak není možné kompenzovat odrazy z lesklé plochy povrchu krycího skla displeje na telefonu. Při zakrytí osvětlení zmíněné záření v infračervené části zmizelo, čímž byl tento vliv potvrzen.

Tento nárůst v počátku infračerveného spektra je také částečně způsoben faktem, že iPhone XS má infračervený senzor pro identifikaci obličeje FaceID. Bylo ověřeno pomocí spektrometru, že i při běžném používání telefonu (tedy i při snímání se zobrazeným obrázkem barvy) senzor v pravidelných intervalech několikrát za sekundu vyzářuje velmi intenzivní záření na vlnové délce kolem 950 nanometrů.

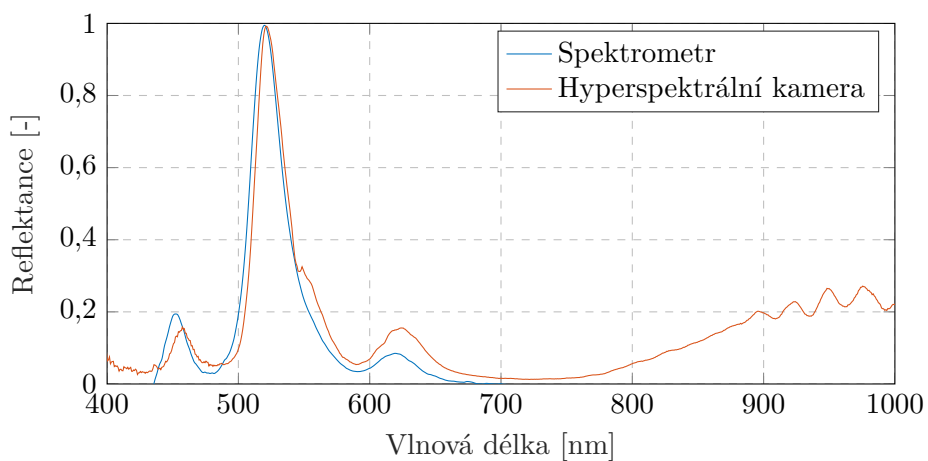
iPhone XS	Spektrometr	Hyperspektrální kamera
Modrá	451,6 nm	457,3 nm
Zelená	519,8 nm	520,9 nm
Červená	619,7 nm	624,0 nm

Tabulka 9.3: Spektrometr vs hyperspektrální kamera, špička

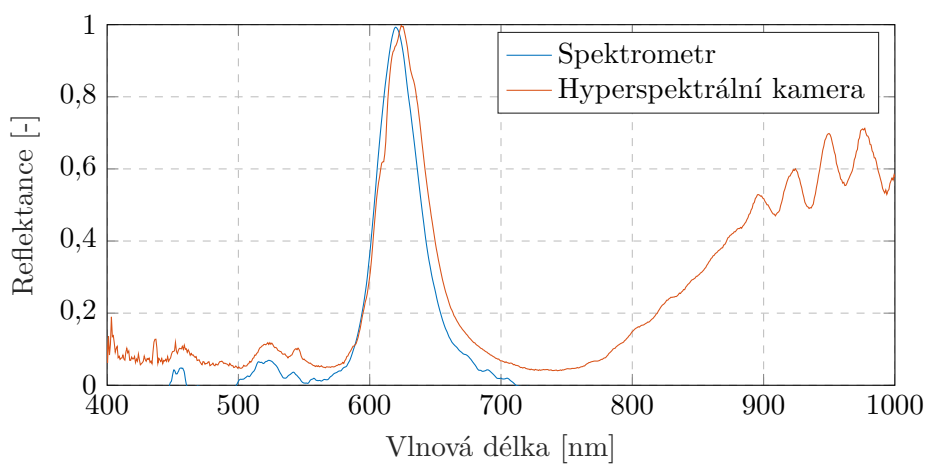
Graf na obrázku 9.11 ukazuje průběh pro zelenou barvu a graf na obrázku 9.12 pro červenou. Lze konstatovat, že hlavní i vedlejší laloky zobrazené barvy se opět téměř neliší při porovnání spektrometru a hyperspektrální kamery.



Obrázek 9.10: Spektrální reflektance Apple iPhone XS - modrá



Obrázek 9.11: Spektrální reflektance Apple iPhone XS - zelená



Obrázek 9.12: Spektrální reflektance Apple iPhone XS - červená

Kapitola 10

Algoritmy a software

10.1 Kalibrace

Základem hyperspektrálního snímání je provedení kalibrace. Při snímání je třeba vyfotit kromě samotného snímku také bílou a černou referenci. Při zpracování dat je posléze nutné jako první krok provést pomocí vzorce 10.1 kalibraci. Nasnímané data jsou I_S , černá reference je I_D a bílá reference je I_W . Výsledná reflektance po kalibraci je R . Pokud chceme reflektanci v procentech, je možné vynásobit výsledek stovkou. [37] Tato kalibrace byla provedena při každém vykreslení spektrální reflektance v této práci.

$$R = \frac{I_S - I_D}{I_W - I_D} \quad (10.1)$$

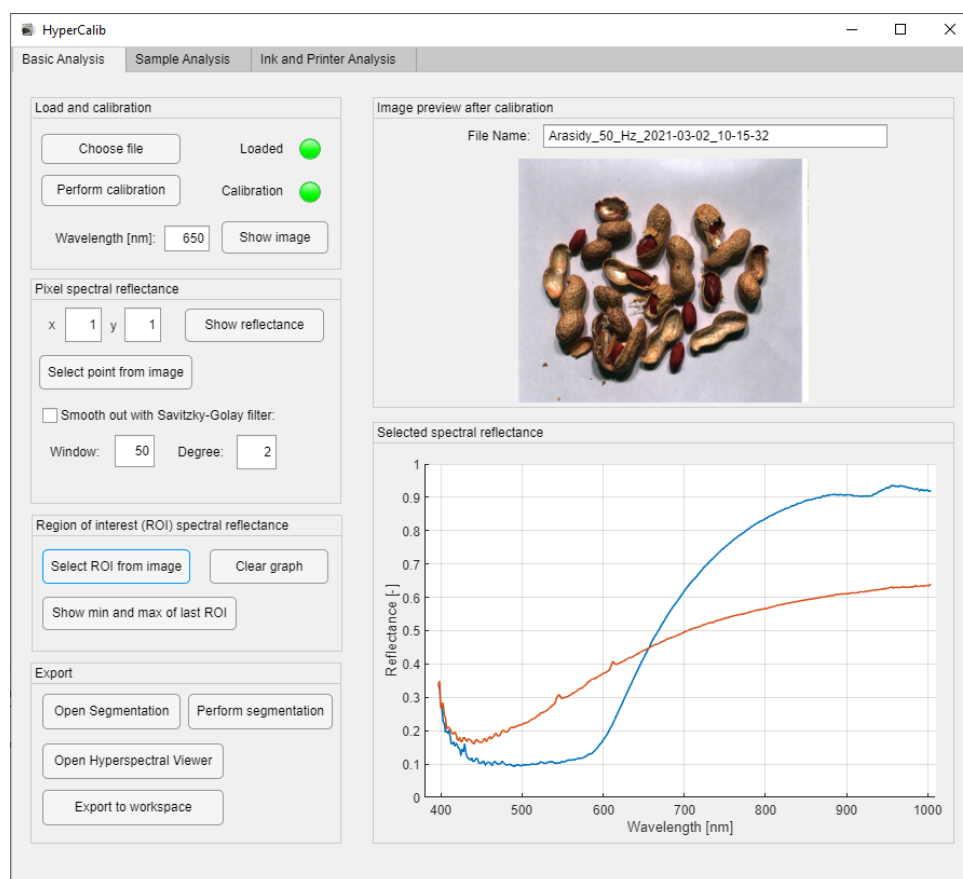
10.2 Vlastní program HyperCalib

V rámci diplomové práce byl vytvořen program v Matlabu verze R2021a, který byl pojmenován HyperCalib. Jedná se o nástroj s uživatelským rozhraním umožňující provést jednoduše kalibraci podle vzorce 10.1, prvotní analýzu hyperspektrálního snímku a spektrální analýzu vzorků. Program je optimalizován pro práci s kamerou Specim PFD4K-65-V10E a dokáže pracovat se snímkem bez binningu nebo s využitím 2x binningu. Hlavní rozhraní je rozděleno na tři záložky - základní analýza, analýza vzorků a analýza tiskárny a inkoustu. Program je v jazyce angličtina pro možné budoucí využití i bez znalosti češtiny. Pro plnou funkčnost je třeba mít nainstalovaný Matlab Image Processing Toolbox s doplňkem Hyperspectral Image Processing.

10.2.1 Základní analýza

První tlačítko slouží k nahrání hyperspektrálního snímku. Po kliknutí stačí zvolit pouze hlavní soubor s daty s příponou *.raw*. Bílá a černá reference se nahraje automaticky spolu s tímto souborem. Využívá se zde plugin *enviread*. Další tlačítko provede kalibraci snímku, kde se na pozadí využívá skript kalibrace od katedry radioelektroniky, který vychází z vzorce 10.1. Pro

přehled jsou zde indikátory stavu. Při kalibraci se zobrazí okno s indikací jejího počítání, přičemž tlačítko zrušit umožňuje předčasně proces ukončit, jelikož kalibrace může trvat třeba i půl hodiny v závislosti na výkonu počítače. Po kalibraci se zobrazí v pravé části nahoře náhled snímku v RGB. Je také možné si zobrazit konkrétní vlnovou délku hned pod tlačítkem pro provedení kalibrace. Zde je možné volit rozsah od 400 do 1000 nm.



Obrázek 10.1: Program HyperCalib

Sekce spektrální reflektance pixelu umožňuje zadat přímo obrazový bod a zobrazit jeho reflektanci. Je také možné vybrat bod ze zobrazeného obrázku pomocí tlačítka *Select point from image*. Volitelně lze použít vyhlazení reflektance pomocí filtru Savitzky Golay, přičemž parametry velikosti okna a stupně polynomu si lze ručně nastavit. Sekce spektrální reflektance oblasti umožňuje vybrat na obrázku větší oblast, kde se spočítá průměr její reflektance a zobrazí se na grafu přímo v rozhraní programu. Je možné takto vykreslit více křivek a také graf přímo uložit. Tlačítko *Clear graph* odstraní všechny zobrazené křivky. Lze si také zobrazit minimum a maximum poslední oblasti v grafu přímo v rozhraní programu.

HyperCalib umí otevřít nástroj pro segmentaci *Image Segmenter* integro-

vaný v Matlabu. Zobrazí zde právě otevřený snímek. Po provedení segmentace je nutné exportovat binární masku (BW) a náhled ($maskedImage$) do workspace Matlabu pomocí tlačítka export. V HyperCalibu je při stisku tlačítka *Perform segmentation* maska odečtena od hyperspektrálního snímku, čímž se zbavíme nežádoucího pozadí, na kterém byl snímán vzorek skenován. Program umí také otevřít vestavěný Hyperspectral Viewer, který je integrovaný v Hyperspectral toolboxu. HyperCalib umožňuje export do workspace Matlabu, aby bylo možné se snímkem dále pracovat. Po kliknutí na tlačítko pro export je možné exportovat snímek po kalibraci, snímek po kalibraci a segmentaci, bílou a černou referenci, vlnovou délku, snímek před kalibrací, poslední spektrální reflektanci oblasti a všechny reflektance vynesené v grafu.

10.2.2 Analýza vzorků

Pro odlišení materiálu na základě spektrální reflektance byla přidána záložka Sample Analysis. Před touto analýzou je nutné nejprve načíst snímek, kalibrovat jej a provést segmentaci. Po těchto krocích na první záložce můžeme buď vybrat ručně endmembers anebo je načíst ze souboru s příponou *.mat*. Můžeme zvolit mezi jedním až šesti endmembers, které se pak automaticky vykreslí na grafu v rozhraní programu.

Pro určení spektrální podobnosti s endmembers jsou integrované celkem tři algoritmy - SID, SAM a SIDSAM. První algoritmus využívá techniku spektrální divergence informací (v angličtině Spectral Information Divergence, zkratkou SID). Jeho výpočet je znázorněn na vzorci 10.2, přičemž jednotlivé distribuční hodnoty pro referenční spektrum r_i počítá vzorec 10.3 a pro testované spektrum t_i vzorec 10.4. [80, 81]

$$SID = \sum_{i=1}^C p_i \log\left(\frac{p_i}{q_i}\right) + \sum_{i=1}^C q_i \log\left(\frac{q_i}{p_i}\right) \quad (10.2)$$

$$q_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^C r_i} \quad (10.3)$$

$$p_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^C t_i} \quad (10.4)$$

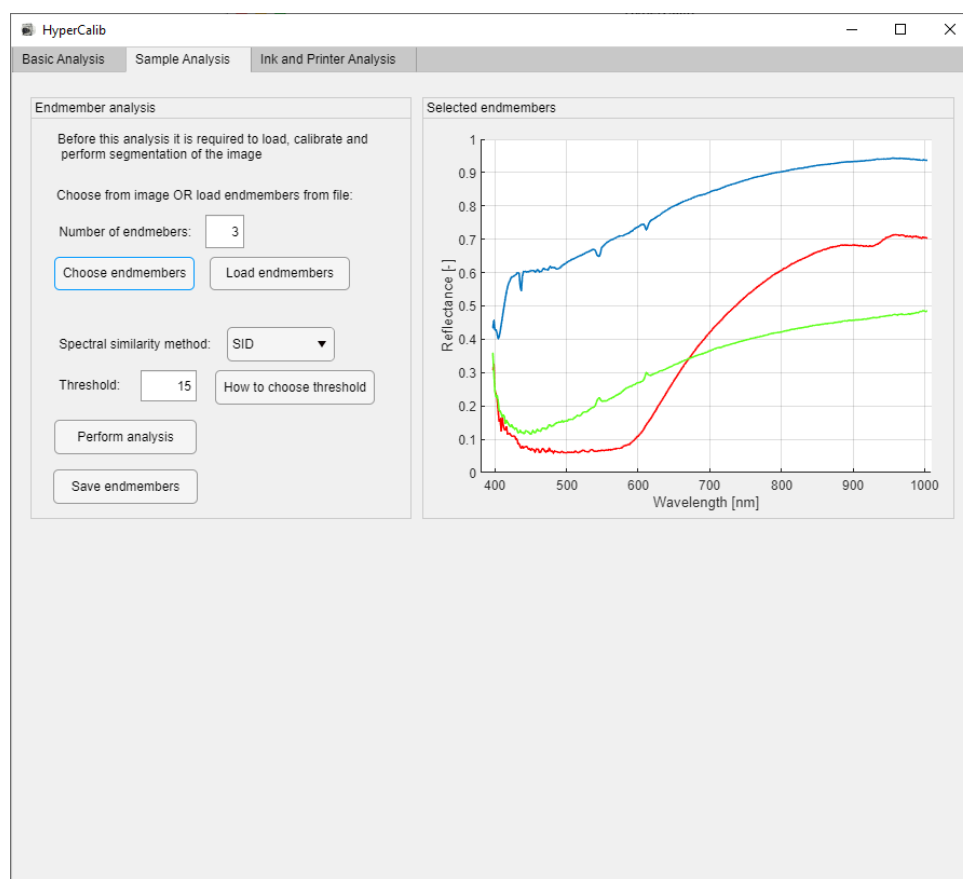
Algoritmus SAM (Spectral Angle Mapper) je znázorněn na vzorci 10.5, kde je porovnáváno spektrum t s referenčním r , přičemž C je délka spektra. SAM skóre je potom úhel α . Algoritmus porovnává spektrální reflektanci na základě geometrické charakteristiky, přičemž není citlivý na intenzitu osvětlení. Jedná se zároveň o nejstarší algoritmus z vybraných do programu. [82, 83]

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^C t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^C t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^C r_i^2}} \quad (10.5)$$

SIDSAM je pak kombinace obou předchozích metod, kdy se podle vzorce 10.6 násobí mezi sebou, čímž dostaneme výsledné skóre. V implementovaném algoritmu SIDSAM je pro výpočet skóre vzorci využita funkce tangens, ačkoliv existuje i varianta s funkcí sinus. U všech algoritmů znamená nižší vypočtené skóre vyšší podobnost. [84, 85]

$$SIDSAM = SID \times \tan(\alpha) \quad (10.6)$$

Po výběru algoritmu se na jeho základě pro každý obrazový bod spočítá skóre podobnosti s ručně zvolenými endmembers. Ještě před spuštěním analýzy je nutné nastavit práh (threshold). Jelikož každý algoritmus stanovuje jinou velikost skóre podobnosti, byla integrována nápověda ve vedlejším tlačítku. Zde jsou doporučeny hodnoty pro vhodné rozpoznání, které byly empiricky určeny. Následně po kliknutí na tlačítko pro provedení analýzy je vykreslen hyperspektrální obrázek, kde jsou barevně zvýrazněny endmembers. Barvy zde odpovídají barvám na grafu endmemberů v rozhraní programu. Program byl následně otestován na několika vzorcích, výsledek metody SID při dvou endmemberech lze vidět například v kapitole 11.3 na obrázku 11.13. Rozhraní programu na záložce analýza vzorků lze vidět na obrázku 10.2.



Obrázek 10.2: Program HyperCalib - záložka analýzy vzorků

10.2.3 Analýza inkoustu a tiskárny

Na základě kapitoly 11.2 byla do programu integrovaná část na analýzu použitého inkoustu na fotografii a odhad, na jaké tiskárně byla pořízena. Obrázek 10.3 zobrazuje tuto část programu. Databáze, kterou je nutné tlačítkem načíst ze souboru, nabízí v základu integrované reflektance dvou tiskáren s různými inkousty, které jsou popsány v kapitole 11.2. Jako reflektance se využívá průměr červeně zvýrazněné oblasti obrázku 11.5, která se ukázala jako vhodná reference při analýze. Databáze byla vytvořena přímo v Matlabu jako struktura. Po jejím načtení se zobrazí reflektance na grafu v rozhraní a údaje o vzorcích. Lze tak vidět název tiskárny, použitý papír, inkoust a případně také poznámku. Následně si lze vybrat metodu pro výpočet spektrální podobnosti.

Jako výchozí je nastavena funkce Jeffries Matusita-Spectral Angle Mapper (JMSAM) v Matlabu. Tato funkce počítá podobnost spektra a je popsána postupně na vzorcích níže. Rovnice 10.7 obsahuje koeficient B , což je Bhattacharyyova vzdálenost. Tu určuje rovnice 10.8, kde μ_r je střední hodnota referenčního spektra a μ_t testovacího. Ve vzorci dále máme a σ_r , což je kovariance referenčního spektra a dále σ_t , což je naopak kovariance testovacího spektra. Celkové skóre JMSAM se pak vypočte na základě vzorce 10.9, kde se vynásobí $JM_{distance}$ spolu s α ze vzorce 10.5. [86, 87]

$$JM_{distance} = 2(1 - e^{-B}) \quad (10.7)$$

$$B = \frac{1}{8}(\mu_t - \mu_r)^T \left[\frac{\sigma_t + \sigma_r}{2} \right]^{-1} (\mu_t - \mu_r) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{|\frac{\sigma_t + \sigma_r}{2}|}{\sqrt{|\sigma_t| |\sigma_r|}} \right] \quad (10.8)$$

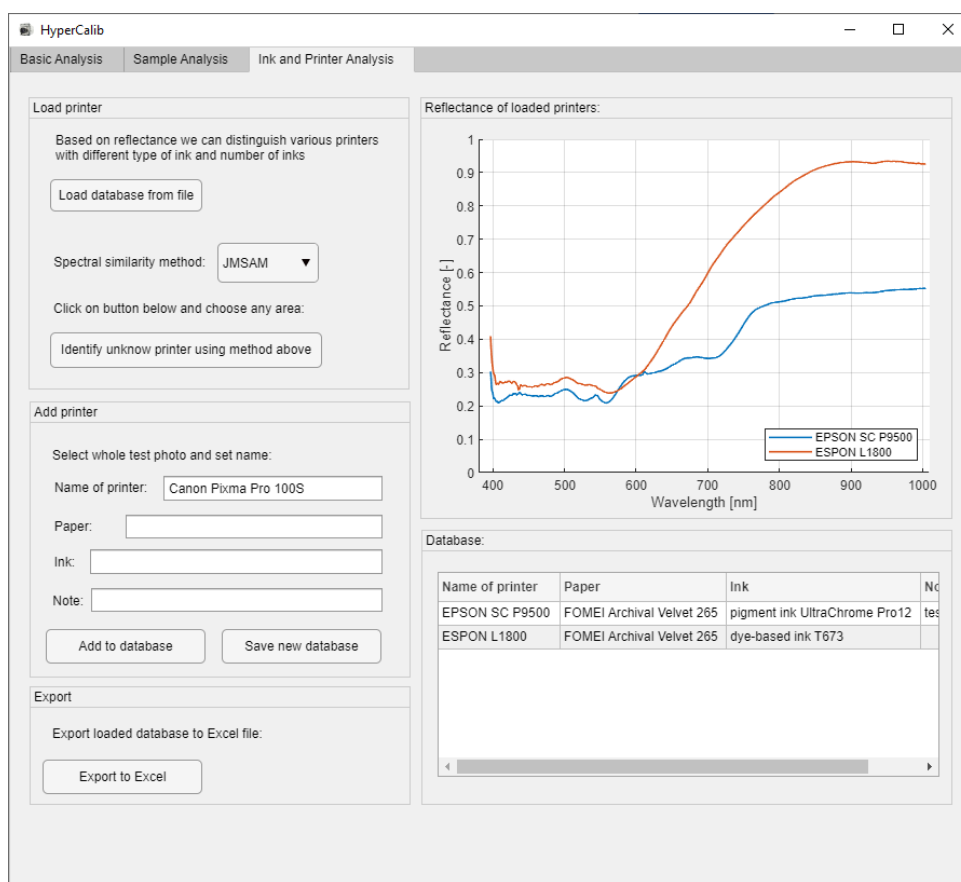
$$JMSAM = JM_{distance} \times \tan(\alpha) \quad (10.9)$$

Dále je možné vybrat metodu SAM, SID a SIDSAM, které byly popsány v předchozích odstavcích. Při kliknutí na tlačítko pro identifikaci inkoustu a tiskárny je nejprve nutné vybrat libovolnou oblast na fotce, která se zprůměruje v jednu reflektanci a ta se pak pomocí zvoleného algoritmu postupně porovná s každou reflektancí v databázi a vypočítá skóre podobnosti. Nejnižší skóre znamená nejvyšší podobnost. Výsledky analýzy s odhadem použité tiskárny včetně všech skóre jsou vypsány v dialogovém okně. Algoritmus zjištění inkoustu a tiskárny není optimalizován na jednodílnou barevnou plochu, vždy je třeba vybrat reálnou část fotografie, nikoliv jen jeden čtverec testovacího obrazce. Čím větší část snímku je vybrána, tím lépe.

Pro rozšíření databáze lze v programu přidat další tiskárnu. Po vyplnění názvu tiskárny, papíru, inkoustu a poznámky do textových polí se při kliknutí na přidat do databáze otevře okno pro výběr oblasti na testovacím snímku.

Je třeba označit červeně vyznačenou oblast na testovací fotce (obrázek 11.5) mimo jednolitě terče a barevné plochy. Následně je již možné s novou tiskárnou provádět porovnání a identifikaci skrz sekci programu výše.

Aktualizovanou databázi o nové vzorky lze uložit do souboru *.mat* a při dalším spuštění použít tuto novou databázi. Zároveň byla do programu implementována funkce na export do Excelu. Po kliknutí na tlačítko k tomuto uložení si uživatel vybere název a místo uložení. Následně lze s daty reflektance dále pracovat v Excelu. Při exportu se do tabulky přidá vektor s vlnovou délkou.



Obrázek 10.3: Program HyperCalib - záložka analýzy inkoustu a tiskárny

Kapitola 11

Testovací vzorky

Na základě kapitoly 7.1, kde je definována vhodná aplikace kamery Specim PFD4K-65-V10E, bylo provedeno testování různých možných vzorků. Po nasnímání byla vždy provedena kalibrace a posléze se zkoumala spektrální reflektance daných vzorků. Vybrané vzorky byly otestovány vlastním programem HyperCalib s integrovanými algoritmy spektrální podobnosti a také další algoritmy pro analýzu hyperspektrálních dat.

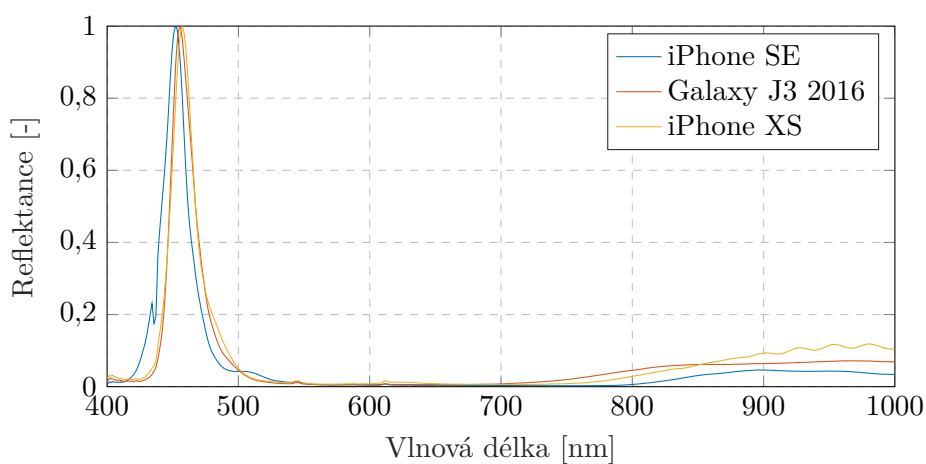
11.1 Displeje

V kapitole 9.7 bylo popsáno porovnání spektrální reflektance spektrometru a hyperspektrální kamery. Bylo provedeno také využití pouze hyperspektrální kamery, kde lze porovnat právě spektrální reflektanci různých displejů, přičemž lze uvažovat celou plochu displeje anebo naopak porovnat rovnoměrnost různých částí jednoho displeje.

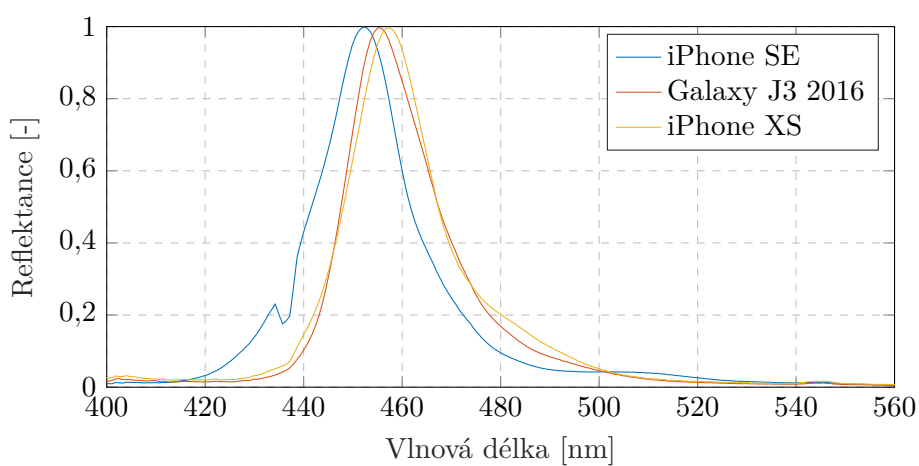
Graf na obrázku 11.1 ukazuje čistou spektrální reflektanci displeje tří telefonů - Apple iPhone SE (2016), Samsung Galaxy J3 (2016) a Apple iPhone XS se zobrazenou modrou barvou po celé ploše. Pro zpracování byl vybrán celý displej telefonu a reflektance tak byla zprůměrována v jednu křivku celé plochy. Jak ukazují výsledky, spektrální reflektance Galaxy J3 (2016) a iPhone XS je téměř shodná, jelikož oba tyto modely používají zobrazovací panel typu AMOLED. Na rozdíl od nich iPhone SE nabízí LCD IPS panel.

11.1.1 Rovnoměrnost

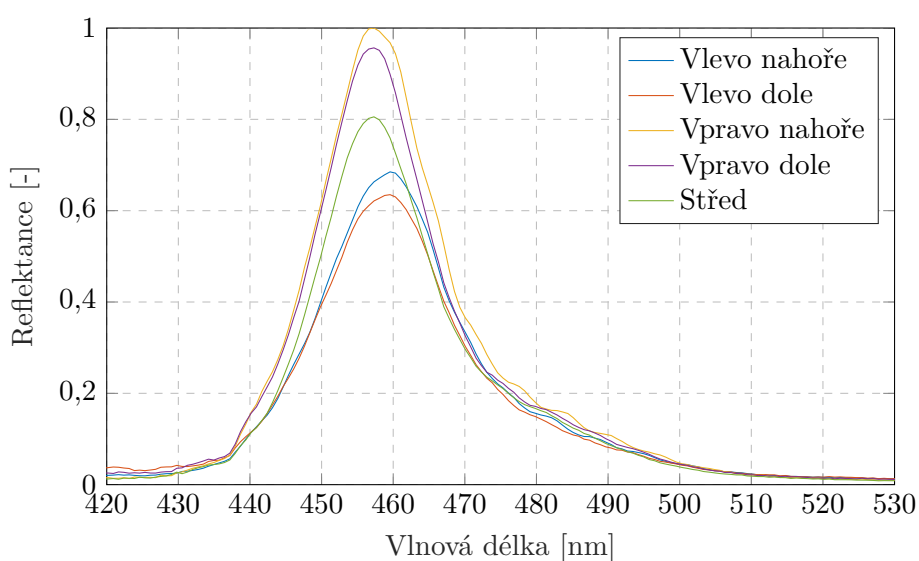
Pro vyzkoušení rovnoměrnosti bylo zvoleno zařízení iPhone XS při zobrazené modré barvě. Bylo vybráno celkem pět oblastí na displeji vždy o rozměrech 50 x 50 obrazových bodů (tedy celkem 250 bodů a tím pádem i spektrálních reflektancí). Oblasti byly zvoleny do rohů displeje - vlevo nahoře, vlevo dole, vpravo nahoře a vpravo dole. Poslední oblastí byl střed. Jak ukazuje graf na obrázku 11.3, tak vrchol se u oblastí vlevo nacházel na 459,6 nm, zatímco u oblastí vpravo a ve středu byl na 457,3 nm. Lišila se také intenzita.



Obrázek 11.1: Spektrální reflektance tří telefonů - modrá



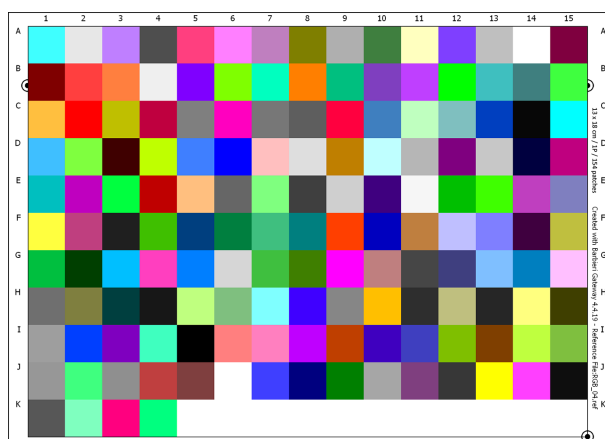
Obrázek 11.2: Spektrální reflektance tří telefonů - modrá - výřez



Obrázek 11.3: Spektrální reflektance - rovnoměrnost v pěti oblastech, iPhone XS, modrá

11.2 Inkoust

Firma FOMEI pro účely této diplomové práce poskytla testovací obrazce a fotografie vytištěné dvěma různými inkousty na různých tiskárnách pro analýzu spektrální reflektance a identifikaci materiálu, tedy inkoustu. Všechny čtyři fotografie jsou vytištěny na fotopapír FOMEI Archival Velvet 265, který splňuje normu ISO 9706 a ISO 12647. První snímek o rozměrech 13 x 18 cm je testovací obrazec označovaný také jako terč (obrázek 11.4), který zobrazuje matici mnoha barev. Druhým snímkem je fotografie skládající se z několika scén a žánrů, která je zobrazena na obrázku 11.5.



Obrázek 11.4: Testovací obrazec s barvami

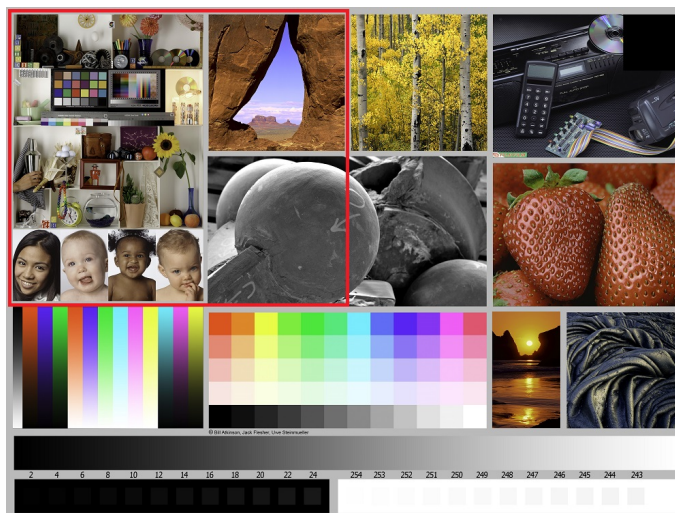
Pro identifikaci materiálu - použitého inkoustu - byly vzorky vytištěny za pomoci dvou různých tiskáren s rozdílnými inkousty:

- EPSON SureColor P9500 s archivačními pigmentovými inkousty EPSON UltraChrome Pro12
- EPSON L1800 se základními dye-based inkousty EPSON T673

První zařízení je profesionální tiskárna s cenovkou kolem 200 tisíc korun, zatímco druhá je amatérská hobby tiskárna s cenovkou kolem 18 tisíc korun. EPSON SureColor P9500 využívá k tisku celkem 12 inkoustů následujících barev: Fotografická černá, Matná černá, Azurová, Světle azurová, Žlutá, Jasná purpurová, Jasná světle purpurová, Violet, Oranžová, Zelená, Grey, Light Grey a celkem nabízí 800 trysek pro každou barvu a černou. Ve srovnání s ní má levnější tiskárna EPSON L1800 pouze 6 inkoustů těchto barev: Černá, Azurová, Světle azurová, Žlutá, Purpurová, Světle purpurová. Vidíme zde rozšířenou konfiguraci CMYK o světlé barvy azurové a purpurové. EPSON L1800 má 90 trysek pro každou barvu. [88, 89]

Skenování hyperspektrální kamerou v laboratoři proběhlo s nastavením frame rate 25 Hz a maximálním expozičním časem 39 ms. Následná analýza proběhla v Matlabu za pomoci vlastně napsaného programu HyperCalib,

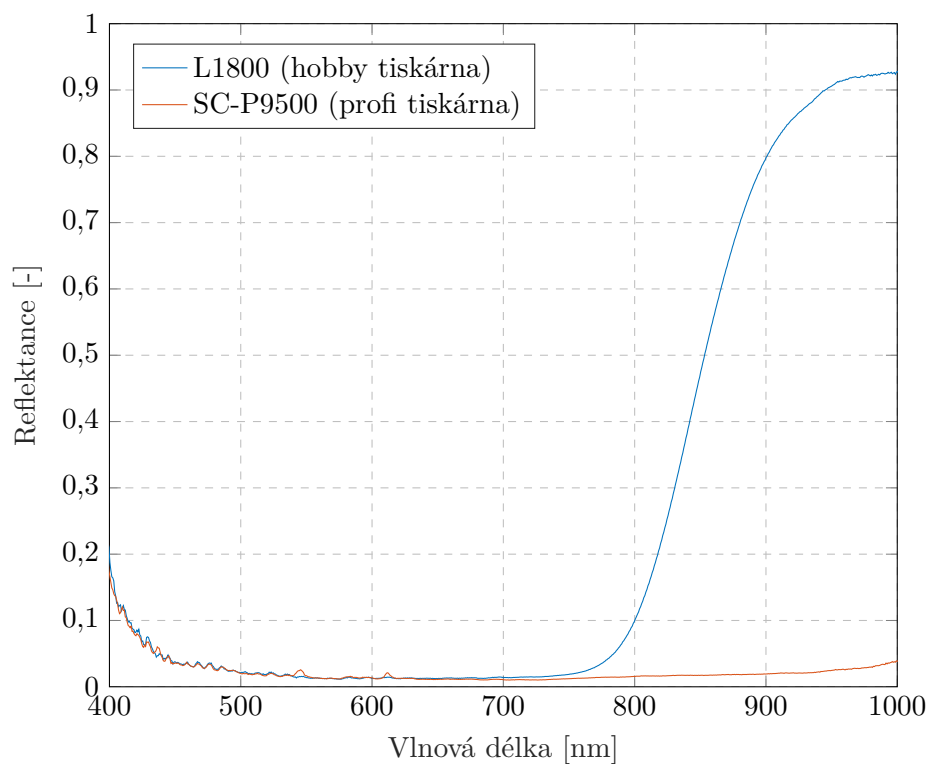
který byl rozšířen o možnost identifikovat inkoust a tiskárnu fotografie na základě spektrální reflektance.



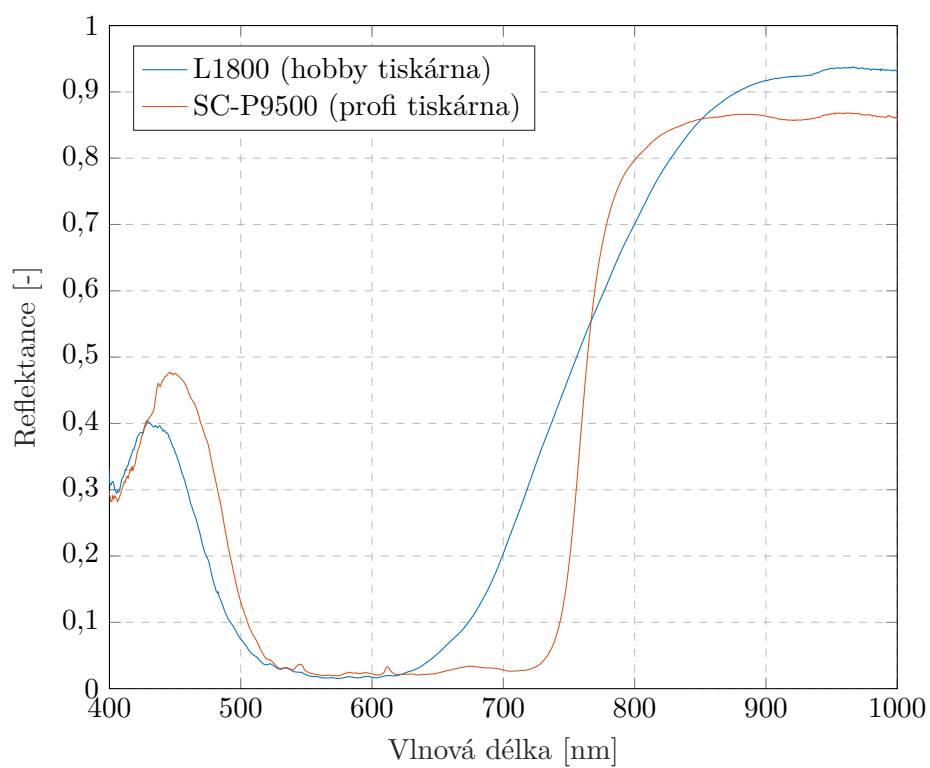
Obrázek 11.5: Testovací fotografie, červeně vyznačená oblast je vykreslena na grafu na obrázku 11.9

Ukázalo se, že je možné na základě reflektance identifikovat použitý inkoust a na jaké tiskárně byla fotografie vytištěna. Graf na obrázku 11.6 ukazuje rozdíl na černé barvě (na obrázci 11.4 pozice I5) mezi tiskárnou SC-P9500 s pigmentovým inkoustem a tiskárnou L1800 s dye-based inkoustem. Právě na této barvě lze pozorovat největší rozdíl. Zatímco inkoust první profesionální tiskárny nevyzařuje v části spektra nad 800 nanometrů téměř nic, druhý vzorek zde má velmi výrazný nárůst. Obrázek 11.7 zobrazuje reflektanci modré barvy (na obrázci 11.4 pozice D6), kde již vidíme záření této barvy v infračervené části u obou tiskáren. U profesionální tiskárny SC-P9500 nicméně začíná až kolem 750 nm. Podobné je to také u zelené barvy na obrázku 11.9. Porovnání dalších barev lze nalézt v příloze.

Při snímání testovací fotografie byla provedena analýza mnoha oblastí různé velikosti. Pro profesionální tiskárnu je charakteristická spektrální reflektance, která má mnohem pestřejší křivku a ve srovnání s hobby tiskárnou není tak plochá. Stejně jako u černé barvy pak křivka zdaleka tolik neroste v počátku infračerveného spektra. Graf na obrázku 11.10 ukazuje spektrální reflektanci čtvrtiny celé testovací fotografie z obou tiskáren, oblast je červeně vyznačena na obrázku 11.5. Tvar křivky se při výběru jiné oblasti například na druhé části snímku příliš neliší.

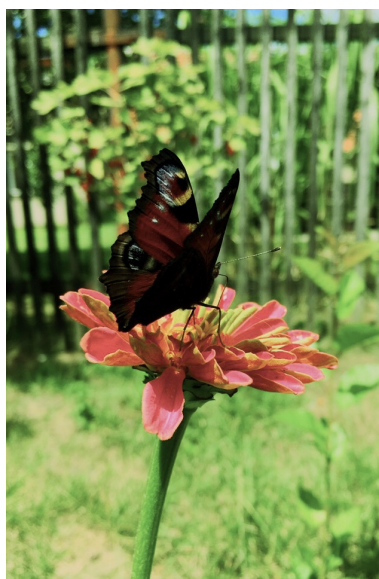


Obrázek 11.6: Spektrální reflektance - inkoust - černá barva (na terči I5)



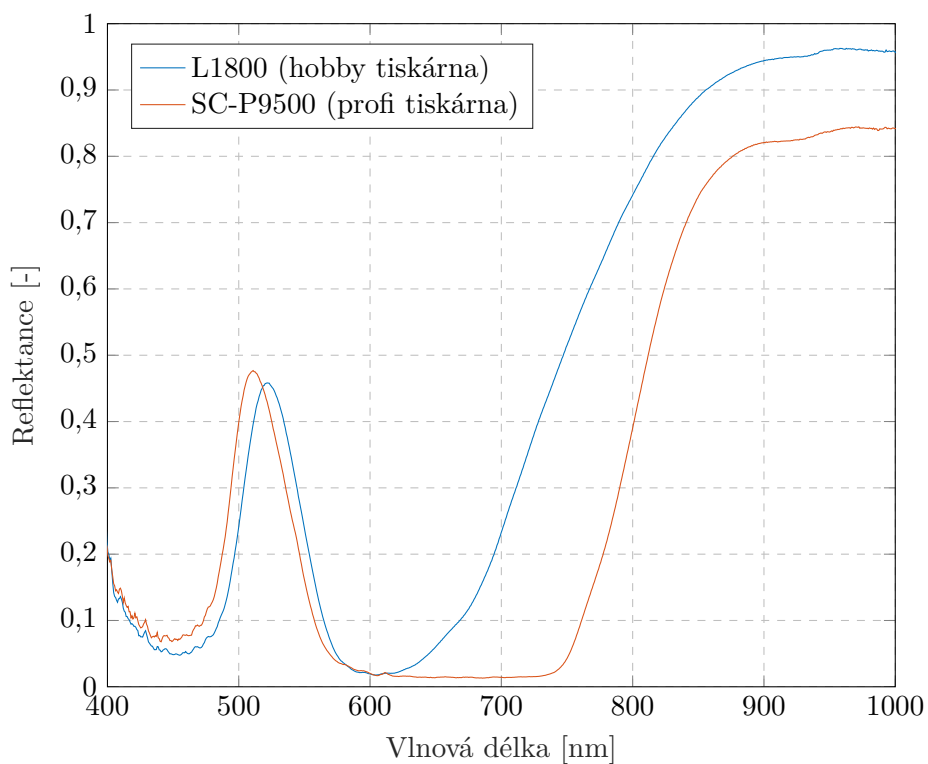
Obrázek 11.7: Spektrální reflektance - inkoust - modrá barva (na terči D6)

Pro otestování detekce byl využit vlastní program HyperCalib. Do databáze byla přidána třetí tiskárna Canon Pixma Pro-100S, na které byla vytištěna stejná testovací fotografie (obrázek 11.5). Ta byla nicméně vytisknuta na jiný papír, a to konkrétně na FomeiJet PRO GLOSS 265. Inkousty byly originální Canon dye-based, kterých je zde celkem osm. Po analýze a zobrazení reflektance stejné červeně vyznačené oblasti testovací fotografie (obrázek 11.5) se ukázala velmi podobná křivka tiskárně EPSON L1800, jak lze vidět na grafu 11.11. Tím se potvrdila charakteristická křivka pro tento typ inkoustu. Jistou odchylku mohl způsobit jiný typ papíru.

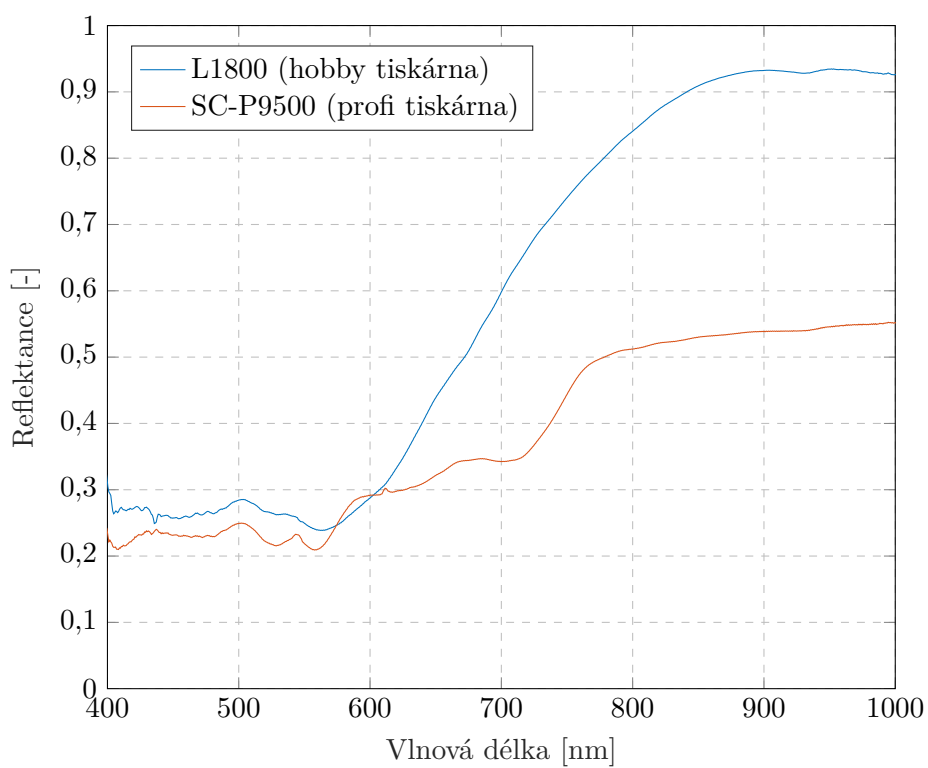


Obrázek 11.8: Fotografie určená k identifikaci inkoustu a tiskárny

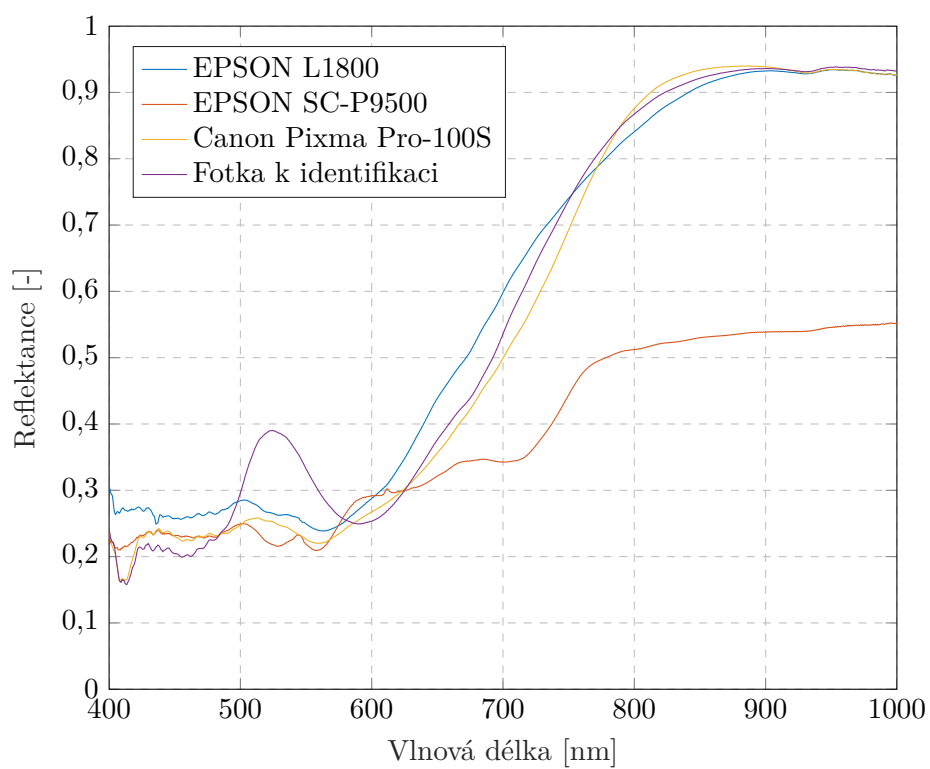
Následně byla k analýze dodána fotografie motýla na květu (obrázek 11.8), která byla určena k identifikaci inkoustu, tiskárny a případně papíru, na kterém je vytištěna. V programu HyperCalib byla označena celá tato fotka při kliknutí na tlačítko *Identify unknow printer* s metodou JMSAM a databází tří tiskáren zmíněných v předchozích odstavcích. Program vyhodnotil její reflektanci nejpodobnější tiskárně Canon Pixma Pro-100S. To můžeme pozorovat také na grafu na obrázku 11.11. Ten zobrazuje reflektanci tří tiskáren (EPSON L1800, EPSON SC-P9500 a Canon Pixma Pro-100S) a reflektanci fotografie motýla. Fotografie byla vytištěna pomocí tiskárny Canon Pixma Pro-100S na papír FOMEI JET Pro 265 (Pearl), čímž se potvrzuje možnost identifikace. Oproti testovací fotografii (obrázek 11.5) zde byl použit jiný papír, který není lesklý ale matný. Přesto je reflektance především v části nad 600 nm téměř stejná. Lze tedy usoudit, že typ papíru nemá na reflektanci příliš velký vliv.



Obrázek 11.9: Spektrální reflektance - inkoust - zelená barva (na terči B12)



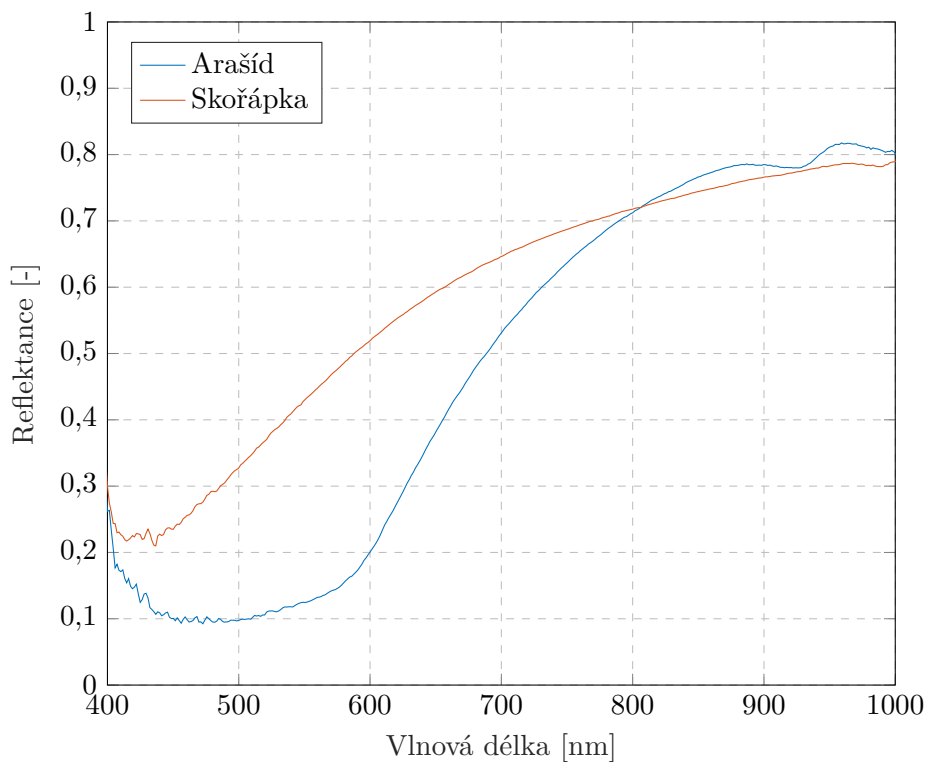
Obrázek 11.10: Spektrální reflektance - fotografie



Obrázek 11.11: Reflektance - fotografie motýla k identifikaci a tři tiskárny

11.3 Podzemnice olejná

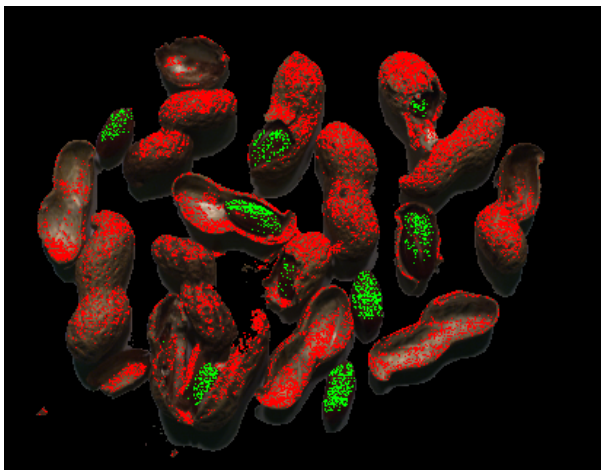
Jednou z možných aplikací je kontrola kvality a třídění, což bylo vyzkoušeno na vzorku podzemnice olejně. Jejím semenem jsou arašíd, které jsou uchovány ve skořápce uvnitř. Na skenovací stolek bylo umístěno několik plodů podzemnic olejních, přičemž některým byla úmyslně rozbita skořápka. Na stolek byl tak mix samotných arašíd, arašíd částečně viditelných ve skořápce a jen samotné skořápky. Po naskenování a analýze bylo zjištěno, že je možné pomocí reflektance rozpoznat, kde se nachází skořápka a kde arašíd. Jako vzorek byly zakoupeny konkrétně Buraczech Arašídly neloupané pražené od výrobce IBK TRADE o celkové hmotnosti 400 gramů, které byly pořízeny v obchodě Billa.



Obrázek 11.12: Spektrální reflektance - jeden arašíd a jedna skořápka

Graf na obrázku 11.12 zobrazuje křivku spektrální reflektance pro jednu část arašíd a jednu část skořápky. Tyto dvě křivky byly použity pro další zpracování jako referenční endmembers. Dále byla využita metoda SID a analýza pomocí programu HyperCalib. Na základě toho byla pak na obrázku vykreslena maska, která identifikuje všechny skořápky a arašíd právě na základě spektrální reflektance (obrázek 11.13). Pro určení je třeba definovat práh (threshold). Po vyzkoušení mnoha variant byla tato hodnota stanovena na číslo 15, kdy na snímku není téměř žádná falešná detekce. Pro spolehlivější výsledek by bylo potřeba, aby osvětlení vzorku bylo homogenní, tedy z obou

stran a nebyly na snímku stíny. Nicméně všechny i částečně schované arašídly byly zeleně označeny. Skořápka je označena červenou barvou a vidíme správně označené dokonce také úlomky skořápky v levém dolním rohu.



Obrázek 11.13: Rozpoznané arašídly - zelená, skořápky - červená, vykresleno metodou SID v programu HyperCalib

11.4 Rostliny

Hyperspektrální kamerou v laboratoři bylo nasnímáno celkem pět listů rostliny *Ficus Benjamina*, přičemž každý list se nacházel v jiném stavu.

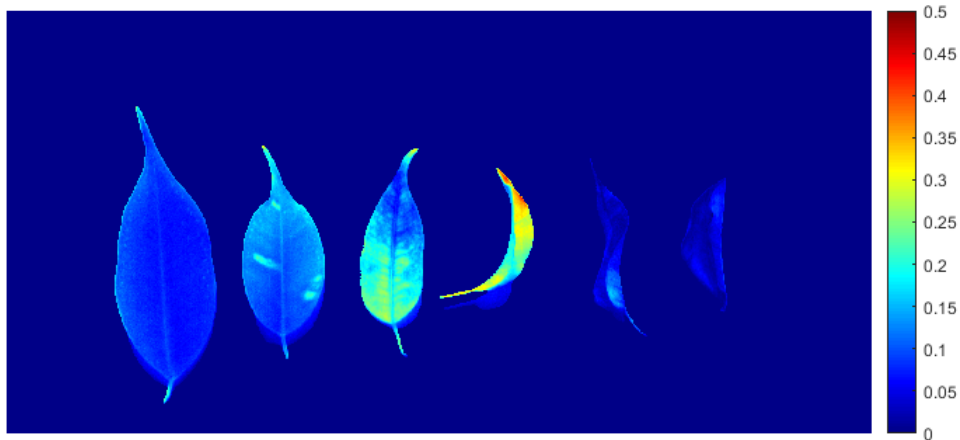


Obrázek 11.14: Vzorky listů

Barevný obrázek 11.14 ukazuje jejich vizuální stav, dva listy úplně vlevo byly zelené, přičemž druhý zleva vykazoval na svém povrchu určitý defekt. List v pořadí třetí zleva byl značně žlutý. Další list vpravo od něj byl také mírně nažloutlý až světle zelený. Nakonec dva listy vpravo byly uschlé, přičemž ten šestý zleva byl již téměř v rozkladu.

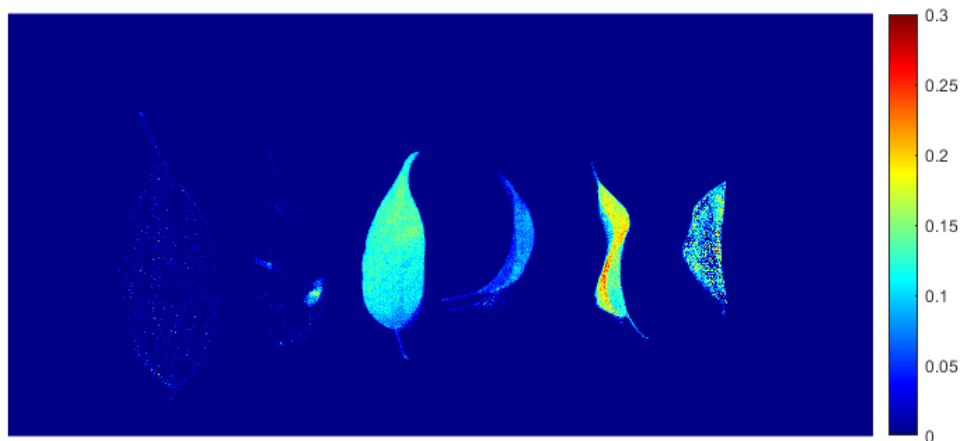
Pro zobrazení absorpce chlorofylu byl v kapitole 6.1 uveden vzorec 6.2 pro výpočet vegetačního indexu reflektance MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index). Obrázek 11.15 zobrazuje použití tohoto vzorce na tento vzorek listů. Čím vyšší hodnota indexu, tím méně se v listu

nachází chlorofylu. Nejméně ho vykazuje světle zelený až nažloutlý list (čtvrtý zleva). Naopak dva suché listy již nebyly vůbec detekovány.



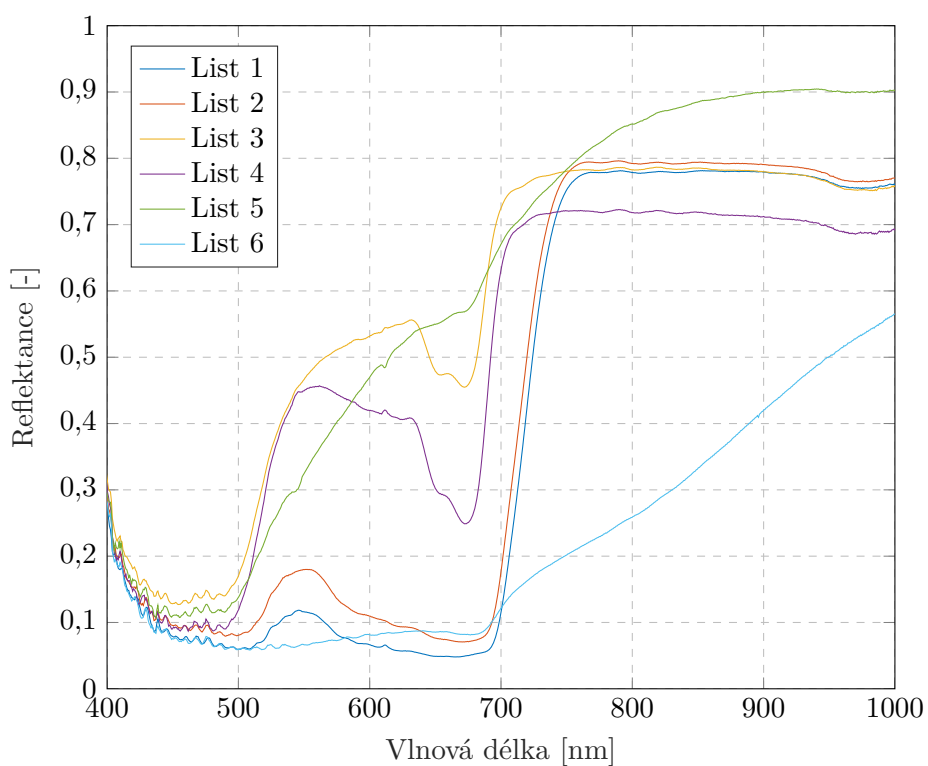
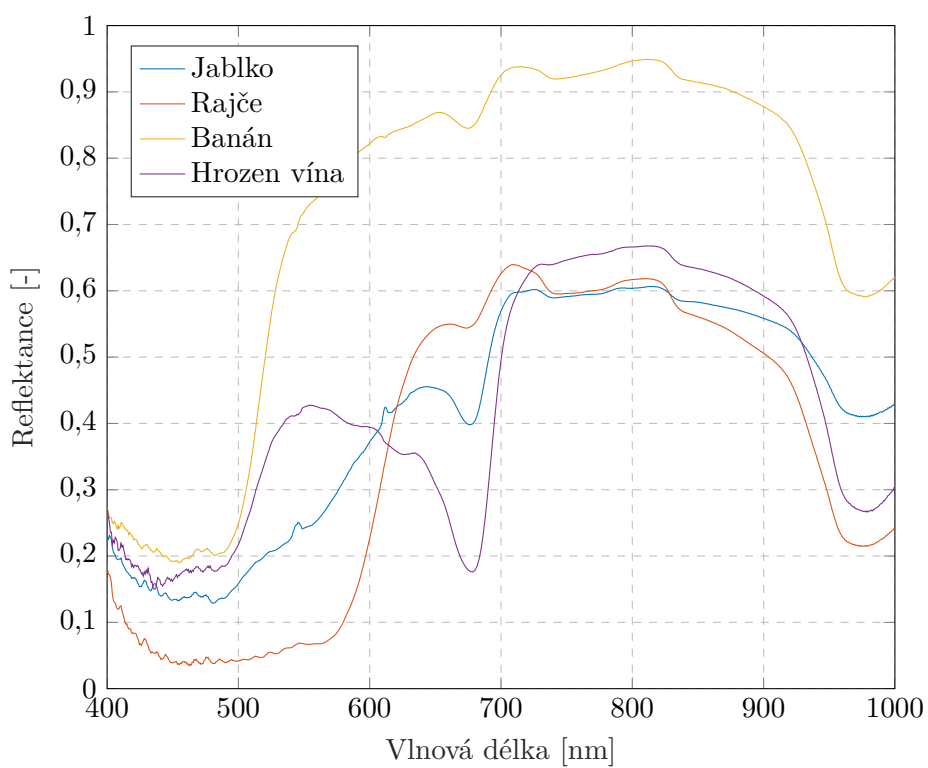
Obrázek 11.15: MCARI na vzorku listů

Pro měření stresu stromu z nedostatku zálivky lze využít Photochemical Reflectance Index (PRI), jehož výpočet je znázorněn v rovnici 6.3. Podle této rovnice bylo provedeno zobrazení na vzorku listů, který lze pozorovat na obrázku 11.16. Barevně byly vyznačeny nejvyšší hodnoty tohoto indexu, které označují nejvyšší stres. Vizualně to odpovídá barvě listů, kdy nejvyšší hodnoty jsou u hnědého téměř suchého listu. Index také zvýraznil defekty na druhém listu zleva.



Obrázek 11.16: PRI na vzorku listů

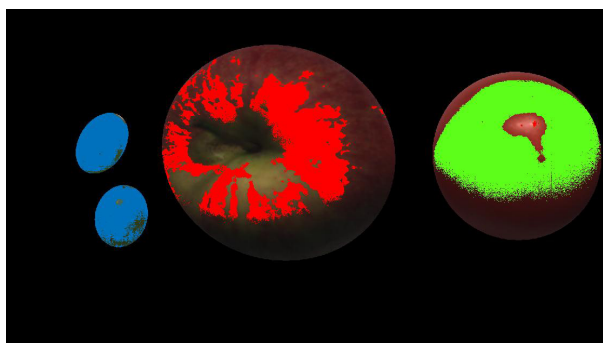
Graf na obrázku 11.17 ukazuje spektrální reflektanci všech listů (vždy oblast zhruba 50 x 50 pixelů, pokud to bylo možné).

**Obrázek 11.17:** Spektrální reflektance - všechny listy zleva doprava**Obrázek 11.18:** Spektrální reflektance - ovoce a zelenina

11.5 Ovoce a zelenina

Graf na obrázku 11.18 zobrazuje spektrální reflektanci jablka odrůdy Gala, běžné rajče, slupky banánu a jedné bobule bílého hroznového vína. Vždy byla pro vykreslení reflektance vybrána adekvátně velká oblast, aby pokryla co největší kus ovoce/zeleniny a nebyl zde žádný přepal. Z grafu můžeme pozorovat, že nejvíce odlišnou reflektanci má hrozen vína. Pokud nebudeme uvažovat intenzitu, křivka banánu a rajčete se mírně podobá, ačkoliv vzhledem ke žluté barvě banánu u něj máme mnohem více záření na vlnové délce již od zhruba 500 nanometrů. Podobně jako s arašídou lze provést analýzu pomocí programu HyperCalib s metodami spektrální podobnosti.

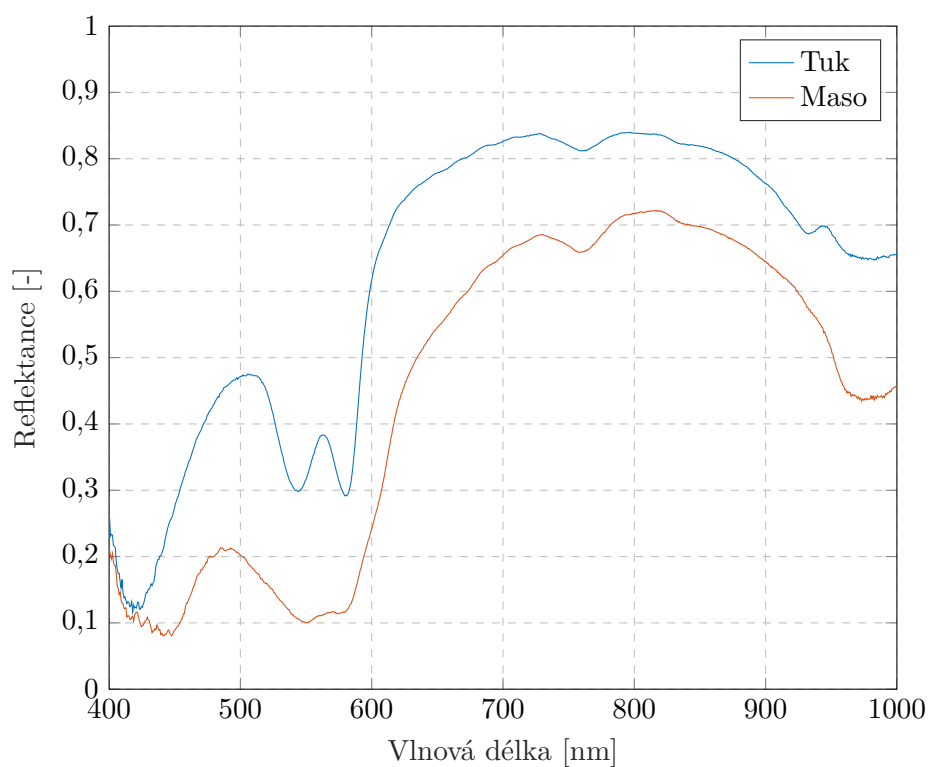
Obrázek 11.19 ukazuje použití na třech vzorcích. Modře označený je hrozen vína, červeně jablko Gala a zeleně rajče. Pro tento konkrétní obrázek byl použit algoritmus SAM s hranicí 0,10. Lze pozorovat, že velký problém opět tvoří stíny z důvodu osvětlení vzorku pouze z jedné strany, což snižuje spolehlivost detekce. Zatímco bobule hroznového vína a rajče jsou velmi dobře rozpoznány, vzorek jablka vzhledem ke své dvoubarevnosti není tak dobře detekován. Pro označení, kde se vzorky nachází, je nicméně výsledek dostačující. Výsledky pro další algoritmy lze nalézt v příloze.



Obrázek 11.19: Rozpoznání ovoce dle reflektance v programu HyperCalib - modře označený je hrozen vína, červeně jablko a zeleně rajče - použití algoritmu SAM s hranicí 0,10

11.6 Maso

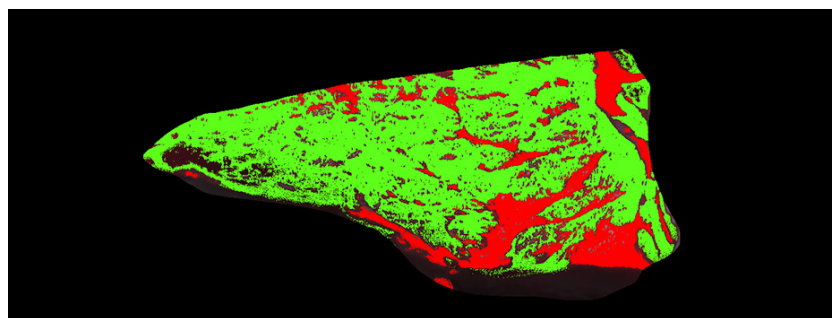
Za pomoci programu HyperCalib proběhla analýza také na vzorku syrového masa. Ukázalo se, že lze určit, kde se nachází tuk a kde libové maso. Pro analýzu vzorku (obrázek 11.21) byly zvoleny ručně dva endmembers - tuk a maso. Tyto endmembers ukazuje graf na obrázku 11.20. Největší odlišnost lze pozorovat v části na vlnové délce 560 nm, kde má tuk vrchol navíc oproti masu. Rozdíl jde vidět také na konci spektra, kde křivka masa rychleji klesá. Obrázek 11.22 zobrazuje výsledné zvýraznění tuku a masa, přičemž byl použit algoritmus spektrální podobnosti SAM s hranicí 0,1.



Obrázek 11.20: Reflektance masa a tuku



Obrázek 11.21: Vzorek syrového masa



Obrázek 11.22: Rozpoznání masa a tuku - použití algoritmu SAM s hranicí 0,10

11.7 Ostatní vzorky

Bylo vyzkoušeno nasnímání čtyř různých léků, z nichž tři byly bílé pilulky bez obalu a jeden doplněk stravy v plastovém obalu. První lék s plastovým obalem vykázal dle předpokladů výrazně odlišnou reflektanci, na obrázku 11.25 se jedná o vzorek s označením Lék 1. Reflektance dalších tří léků, přičemž se jednalo o různé vitamíny, se ukázala jako velmi podobná. Křivky jsou téměř ploché, pouze kulatý prášek má zakulacenější charakteristiku. To vychází ze zpracování dat, kdy se bral průměr reflektance z 25 bodů uprostřed léku. Nepodařilo se tak nalézt vhodnou část spektra, pomocí které by bylo možné léky od sebe rozpoznat a ani algoritmy v programu HyperCalib nedokázaly od sebe prášky odlišit. Bílé prášky mají ve finále podobnou charakteristiku jako bílá reference. Pro rozpoznání by tak bylo nejspíše vhodné mít kameru se spektrálním rozsahem nad 1000 nm.

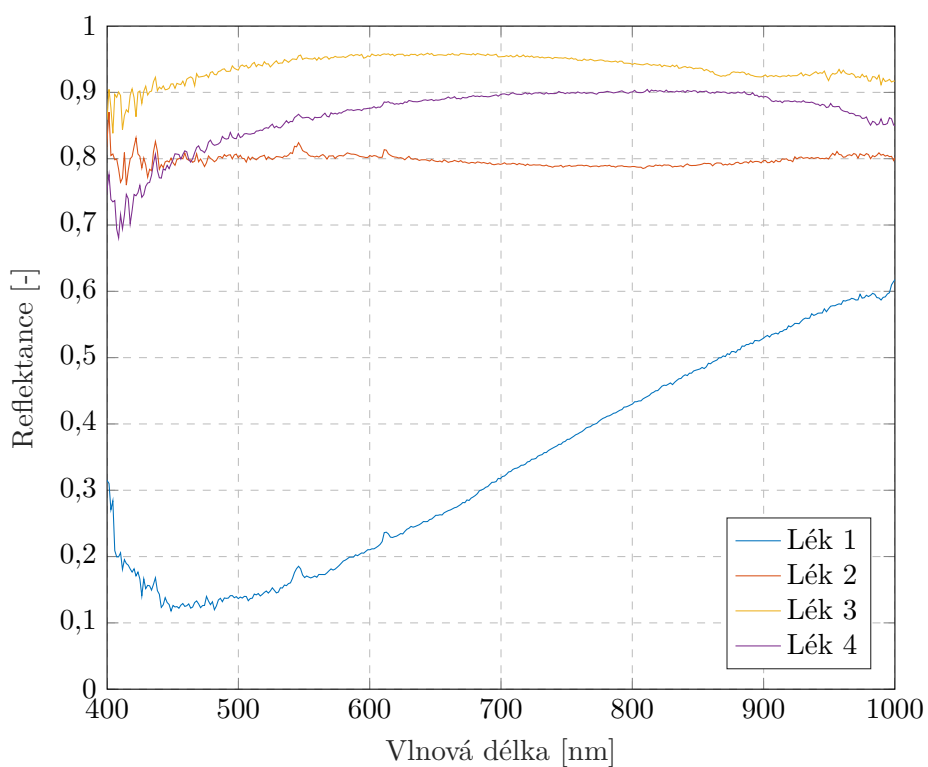


Obrázek 11.23: Léky použité k analýze

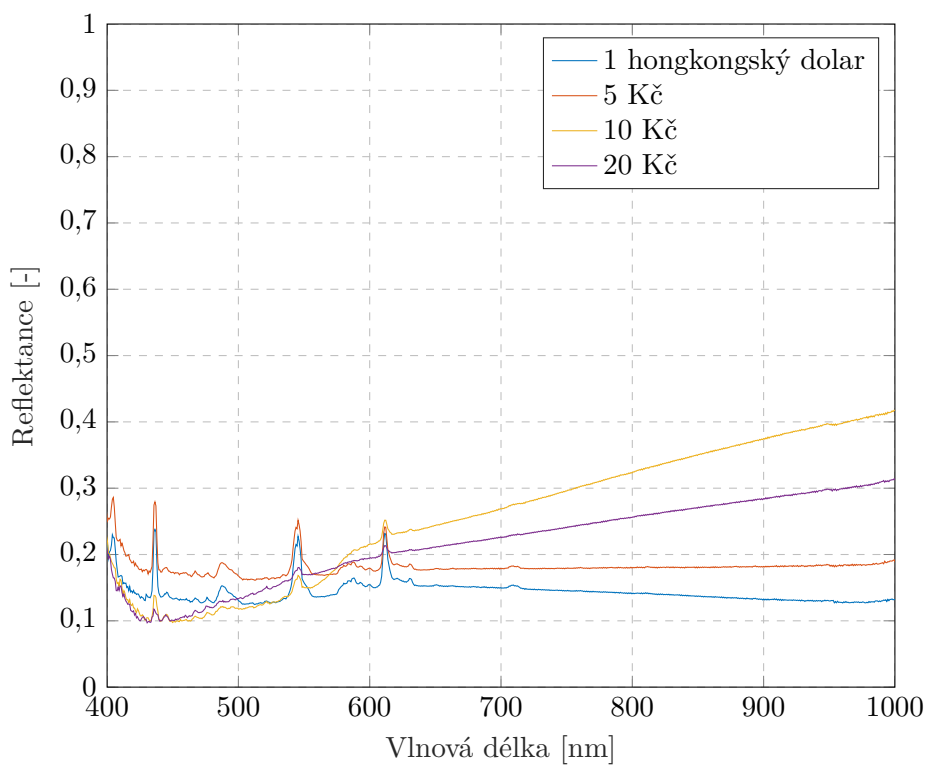
Vyzkoušeny pro možnou aplikaci byly také mince. Na jednom snímku byly nafoceny mince o hodnotě 1 Kč, 2 Kč, 5 Kč, 10 Kč, 20 Kč, 50 Kč a 1 hongkongský dolar. Pro analýzu pomocí programu HyperCalib byl vždy u mincí vybrán čtverec, který se přesně vejde do jejich tvaru. Jako ručně zvolené endmembers byly zvoleny mince o hodnotách 1 hongkongský dolar, 5 Kč, 10 Kč a 20 Kč. Jejich reflektance je nicméně velmi podobná a je tak obtížné je od sebe odlišit, jak ukazuje graf 11.26. Při vyzkoušení všech tří algoritmů s různou hranicí v programu HyperCalib nebyl nikdy výsledek uspokojivý, nikdy nedošlo ke správné detekci zvolených mincí. Pravděpodobně by i na tyto vzorky byla potřeba kamera, která snímá spektrum více v infračervené oblasti.



Obrázek 11.24: Mince použité k analýze



Obrázek 11.25: Reflektance léků



Obrázek 11.26: Reflektance mincí

Kapitola 12

Závěr

Tato diplomová práce popsala parametry hyperspektrálních kamer. V prvních kapitolách byl zmíněn teoretický úvod k problematice, popsán rozdíl mezi multispektrálním a hyperspektrálním snímáním a definován samotný princip hyperspektrálního snímání, při kterém vzniká hyperspektrální kostka s názvem hypercube. Existují celkem čtyři metody snímání těchto dat, mezi které patří whiskbroom, pushbroom, staring a snapshot. Všechny metody byly popsány včetně jejich různých metod rozkladu světla.

Čtvrtá kapitola se zaměřila na samotné parametry hyperspektrálních snímacích systémů, mezi které patří prostorové rozlišení, spektrální rozsah, spektrální rozlišení, šířka pásma, zorné pole, senzor, SNR a další. Všechny parametry byly diskutovány a následně podán přehled výrobců samotných hyperspektrálních kamer. Vybrané modely byly porovnány s kamerou Specim PFD4K-65-V10E. Důležitá je aplikace v praxi, které se věnovala šestá kapitola. Přiblížila několik zajímavých aplikací od lesnictví přes zdravotnictví až po detekci min. Použití v průmyslu se nicméně neustále rozšiřuje.

V praktické části byla nejprve popsána hyperspektrální kamera Specim PFD4K-65-V10E, která byla nedávno nainstalovaná do laboratoře na ČVUT. Jelikož se jedná o novou kameru, bylo nutné popsat a seznámit se detailně s jejím ovládáním a možnostmi nastavení. Pro nastavení rychlosti skenování výrobce nabízí tři možnosti, přičemž metoda *Working distance a Field of view* se jeví jako nejlepší, jelikož při jejich použití na rozdíl od metody *Aspect ratio* není nutné provádět naskenování kulatého objektu. Dále bylo nutné prověřit vlastnosti a parametry kamery a nalézt vhodné nastavení parametrů jako je frame rate nebo expoziční čas při snímání. Cílem bylo také zjistit, zda se zde nenachází anomálie.

Ukázalo se, že hodnota spektrálního vzorkování kamery postupně roste od 0,73 na počátku do 0,80 nm na konci spektrálního rozsahu. Dále bylo provedeno měření PSNR. Pro jeho zjištění byl navržen vhodně velký obrazec na základě standardu ISO 15739. Z výsledků vyplynulo, že při změně frame rate nedochází ke změně PSNR, zatímco delší expoziční čas zajistí vyšší hodnotu PSNR, což je pozitivní a predikovatelné. Nedošlo ke zjištění anomálií

či defektů. Vyšší hodnoty frame rate jsou omezené nízkou expoziční dobou, a tak je není vhodné používat. Pro další ověření byl zvolen nereferenční parametr PIQE. Stejně jako PSNR tento parametr potvrdil, že kamera Specim PFD4K-65-V10E v sestavení na katedře snímá v počátku jejího spektrálního rozsahu zhruba do 500 nm velmi nekvalitně s vysokým šumem, který postupně klesá. Nárůst šumu a pokles kvality lze pozorovat také na konci spektrálního rozsahu. Jako nejvhodnější nastavení při snímání se jeví volba 25 Hz frame rate, která nabízí vysokou kvalitu po stejný spektrální rozsah jako nižší frame rate. Oproti nim je však snímání nejkratší, například při nastavení frame rate 5 Hz trvá obvykle nasnímání jednoho vzorku více než 10 minut. Pro ověření rozlišovací schopnosti byl nasnímán obrazec ISO 12233 ke zjištění modulační přenosové funkce (MTF). Ta byla vyhodnocena pro tři vlnové délky. Pro vlnovou délku 700 nm byl zaznamenán stabilní pokles až do hodnoty 11 lw/mm, přičemž pak lze na snímku pozorovat aliasing. Také MTF potvrdila horší schopnosti kamery záznamu na jejím počátku spektrálního rozsahu.

Nakonec bylo v rámci ověření parametrů provedeno porovnání hyperspektrální kamery Specim PFD4K-65-V10E se spektrometrem Avantes AvaSpec 3648 s optickým vláknem. Nasnímán byl displej mobilního telefonu Apple iPhone XS. Při záznamu byla na displeji zobrazena homogenní červená, zelená nebo modrá barva. Ukázalo se, že nasnímané spektrum se příliš neliší, ačkoliv vrchol je na hyperspektrální kameře posunutý o 1 - 6 nanometrů dle zobrazené barvy.

V rámci řešení diplomové práce byl napsán program HyperCalib v Matlabu pro analýzu hyperspektrálních snímků a rozpoznání vzorků na základě zvolené spektrální reflektance. Program umí provést kalibraci, což je klíčová součást po pořízení hypercube snímacím softwarem. Dále si lze zobrazit zkalibrovaný snímek na jakémkoliv vlnové délce, zobrazit spektrum jednotlivého obrazového bodu s možností vyhlazení nebo zobrazit spektrum vybrané oblasti přímo na grafu v uživatelském rozhraní. Neméně důležitou součástí je provedení segmentace, kterou HyperCalib s nástrojem v Matlabu také zvládá. Samozřejmostí je export proměnných pro další práci do workspace Matlabu. Druhá část programu HyperCalib umožňuje zvolit nebo nahrát endmembers (referenční spektrální reflektance) na základě kterých dle tří různých algoritmů proběhne analýza. Ta podle spektrální podobnosti zjistí, kde se jaký materiál nachází. V poslední části programu lze provádět analýzu inkoustu fotografie a na základě reflektance zjistí typ inkoustu a použitou tiskárnu.

V kapitole testovací vzorky byla nasnímaná a analyzována celá řada různých vzorků. Byla zkoumána a porovnána reflektance displejů tří telefonů - Apple iPhone SE (2016), Samsung Galaxy J3 (2016) a Apple iPhone XS. Při zobrazené modré barvě bylo možné pozorovat rozdíl v křivce a posunutém vrcholu na zařízení s IPS panelem oproti dvou telefonům s AMOLED panelem. Na jednom telefonu byla následně zkoumána rovnoměrnost v pěti oblastech, kde se ukázalo, že v levé části displeje byl vrchol posunut o necelé

dva nanometry. Jako vhodný organický vzorek pro demonstraci byl zvolen plod podzemnice olejné, na kterém lze krásně ukázat rozpoznání arašídů od skořápky, a to právě také pomocí programu HyperCalib a jeho integrovaných algoritmů. Mezi další vhodné vzorky patří ovoce a zelenina, což bylo ukázáno na odlišení bobule hroznového vína, jablka a rajčete za použití algoritmů SID, SAM a SIDSAM. Jako testovací vzorek je možné použít také syrové maso, na kterém lze rozlišit tuk od libového masa. Nasnímány byly listy rostliny, které se nacházely v různém stavu a s defekty. Následně na ně byly aplikovány různé vegetační indexy, kdy byla z hyperspektrálního snímku zjištěna absorpce chlorofylu a stresu stromu.

Dále byly díky firmě FOMEI poskytnuty vzorky testovacích fotografií a terčů nasnímané na dvě odlišné tiskárny s odlišným inkoustem. Na základě analýzy reflektance byl zjištěn výrazný rozdíl mezi oběma tiskárnami, kde například při zobrazení černé barvy profesionální tiskárna s pigmentovými inkousty vůbec nezáří v infračerveném spektru, zatímco hobby tiskárna zde vykazuje vysoké hodnoty reflektance. Jedná se o novou možnou aplikaci. Bylo ověřeno, že podle reflektance lze poznat typ inkoustu a na základě algoritmů spektrální podobnosti určit tiskárnu snímku, což bylo otestováno po přidání další tiskárny do databáze na snímku motýla. V rámci řešení diplomové práce byly připraveny také dvě laboratorní úlohy pro seznámení a demonstraci hyperspektrální kamery, které se mohou využít při výuce na fakultě.

Téma hyperspektrálního snímání je perspektivní obor. Z diplomové práce se jeví jako velmi zajímavé a zatím nepříliš prozkoumané využití k rozpoznání inkoustu a tiskárny na základě reflektance. To nicméně vyžaduje další výzkum a více vzorků ke zkoumání. Jako zlepšení do budoucna by bylo vhodné kameru Specim PFD4K-65-V10E v laboratoři vybavit osvětlením vzorku i z druhé strany, které dnes bohužel nemá. Analýza hyperspektrálních dat a práce s nimi je také vskutku náročná na výkon počítače, kdy vyžaduje desítky gigabajtů operační paměti a výkonný procesor. Pro další rozvoj a rychlé zpracování dat by tedy byl vhodný velmi výkonný počítač.



Literatura

1. MANOLAKIS, Dimitris G.; LOCKWOOD, Ronald B.; COOLEY, Thomas W. *Hyperspectral Imaging Remote Sensing: Physics, Sensors, and Algorithms* [online]. Cambridge University Press, 2016 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-1-107-08366-0. Dostupné z DOI: 10.1017/CB09781316017876.
2. WARE, Michael; PEATROSS, Juston. *Physics of Light and Optics*. 2015. vyd. Brigham Young University, [n.d.]. 2015 Edition. ISBN 978-1-312-92927-2.
3. VERHOEVEN, Geert. The reflection of two fields – Electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. 2017, roč. 55. Dostupné z DOI: 10.5281/zenodo.3534245.
4. FISCHER, Jan. *Optoelektronické senzory a videometrie* [online]. ČVUT, 2002 [cit. 2020-11-21]. ISBN 80-01-02525-X.
5. OPTICS, Edmund. *What is SWIR?* [Online]. [N.d.] [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/>.
6. ING. JIŘÍ HABEL, DrSc. prof. Zrak a vidění - Odborné časopisy. *Časopis Světlo* [online]. 2008, roč. 2008, č. 05 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zrak-a-videni--16756>.
7. SCHUBERT, E. F. *Light Emitting Diodes, Second edition*. 2006. vyd. Cambridge University Press, [n.d.].
8. MUDR. JARMILA BOGUSZAKOVÁ, DrSc. prof. Základy světelné techniky (2) - Časopis Světlo - Odborné časopisy. *Časopis Světlo* [online]. 2003, č. 04 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-2--15893>.
9. BUTLER, Richard. *Resolution, aliasing and light loss - why we love Bryce Bayer's baby anyway* [online]. 2017 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://www.dpreview.com/articles/3560214217/resolution-aliasing-and-light-loss-why-we-love-bryce-bayers-baby-anyway>.
10. HURST, George Samuel. *Spectroscopy* [online]. 2020 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/spectroscopy>.

11. ACADEMIC, Britannica. *Spectroscopy* [online]. 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://academic.eb.com/levels/collegiate/article/spectroscopy/110407>.
12. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, The Editors of. *Light - Diffraction* [online]. 2020 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://academic-eb-com.ezproxy.techlib.cz/levels/collegiate/article/light/110443#258401.toc>.
13. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/560-ohyb-svetla-na-hrane>. Publisher: Jaroslav Reichl.
14. BORENGASSER, M.; HUNGATE, W.S.; WATKINS, R. *Hyperspectral remote sensing: Principles and applications*. 2007. ISBN 978-1-56670-654-4.
15. KHAN, Muhammad; KHAN, Hamid; YOUSAF, Adeel; KHURSHID, Khurram; ABBAS, Asad. Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review. *IEEE Access*. 2018, roč. 6. Dostupné z DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2812999.
16. LI, Qingli; HE, Xiaofu; WANG, Yiting; LIU, Hongying; XU, Dongrong; GUO, Fangmin. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: Achievements and challenges. *Journal of biomedical optics*. 2013, roč. 18. Dostupné z DOI: 10.1117/1.JBO.18.10.100901.
17. ADÃO, Telmo; HRUŠKA, Jonáš; PÁDUA, Luís; BESSA, José; PERES, Emanuel; MORAIS, Raul; SOUSA, Joaquim João. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sensing* [online]. 2017, roč. 9, č. 11 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z DOI: 10.3390/rs9111110.
18. JET PROPULSION LABORATORY, NASA. *AVIRIS - Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer* [online]. 2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://aviris.jpl.nasa.gov/aviris/index.html>.
19. AIKIO, Mauri. *Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph: Dissertation* [online]. Espoo, 2001 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://cris.vtt.fi/en/publications/hyperspectral-prism-grating-prism-imaging-spectrograph-dissertati>. Disertační práce. University of Oulu.
20. LU, Guolan; FEI, Baowei. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 2014, roč. 19, č. 1, s. 010901 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1083-3668, ISSN 1560-2281. Dostupné z DOI: 10.1117/1.JBO.19.1.010901.
21. HAGEN, Nathan A.; KUDENOV, Michael W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering* [online]. 2013, roč. 52, č. 9, s. 090901 [cit. 2020-11-15]. ISSN 0091-3286, ISSN 1560-2303. Dostupné z DOI: 10.1117/1.OE.52.9.090901.

22. BEI, Ling; DENNIS, Glenn I.; MILLER, Heather M.; SPAINE, Thomas W.; CARNAHAN, Jon W. Acousto-optic tunable filters: fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques. *Progress in Quantum Electronics* [online]. 2004, roč. 28, č. 2 [cit. 2020-12-30]. ISSN 0079-6727. Dostupné z DOI: 10.1016/S0079-6727(03)00083-1.
23. MAHESH, S.; JAYAS, D. S.; PALIWAL, J.; WHITE, N. D. G. Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *Journal of Stored Products Research* [online]. 2015, roč. 61, s. 17–26 [cit. 2020-12-14]. ISSN 0022-474X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jspr.2015.01.006.
24. BIOUCAS-DIAS, J. M.; PLAZA, A.; CAMPS-VALLS, G.; SCHEUNDERS, P.; NASRABADI, N.; CHANUSSOT, J. Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2013, roč. 1, č. 2, s. 6–36. ISSN 2168-6831. Dostupné z DOI: 10.1109/MGRS.2013.2244672.
25. SMITH Ph.D., Randall B. *Introduction to Hyperspectral Imaging*. Micro-Images, 2012.
26. MEERDINK, Susan K.; HOOK, Simon J.; ROBERTS, Dar A.; ABBOTT, Elsa A. The ECOSTRESS spectral library version 1.0. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2019, roč. 230 [cit. 2020-12-28]. ISSN 00344257. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.015.
27. REMOTE SENSING, Canada Centre for. *Fundamentals of Remote Sensing* [online]. 2015 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>.
28. HALOUNOVÁ, Lena; PAVELKA, Karel. *Dálkový průzkum Země* [online]. Vydavatelství ČVUT, 2005 [cit. 2021-02-09]. ISBN 80-01-03124-1.
29. MALENOVSKÝ, Zbyněk. Quantitative remote sensing of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) : spectroscopy from needles to crowns to canopies [online]. 2006 [cit. 2021-03-14].
30. VIITAKOSKI, Miko; SPECIM, SPECTRAL IMAGING LTD. *Hyperspectral Objective Lenses* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: https://www.specim.fi/downloads/Hyperspectral_fore_lenses-ver1-15.pdf.
31. INC., Resonon. *Product Catalog / Hyperspectral Imaging Solutions* [online]. 2020 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://resonon.com/objective-lenses>.
32. SPECIM SPECTRAL IMAGING LTD. *Products* [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/products/>.
33. LARS, Fermum. *Lens mount, flange focal length and back focal length* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.vision-doctor.com/en/optical-basics/lens-mount-and-flange-back.html>.

34. FLIR. *Selecting a Lens for your Camera*. 2017.
35. NAKAMURA, Junichi (ed.). *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. 1st edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. ISBN 978-0-8493-3545-7.
36. KAMRUZZAMAN, Mohammed; SUN, Da-Wen. Introduction to Hyperspectral Imaging Technology. In: 2016. ISBN 978-0-12-802232-0. Dostupné z DOI: 10.1016/B978-0-12-802232-0.00005-0.
37. WU, Di; SUN, Da-Wen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review — Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. 2013, roč. 19, s. 1–14 [cit. 2020-12-12]. ISSN 1466-8564. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ifset.2013.04.014.
38. GMBH., Cubert. *ULTRIS 20 Plus - High Resolution Hyperspectral Video Camera* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://cubert-gmbh.com/product/hyperspectral-pan-camera-ultris-20-plus/>.
39. SPECIM SPECTRAL IMAGING LTD. *Spectral Imaging in Machine Vision Solutions* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/industry/>.
40. LTD., SPECIM SPECTRAL IMAGING. *Data Sheet - Specim PFD4K-65-V10E* [online]. [N.d.] [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/products/pfd4k-65-v10e/>.
41. CHEN, Y.; JI, Y.; ZHOU, J.; CHEN, X.; SHEN, W. Computation of signal-to-noise ratio of airborne hyperspectral imaging spectrometer. In: 2012. Dostupné z DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223191.
42. AG, Photonfocus. *PhotonSPECTRAL cameras* [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: </products/standard-cameras/photon-spectral>.
43. ASSOCIATION, Automated Imaging. *GigE Vision Standard* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?id=36&type=5>.
44. ASSOCIATION, Automated Imaging. *Camera Link Standard* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?id=37&type=6>.
45. AG, STEMMER IMAGING. *CameraLink* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/cameralink/>.
46. HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS, Inc. *ENVI - The Leading Geospatial Image Analysis Software* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.13harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>.
47. BAYSPEC, Inc. *BaySpec - Hyperspectral Imaging | Hyperspectral Camera* [online]. [N.d.] [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.bayspec.com/category/spectroscopy/hyperspectral-imaging/>.

48. QIN, Jianwei; CHAO, Kuanglin; KIM, Moon S.; LU, Renfu; BURKS, Thomas F. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering* [online]. 2013, roč. 118, č. 2, s. 157–171 [cit. 2021-02-09]. ISSN 0260-8774. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001.
49. BAYSPEC, Inc. *BaySpec - About* [online]. [N.d.] [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.bayspec.com/company/about/>.
50. PHOTONICS, Headwall. *Headwall Photonics - Hyperspectral Sensors / Hyperspectral Cameras* [online]. [N.d.] [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.headwallphotonics.com/hyperspectral-sensors>.
51. *HySpex by NEO* [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.hyspex.com/>.
52. IMEC. *Cameras* [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.imechyperspectral.com/en/cameras>.
53. IMEC. *SNAPSHOT UAV NIR+SWIR* [online]. [N.d.] [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: <https://www.imechyperspectral.com/en/cameras/snapshot-uav-nirswir>.
54. INC., Resonon. *Hyperspectral Cameras* [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://resonon.com/hyperspectral-cameras>. [online]. [vid. 8.11.2020].
55. XIMEA. *Hyperspectral Linescan USB3 camera 150 bands 470-900nm* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.ximea.com/en/products/hyperspectral-cameras-based-on-usb3-xispec/mq022hg-im-ls150-visnir>.
56. IMEC. *SNAPSCAN VNIR hyperspectral camera* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.imechyperspectral.com/en/cameras/snapskan-vnir>.
57. AG, Photonfocus. *MV1 D2048x1088 HS05 96-G2* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.photonfocus.com/products/camerafinder/camera/mv1-d2048x1088-hs05-96-g2/>.
58. NEO, HySpex by. *HySpex VNIR-1800* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-classic/hyspex-vnir-1800/>.
59. LTD., SPECIM SPECTRAL IMAGING. *PFD4K-65-V10E* [online]. [N.d.] [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/products/pfd4k-65-v10e/>.
60. PÖLÖNEN, Ilkka; SAARI, Heikki; KAIIVOSOJA, Jere; HONKAVARA, Eija; PESONEN, Liisa. Hyperspectral imaging based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV. *Proc SPIE*. 2013, roč. 8887. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2028624.

61. ZARCO-TEJADA, P. J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J. A. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2012, roč. 117, s. 322–337 [cit. 2021-02-06]. ISSN 0034-4257. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.007.
62. KOVÁČ, Daniel; VESELOVSKÁ, Petra; KLEM, Karel; VEČEŘOVÁ, Kristýna; AČ, Alexander; PEÑUELAS, Josep; URBAN, Otmar. Potential of Photochemical Reflectance Index for Indicating Photochemistry and Light Use Efficiency in Leaves of European Beech and Norway Spruce Trees. *Remote Sensing* [online]. 2018, roč. 10, č. 8, s. 1202 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z DOI: 10.3390/rs10081202.
63. LANKAPALLI, Ravikanth; S, Jayas Digvir; WHITE, Noel D.; FIELDS, Paul G.; DA-WEN, Sun. Extraction of Spectral Information from Hyperspectral Data and Application of Hyperspectral Imaging for Food and Agricultural Products. *Food and Bioprocess Technology* [online]. 2017, roč. 10, č. 1 [cit. 2020-12-14]. ISSN 19355130. Dostupné z DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-016-1817-8>.
64. VIITAKOSKI, Miko. *Food fraud detection with hyperspectral imaging* [online]. 2018 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/food-fraud-detection-with-hyperspectral-imaging/>.
65. ZHENG, Yan; BAI, Jiarui; XU, Jingna; LI, Xiayang; ZHANG, Yimin. A discrimination model in waste plastics sorting using NIR hyperspectral imaging system. *Waste Management* [online]. 2018, roč. 72, s. 87–98 [cit. 2021-02-07]. ISSN 0956-053X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.wasman.2017.10.015.
66. ULRICI, A.; SERRANTI, S.; FERRARI, C.; CESARE, D.; FOCA, G.; BONIFAZI, G. Efficient chemometric strategies for PET–PLA discrimination in recycling plants using hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* [online]. 2013, roč. 122, s. 31–39 [cit. 2021-02-07]. ISSN 0169-7439. Dostupné z DOI: 10.1016/j.chemolab.2013.01.001.
67. TATZER, Petra; WOLF, Markus; PANNER, Thomas. Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range. *Real-Time Imaging* [online]. 2005, roč. 11, č. 2, s. 99–107 [cit. 2021-02-07]. ISSN 1077-2014. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rti.2005.04.003.
68. FOX, N.; PARBHAKAR-FOX, A.; MOLTZEN, J.; FEIG, S.; GOEMANN, K.; HUNTINGTON, J. Applications of hyperspectral mineralogy for geoenvironmental characterisation. *Minerals Engineering* [online]. 2017, roč. 107, s. 63–77 [cit. 2021-02-07]. ISSN 0892-6875. Dostupné z DOI: 10.1016/j.mineng.2016.11.008.

69. SHIMONI, M.; HAELTERMAN, R.; PERNEEL, C. Hyperspectral Imaging for Military and Security Applications: Combining Myriad Processing and Sensing Techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019, roč. 7, č. 2, s. 101–117. ISSN 2168-6831. Dostupné z DOI: 10.1109/MGRS.2019.2902525.
70. GHANBARI, Hamid; JACQUES, Olivier; ADAIMÉ, Marc-Elie; GREGORY EAVES, Irene; ANTONIADES, Dermot. Remote Sensing of Lake Sediment Core Particle Size Using Hyperspectral Image Analysis. *Remote Sensing* [online]. 2020, roč. 12, č. 23 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z DOI: 10.3390/rs12233850.
71. BAKKER, W.; WERFF, H. v d.; MEER, F. v d. Determining Smile And Keystone Of Lab Hyperspectral Line Cameras. In: 2019. Dostupné z DOI: 10.1109/WHISPERS.2019.8921045. ISSN: 2158-6276.
72. ACUÑA, T.; MATTAR, C.; HERNÁNDEZ, H. J. Spectral characterization of Quillaja saponaria (Mol.) In: *Revista de Teledetección* [online]. Universitat Politècnica de València, 2016 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z DOI: 10.4995/raet.2016.6488.
73. DESTA, Feven; BUXTON, Mike. Image and Point Data Fusion for Enhanced Discrimination of Ore and Waste in Mining. *Minerals* [online]. 2020, roč. 10, č. 12 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z DOI: 10.3390/min10121110.
74. MONNO, Yusuke; KIKU, Daisuke; TANAKA, Masayuki; OKUTOMI, Masatoshi. Adaptive Residual Interpolation for Color and Multispectral Image Demosaicking. *Sensors* [online]. 2017, roč. 17 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z DOI: 10.3390/s17122787.
75. SPECIM, SPECTRAL IMAGING LTD. *Lumo Scanner - User Guide 1.2*. [N.d.].
76. VENKATANATH N; PRANEETH D; MARUTHI CHANDRASEKHAR BH; CHANNAPPAYYA, S. S.; MEDASANI, S. S. Blind image quality evaluation using perception based features. In: 2015. Dostupné z DOI: 10.1109/NCC.2015.7084843.
77. MATHWORKS. *Perception based Image Quality Evaluator (PIQE) no-reference image quality score* [online]. [N.d.] [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/images/ref/piqe.html#mw_f4c94037-0fd1-4f8f-b17d-8b293bfb4427.
78. KATEDRA RADIOELEKTRONIKY, ČVUT FEL. *Modulační přenosová funkce digitálního fotoaparátu* [online]. 2007 [cit. 2021-03-03].
79. MARMION, Mathieu. *The Top 10 Questions about Hyperspectral Imaging (Part 2 of 2)* [online]. 2016 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.specim.fi/the-top-10-questions-about-hyperspectral-imaging-part-2-of-2/>.

80. CHEIN-I, Chang. An information-theoretic approach to spectral variability, similarity, and discrimination for hyperspectral image analysis. *IEEE Transactions on Information Theory* [online]. 2000, roč. 46, č. 5 [cit. 2021-05-02]. ISSN 00189448. Dostupné z DOI: 10.1109/18.857802.
81. MATHWORKS. *Measure spectral similarity using spectral information divergence*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/sid.html>.
82. KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1993, roč. 44, č. 2-3, s. 145–163 [cit. 2021-05-02]. ISSN 00344257. Dostupné z DOI: 10.1016/0034-4257(93)90013-N.
83. MATHWORKS. *Measure spectral similarity using spectral angle mapper*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/sam.html>.
84. CHEIN-I, Chang. New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization. *Optical Engineering* [online]. 2004, roč. 43, č. 8, s. 1777 [cit. 2021-05-02]. ISSN 0091-3286. Dostupné z DOI: 10.1117/1.1766301.
85. MATHWORKS. *Measure spectral similarity using spectral information divergence-spectral angle mapper hybrid method*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/sidsam.html>.
86. PADMA, S.; SANJEEVI, S. Jeffries Matusita based mixed-measure for improved spectral matching in hyperspectral image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2014, roč. 32, s. 138–151 [cit. 2021-05-02]. ISSN 03032434. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jag.2014.04.001.
87. MATHWORKS. *Measure spectral similarity using Jeffries Matusita-Spectral Angle Mapper method*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/jmsam.html>.
88. EPSON. *EcoTank L1800* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.epson.eu/products/printers/inkjet-printers/for-home/ecotank-11800>.
89. EPSON. *SureColor SC-P9500* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.epson.eu/products/printers/large-format-printers/surecolor-sc-p9500>.

Příloha A

Seznam všech příloh

Příloha diplomové práce zahrnuje:

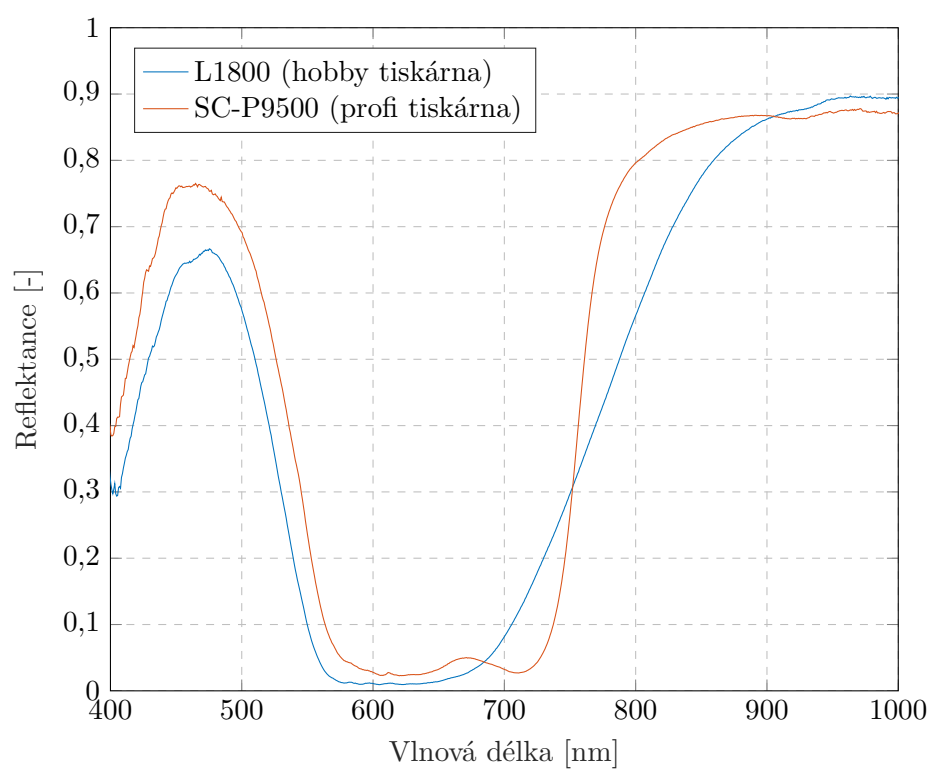
- Vlastní text práce ve formátu PDF
- Zdrojový kód vlastního programu HyperCalib ve formátu *.mlapp*
- Instalační soubor programu HyperCalib ve formátu *.mlappinstall*
- Skript *MTF_HSI.m* vyrobený k výpočtu MTF
- Skript *PIQE.m* vyrobený k výpočtu PIQE
- Skript *PSNR.m* vyrobený k výpočtu PSNR
- Skript *vzorky.m* vyrobený pro výpočty vegetačních indexů a další analýzu vzorků
- Skript *porovnaní.m* vyrobený k porovnání hyperspektrální kamery a spektrometru
- Soubor *Ink_printers_database.mat* obsahující databázi dvou tiskáren určenou pro program HyperCalib
- Laboratorní úloha 1 ve formátu PDF pro práci s hyperspektrální kamerou a měření na vzorku arašíd
- Laboratorní úloha 2 ve formátu PDF pro práci s hyperspektrální kamerou a měření na vzorku fotek
- Vyrobený obrazec pro měření PSNR ve formátu Adobe Illustrator Artwork

Na DVD budou přiloženy navíc také dva hyperspektrální snímky, samotný soubor pro nahrání do programu HyperCalib je ve složce Capture:

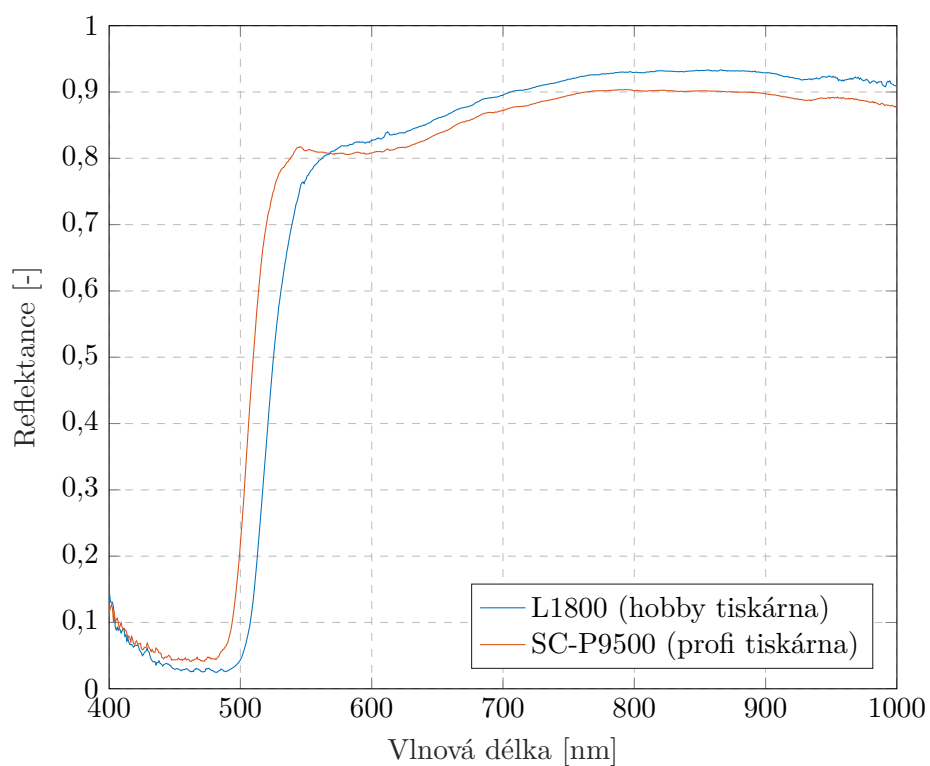
- *Arasidy – 2binning_2021 – 03 – 02_10 – 15 – 32.zip* - 500MB hyperspektrální snímek vzorku arašíd a skořápky s použitým dvojnásobným binningem.
- *Ovoce_zelenina_2021 – 03 – 26_10 – 39 – 37.zip* - 1700MB hyperspektrální snímek vzorku bobule bílého vína, jablka Gala a rajčete bez binningu.

Příloha B

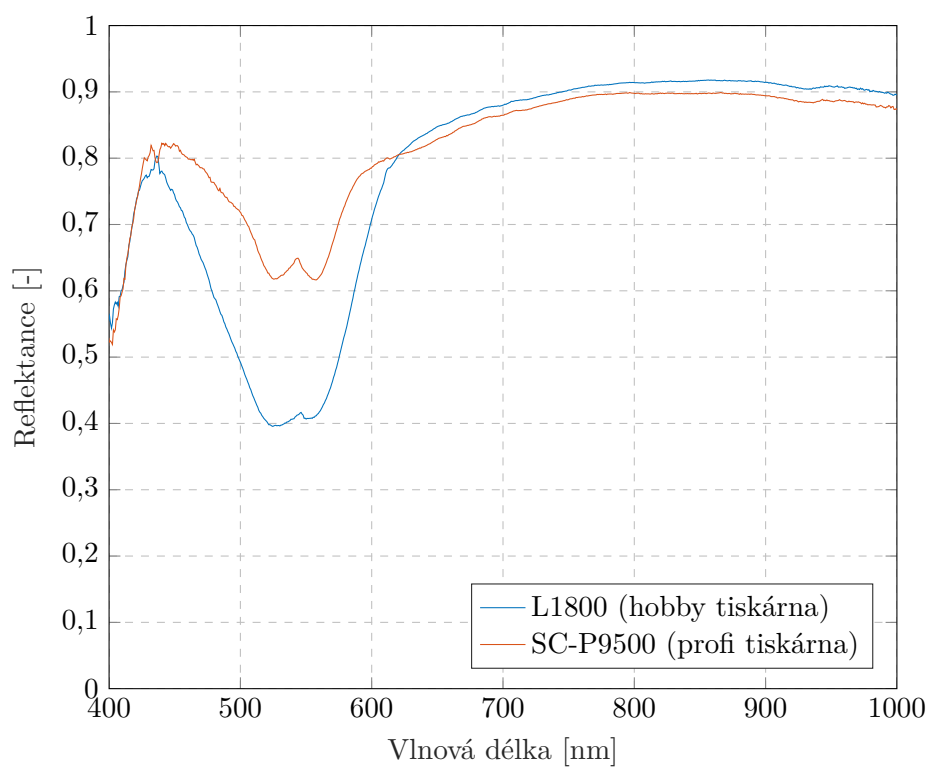
Inkoust - testovací obrazec - barvy



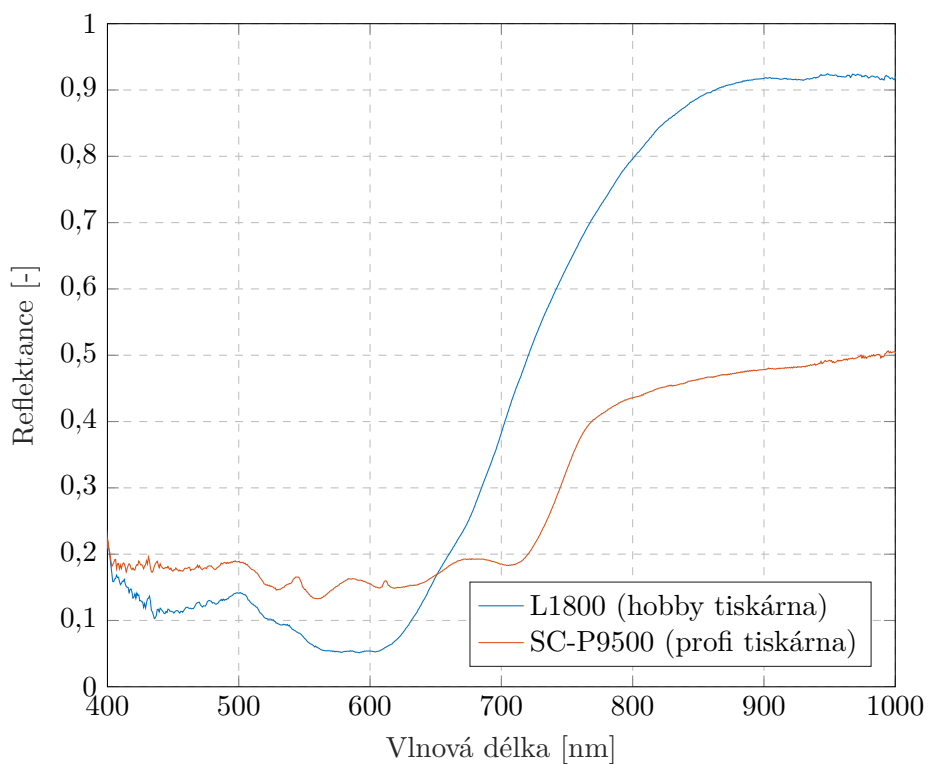
Obrázek B.1: Spektrální reflektance - inkoust - světle modrá barva (na terči C15)



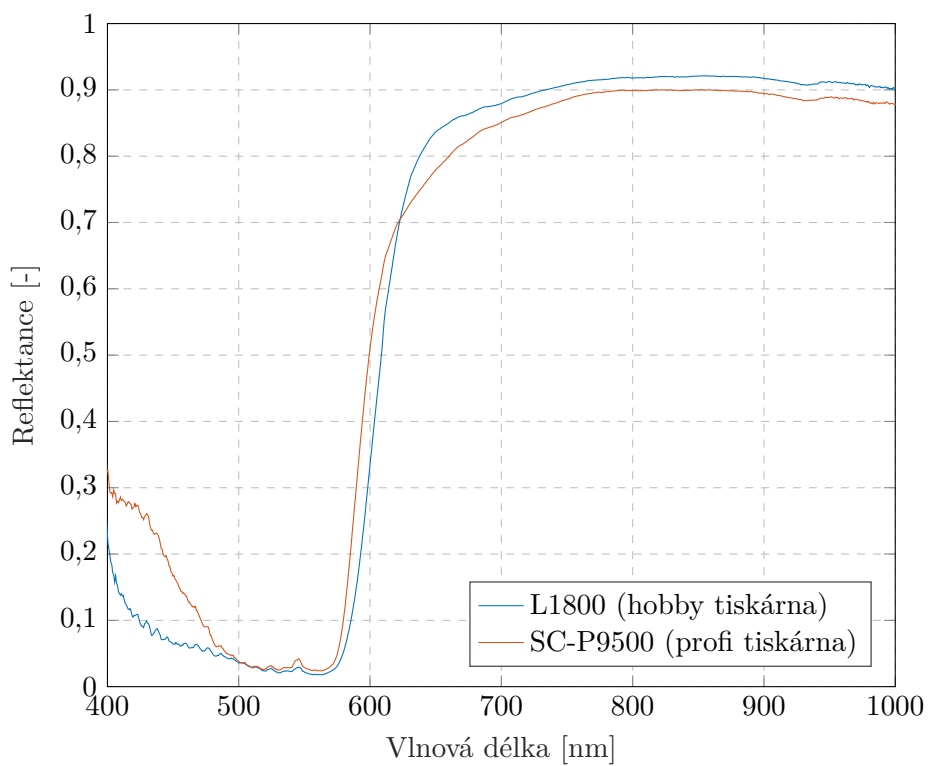
Obrázek B.2: Spektrální reflektance - inkoust - žlutá barva (na terči J13)



Obrázek B.3: Spektrální reflektance - inkoust - světle růžová barva (na terči G15)



Obrázek B.4: Spektrální reflektance - inkoust - šedá barva (na terči H1)



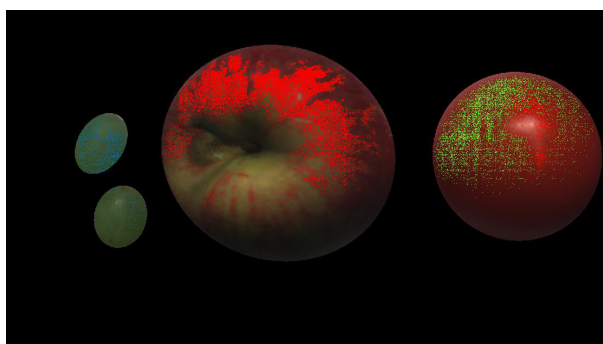
Obrázek B.5: Spektrální reflektance - inkoust - fialová barva (na terči K3)

Příloha C

Ovoce a zelenina - použité algoritmy rozpoznání dle reflektance



Obrázek C.1: Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib
- použitá fotka pro následující snímky před segmentací - náhled v RGB



Obrázek C.2: Rozpoznání ovoce a zeleniny dle reflektance v programu HyperCalib
- použití algoritmu SID s hranicí 40

