

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCA
HYPER SPEKTRÁLNÍ KAMERA
HYPER SPECTRAL CAMERA

Autor: Bc. Adam Karas

Vedúci bakalárskej práce: Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.

Praha 2022



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Karas** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **483383**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**
Specializace: **Přístrojová technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hyperspektrální kamera

Název diplomové práce anglicky:

Hyperspectral camera

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je zprovoznění hyperspektrální kamery včetně manipulace se vzorkem a osvětlení.
- rešerše principů hyperspektrálních kamer a jejich aplikací
- oživení kamery, seznámení se s obslužným SW
- návrh a výroba stojanu na kameru s posuvem vzorku
- návrh a implementace osvětlení vzorku
- zajistit kontrolovaný posuv měřeného objektu, zpracovat naměřená data vybraného vzorku

Seznam doporučené literatury:

- [1] Václavík P.: Technická optika II, skriptum ČVUT
- [2] Moodle podklady k předmětu Konstrukce optomechanických přístrojů
- [3] Kenyon I.R.: The Light Fantastic, Oxford University Press, 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D. odbor přesné mechaniky a optiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

24.04.2024
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne, a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

Dátum:

.....

Adam Karas

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa poďakovať vedúcej mojej diplomovej práce, Ing. Bc. Šárke Němcovej, Ph.D., za odbornú a pedagogickú pomoc, trpezlivosť, rady a nápady, ktoré som zúžitkoval pri jej vypracovaní.

NÁZOV DIPLOMOVEJ PRÁCE:

HYPERSPEKTRÁLNÍ KAMERA

ANOTÁCIA

Technológia hyperspektrálnych kamier začína byť využívaná v širokom spektre aplikácii, vrátane poľnohospodárstva, potravinárskeho priemyslu alebo biomedicíne. Napriek ich nesporným výhodám sa často stretávajú s problémami týkajúcimi sa ich implementácie v pracovných prostrediach.

Táto práca sa zaoberá tematikou hyperspektrálneho snímania. V rešeršnej časti skúma princípy a fungovanie hyperspektrálnych kamier, ďalej ponúka prehľad o praktických aplikáciách vo vede a priemysle a následne sa bližšie zameriava na hyperspektrálnu kameru HAIP BlackIndustry VNIR V2.

Návrhová a praktická časť tejto práce sa zaoberá návrhom pracovnej stanice pre túto kameru. Návrh pracovnej stanice zahŕňa použitie krokového motora na presné polohovanie kamery. Riadenie rýchlosti pohybu kamery je kľúčové pre dosiahnutie optimálnej kvality obrazu. Okrem toho je venovaná pozornosť návrhu a implementácie vhodného osvetlenia, ktoré zabezpečuje konzistentnú expozíciu scény a minimalizuje artefakty. Pracovná stanica je navrhnutá tak, aby bola robustná, stabilná a zároveň jednoduchá na obsluhu a údržbu.

Posledná časť je venovaná záznamu hyperspektrálnych snímok a ich vyhodnoteniu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

hyperspektrálna kamera, hyperspektrálne snímanie, HAIP BlackIndustry VNIR V2, pracovná stanica, krokový motor, polohovanie kamery, riadenie rýchlosti, kvalita obrazu, osvetlenie

DIPLOMA THESIS TITLE:

HYPERSPETRAL CAMERA

ABSTRACT

Hyperspectral imaging technology is beginning to be used in a wide range of applications, including agriculture, food industry or biomedicine. Despite their undeniable advantages, they are often faced with challenges regarding their implementation in working environments.

This work deals with the topic of hyperspectral imaging. In the research part, it examines the principles of hyperspectral cameras, then offers an overview of practical applications in science and industry, and then takes a closer look at the HAIP BlackIndustry VNIR V2 hyperspectral camera.

The practical part of this thesis deals with the design of a workstation for this camera. The workstation design involves the use of a stepper motor to accurately position the camera. Controlling the speed of the camera movement is a key to achieve the optimum image quality. In addition, attention is given to the design and implementation of an appropriate lighting to ensure a consistent scene exposure and minimizing artifacts. The workstation is designed to be robust, stable and at the same time easy to operate and maintain.

The final part is focused on obtaining hyperspectral pictures and their evaluation.

KEY WORDS

hyperspectral camera, hyperspectral imaging, HAIP BlackIndustry VNIR V2, workstation, stepper motor, camera positioning, speed control, image quality, illumination

Obsah

Zoznam skratiek, konštant a veličín	9
Úvod.....	10
1. Teoretická časť	11
1.1. Definícia pojmov	11
1.2. Princípy hyperspektrálnych kamier	15
1.2.1. Disperzné prvky	15
1.2.2. Objektívy	19
1.2.3. Snímkovacia frekvencia.....	21
1.2.4. Typy senzorov.....	21
1.3. Technológia získavania hyperspektrálnych údajov	23
1.3.1. Multispektrálne snímanie.....	23
1.3.2. Hyperspektrálne snímanie.....	23
1.3.3. Porovnanie hyperspektrálnych kamier s inými zobrazovacími technológiami	24
1.3.4. Whisk-broom	25
1.3.5. Push-broom.....	26
1.3.6. Staring.....	26
1.3.7. Snapshot.....	27
1.3.8. Spektrálny rozsah.....	28
1.3.9. Spektrálne miešanie (Spectral mixing).....	29
1.3.10. Spektrálne rozlíšenie a šírka pásma	30
1.4. Aplikácie hyperspektrálnych kamier	31
1.4.1. Poľnohospodárstvo	31
1.4.2. Medicína	33
1.4.3. Triedenie odpadu	33
1.4.4. Potravinársky priemysel	34
1.4.5. Ťažba.....	34
1.4.6. Kontrola tenkých vrstiev.....	35
1.5. Metódy spracovania hyperspektrálnych dát	38
1.5.1. Kalibrácia.....	39
1.5.2. Predspracovanie údajov	40
1.5.3. Segmentácia a klasifikácia.....	40
1.5.4. Vizualizácia hyperspektrálnych údajov	40
1.5.5. Osvetlenie vzoriek	40
1.6. Záver rešerše	43

1.6.1.	Výhody a obmedzenia hyperspektrálneho zobrazovania.....	43
1.6.2.	Budúcnosť hyperspektrálneho zobrazovania.....	44
2.	Návrhová časť.....	45
2.1.	Kamera BlackIndustry VNIR v2 by HAIP Solutions.....	45
2.1.1.	Technické špecifikácie.....	45
2.2.	Pilotné meranie.....	46
2.3.	Návrh pracovnej stanice s využitím tejto kamery.....	50
2.3.1.	Konštrukcia.....	52
2.3.2.	Pohon.....	54
2.3.3.	Elektronika.....	59
2.3.4.	Softvér.....	63
2.3.5.	Osvetlenie.....	67
3.	Praktická časť.....	69
3.1.	Výroba.....	69
3.1.1.	3D tlač.....	69
3.1.2.	Základne pre pohon.....	71
3.1.3.	Elektronika.....	72
3.1.4.	Osvetlenie.....	73
4.	Praktická aplikácia a vyhodnotenie získaných dát.....	75
4.1.	Testovanie v reálnych podmienkach.....	75
4.2.	Ukážkové snímky.....	80
	Záver.....	83
	Zoznam použitej literatúry a zdrojov.....	85
	Zoznam obrázkov, rovníc, tabuliek a grafov.....	93
	Zoznam použitého softvéru.....	96
	Zoznam príloh.....	96

Zoznam skratiek, konštánt a veličín

λ - vlnová dĺžka [nm]

c - rýchlosť svetla vo vákuu [299 792 458 m.s⁻¹]

ν - frekvencia [Hz]

f – ohnisková vzdialenosť [mm]

n_i – relatívny index lomu pre prostredie i [1]

v – rýchlosť [mm.s⁻¹]

T – perióda [s]

ϵ_0 - permitivita vákua [8,8541878128 . 10⁻¹² F.m⁻¹]

μ_0 - permeabilita vákua [1,25663706212 . 10⁻⁶ N.A⁻²]

THT - Through-hole technology (Označenie pre komponenty s drôtovým vývodom)

AC - Alternating current (Striedavý prúd)

DC - Direct current (Jednosmerný prúd)

β – zväčšenie [1]

AOTF – Acousto-Optic Tunable Filter

LCTF - Liquid Crystal Tunable Filter

HSI – Hyperspectral Imaging

Q – Osová sila [N]

M – krútiaci moment [Nm]

WD – pracovná vzdialenosť [mm]

Úvod

Hyperspektrálna kamera zaznamenáva celé spektrum dopadajúceho svetla na každý pixel. Pre každý objekt zaznamenáva jeho jedinečný spektrálny podpis, ktorý poskytuje podrobné informácie o materiálovom zložení snímaného objektu.

Hyperspektrálne zobrazovanie (Hyperspectral Imaging, skr. HSI) je technika, ktorá analyzuje široké spektrum svetla namiesto toho, aby každému pixelu priradila len základné farby (červenú, zelenú a modrú). Svetlo dopadajúce na každý pixel sa rozdelí do mnohých rôznych spektrálnych pásiem, aby sa poskytlo viac informácií o tom, čo sa zobrazuje. Algoritmy a metodiky spracovania obrazu spojené s HSI sú výsledkom vojenského výskumu a používali sa predovšetkým na identifikáciu cieľov a iných objektov v pozadí. Postupne sa HSI začalo využívať aj v civilnom sektore a našlo uplatnenie najmä v satelitnej technológii. [1]

História

Termín "hyperspektrálne zobrazovanie" sa prvýkrát objavil v článku, v ktorom sa diskutovalo o prvých výsledkoch techniky zobrazovacej spektrometrie (Goetz a kol., 1985). Zdá sa, že tento termín sa dostal do vedeckých kruhov koncom 80. rokov 20. Storočia. Modifikátor "hyper" znamená príliš veľa, ako napríklad hyperinflácia alebo hyperkinetika. V skutočnosti však ide o výstižný opis veľkosti súboru spektrálnych dát zozbieraných senzormi. Inými slovami, žiadny materiál nevyžaduje na jednoznačnú identifikáciu stovky spektrálnych pásiem rozložených v niekoľkých oktávach elektromagnetického spektra. Keď sa však zmieša s mnohými inými materiálmi na zemskom povrchu a pozoruje sa cez nepriaznivú a premenlivú atmosféru, v číslach je istota. Aby bolo možné na údaje aplikovať štatistické techniky, je potrebné nadmerné množstvo spektrálnych pásiem na vyčlenenie rôznych materiálových zložiek, pixel pozorovaný pomocou senzora. [2]

Začiatky zobrazovacej spektrometrie Zeme sa datujú od vypustenia družice Landsat-1, vtedy nazývanej ERTS-1, v roku 1972. Na analýzu prvých multispektrálnych snímok z družice obiehajúcej okolo Zeme boli využité všetky zdroje Laboratória pre spracovanie obrazu (Image Processing Laboratory skr. IPL) NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), ktoré bolo v tom čase pravdepodobne najlepším zariadením svojho druhu. Počas terénnych štúdií porovnávajúcich rozšírené snímky MSS s pozemnými pozorovaniami sa ukázalo, že jemné farebné odchýlky na snímkach sa v teréne ťažko identifikujú a na správnu interpretáciu farieb budú potrebné merania spektrálnej odrazivosti neporušených povrchových vzoriek. MSS bol v podstate reflektančný spektrometer s nízkym rozlíšením, síce len so 4 spektrálnymi pásmami, ale poskytujúci informácie mimo rozsahu ľudského videnia. [2]



Obr. 0.1 - Kontrola družicových snímok pomocou prenosného spektrometru (1972) [2]



Obr. 0.2 - Družica Landsat I- [3]

1. Teoretická časť

1.1. Definícia pojmov

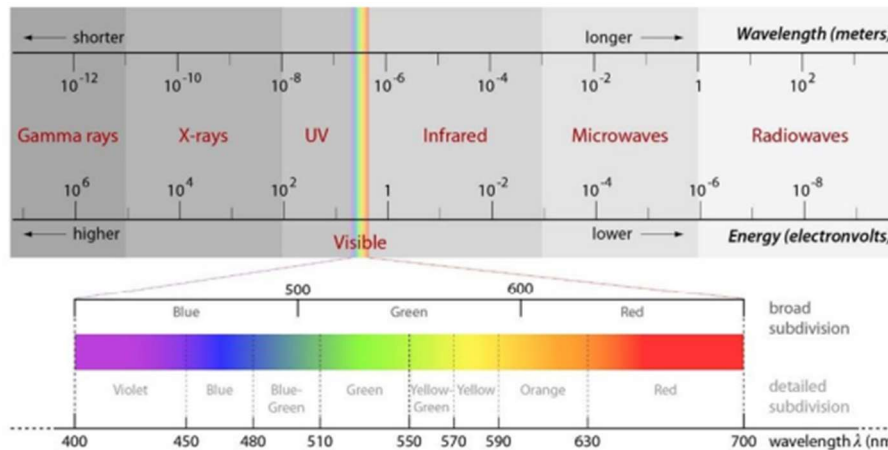
Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum sa skladá z elektromagnetických vln rôznych frekvencií alebo vlnových dĺžok. Spektrum možno všeobecne rozdeliť na rádiové vlny, mikrovlny, infračervené vlny, viditeľné svetlo, ultrafialové žiarenie, röntgenové žiarenie a gama žiarenie. Svetlo sa označuje časť spektra viditeľná pre ľudské oko. Táto časť je definovaná vlnovou dĺžkou 380-770 nm. Vlnová dĺžka celého spektra sa začína približne na 10^{-16} metroch, kde nájdeme gama žiarenie a postupne sa zvyšuje až po dlhé rádiové vlny. Naopak, frekvencia sa postupne znižuje od gama žiarenia k spomínaným rádiovým vlnám. Frekvencia ν a vlnová dĺžka λ súvisia so vzťahom (1.1), kde c je rýchlosť svetla vo vákuu. Je to rýchlosť, ktorou sa v tomto prostredí šíria všetky elektromagnetické vlny. [4]

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

Rýchlosť svetla c je vo vákuu určená na 299 792 458 m/s. Táto hodnota je určená definíciou vo vzťahu (1.2), kde ϵ_0 je permitivita vákuu a μ_0 je permeabilita vákuu. Rýchlosť svetla vo vákuu sa často zaokrúhľuje na 3×10^8 m/s. [4]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1.2)$$



Obr. 1.1- Elektromagnetické spektrum [2]

Pre hyperspektrálne snímanie je obzvlášť dôležité pásmo viditeľného svetla a infračervené žiarenie. Infračervené spektrum začína pri vlnovej dĺžke 770 nm a siaha až do 1 mm. Zvyčajne sa delí na tri časti - krátku, strednú a dlhú. V závislosti od aplikácie však možno rozlišovať rôzne delenia tohto pásma. Podľa normy ISO 20478 sa pásmo delí na blízke infračervené označované skratkou NIR, s vlnovými dĺžkami od 0,78 do 3 μm , strednú infračervenú oblasť (Mid-Infrared), skrátene MIR, s vlnovou dĺžkou od 3 do 50 μm , a ďaleké Far-Infrared (FIR) s vlnovou dĺžkou od 50 do 1 000 μm . [5]

Spektrálny podpis

Spektrum materiálu sa označuje aj ako jeho spektrálny podpis. Čistý spektrálny podpis bez akýchkoľvek vonkajších vplyvov sa nazýva koncový člen (end member) alebo referenčné spektrum. Tento koncový člen možno získať meraním v laboratóriu pomocou spektrometra. Koncový člen sa potom používa v analýze hyperspektrálnych snímok na identifikáciu materiálu pomocou rôznych algoritmov. Detekčný algoritmus potom dokáže nájsť v nasnímanom spektre práve uvedené koncové členy. [6]

Známe spektrálne signatúry mnohých objektov a materiálov možno nájsť v spektrálnych knižniciach. Po získaní spektrálnej signatúry snímaného objektu je možné ho porovnať s touto databázou a určiť, o aký materiál sa jedná. Mnohé spektrálne knižnice sú voľne dostupné na použitie ako napríklad spektrálna knižnica ECOSTRESS od NASA. Táto konkrétna knižnica obsahuje viac ako 3 400 spektier rôznych prírodných a umelých materiálov od minerálov, pôdy, vegetácie, vody až po meteority. Rozsahy spektier pre rozlíšenie materiálov sú v rozmedzí od 0,35 do 15,4 mikrometra. [7], [8]

Spektroskopia

Spektroskopia je veda o skúmaní interakcie medzi hmotou a vyžarovanou energiou. Je to štúdium absorpčných vlastností hmoty alebo absorpčného správania sa hmoty pri vystavení elektromagnetickému žiareniu. Spektroskopia nevytvára žiadne výsledky, je to len teoretický prístup k vede. [9]

Spektrometria

Spektrometria je metóda, ktorá sa používa na získanie kvantitatívneho merania spektra. Je to praktická aplikácia, pri ktorej sa získavajú výsledky, ktoré pomáhajú pri kvantifikácii napríklad absorpcie, optickej hustoty alebo transmitancie. [9]

Spektrometer

Spektrometer je zastrešujúci termín, ktorý popisuje prístroj, ktorý oddeľuje a meria spektrálne zložky fyzikálnych vlastností. Sú to zariadenia, ktoré merajú spojitú premennú, v ktorej sú zložky spektra oddelené od ich pôvodnej zmesi. [10]

Existuje niekoľko variácií spektrometrov a niektoré z najbežnejších sú spektrometer nukleárnej magnetickej rezonancie (NMR), hmotnostný spektrometer a optický spektrometer. [10]

NMR spektrometer

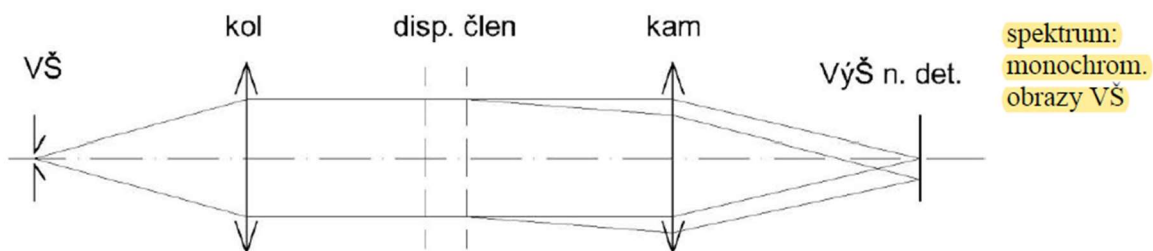
NMR spektrometer pozoruje a meria interakciu spinov jadier, keď je vzorka umiestnená v silnom, konštantnom magnetickom poli. NMR signál vzniká, keď jadrá interagujú s magnetickým poľom s frekvenciou, ktorá rezonuje s frekvenciou jadier. Intramolekulárne magnetické pole obklopujúce atóm v molekule sa mení s rezonančnou frekvenciou, čím sa odhaľuje molekulárna štruktúra vzorky. [10]

Hmotnostný spektrometer

Hmotnostný spektrometer meria pomer hmotnosti k náboju iónov a identifikuje zloženie prvkov prítomných vo vzorke. Funguje to tak, že sa vzorka ionizuje, čo spôsobí, že sa niektoré molekuly nabijú a oddelia podľa ich pomeru hmotnosti a náboja. Tieto ióny potom deteguje zariadenie, ktoré dokáže detegovať nabitú časticu. [10]

Optický spektrometer

Optický spektrometer meria vlastnosti svetla, t.j. zmena v absorpcii a emisii intenzity svetla s vlnovou dĺžkou umožňuje identifikáciu materiálov. [10]



Obr. 1.2 - Všeobecná schéma spektrometru [11]

Hlavné charakteristiky:

- Rozlišovacia schopnosť - schopnosť rozlíšiť vlnové dĺžky dvoch lúčov líšiacich sa o $\Delta\lambda$ (čím vyššia, tým lepšie) [11]

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} [1] \quad (1.3)$$

Cca 5-50 000, v maximálnom prípade až 600 000. Nemusí byť konštantná v celom rozsahu

- Uhlová disperzia – miera rozbiehavosti 2 lúčov blízkych vlnových dĺžok (závisí na disperznom člene) [11]

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} \left[\frac{rad}{m} \right] \quad (1.4)$$

- Lineárna disperzia – lineárna vzdialenosť 2 lúčov blízkych λ v ohniskovej rovine kamery (v rovine výstupnej štrbiny detektoru) [11]

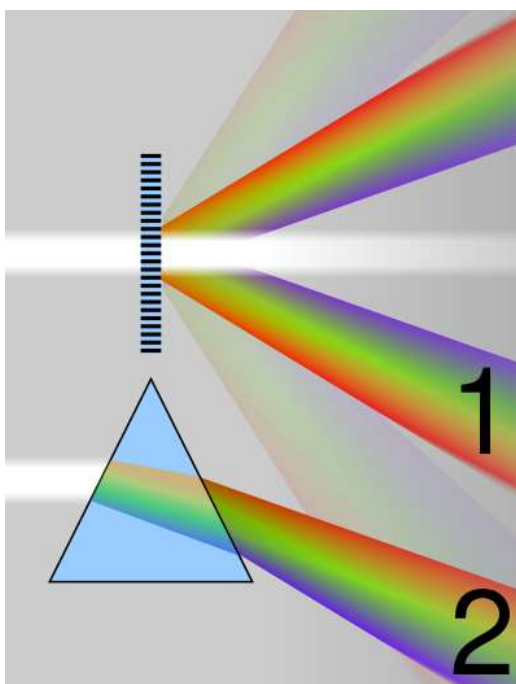
$$T = \frac{dl}{d\lambda} [1] \quad (1.5)$$

1.2. Princípy hyperspektrálnych kamier

1.2.1. Disperzné prvky

Jednotlivé farby, z ktorých sa skladá biele svetlo majú rôzne vlnové dĺžky. Keď biele svetlo prechádza do disperzného prvku, pre každú farbu sa ohýba alebo láme pod iným uhlom, čo vedie k oddeleniu farieb.

Hlavnými typmi disperzných prvkov sú optický hranol a difrakčná mriežka. Používajú sa aj ich rôzne kombinácie.

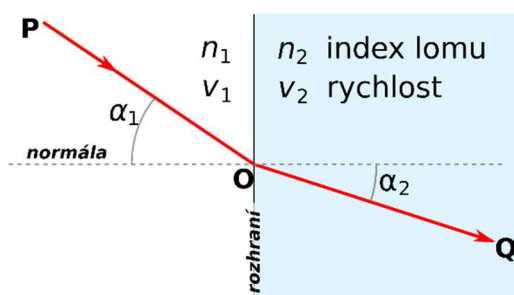


Obr. 1.3 - Rozklad bieleho svetla na mriežke a hranole [12]

Optický hranol

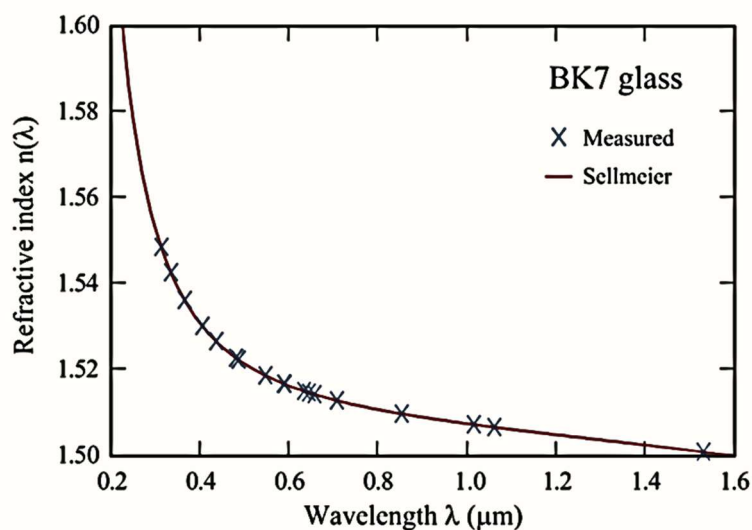
Pri rozklade svetla pomocou hranola sa využíva lom svetla pri prechode z jedného optického prostredia do druhého s iným indexom lomu. Tento jav popisuje Snellov zákon lomu: [11]

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (1.6)$$



Obr. 1.4 - lom lúča pri prechode z opticky redšieho do opticky hustejšieho prostredia [13]

Pre priradenie jednotlivej vlnovej dĺžky k jej indexu lomu v danom materiále sa využíva Sellmeierova rovnica. Sellmeierova rovnica je empirický vzťah medzi indexom lomu a vlnovou dĺžkou pre konkrétne transparentné prostredie. [14]



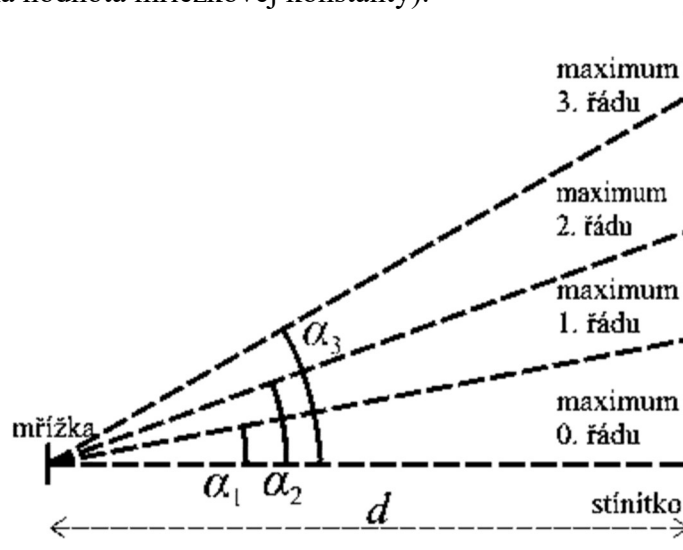
Graf 1-1 - Indexy lomu pre sklo BK7 [14]

Difrakčná mriežka

Difrakčná mriežka sa skladá z mnohých tenkých štrbín rozmiestnených vedľa seba v rovnakej vzdialenosti. Pri rozklade svetla pomocou difrakčnej mriežky sa využíva ohyb svetla, ktorý popisuje mriežková rovnica: [11]

$$\sin \alpha_k = \frac{k\lambda}{b} \quad (1.7)$$

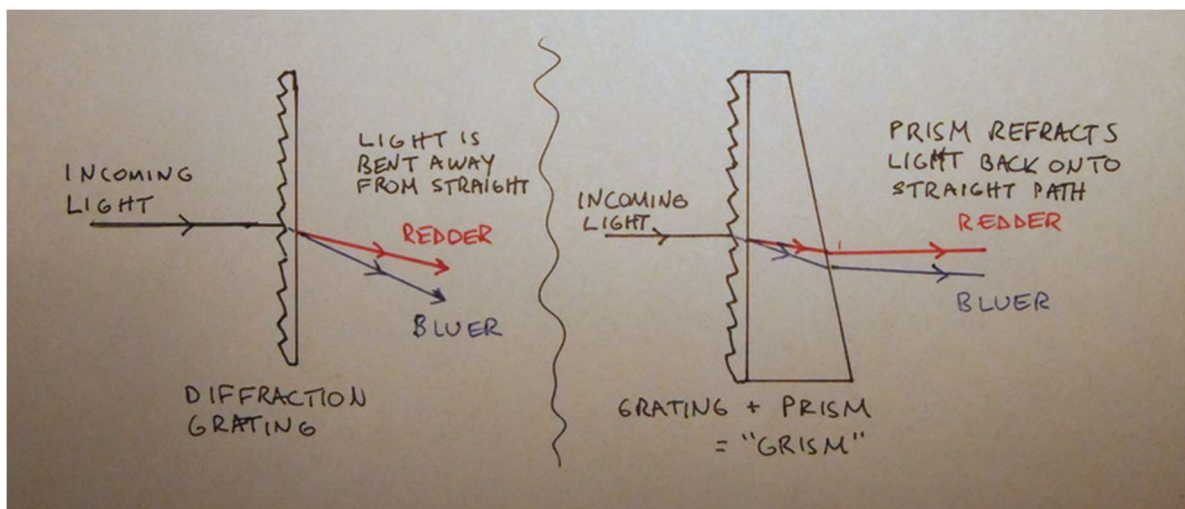
Kde k je rád daného maxima, λ je vlnová dĺžka a b je vzdialenosť medzi vrypami na mriežke (prevrátená hodnota mriežkovej konštanty).



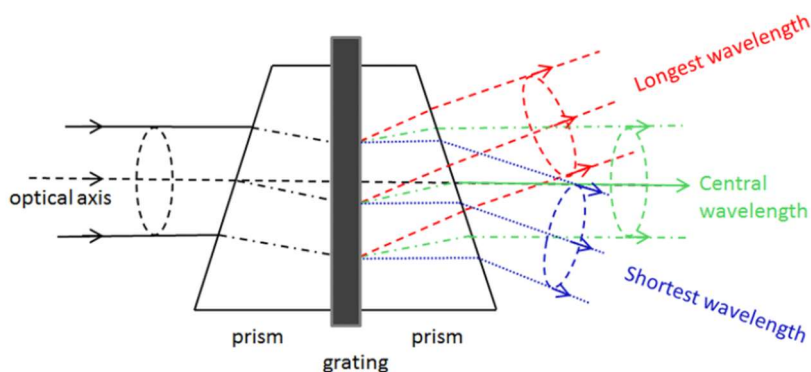
Obr. 1.5 - Náčrt pre difrakciu na mriežke [11]

GRISM (nazývaný aj mriežkový hranol) je kombinácia hranola a mriežky usporiadaná tak, aby ním prešlo svetlo so zvolenou centrálnou vlnovou dĺžkou. Výhodou tohto usporiadania je, že jeden a ten istý fotoaparát možno použiť na zobrazovanie (bez mriežky) aj na spektroskopiu (s mriežkou). GRISM sa vkladá do lúča kamery, ktorý je už kolimovaný. Potom sa vytvorí rozptýlené spektrum so stredom v mieste objektu v zornom poli kamery. [15], [16]

PGP (Prism-Grating-Prism) sa používa v nízkonákladových hyperspektrálnych systémoch pre priemysel a výskumné aplikácie v rozsahu vlnových dĺžok od 320 do 2700 nm. [15], [16]



Obr. 1.6 - Princíp mriežkového hranola [17]



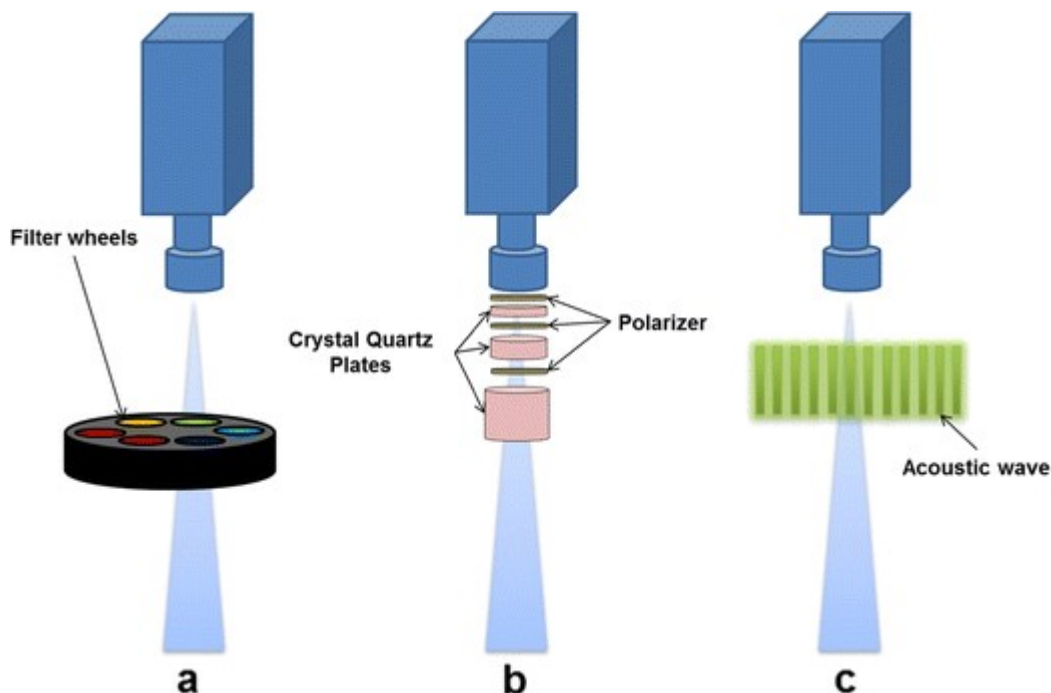
Optical principle of the prism-grating-prism (PGP)

Obr. 1.7 – PGP, kombinácia hranol-mriežka-hranol [18]

Laditeľné filtre

Na rozklad svetla sa môžu použiť laditeľné filtre alebo filtračné koleso. Filtračné koleso je rozdelené na menší počet farebných filtrov, a preto je vhodné na vhodnejšie pre multispektrálne systémy. Rýchlosť prepínania medzi vlnovými dĺžkami (t. j. filtrov) je približne 1 sekunda. V porovnaní s laditeľnými filtermi LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter),

kde sa čas prepínania pohybuje od 50 do 500 ms, alebo s AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) s rýchlosťou prepínania od 10 do 50 μ s, je pomalé. [19]



Obr. 1.8 - rozličné druhy laditeľných filtrov (zľava filtračné koleso, LCTF, AOTF) [20]

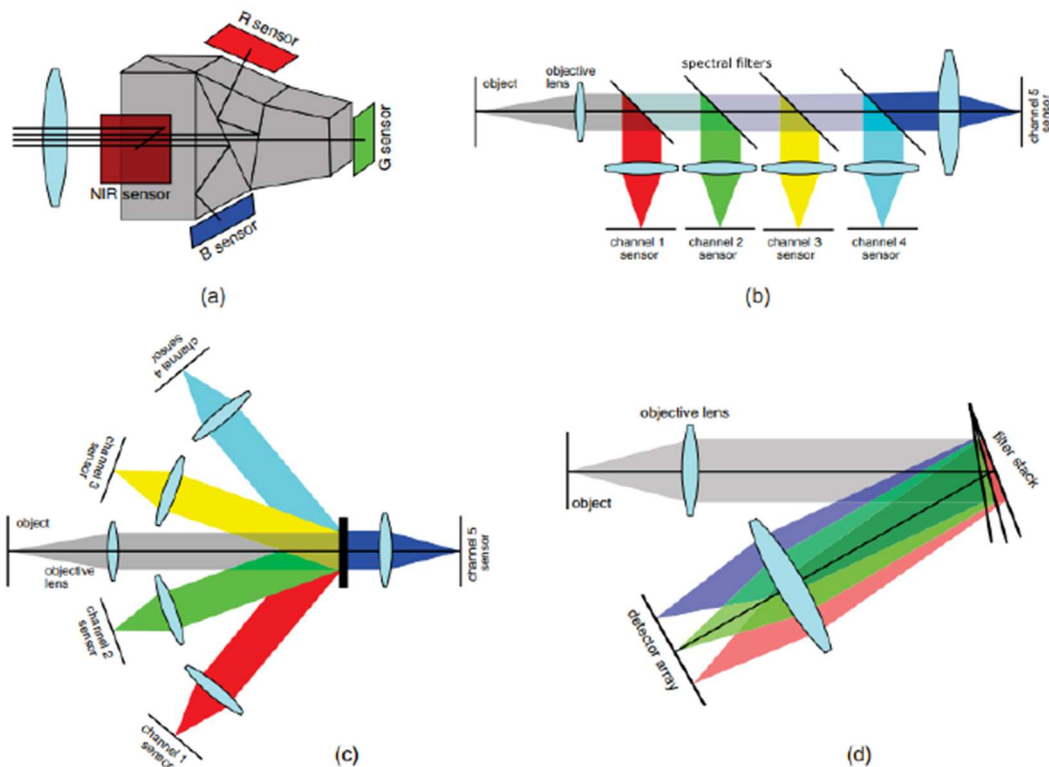
AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) funguje na základe interakcie medzi svetelnými a zvukovými vlnami v optickom prostredí. Táto interakcia je známa ako akusticko-optický efekt. Keď sa zvuková vlna (akustická vlna) šíri cez médium (zvyčajne kryštál), vytvára periodické zmeny indexu lomu média, čím sa vytvára difrakčná mriežka. Svetlo prechádzajúce týmto prostredím sa môže difraktovať touto mriežkou a vlnová dĺžka difraktovaného svetla závisí od frekvencie akustickej vlny. [21]

LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter) funguje na základe elektricky riadeného dvojlomu materiálov z tekutých kryštálov. Dvojlom je vlastnosť materiálu mať rôzne indexy lomu pre rôzne polarizácie svetla. Úpravou orientácie molekúl tekutých kryštálov pomocou elektrického poľa môže filter selektívne prepúšťať svetlo špecifických vlnových dĺžok. [21]

Medzi výhody laditeľných AOTF a LCTF filtrov patrí vysoké spektrálne rozlíšenie, široký spektrálny rozsah, jednoduchá zmena vlnovej dĺžky a výsledný obraz bez skreslenia. [21]

Zobrazovače s jedným záberom (Single shot imagers)

Multispektrálne zobrazovače sa môžu použiť na rozklad svetelného a infračerveného žiarenia snímacieho systému, ktorý je obmedzený počtom spektrálnych kanálov. Väčšina týchto systémov s disperzným prvkom a sústavou kmitajúcich mikrozrkadiel tak rozdeľuje svetlo do maximálne štyroch kanálov. Ilustráciu možno vidieť na obrázku 1.9. [19]



Obr. 1.9 - Schéma štyroch rôznych multispektrálnych rozdeľovačov lúčov (a) hranolový rozdeľovač lúča s tenkými vrstvami, (b) sekvencia dichroických zrkadiel, (c) hologramový optický rozdeľovač lúčov, (d) spektrálny náklonový rozdeľovač [19]

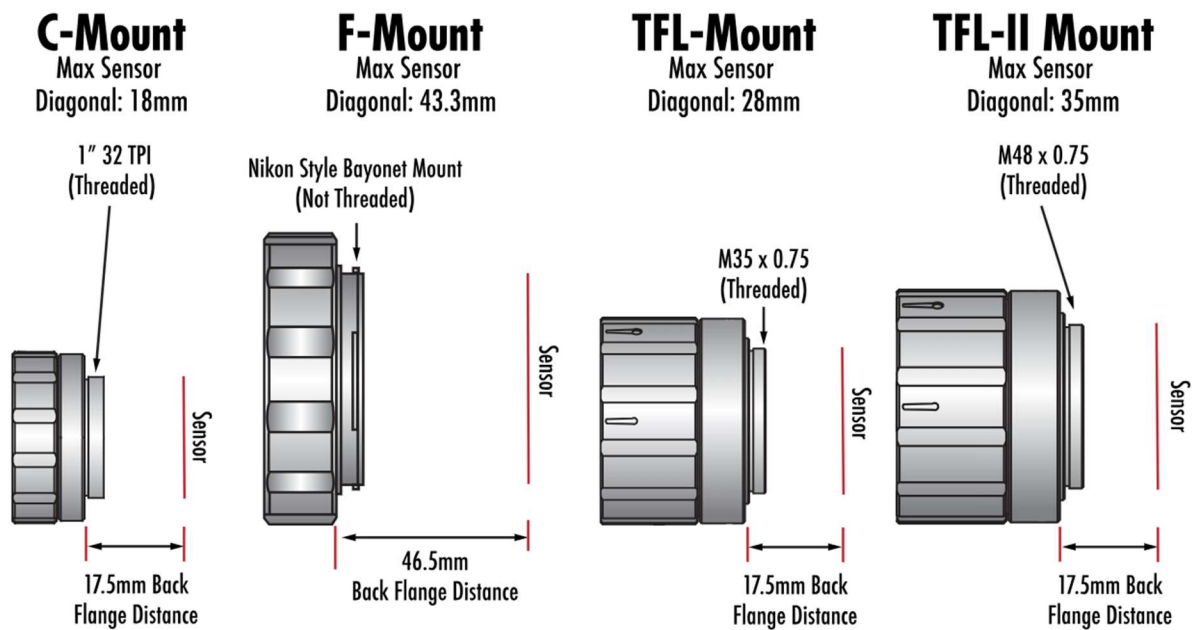
1.2.2. Objektívy

Optická časť hyperspektrálnych kamier sa veľmi nelíši od bežnej kamery. Pred snímačom máme vždy objektív s určitou ohniskovou vzdialenosťou. Vo väčšine prípadov sa prepočítava na ekvivalentnú f' , teda pre veľkosť formátu obrazu Full Frame (36 x 24 mm), čo je rovnaká veľkosť ako jeden snímok filmu. [22], [23], [24]

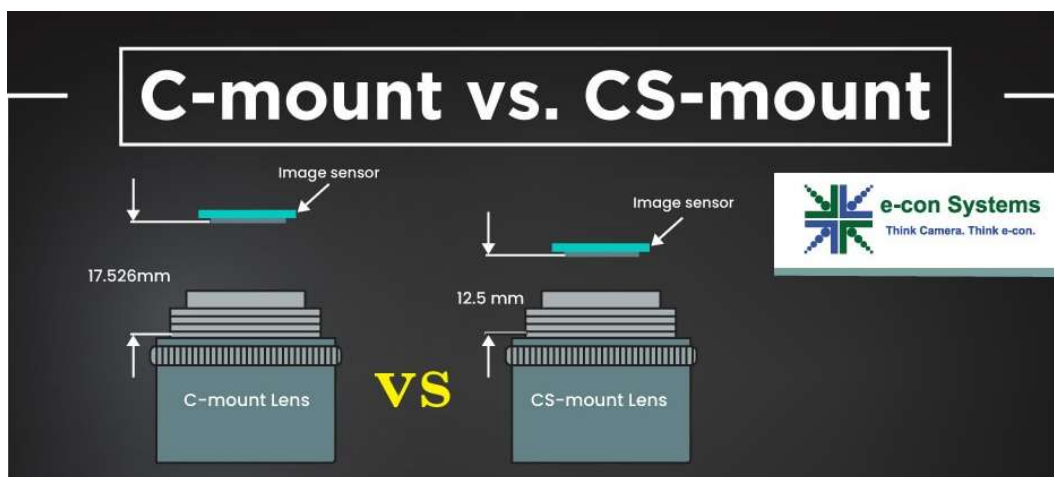
Objektív s ekvivalentnou ohniskovou vzdialenosťou 50 mm nazývame štandardným objektívom. Objektívy s nižšou hodnotou sa považujú za širokouhlé. Vyššie ohniskové vzdialenosti znamená menšiu scénu, teda menšie zorné pole. Spravidla objektívy s ohniskovou vzdialenosťou väčšou ako 50 mm sa zvyčajne označujú ako teleobjektívy. Hlavní výrobcovia hyperpektrálnych kamier, napr. Resonon a Specim ponúkajú vo svojom katalógu objektívy s rôznymi ohniskovými vzdialenosťami (záleží na aplikácii) [22], [23], [24]

Clonové číslo vyjadruje pomer f/D , kde D je priemer apertúrnej clony objektívu a f je ohnisková vzdialenosť. Nižšie clonové číslo znamená menšiu hĺbku ostrosti. Zvyčajne sa clonové číslo sa pohybuje od $f/1,4$ do $f/8$. Optika objektívu môže mať množstvo väd, chromatických a monochromatických. Monochromatické chyby sú napríklad otvorová vada, koma, astigmatizmus, sklenuťie poľa a skreslenie (súdkovité alebo poduškovité). [25]

Pre hyperspektrálne kamery sa najčastejšie používajú objektívy s bajonetovým uchytением C-mount, CS-mount, F-mount alebo iné vlastné riešenia výrobcov. Objektív C-mount je definovaný v norme ISO 10935, ktorá presne špecifikuje rozmery a polohu obrazovej roviny. [25]



Obr. 1.10 - Princípy upevnenia jednotlivých objektívov [26]



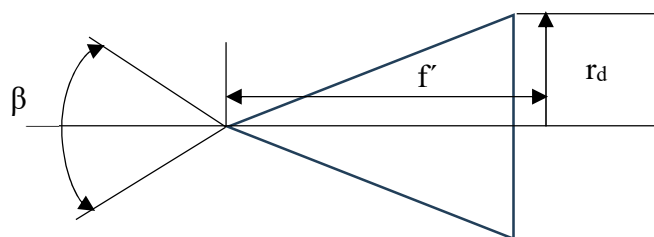
Obr. 1.11 - Rozdiel medzi upevnením C mount a CS mount [27]

Zorné pole (FOV) kamery je kritický parameter, ktorý určuje oblasť pokrytia predmetu zobrazovacím systémom. Zjednodušene povedané, definuje, ktoré objekty na snímanej scéne sú ešte zachytené a ktoré už nie. [7]

Uhol zorného poľa možno definovať takto:

$$\beta = 2 * \arctan \frac{r_d}{f'} \quad (1.8)$$

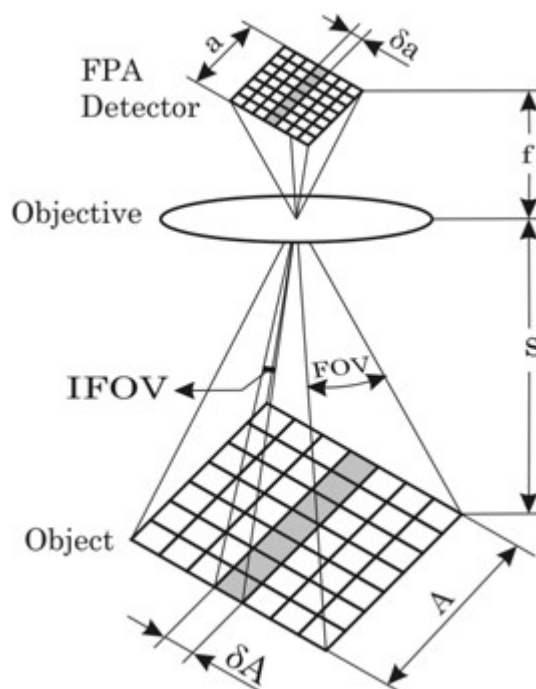
kde r_d je polomer snímača (detektora) a f' je obrazová ohnisková vzdialenosť.



Obr. 1.12 - Zorné pole graficky

Často sa uvádza aj pojem okamžité zorné pole (IFOV), ktorý sa definuje ako miera priestorového rozlíšenia systému. Definuje sa ako uhol, ktorý zvierajú jeden detekčný prvok (pixel) s osou optického systému. IFOV má tieto vlastnosti:

- Pevný uhol, cez ktorý je detektor citlivý na žiarenie.
- IFOV a vzdialenosť od cieľa určujú priestorové rozlíšenie. Zobrazovací prístroj v malej výške bude mať vyššie priestorové rozlíšenie ako prístroj vo väčšej výške s rovnakým IFOV. [28]



Obr. 1.13 - Okamžitý zorný uhol [29]

1.2.3. Snímkovacia frekvencia

Snímková frekvencia (bežne vyjadrená v snímkach za sekundu alebo FPS) je zvyčajne frekvencia, pri ktorej sú za sebou idúce snímky zachytené alebo zobrazené. Táto definícia sa vzťahuje na filmové kamery a videokamery, počítačové animácie a systémy snímania pohybu. V týchto súvislostiach môže byť snímková frekvencia používaná zameniteľne so snímkovou frekvenciou a obnovovacou frekvenciou, ktoré sú vyjadrené v hertzoch. [30]

Tento parameter je dôležitý najmä v systéme, v ktorom sa používa snímanie pomocou pushbroomu, keďže počas snímania dochádza k pohybu vzorky alebo kamery. Skenovaciu frekvenciu pri lineárnom skenovaní možno vypočítať ako pomer rýchlosti pohybu skenovaného objektu (v praxi zvyčajne pohyblivého stola) k priestorovej rýchlosti skenovania.

1.2.4. Typy senzorov

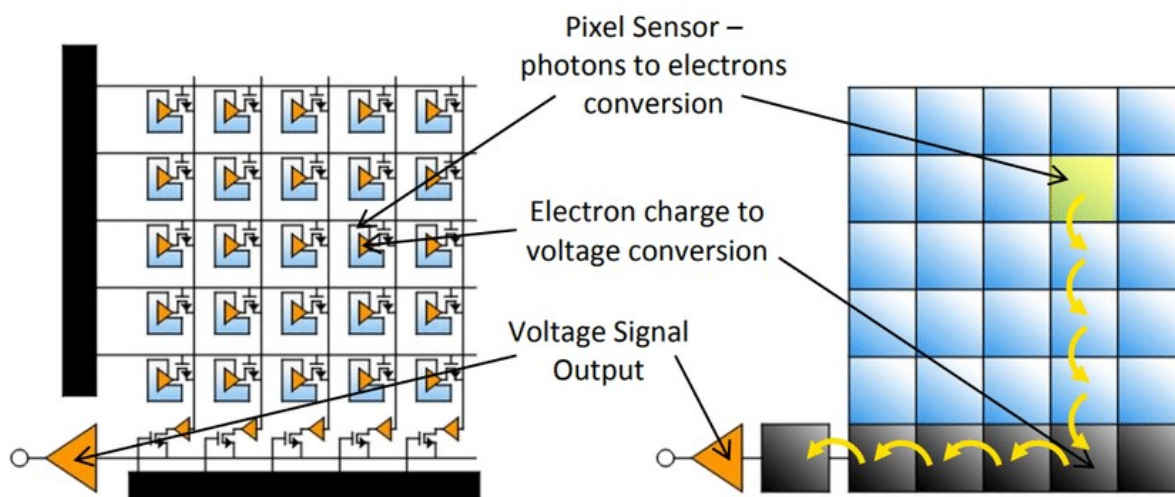
Snímač obrazu dokáže rozpoznať prichádzajúce elektromagnetické žiarenie na rôznom spektrálnom rozsahu od röntgenového žiarenia po infračervené žiarenie. Vždy závisí od jeho štruktúry a materiálu, ktorý je citlivý na požadovanú vlnovú dĺžku. [31]

Na snímanie sa najčastejšie používajú dva typy snímačov, a to Charge Coupled Device (CCD) a Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS). Sensory sú vyrobené z kremíka, sú citlivé na vlnové dĺžky od 400 nm až 1 000 nm, takže okrem viditeľného svetla dokážu detegovať aj časť blízkeho infračerveného žiarenia. Medzná vlnová dĺžka materiálu vypovedá, kde je snímač ešte schopný detegovať svetlo. Elektróny sa v dôsledku vonkajšieho fotoelektrického efektu uvoľňujú mimo materiál, pri prekonaní určitej energie. Ak túto energiu poznáme, môžeme použiť vzorec $E = h\nu$ na zistenie frekvencie ν , keďže h je Planckova konštanta. Frekvenciu potom jednoducho jednoducho dosadíme,

$$\nu = \frac{c}{\lambda_{\min}} \quad (1.9)$$

kde c je rýchlosť svetla. Rovnica 1.9 opisuje konečný upravený vzorec po vyjadrení medznej vlnovej dĺžky. Nad touto hodnotou už senzor nezaznamená žiadny signál. [32]

CCD snímač funguje ako posunovací register. Detekovaná intenzita svetla v tvare elektrického náboja prechádza postupne cez celý snímač na výstup zosilňovača, kde sa hodnota odčíta a zaznamená. Snímač CMOS na rozdiel od snímača CCD, má pod každým obrazovým bodom samostatný zosilňovač a hodnota elektrického náboja alebo napätia sa získava zo všetkých pixelov pomocou zbernice. [32]



Obr. 1.14 - Princíp senzorov CMOS (vľavo) a CCD (vpravo) [33]

Na snímanie infračerveného spektra v rozsahu 900 - 2 500 nm sa používajú snímače vyrobené z drahších materiálov, ako je napríklad arzenid india a gália (InGaAs) alebo telurid kadmia a ortuti (MCT). [32]

InGaAs senzory sú vyrobené zo zliatiny prvkov arzenidu india (InAs) a arzenidu gália (GaAs) a zvyčajne dokážu detekovať spektrá s vlnovou dĺžkou 900 - 1700 nm. Existujú však aj špecifické prípady InGaAs senzorov s citlivosťou až do 2500 nm. Sensory MCT sú vyrobené zo zlúčeniny teluridu kadmia (CdTe) a teluridu ortuťnatého (HgTe). Pokrývajú celú vlnovú dĺžku blízkej infračervenej oblasti spektra od približne 800 do 2 500 nm, ako aj strednú infračervenú oblasť až po až do 25 000 nm. [34], [35]

Ďalším typom senzoru používaným hlavne v termokamerách sa ako detektor používa špecifický typ rezistora, ktorý sa nazýva mikrobolometer. Keď na mikrobolometer dopadá dlhovlnné infračervené žiarenie vyžarované z objektov, zahrieva sa. Tým sa mení jeho

elektrický odpor. Táto zmena sa potom prevedie na elektrické signály a spracuje na obraz. [36]

Keďže vlnové dĺžky energie v infračervenom spektre sú dlhšie ako vlnové dĺžky viditeľného svetla, každý prvok infračerveného detektora musí byť primerane väčší ako prvky detektorov viditeľného svetla, aby absorboval väčšiu vlnovú dĺžku. V dôsledku toho má termokamera zvyčajne nižšie rozlíšenie (menej pixelov) ako snímač viditeľného svetla rovnakej mechanickej veľkosti. Mikrobolometre vynikajú v detekcii infračerveného žiarenia s vlnovou dĺžkou medzi 7,5-14 μm , čo je rozsah, ktorý pokrýva emisie živých tvorov. [37]

1.3. Technológia získavania hyperspektrálnych údajov

1.3.1. Multispektrálne snímanie

Multispektrálne snímanie obsahuje niekoľko nespojitých spektrálnych pásiem detegovaných pri rôznych vlnových dĺžkach. Tých je väčšinou od 3 do 7 a ich šírka sa pohybuje od 50 do 120 nanometrov. [7]

Väčšina multispektrálnych systémov dokáže snímať od viditeľného spektra po až po infračervené spektrum. Obmedzujúcim faktorom je však nízky počet spektrálnych pásiem, takže nie je možné vytvoriť súvislé spektrum bez medzier, a preto je nemožné ho používať na detekciu materiálu na základe jeho spektra. [38]

1.3.2. Hyperspektrálne snímanie

Pri hyperspektrálnom snímaní sa na rozdiel od multispektrálneho snímania zachytáva oveľa viac spektrálnych pásiem, často stovky až tisíce, v závislosti od parametrov daného hyperspektrálneho systému. Šírka pásma sa pohybuje od 1 do 15 nanometrov. Jednotlivé pásma na seba nadväzujú a tvoria tak súvislé spektrum. [7]

Hyperspektrálny obraz má priestorovú aj spektrálnu informáciu. Priestorové rozlíšenie je charakterizované obrazovými bodmi (pixelmi), zatiaľ čo spektrálne rozlíšenie definuje funkciu vlnovej dĺžky za každým pixelom (spektrum). Hyperspektrálny obraz sa teda skladá z dvoch priestorových x , y a jednej spektrálnej súradnice, označenej z . [38]

Pri pohľade na tabuľku 1.1 môžeme vidieť porovnanie rôznych metód snímania. Pri monochromatickom snímaní získame len čiernobiely obraz bez spektrálnych informácií. Pri snímaní RGB získame farebnú fotografiu, ktorá má tri farby, ale nezískame žiadne spektrálne informácie pre ďalšie použitie. Pri spektrometri získame len výsledné spektrum materiálu, ktoré môže mať desiatky alebo stovky pásiem. To, čo nám chýba, je priestorová informácia, takže máme v podstate snímku len jedného pixelu. Multispektrálne zobrazovanie už poskytuje spektrálne informácie v obmedzenej forme, ale kvôli nízkemu počtu pásiem neponúkne podrobné spektrum, ktoré by sa dalo použiť napr. na identifikáciu materiálu. Hyperspektrálne zobrazovanie poskytne kombináciu podrobných spektrálnych, priestorových informácií a počtu pásiem od desiatok až stoviek. [35]

1.3.3. Porovnanie hyperspektrálnych kamier s inými zobrazovacími technológiami

Tab. 1.1 - Porovnanie metód snímania [39]

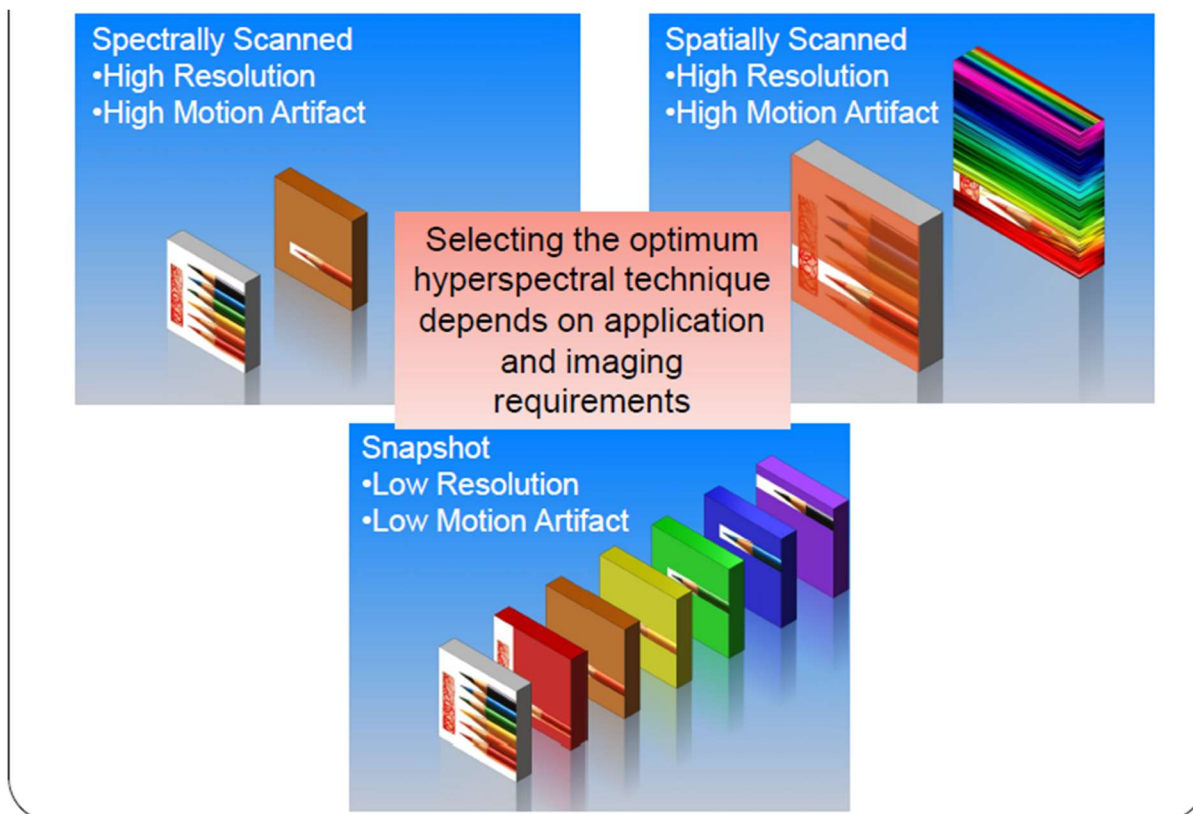
	BW	RGB	Spektroskopia	Multispektrálne	Hyperspektrálne
Priestorová informácia	Áno	Áno	Nie	Áno	Áno
Spektrálna informácia	Nie	Nie	Áno	Čiastočne	Áno
Počet spektrálnych pásiem	1	3	>100	3-10	>100

Hyperspektrálne zobrazovače poskytujú snímky s extrémne vysokým rozlíšením tým, že zhotovujú viacero snímok na vytvorenie hyperspektrálnej dátovej kocky. Keďže sa však na vytvorenie kocky vyžaduje viacero snímok, často vznikajú pohybové artefakty. V dôsledku toho sú určité skenovacie systémy nevhodné na vysokorýchlostné aplikácie.

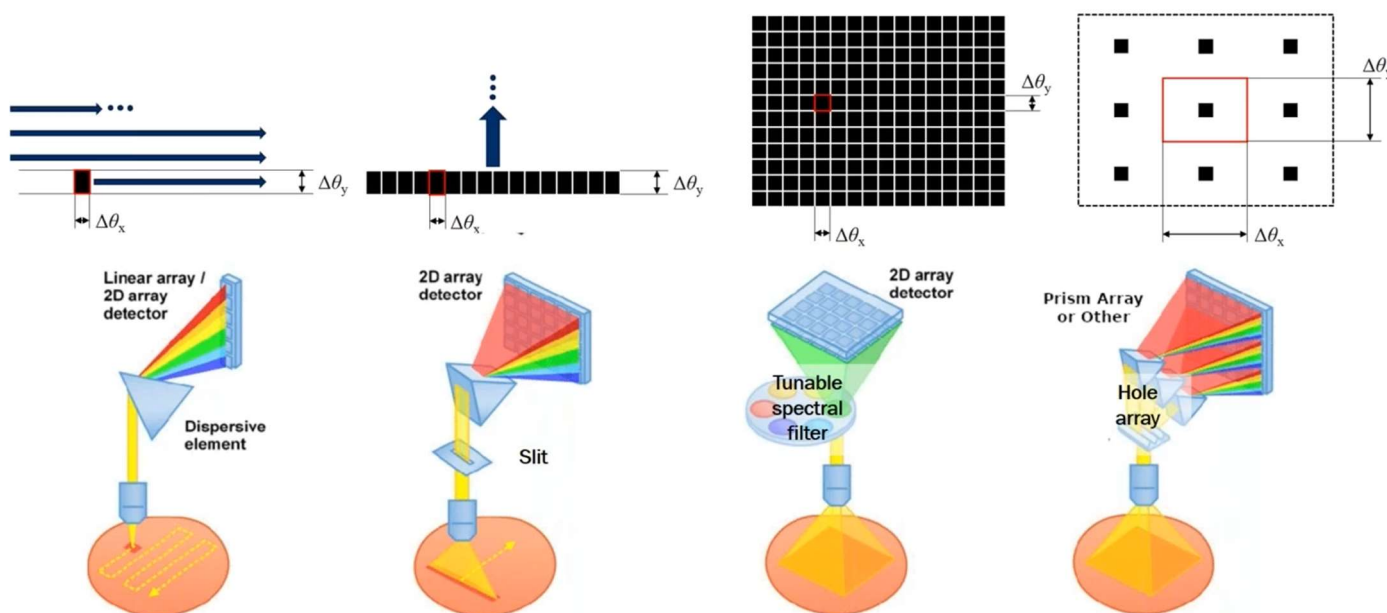
Dva hlavné typy sú:

- Priestorovo skenované hyperspektrálne zobrazovače, ktoré používajú štrbinovú clonu na skenovanie scény v priebehu času na vytvorenie hyperspektrálnej dátovej kocky.
 - o **Metóda Whiskbroom** alebo bodové skenovanie, ktoré postupne rozrezáva celý obraz bod po bode pohybom kamery v smere x a y.
 - o **Metóda pushbroom**, resp. riadkové skenovanie postupne zachytáva celý rad priestorových informácií spolu s príslušným spektrom každého obrazového bodu.
- Spektrálne skenované hyperspektrálne zobrazovače, ktoré používajú sériu filtrov alebo jeden laditeľný filter na zachytenie spektier v scéne v priebehu času na vytvorenie hyperspektrálnej dátovej kocky.
 - o Metóda známa aj ako **staring**, zaznamenáva priestorové informácie naraz, ale sekvenčne skenuje spektrum.

Ďalším typom sú **Snapshot** hyperspektrálne zobrazovače. Tie zachytávajú spektrálne aj priestorové informácie scény súčasne. Táto metóda poskytuje snímky s nízkym priestorovým alebo spektrálnym rozlíšením. Keďže sa však všetky informácie potrebné na zostavenie kocky zachytávajú v jednom snímku, eliminujú sa pohybové artefakty. Výsledkom je, že obrazy možno zachytiť snímkovacou frekvenciou bežného videa, vďaka čomu je táto technológia vhodná pre vysokorýchlostné aplikácie. [40]



Obr. 1.15 - Rozdelenie skenovania na priestorové, spektrálne a snapshot [40]



[Modified] Wang, Yu et al. (2017). Multiplexed Optical Imaging of Tumor-Directed Nanoparticles: A Review of Imaging Systems and Approaches. *Nanotheranostics*. 1. 369-388. 10.7150/ntno.21136.

Obr. 1.16 - Prehľad jednotlivých princípov skenovania [41]

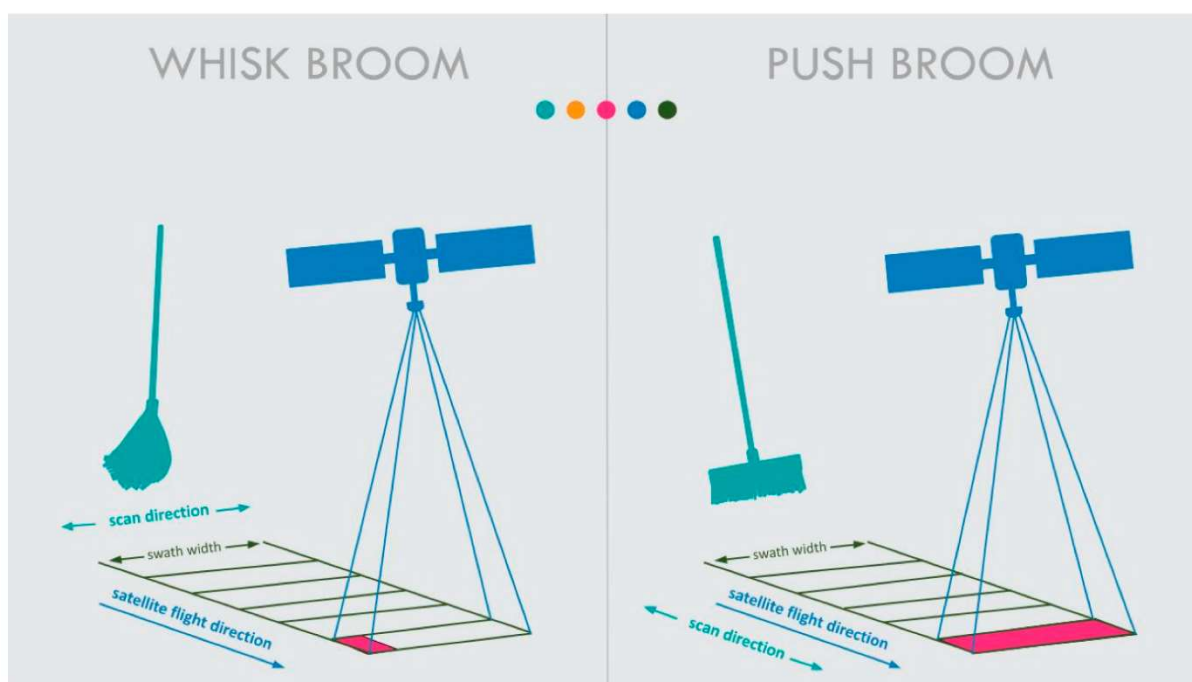
1.3.4. Whisk-broom

Whiskbroom je príkladom technológie, ktorá funguje ako elektromechanický skener s jedným detektorom. Whiskbroom skenuje jeden pixel naraz, pričom snímací prvok sa pohybuje nepretržite. Svetlo prichádzajúce zo vzorky sa rozptyľuje pomocou optickej mriežky, hranola alebo podobného disperzného prvku a je detegované sústavou čiarových detektorov. Preto majú skenery whiskbroom jeden detekčný prvok pre každú vlnovú dĺžku

(spektrálne pásmo). Jediný malý snímač sa môže pohybovať cik-cak alebo na snímání intenzity svetla v mriežke bodov pokrývajúcej celý obraz. Obraz sa zaznamenáva s dvojitým krokom snímání: jeden v oblasti vlnovej dĺžky a druhý v priestorovej oblasti. Táto konštrukcia sa bežne používa na mikroskopické zobrazovanie, kde čas zvyčajne nie je problém. Systematickým pohybom vzorky v dvoch priestorových dimenziách, možno získať kompletný hyperspektrálny obraz. Tento systém je však časovo veľmi náročný a má vysoké nároky na hardvér na zmenu polohy, aby sa zabezpečila opakovateľnosť. Priestorové rozmery hyperspektrálneho obrazu sú obmedzené len hardvérom na polohovanie vzorky. [42]

1.3.5. Push-broom

Zariadenia na riadkové snímání zaznamenávajú celý riadok obrazu namiesto jedného pomocou dvojrozmerného rozptylového prvku (mriežky) a dvojrozmernej sústavy detektorov. Zobrazuje sa úzka línia vzorky na riadok pixelov na snímačom čípe a spektrograf generuje spektrum pre každý bod na riadku, rozložené v druhom rozmere čípu. Tieto prístroje vyžadujú vstupnú clonu, zvyčajne štrbinu, ktorá sa zobrazuje na ohniskovú rovinu spektrografu pri každej vlnovej dĺžke súčasne. Preto sa objekt zobrazený na štrbine zaznamená ako funkcia jeho celého spektra a jeho umiestnenia vo vzorke. Táto konfigurácia sa zvyčajne používa, keď je vzorka alebo zobrazovacia jednotka v pohybe vzhľadom k druhej, ako napríklad v priemyselných aplikáciách. Detektory snímačov v pushbroom skeneri sú zoradené do radu nazývanom lineárne pole. Keďže nie je potrebná žiadna výmena filtra, rýchlosť zobrazenia je obmedzená len rýchlosťou čítania z kamery. Keďže režim priestorového skenovania si vyžaduje pohyb vzorky po riadkoch, táto metóda je obzvlášť vhodná pre systémy s dopravníkovým pásmom. [19]



Obr. 1.17 - porovnanie techník whiskbroom a pushbroom [43]

1.3.6. Staring

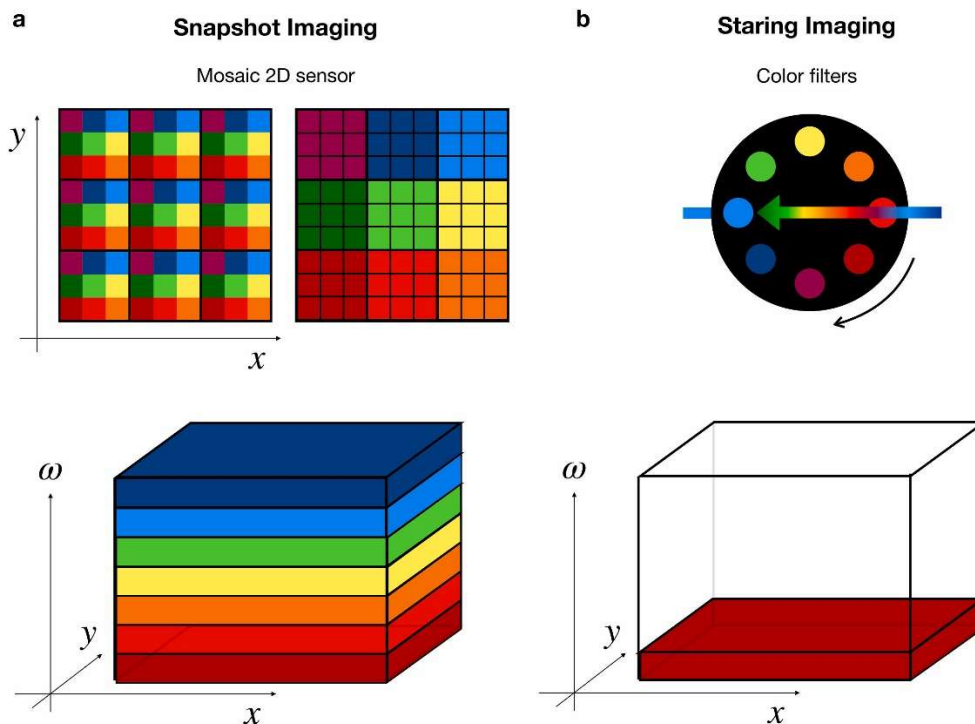
Detektor v konfigurácii plošného snímání je umiestnený v rovine rovnobežnej s povrchom vzorky a vzorka sa zobrazuje na ohniskovej rovine detektora. Kamera, objektív, spektrograf a samotná vzorka zostávajú v pevnej polohe vzhľadom na detektor. Spektrálna

oblasť sa elektronicky skenuje a obraz sa zhromažďuje v jednej spektrálnej rovine (vlnovej dĺžke) za druhou. Jedna z najjednoduchších metód zberu snímok pri jednej vlnovej dĺžke za druhou sa môže uskutočniť zbieraním obrazov pomocou výmenných úzkopásmových interferenčných filtrov pri rôznych vlnových dĺžkach. [42]

Veľkosť pásmových priepustí filtrov určuje počet vlnových dĺžok spektrálneho rozsahu. Filtre sa umiestnia pred kameru a filtračné koleso otáča pásmový filter do optickej dráhy na získanie vlnovej dĺžky pásma s rovnakou šírkou pásma. Táto technika sa zvyčajne uprednostňuje len v prípadoch, keď sa vyžaduje obmedzený počet vlnových pásiem, pretože tento proces je vo svojej podstate pomalý, čo sa považuje za jednu z jeho nevýhod. Nevýhodou tejto konfigurácie je požiadavka na opakované skenovanie tej istej vzorky pri niekoľkých vlnových dĺžkach. Takéto opakovanie pri skenovaní je potrebné, aby bolo možné získať po sebe idúce obrazy pri každom prírastku vlnovej dĺžky. Alternatívnym mechanizmom na získanie skenovania vlnovej dĺžky je použitie laditeľných filtrov. Zvyčajne sa to dosahuje použitím elektronicky laditeľných filtrov alebo zobrazovacích interferometrov. V tejto konfigurácii sa najčastejšie používajú filtre s tekutými kryštálmi (LCTF), akustické filtre (LCTF), akusto-optické laditeľné filtre (AOTF) a interferometre, buď medzi zdrojom osvetlenia a vzorkou, alebo medzi vzorkou a detektorom. Získavanie obrazu metódou staring je vhodné pre mnohé aplikácie, kde sa nevyžaduje pohybujúca sa testovaná vzorka, ako je napríklad zobrazovanie fluorescencie pomocou excitačno-emisnej matice. Dlhý čas získavania obrazu môže byť problémom aj pre biologické vzorky, ktoré môžu byť citlivé na zahrievanie spôsobené nepretržitým osvetlením zo zdrojových lúčov. Okrem toho staring zobrazovanie nie je efektívne ani v prípade pohybujúceho sa cieľa, ani v prípade poskytovania informácií v reálnom čase. [42]

1.3.7. Snapshot

Metóda snapshot je schopná zaznamenať kompletný hyperspektrálny obraz, ktorý obsahuje úplné priestorové aj spektrálne informácie. Nie je potrebné vykonávať žiadne sekvenčné snímanie, takže nie je potrebné meniť polohu objektu alebo kamery a ani meniť filtre. Pre rozklad svetla sa používajú hranoly, mriežky alebo hologramy. Nevýhodou je nižšie spektrálne a priestorové rozlíšenie v porovnaní s predchádzajúcimi metódami a obmedzenejší počet spektrálnych pásiem. [42]



Obr. 1.18 - Porovnanie techník snapshot a staring [44]

To, aké priestorové rozlíšenie môže kamera zaznamenať, súvisí s počtom pixelov matice a ich veľkosti. V prípade hyperspektrálneho pushbroom systému sa v jednom okamihu zaznamenáva len jeden riadok, preto sa uvádza len šírka jedného radu v pixeloch.

1.3.8. Spektrálny rozsah

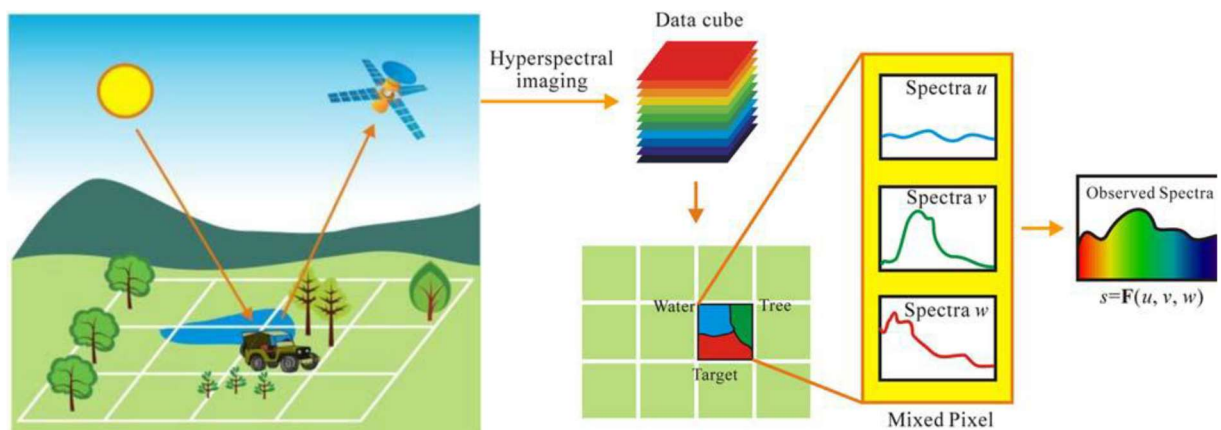
Spektrálny rozsah možno definovať ako interval vlnových dĺžok, v ktorom daná zostava dokáže detegovať elektromagnetické žiarenie. Citlivosť na žiarenie priamo súvisí so samotným senzorom kamery a materiálom, ktorého je vyrobený. V závislosti od systému sa pohybuje približne od 300 až do 25 000 nm. Žiadna kamera neponúka taký veľký súvislý spektrálny rozsah s použitím jediného snímača. Preto sa v tomto prípade používa kombinácia viacerých snímačov v jednom hyperspektrálnom systéme, ako je napríklad kamera Imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR, ktorá kombinuje snímače pre blízku infračervenú oblasť (900-1700 nm) a krátkovlnnú infračervenú oblasť (1000- 2500 nm). [45]



Obr. 1.19- Kamera imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR [46]

1.3.9. Spektrálne miešanie (Spectral mixing)

V ideálnom prípade by v prípade hyperspektrálneho snímania mali spektrá zaznamenané v každom pixeli presne zodpovedať spektrálnym vlastnostiam konkrétneho materiálu podľa jeho umiestnenia v scéne. V dôsledku malého priestorového rozlíšenia spektrálnej kamery a vplyvu rozptýleného žiarenia však dochádza k tzv. spektrálnemu miešaniu. [47]



Obr. 1.20- Ukážka spektrálneho miešania v jednom pixli [47]

V dôsledku spektrálneho miešania na jednu bunku pixelu dopadá viacero žiarení so spektrálnymi charakteristikami pre konkrétny materiál, takže z výsledného spektrálneho vektora daného pixelu nie je možné priamo určiť, ku ktorému materiálu (alebo kombinácii materiálov) patrí. [48]

Takéto zložené spektrum možno ďalej rozdeliť na dve kategórie: na makroskopické (lineárne) a nelineárne. Prvá skupina umožňuje jednoducho oddeliť napríklad dva materiály a identifikovať ich pomocou krivky referenčného spektra. Výsledné spektrum dvoch materiálov je súčtom týchto koncových členov. V prípade nelineárnej zmesi spektier je situácia oveľa komplikovanejšia, pretože materiál nemožno jednoznačne identifikovať. Môže ísť napríklad o mikroskopickú zmes minerálov. [47]

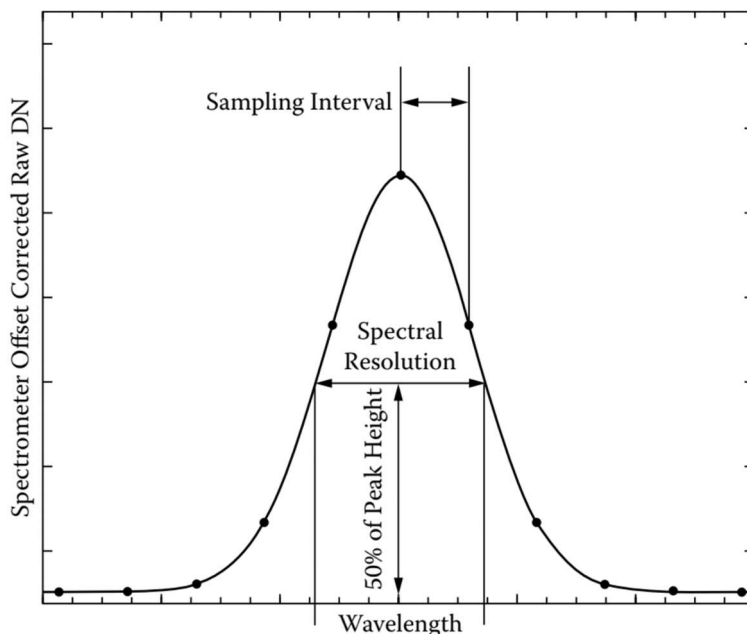
Pixely, ktoré presne zodpovedajú konkrétnemu materiálu, sa nazývajú čisté pixely, zatiaľ čo pixely, pre ktoré nie je spektrálna charakteristika jasne identifikovateľná, sa nazývajú zmiešané pixely. [49]

Z tohto dôvodu je potrebné použiť metódu analýzy hyperspektrálnych údajov nazývanú **hyperspektrálny rozklad**.

1.3.10. Spektrálne rozlíšenie a šírka pásma

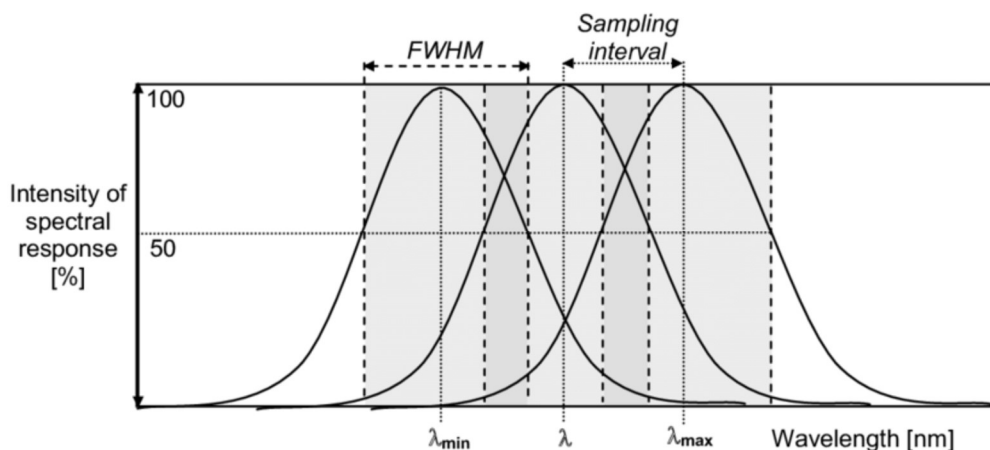
Vo všeobecnosti môžeme spektrálne rozlíšenie označiť ako najvyššiu spektrálnu frekvenciu, ktorú môže zostava zachytiť. Spektrálne rozlíšenie teda charakterizuje, ako detailne je možné zachytiť elektromagnetické žiarenie snímaného objektu. [50]

Dôležitým parametrom pri definovaní spektrálneho rozlíšenia je plná šírka pri polovičnom maxime (full width at half maximum skr. FWHM), t. j. plná šírka v polovici výšky maxima (pološírka). V skutočnosti má odozva jedného snímaného pásma približne tvar Gaussovej krivky. Šírka pásma definovaná FWHM zahŕňa interval, v ktorom je krivka na viac ako 50 percentách maxima. Spektrálne rozlíšenie je potom určené parametrom polovičnej šírky maxima. Obrázok 4.1 znázorňuje tento parameter. Aby bolo možné detegovať spektrálnu odozvu, musí byť väčšia, ako parameter FWHM systému. [7]



Obr. 1.21- Plná šírka v polovici maxima (FWHM) [7]

Podľa [7] je šírka pásma hyperspektrálnych kamier zvyčajne od 1 do 15 nanometrov. Celkovo majú kamery zvyčajne desiatky až stovky pásiem. Spektrálne vzorkovanie určuje rozostup medzi vrcholmi vlnových dĺžok. Najlepšie to popisuje obrázok 1.23, ktorý porovnáva parameter FWHM definovaný vyššie práve so spektrálnym vzorkovaním (na obrázku Sampling interval).



Obr. 1.22- Full width at half maximum (FWHM) vs. spektrálne vzorkovanie [51]

1.4. Aplikácie hyperspektrálnych kamier

1.4.1. Poľnohospodárstvo

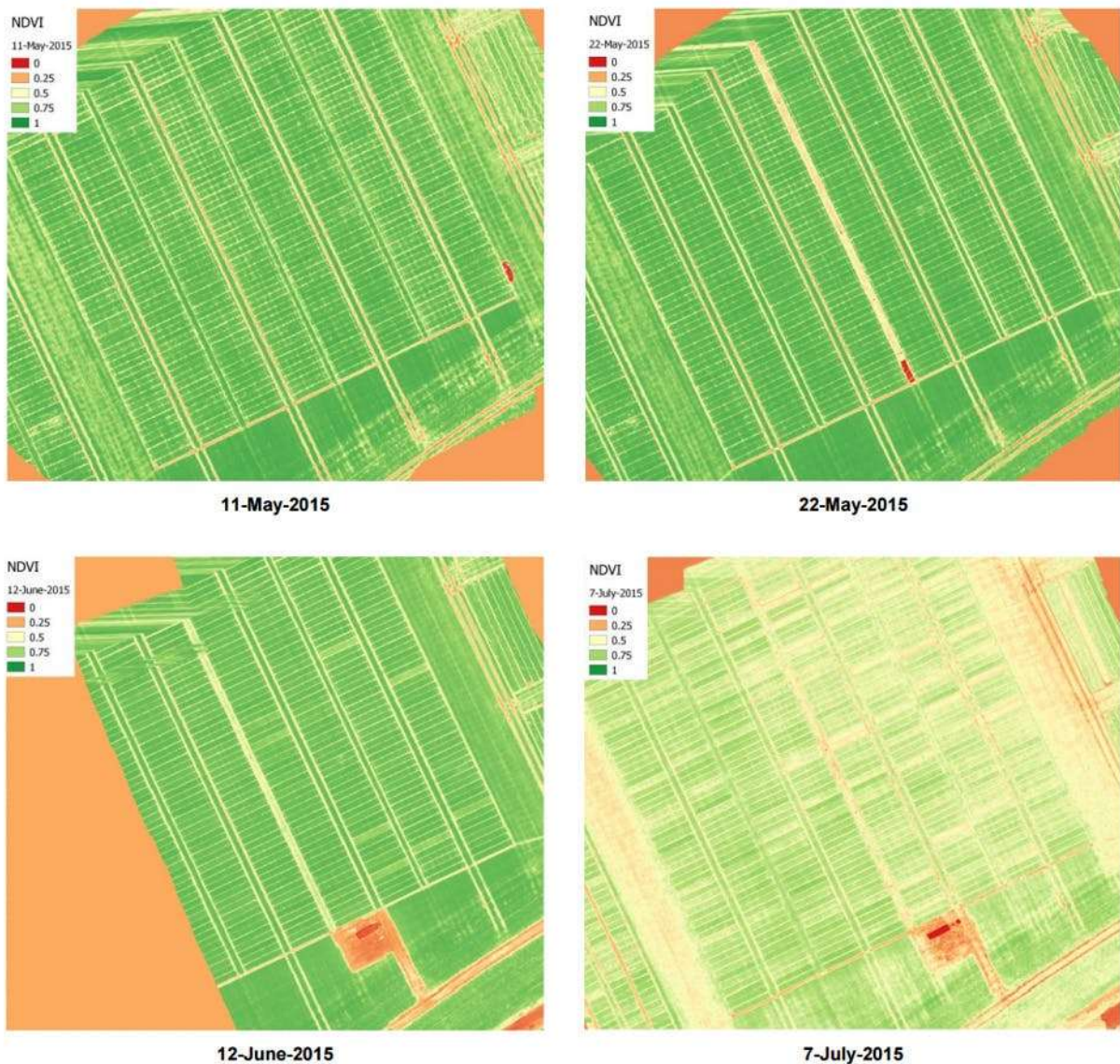
Existuje mnoho dôvodov, prečo poľnohospodári hľadajú inteligentné spôsoby, ako zvýšiť výnosy a efektívnosť svojej produkcie. Mnohí z nich sa obracajú na optimálne riadenie procesu rastu, väčšinou pomocou pokročilých technológií. Jednou z týchto technológií je hyperspektrálne zobrazovanie.

To využíva skutočnosť, že jemné rozdiely v rastlinách alebo pôde - nepostrehnuteľné voľným okom - vedú k rôznym spektrálnym podpisom. A tie dokáže zachytiť hyperspektrálna kamera.

Kontrolou plodín pomocou hyperspektrálnych kamier môžu poľnohospodári zistiť napr:

- Skoré príznaky chorôb
- Stres z nedostatku vody
- Kvalitu pôdy

Na základe týchto údajov sú potom schopní prijať cielenejšie využívanie zavlažovania, hnojív, pesticídov atď.



Obr. 1.23- Hyperspektrálne letecké snímky testovacích polí s jahodami v Belgicku - s dovolením VITO a pcfruit. [52]

Landsat Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sa používa na kvantifikáciu zelene vegetácie a je užitočný na pochopenie hustoty vegetácie a posúdenie zmien zdravotného stavu rastlín. [52]

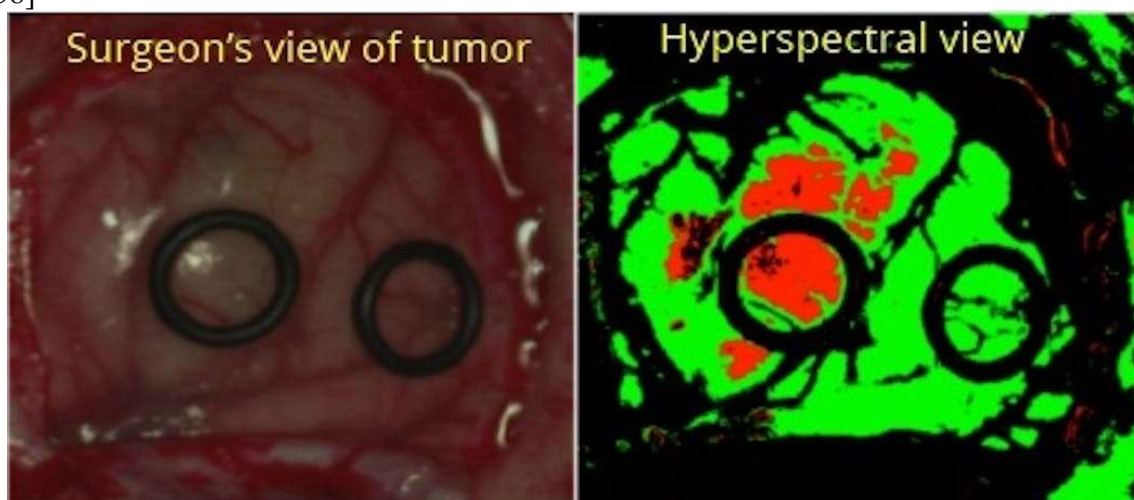
Existujú dva spôsoby, ako sa môže hyperspektrálne zobrazovanie používať na zber údajov s vysokým rozlíšením na poľnohospodárske účely:

- v blízkosti vegetácie - namontovaním hyperspektrálnej kamery na robota alebo poľnohospodárske vozidlo
- z výšky - pomocou hyperspektrálneho UAV (bezpilotného lietadla)

V oboch prípadoch sa nedá vyhnúť náhodnému pohybu - v dôsledku vibrácií, vetra, ... od jedného záberu k druhému. Pri štandardných hyperspektrálnych kamerách s riadkovým snímaním (push-broom) to vedie k pomalému a frustrujúcemu procesu hyperspektrálneho snímania. To tiež zvyšuje náklady. Okrem hodín práce navyše je potrebné kombinovať hyperspektrálne kamery s drahým vybavením, ako je GPS a IMU (inerciálna meracia jednotka). [52]

1.4.2. Medicína

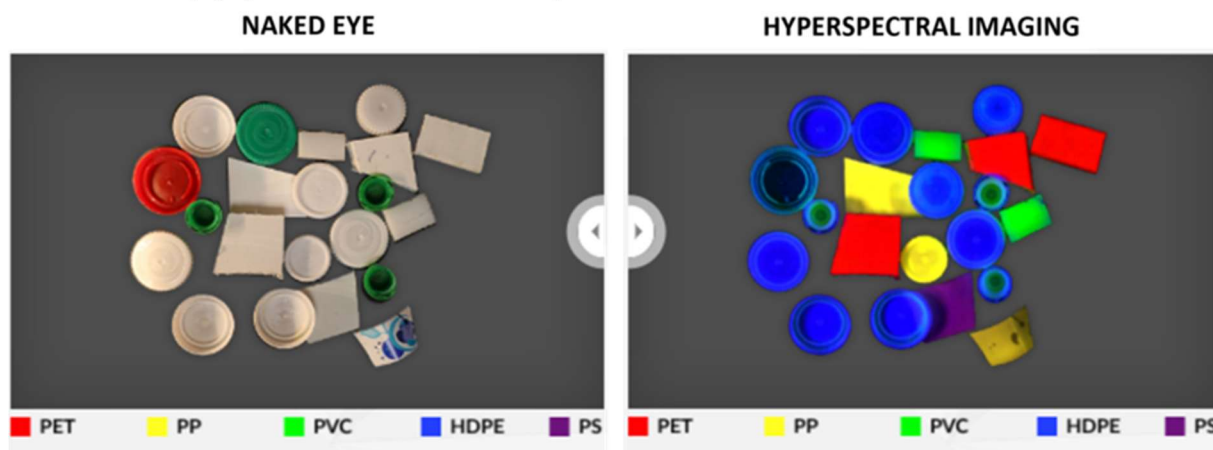
Hyperspektrálne kamery pomaly nachádzajú uplatnenie v zdravotníckom sektore, kde môžu doplniť dnes bežne používané metódy tomografie a magnetickej rezonancie. Čoraz častejšie sa používajú na lekársku diagnostiku, ako aj na chirurgické zákroky. Medzi špecifické aplikácie patrí detekcia rakoviny v dôsledku biochemických zmien v bunkách, ochorenie srdca, popálenín kože, ochorenie obličiek alebo cukrovky. Kamery sa používajú aj na zisťovanie chorôb žľazy prostredníctvom fotografovania štruktúry tkaniva. Môžu sa použiť aj na pozorovanie nasýtenia sietnice kyslíkom. Nevýhodou hyperspektrálnych systémov pri tomto použití je však nutnosť priamej viditeľnosti tkaniva alebo orgánu, keďže vidíme predovšetkým povrchové spektrum. Uvádza sa, že pri vlnovej dĺžke 550 nm môže kamera "vidieť" pod povrch do hĺbky 0,48 mm, pri vlnovej dĺžke 850 nm je to 3,57 mm [16], [38]



Obr. 1.24- Rakovinové tkanivo pozorované hyperspektrálnou kamerou [53]

1.4.3. Triedenie odpadu

Hyperspektrálnu kameru možno použiť na jednoduché triedenie plastov, papiera, kovov, sklo a iné materiály. Ako ukazuje výskum [54], pomocou hyperspektrálneho systému je možné triediť a rozlišovať aj rôzne druhy plastov pri recyklácii v blízkej infračervenej oblasti s vysokou, takmer 100 % presnosťou. Spoľahlivé rozlíšenie plastov PET a PLA potvrdzuje aj [55], pričom tieto dva typy plastov sa najčastejšie používajú na balenie potravín. Ich výsledky ukazujú 98 % presnosť. Výskum [56] aplikuje triedenie nielen na plasty, ale aj na papier, kde je možné spoľahlivo triediť celulózoový materiál, ako napr. biely papier, kartón alebo novinový papier. Použité boli kamery s vlnovou dĺžkou 900 - 1700 nm.

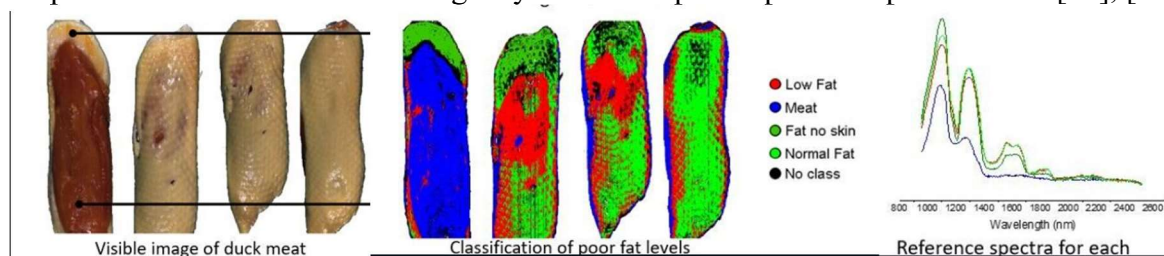


Obr. 1.25- Klasifikácia plastov pomocou hyperspektrálneho zobrazovania [57]

Recyklácia odpadu je v súčasnosti otázkou rýchlosti. Čoraz viac odpadu prechádza cez dopravníkové pásy, kde sa musí triediť vysokou rýchlosťou. Okrem toho, s novými metódami možno separovať mnoho druhov odpadu pomocou rýchlych multispektrálnych kamier s vyhradenými vlnovými dĺžkami. Napriek tomu vznikajú nové a nové výzvy. Napríklad pri triedení plastov v spaľovni je potrebné lokalizovať tie plasty, ktoré obsahujú retardanty horenia.

1.4.4. Potravinársky priemysel

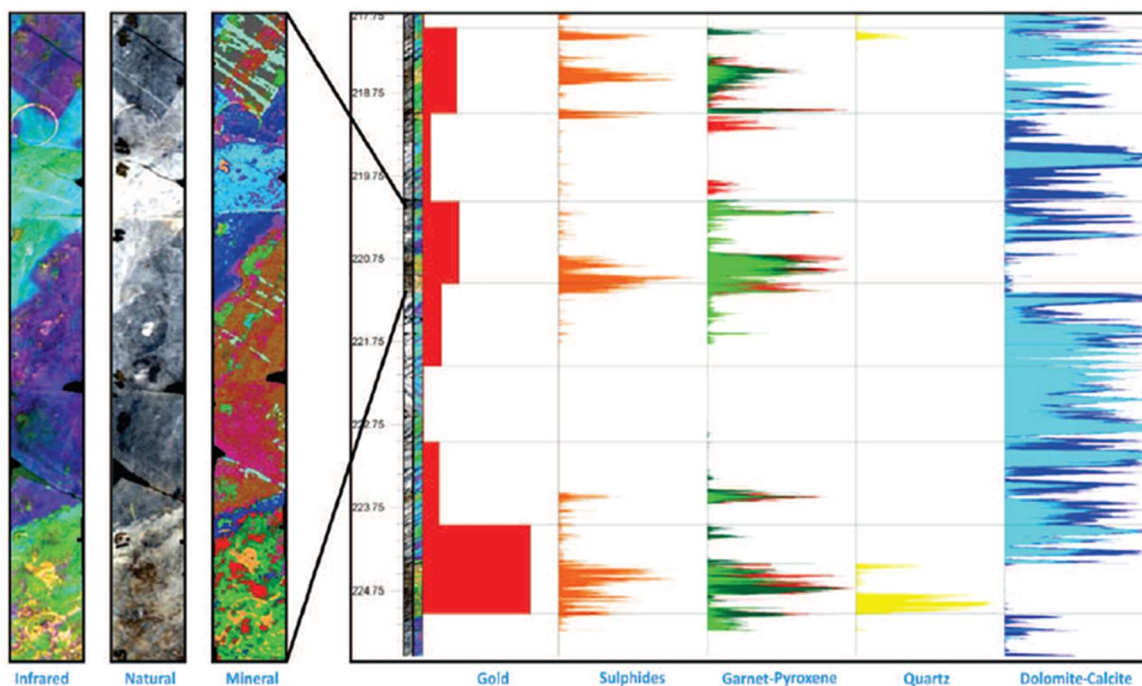
Hyperspektrálne kamery sa môžu používať v potravinárskom priemysle na kontrolu kvality, detekciu vady alebo kontaminácie ovocia, zeleniny, mäsa a iných potravín. Preto následne nie je potrebné používať ľudskú kontrolu alebo chemické metódy. Vo väčšine prípadov sa získavanie údajov vykonáva na vlnových dĺžkach od 400 do 1700 nm (viditeľné svetlo - blízke infračervené svetlo), výnimočne do 2500 nm. Metóda snímania je buď pushbroom alebo staring. Veľkou výhodou pre využitie hyperspektrálneho snímania v potravinárskom priemysle je rozpoznávanie zloženia bez potreby použitia chemických látok a bez kontaktu so snímanou látkou. Proces je teda nedeštruktívny a neinvazívny. Niektoré z nich nevýhod patrí obrovské množstvo zaznamenaných údajov, ktoré je potrebné spracovať, a potreba výkonného hardvéru na rýchlu analýzu údajov. Pre určité aplikácie v potravinárskom priemysle stačí použiť len multispektrálnu kameru s vhodne zvolenou vlnovou dĺžkou. Tú možno najprv určiť pomocou hyperspektrálneho snímania. Na rozpoznávanie tekutín alebo homogénnych látok sa potom používa spektrometer. [34], [20]



Obr. 1.26 - Podiel tuku v kačacom mase [58]

1.4.5. Ťažba

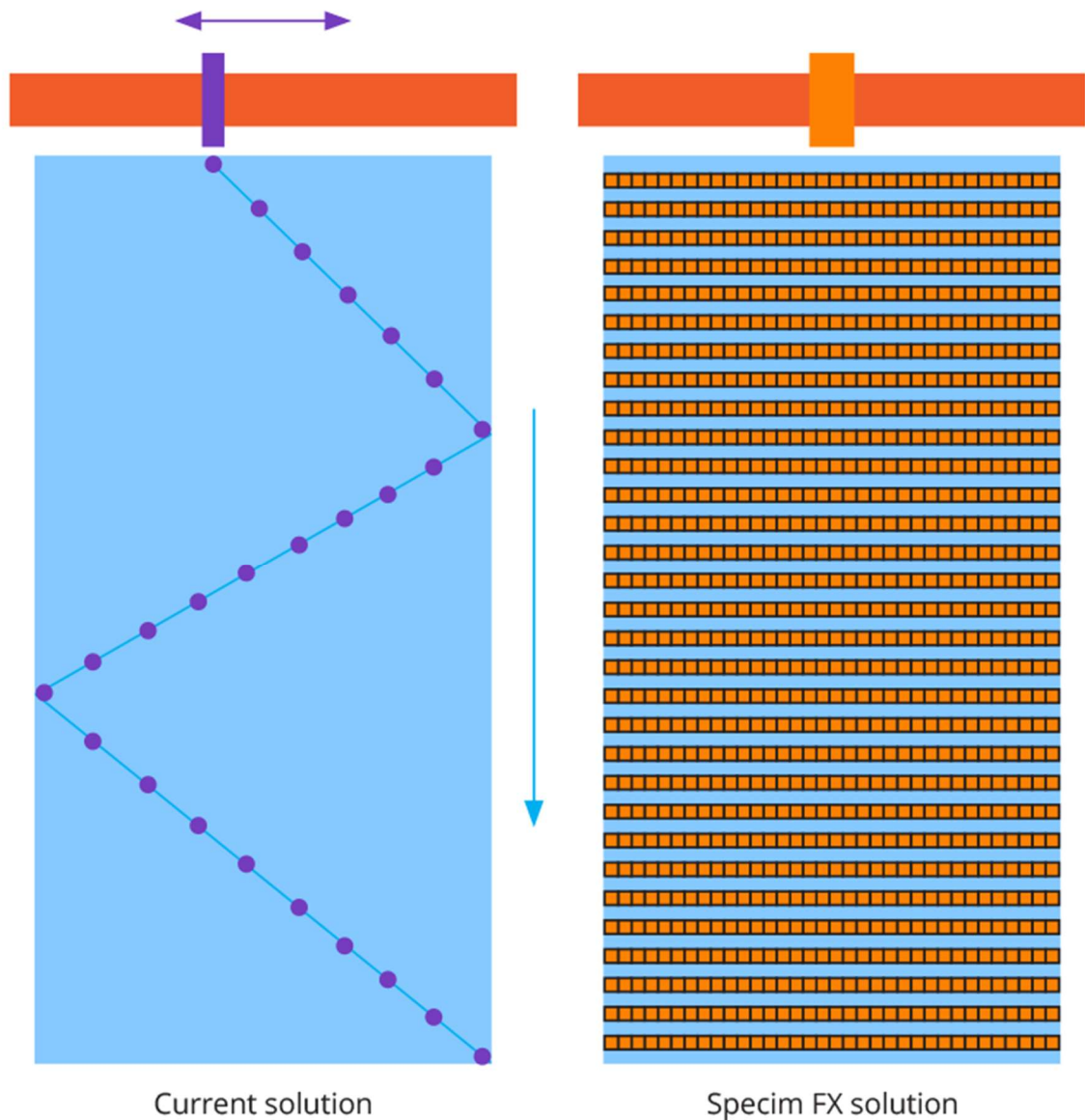
Hyperspektrálne zobrazovanie môže mapovať íly, mastenec a iné škodlivé horninové fázy a poskytovať cenné informácie na vytváranie prediktívnych modelov ťažby a geometralurgických parametrov. Na tento účel a ako doplnok k ťažbe jadra sa môžu na miesta ťažby dopraviť hyperspektrálne kamerové systémy a nainštalovať na spracovateľské linky. Hyperspektrálna kamera môže poskytnúť údaje na rýchle mineralogické mapovanie celej steny bane, či už na palube pozemného vozidla alebo dronu. [59]



Obr. 1.27 - Zloženie hornin zísané zo satelitného snímku [59]

1.4.6. Kontrola tenkých vrstiev

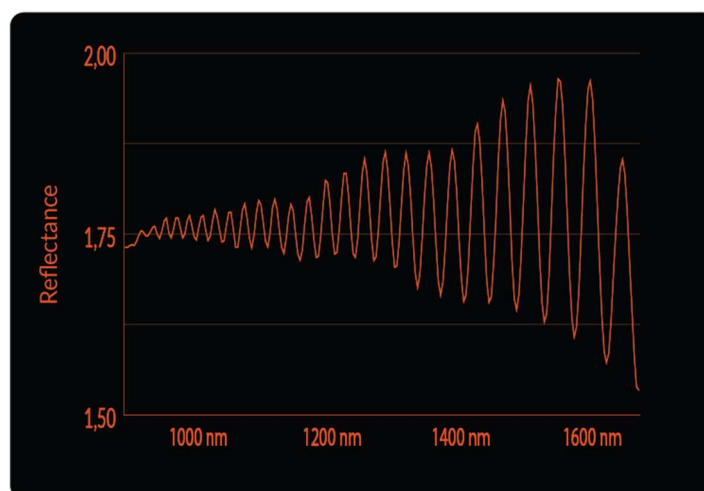
Hrúbka je kľúčovým parametrom kvality tenkých vrstiev a povlakov. Hrúbka a homogenita výrazne ovplyvňujú funkčnosť filmu a vyžadujú si presné monitorovanie. Na tento účel sa v širokej miere používajú röntgenové techniky a optická spektroskopia v stolových aj in-line kontrolných systémoch. V súčasnosti sa však používajú len bodové snímače, ktoré sa v prípade in-line aplikácií zvyčajne montujú na priečne posuvné skenovacie zariadenie, čo vedie k cikcakovitému kontrolnému vzoru. Kontrolovaná fólia je tak monitorovaná len čiastočne. [60]



Obr. 1.28 - Princíp skenovania tenkých vrstiev [60]

Hyperspektrálna kamera s riadkovým snímaním (push-broom) môže toto obmedzenie prekonať a skontrolovať celú fóliu alebo povlak. Pri každom riadkovom snímaní sa získajú spektroskopické údaje v celej šírke filmu s vysokým priestorovým rozlíšením. [60]

Na demonštráciu hyperspektrálneho snímania v tejto aplikácii spoločnosť Specim merala štyri vzorky tenkých polymérových vrstiev pomocou spektrálnej kamery pracujúcej v oblasti 935 - 1700 nm (Specim FX17). Nominálna hrúbka filmov vzoriek bola 17, 20 (dva filmy) a 23 um. Použila sa spektrálna geometria a podrobne sa kontrolovali interferencie. V závislosti od spektrálnej polohy a vzdialenosti medzi konštruktívnymi interferenciami možno odvodiť hrúbku [60] :

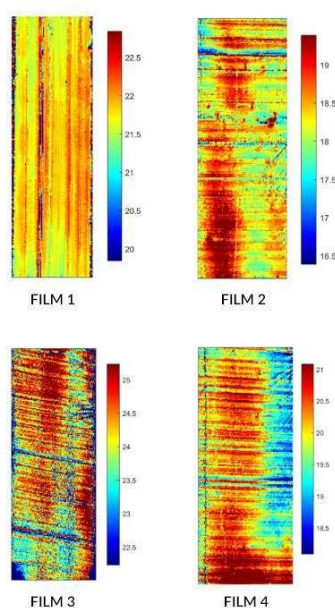


$$\text{Thickness} = \frac{\lambda_{p+1}\lambda_p}{2n(\lambda_{p+1}-\lambda_p) \cos\left[\sin^{-1}\frac{\sin \alpha}{n}\right]}$$

Obr. 1.29 - výpočet hrúbky tenkej vrstvy [60]

λ_p ako vlnová dĺžka v nm, kde je maximum, indexované p. n je index lomu materiálu filmu α je uhol dopadu zrkadlového nastavenia [60]

Spektrálne interferencie boli prevedené na tepelnú mapu hrúbky pomocou programu Matlab. Priemerné hrúbky vypočítané zo spektrálnych údajov FX17 boli 18,4, 20,05, 21,7 a 23,9 μm . Štandardná odchýlka bola 0,12, 0,076, 0,34 a 0,183 μm . Pri meraní sa filmy nenaťahovali. To môže vysvetľovať, prečo sú namerané hodnoty mierne vyššie ako nominálne hodnoty. Okrem toho sa zistili aj defekty. Vo filme 1 sa zistili dve tenké ryhy, pravdepodobne spôsobené miestnymi tlakmi. [60]



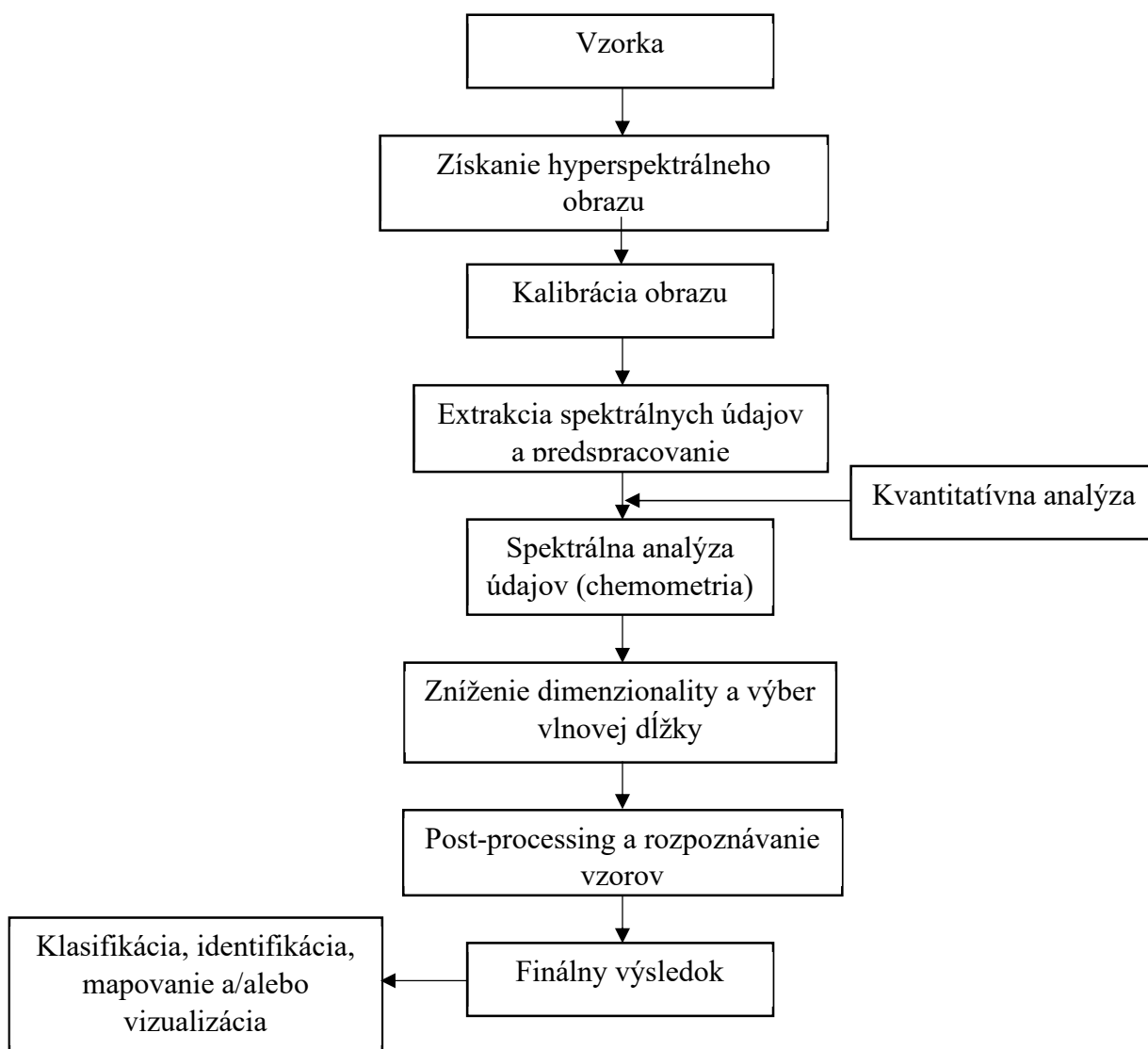
Obr. 1.30 - vyhodnotenie povrchu 4 vzoriek [60]

Hyperspektrálne zobrazovanie výrazne zlepšilo súčasnú účinnosť kontroly tenkých vrstiev a kvality povlakov založených na optickej spektroskopii. Keďže hyperspektrálne

kamery (ako napríklad Specim FX17) dokážu získať až tisíce riadkových snímok za sekundu, môžu poskytnúť 100 % in-line kontrolu tenkých filmov na zvýšenie konzistentnej kvality a zníženie odpadu. Hyperspektrálne kamery tiež eliminujú riziká škodlivého röntgenového žiarenia, pretože je potrebné len svetlo. [60]

1.5. Metódy spracovania hyperspektrálnych dát

Hyperspektrálne zobrazovacie systémy nemôžu fungovať samostatne bez pomoci softvéru. Je nevyhnutné podporiť hardvér softvérom na získavanie obrazu, softvérom na ovládanie motora pre pohyb lineárneho vedenia, softvér na extrakciu spektrálnych údajov a pre-processing, softvér na dátovú analýzu a softvér na konečné spracovanie obrazu. Typické kroky, ktoré sa zvyčajne vykonávajú pri hyperspektrálnych zobrazovacích experimentoch sú uvedené vo vývojovom diagrame opísanom v obrázku 1.10. [42]



Obr. 1.31- Schéma kľúčových krokov pri analýze hyperspektrálneho zobrazovania

Existuje niekoľko faktorov, ktoré robia z analýzy HSI dát náročnú úlohu, ktorá si vyžaduje sofistikované metódy a algoritmy. Medzi tieto faktory patrí veľkosť a vysoká dimenzionalita údajov HSI, mechanizmy degradácie ovplyvňujúce údaje počas ich získavania (šum a atmosférické vplyvy) a spektrálne miešanie (spectral mixing). [47]

Prvým krokom pri zbere hyperspektrálneho obrazu je príprava ideálnych podmienok z hľadiska osvetlenia, priestorového a spektrálneho rozlíšenia, rýchlosti posuvu, frekvencie snímok a expozičného/integračného času. Po získaní hyperspektrálneho obrazu pre testovanú vzorku by sa mal tento obraz kalibrovať pomocou bielych a tmavých hyperspektrálnych obrazov. Spektrálne údaje sa potom extrahujú z rôznych oblastí záujmu (Region of interest - skr. ROI), ktoré na kalibrovanom obraze vykazujú rôzne kvalitatívne vlastnosti. [42]

1.5.1. Kalibrácia

Kvantitatívne informácie, napr. o ploche, objeme, hmotnosti atď. materiálov, ktoré prešli skrz objektív sú k dispozícii len v relatívnom (a často neznámom) formáte. Správna kalibrácia dokáže odstrániť tieto chyby. Kalibrácia sa zvyčajne vykonáva oddelene pre intenzitu, priestorové rozmery a spektrum. [61]

Kalibrácia intenzity

Intenzita osvetlenia nebude vo väčšine prípadov homogénna a kalibrácia sa môže vykonať napr. vložení rovinného kovového zrkadla pre úplný odraz svetla alebo certifikovaného kalibračného objektu, takže svetlo sa cez tieto zariadenia odráža späť do optiky. V priemyselných podmienkach sa dopravníkový pás zvyčajne osvetľuje z oboch strán a priestor snímania je zakrytovaný, aby bolo možné kontrolovať rozptýlenie svetla. [61]

Konstruktúra dopravníkového pásu spôsobuje, že kalibrácia s kovovým zrkadlom je nepoužiteľná. Vo väčšine priemyselných prípadov je vhodnejšou metódou umiestnenie bloku teflónu (alebo podobného bieleho materiálu) na dopravník a jeho zobrazenie. Jeden obraz s vypnutým svetlom (čierny) a jeden so zapnutým svetlom (biely). Z čierneho obrazu sa dá získať skreslenie snímača a z bieleho obrazu sa dá získať zmena intenzity na dopravníkovom páse a zmena citlivosti jednotlivých pixelov v snímači. Nakoniec z povrchu teflónu možno odčítať intenzitu osvetlenia. Hoci je tento postup jednoduchý, robustný a zvláduteľný v továrenských podmienkach, môže byť skreslený teflónom a/alebo dopravníkovým pásom, ktoré môžu absorbovať časť žiarenia, a tým vniestť absorpčné spektrum do kalibračných údajov. Okrem toho majú napríklad InGaAs senzory zvyčajne niekoľko mŕtvych pixelov, ktoré vznikajú pri výrobe senzora. Ani správny kalibračný štandard a postup toto neodstráni a mŕtve pixely sa musia odhaliť a riešiť samostatne. [61]

Priestorová kalibrácia

Existuje množstvo spôsobov priestorovej kalibrácie. Zvyčajne sa vykonáva zobrazením známeho geometrického tvaru. V niektorých prípadoch sa používa niekoľko čiar v krížovom vzore alebo kontrolný vzor. Vzory sú navrhnuté tak, aby mali silné kontrasty, t. j. čierne a biele štvorce. Zo známeho vzoru a získaných rozhraní, možno vykonať priestorovú kalibráciu, a tým kompenzovať skreslenie obrazu, napr. z optiky. [61]

Spektrálna kalibrácia

Kalibrácia hyperspektrálnej kamery sa tradične vykonáva osvetlením pomocou ortuťovej katódovej výbojky generujúcej svetlo s niekoľkými diskretnými vlnovými dĺžkami

(neón: 339,3, 585,2, 793,7, 812,9, 826,7, 837,8, 864,7, 877,2, 914,9, 932,7 a 953,4 nm alebo argónu: 253,7, 302,2, 312,6, 334,0, 365,0, 404,7, 435,8, 546,1, 577,0 a 579,0 nm) a potom sa koreluje s kanálmi s polohou nameraných spektrálnych čiar. V súčasnosti môžu byť tieto zdroje svetla náročné získať a často sa namiesto toho používa kompaktná žiarivka. [61]

1.5.2. Predspracovanie údajov

Extrahované spektrálne údaje by sa mali predspracovať s cieľom znížiť šum alebo zlepšiť rozlíšenie prekrývajúcich sa údajov. Predbežné spracovanie spektrálnych údajov má často zásadný význam, ak sa majú zo spektrálnej analýzy získať kvalitné výsledky. Predspracovanie zahŕňa spektrálne a priestorové operácie.

Spektrálne predspracovanie zahŕňa niektoré operácie, ako sú spektrálne filtrovanie, normalizácia, stredné centrovanie (mean centering), automatické škálovanie, štandardná smerodatná odchýlka (standard normal variate – skr. SNV) a vyhladzovanie.

Na druhej strane, priestorové operácie zahŕňajú nástroje na potlačenie vysokofrekvenčného a nízkofrekvenčného šumu. [42]

1.5.3. Segmentácia a klasifikácia

Do tejto kategórie patrí mnoho chemometrických nástrojov. Základom tohto procesu je analýza údajov pomocou viacrozmernej analýzy pomocou jedného alebo viacerých chemometrických nástrojov vrátane korelačných techník, ako je kosínusová korelácia a korelácia Euklidovej vzdialenosti, ďalej klasifikačné techniky, ako je analýza hlavných komponentov (PCA), zhuková analýza a techniky spektrálnej dekonvolúcie. Pomocou viacrozmernej analýzy sa obrovská dimenzionalita a kolinearity hyperspektrálnych údajov dá znížiť alebo odstrániť zúžením spektrálnych údajov na niektoré dôležité vlnové dĺžky.

Vo väčšine prípadov, nie sú na riešenie konkrétneho atribútu potrebné všetky spektrálne pásma. Výber dôležitých vlnových dĺžok je voliteľný krok založený na požiadavke na rýchlosť celého procesu. Vo všeobecnosti výber týchto optimálnych vlnových dĺžok znižuje veľkosť požadovaných meracích údajov a zároveň sa zachováva najdôležitejšia informácia obsiahnutá v dátovom priestore. Vybrané základné vlnové dĺžky by mali nielen zachovať všetky cenné požadované podrobnosti, ale aj zjednodušiť postupnú klasifikáciu. [42]

1.5.4. Vizualizácia hyperspektrálnych údajov

Výsledky získané z predspracovania, kvalitatívnej analýzy a kvantitatívnej analýzy je potrebné vizualizovať buď pomocou škálovania, mapovania povrchu alebo pseudofarebného zobrazenia. [42]

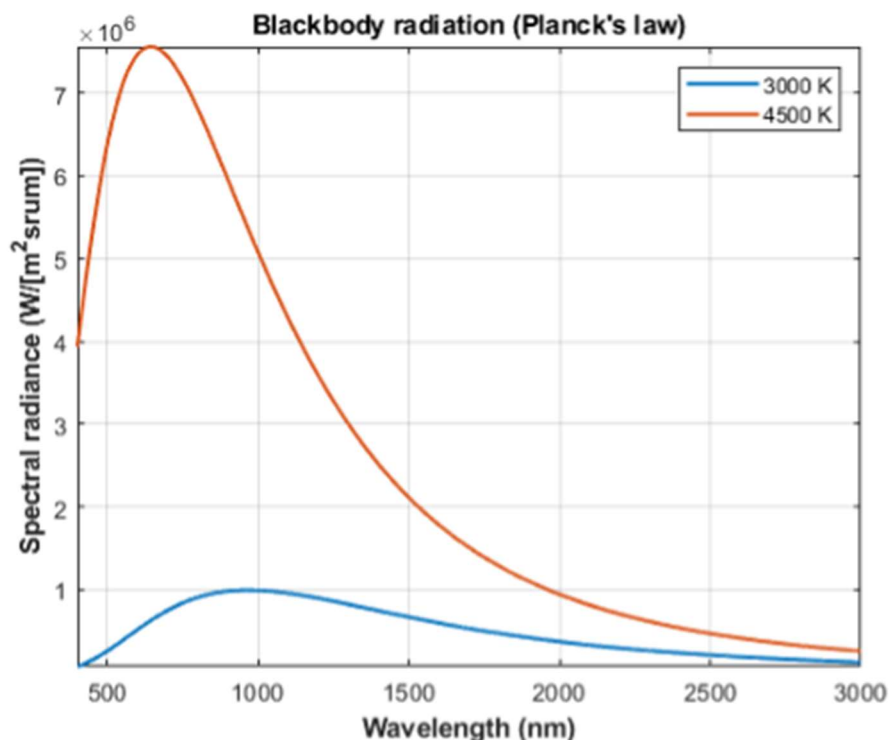
Záverečný krok spracovania obrazu sa vykonáva s cieľom previesť kontrast vytvorený v kroku klasifikácie na obrázok zobrazujúci rozloženie komponentov. Mapovanie v odtieňoch šedej alebo farbách so škálovaním intenzity sa bežne používa na zobrazenie kompozičného kontrastu medzi pixelmi v obraze. [42]

1.5.5. Osvetlenie vzoriek

Hyperspektrálne kamery snímajú svetlo, ktoré objekty vyžarujú, prenášajú alebo odrážajú. V prípade odrazu a prenosu hrá dopadajúce svetlo významnú úlohu pri relevantnosti výsledkov. Keďže hyperspektrálne kamery merajú spojité spektrá, je nevyhnutné, aby aj zdroj svetla mal spojité spektrum. Vhodných a dostupných je niekoľko zdrojov svetla s takouto vlastnosťou. [62]

1. Halogény

Halogény sú pravdepodobne najbežnejším a najlacnejším zdrojom svetla pre hyperspektrálne zobrazovanie. Emisivita halogénov zvyčajne sleduje Plankove krivky čiernych telies medzi 3000 a 4500 K. [62]



Graf 1-2 - Typické spektrálne čiary halogénových žiaroviek [62]

Teplejšie halogény obsahujú väčší podiel modrej zložky ako chladnejšie. Teplejšie halogény sú tiež menej vyvážené ako chladnejšie. Na vyrovnanie tohto javu je možné použiť filter alebo výsledky normalizovať pomocou algoritmu. [62]

Výhody:

- Cena
- Spojité spektrum v rozsahu 400 - 2 500 nm
- Dobrá infračervená emisivita

Nevýhody:

- Krátka životnosť
- Produkujú teplo
- Vyžaduje optickú mechaniku na zaostrenie (ako eliptické reflektory)
- Spička pri cca. 1000 nm, čo nie je optimálne na meranie farieb.

Keďže v mnohých aplikáciách sa vyžaduje meranie farieb, niektoré halogény sú doplnené filtermi. Tieto halogénové žiarovky majú aj reflektor, ktorý neodráža infračervené žiarenie dopredu, ale prepúšťa ho dozadu, čím sa znižuje infračervené tepelné zaťaženie povrchu. Tieto lampy sa nemôžu používať pri meraniach v NIR (Near Infrared) alebo SWIR (Short wave infrared). [62]

2. LED

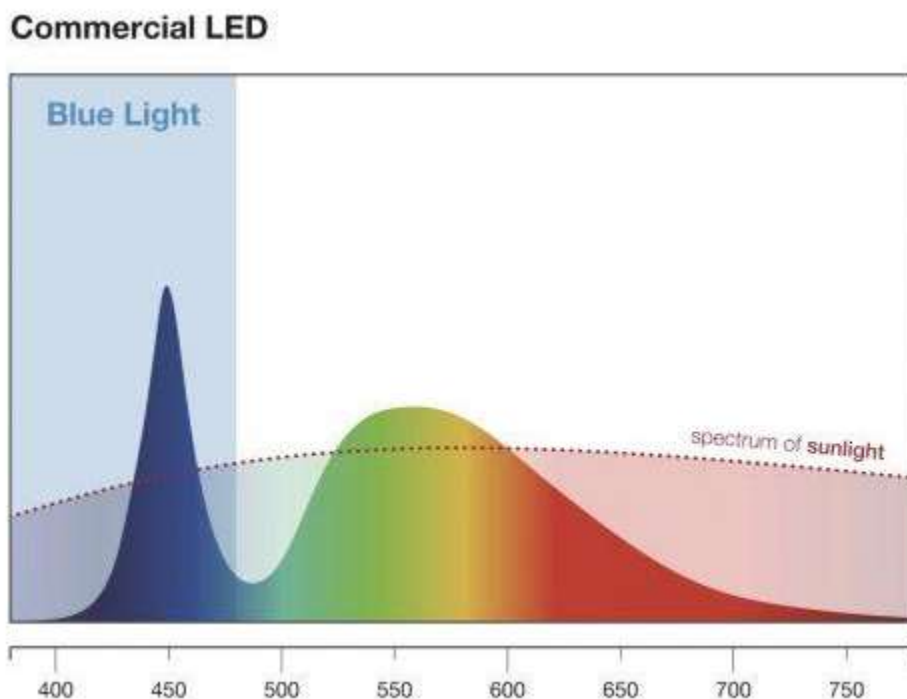
LED diódy sa od polovice roku 2010 rýchlo vyvíjajú a v súčasnosti je k dispozícii niekoľko diód na hyperspektrálne zobrazovanie. Nie všetky sú však vhodné a vhodné sú len tzv. biele. [62]

Výhody:

- Dajú sa nastaviť
- Nezahrievajú sa
- Dlhá životnosť
- Kolimované riadkové svetlo

Nevýhody:

- Drahšie ako halogény
- Malý jas
- Slabá emisivita nad 900 nm
- Pokles intenzity v zelenej oblasti



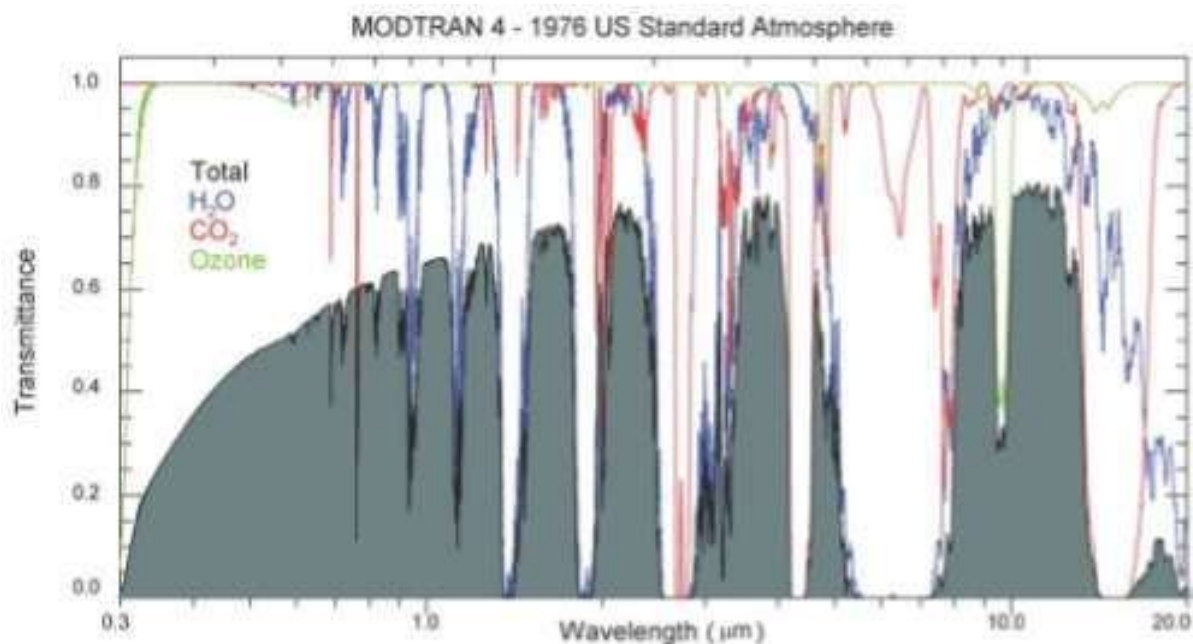
Obr. 1.32 - Spektrálna čiara bežnej LED žiarovky v porovnaní so slnečným svetlom [63]

Na pozorovanie farieb sú vhodné, pretože signál na modrom konci spektra je stále dostatočný.

3. Slnečné svetlo

Slnečné osvetlenie sa využíva v mnohých aplikáciách: poľnohospodárstvo, hodnotenie životného prostredia, banský priemysel a všetky aplikácie súvisiace s diaľkovým snímaním. Slnko samo o sebe poskytuje spojité spektrum osvetlenia, ktoré by čierne teleso vyžarovalo pri teplote približne 5800 K. Atmosféra obklopujúca Zem však obsahuje gazóny

s absorpčnými vlastnosťami, ktoré ovplyňujú osvetlenie dosahujúce povrch našej planéty. [62]



Graf 1-3 - Priepustnosť atmosféry podľa vlnovej dĺžky [62]

Ako je znázornené na grafe 1-3, slnečné žiarenie je relevantné v rozsahu 400 až 1000 nm, ale nad touto hodnotou je potrebné zapojiť atmosférické modely do korekcie spektier, ak je to možné. [62]

Výhody:

- Homogénne
- Relatívne spojité spektrum v rozsahu 400 - 1000 nm
- Zadarmo

Nevýhody:

- Dostupné len počas dňa
- Oblaky ovplyvňujú infračervené vyžarovanie
- Atmosférické absorpčné vrchoľy (nutná korekcia)

1.6. Záver rešerše

1.6.1. Výhody a obmedzenia hyperspektrálneho zobrazovania

Hlavnou výhodou hyperspektrálneho zobrazovania je, že vďaka tomu, že sa v každom bode získa celé spektrum, operátor nepotrebuje žiadne predchádzajúce znalosti o vzorke a následné spracovanie umožňuje získať všetky dostupné informácie zo súboru údajov. Hyperspektrálne zobrazovanie môže využívať aj priestorové vzťahy medzi rôznymi spektrami v okolí, čo umožňuje prepracovanejšie spektrálno-priestorové modely na presnejšiu segmentáciu a klasifikáciu obrazu. [65]

Hlavnými nevýhodami sú náklady a zložitosť. Na analýzu hyperspektrálnych údajov sú potrebné rýchle počítače, citlivé detektory a veľké kapacity na ukladanie údajov. Je

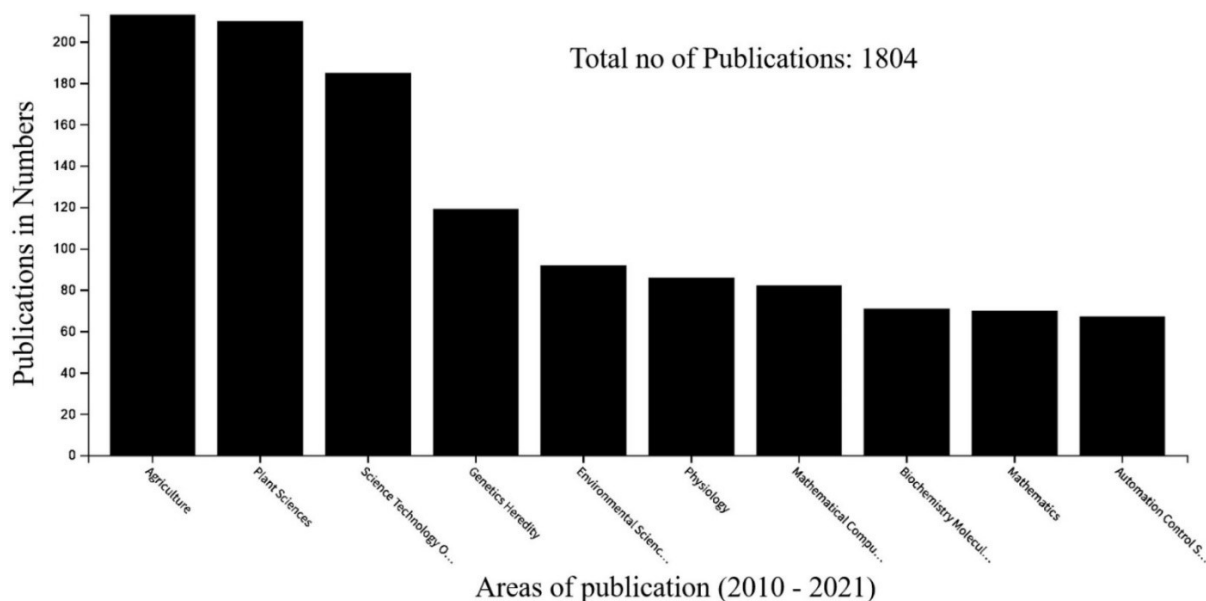
potrebná značná kapacita na ukladanie údajov, pretože nekomprimované hyperspektrálne kocky sú veľké, viacrozmerné súbory údajov, ktoré môžu presiahnuť stovky megabajtov. Všetky tieto faktory výrazne zvyšujú náklady na získavanie a spracovanie hyperspektrálnych údajov. Jednou z prekážok, ktorým výskumníci museli čeliť, je aj hľadanie spôsobov, ako naprogramovať hyperspektrálne satelity, aby samy triedili údaje a prenášali len najdôležitejšie snímky, pretože prenos aj ukladanie takého množstva údajov by bolo náročné a nákladné. [65]

1.6.2. Budúcnosť hyperspektrálneho zobrazovania

Hyperspektrálne zobrazovanie bolo po desaťročia často spájané s vysokými nákladmi a vyžadovalo časovo náročné techniky spracovania, aby sa získali zmysluplné údaje. To obmedzovalo jeho využitie hlavne na akademické aplikácie. Situácia sa však začína meniť. Prenosné môžu poskytovať údaje vynikajúcej kvality, ale výsledné dátové kocky sú stále veľké, takže spracovanie a ukladanie údajov je potrebné starostlivo zvážiť. Pre mnohých zákazníkov zostáva hlavným problémom cena, ale keď sa táto technológia rozšíri, tieto kamery budú cenovo dostupnejšie. [66]

Vývoj v oblasti spracovania obrazu a umelej inteligencie bude nesmierne dôležitý pre budúcnosť hyperspektrálneho zobrazovania. Kombinácia rozpoznávania vzorov a identifikácie materiálov, ako aj lepšia klasifikácia v reálnom čase urobí z hyperspektrálneho snímania výkonnejšiu techniku a umožní širšie využitie tejto technológie. [66]

Vývoj senzorov SWIR (Short wave infrared) je tiež novým trendom, ktorý poskytuje optimálnu spektrálnu odozvu a kvalitné zobrazenie. Rozsah vlnových dĺžok SWIR je dôležitý pre mnohé aplikácie, ale cena týchto senzorov bola v minulosti veľmi vysoká. Novo vznikajúce senzory SWIR majú potenciál výrazne znížiť náklady a sprístupniť spektrálne zobrazovanie SWIR mnohým používateľom. Nová generácia senzorov SWIR by mala viesť k nižším nákladom na kamery, čo umožní viac aplikácií v oblastiach, ako je potravinárstvo a poľnohospodárstvo, bezpečnosť a obrana, farmaceutický priemysel, ako aj triedenie/recyklácia plastov a textilu. [66]



Obr. 1.33 - Oblasti publikácií s témou hyperspektrálne zobrazovanie (Zľava: Poľnohospodárstvo, vedy o rastlinách, vedecké technológie, genetika a dedičnosť, environmentálne vedy, fyziológia, matematické výpočty, Biochémia, Matematika, Automatické riadenie) [64]

2. Návrhová časť

Cieľom tejto časti je naučiť sa pracovať s kamerou BlackIndustry VNIR v2 a jej obslužným softvérom. K zhotoveniu kvalitných snímok je taktiež potrebné navrhnúť pracovnú stanicu, v ktorej bude kamera umiestnená. Pretože sa jedná o kameru typu Push-broom, je nutné zaistiť kontrolovaný pohyb vzorku voči kamere.

2.1. Kamera BlackIndustry VNIR v2 by HAIP Solutions

2.1.1. Technické špecifikácie

HAIP Solutions BlackIndustry VNIR v2 je inteligentná push-broom hyperspektrálna kamera s rozlíšením až do blízkej infračervenej oblasti, ktorá umožňuje získavať spektrálne údaje v reálnom čase s veľmi vysokým priestorovým rozlíšením. Vynikajúca citlivosť v rozsahu NIR od 500 nm až 1 000 nm je ideálna na použitie v priemyselných dopravníkových aplikáciách. So snímkovou frekvenciou 430 Hz pri plnej snímke a až 1700 Hz pri ROI (region of interest), je snímač vhodný pre vysokorýchlostné pásy na triediace aplikácie v potravinárstve alebo recyklácii. Hyperspektrálny snímač poskytuje priestorové rozlíšenie 1920 pixelov s rozlíšením až 250 spektrálnych kanálov, ktoré možno čítať v rámci vlnovej dĺžky od 500 nm do 1000 nm. [67]

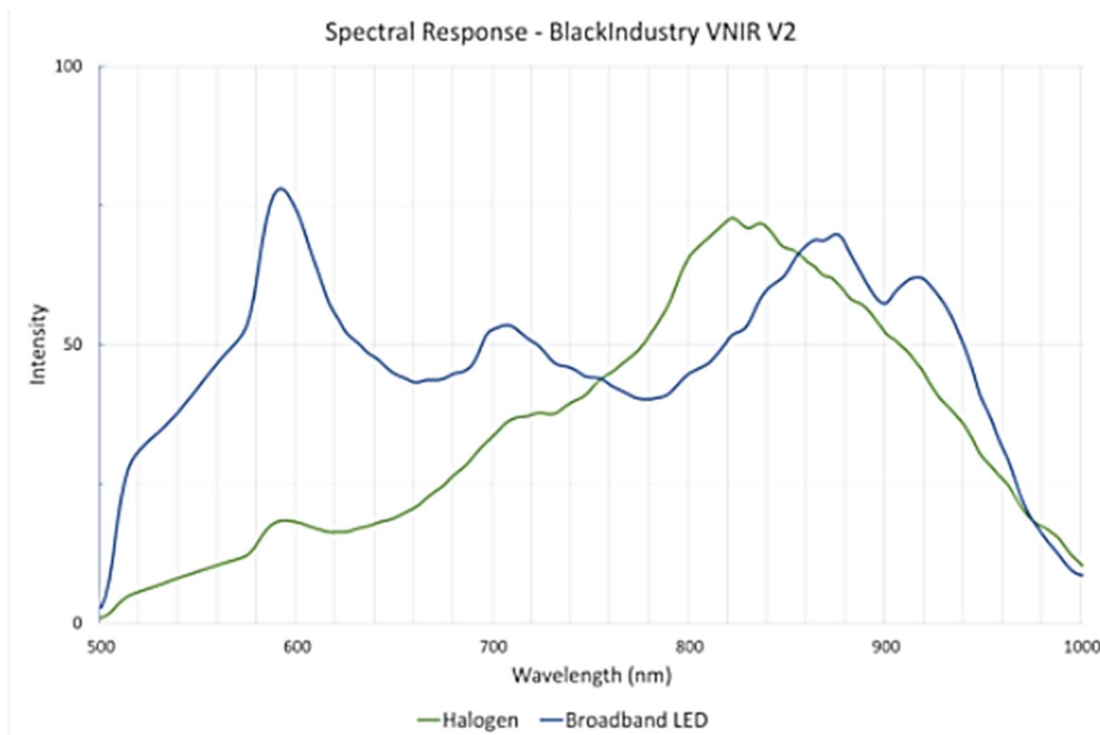


Obr. 2.2 - kamera Blackindustry VNIR V2 [67]

BlackIndustry VNIR V2 Hyperspectral Machine Vision Camera

Optics	
Spectral range	500-1000 nm
Spatial resolution	1920 px
Dispersion	130 nm/mm
Pixel resolution	0.26 nm/pixel
FWHM (spectral res.)	< 5 nm (25 µm slit)
Image size	3.9 (spectral) x 7.68 (spatial) mm
Smile	< 5 µm; software corrected
Keystone	< 5 µm; software corrected
Aperture	F/2.0
Slit width (default)	25 µm (10/15 µm on request)
Electronics	
Sensor type	CMOS
Pixels in full frame	1920 (H) x 1080 (V)
Active pixels	1920 (H) x 965 (V)
Pixel size	4 x 4 µm
Radiometric resolution	10 bit
Framerate Full Frame/ROI	430/1700 Hz
Internal data processing	NVIDIA Jetson Nano, 16 GB
Connection	GigE (GenICam compatible)
Sensor cooling	passive
Power input	12 V DC
Power consumption	< 15 W
Mechanics	
Lens mount	Standard C-Mount
Housing	Anodised aluminum
Temperature (Operation)	-10 - +50°C
Temperature (Storage)	-15 - +60°C
Size	80 * 80 * 147 mm
Weight	1.3 kg

Obr. 2.1 - Technické špecifikácie [67]



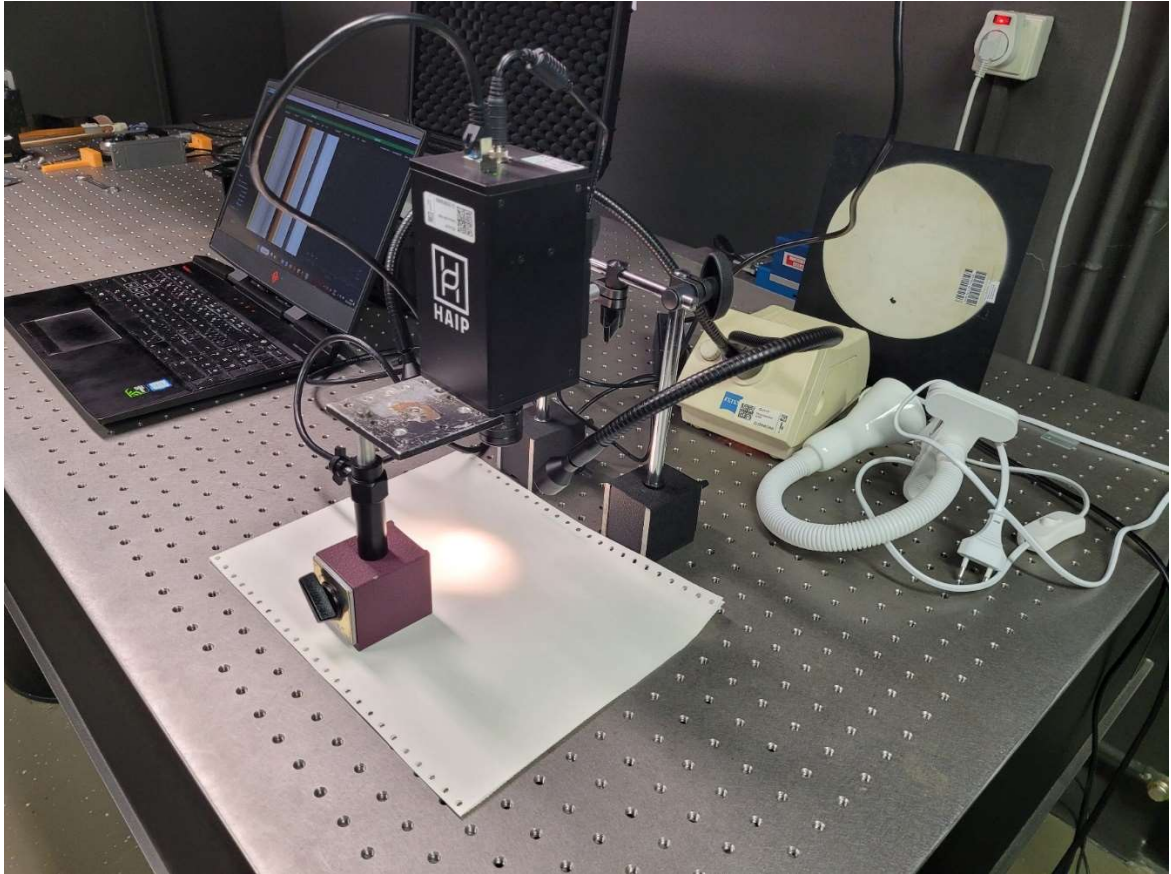
Graf 2-1 - Spektrálna odozva kamery Blackindustry VNIR V2 [67]

2.2. Pilotné meranie

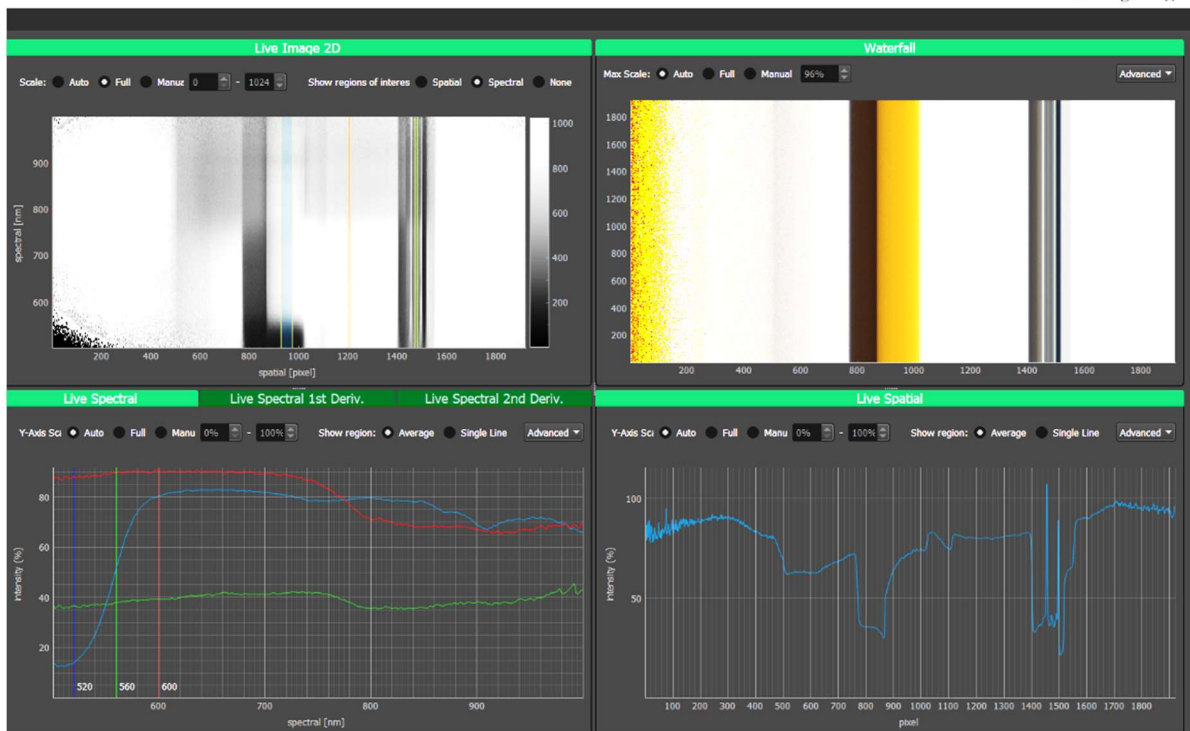
Cieľom pilotného merania je naučiť sa pracovať s kamerou BlackIndustry V2 a softvérom BlackStudio. Kamera bola umiestnená na provizórny držiak a nakalibrovaná podľa návodu. Ďalej bolo potrebné nastaviť sieťový adaptér v počítači, pretože kamera s počítačom komunikuje prostredníctvom káblového Ethernet pripojenia. Kompletné návody na obsluhu kamery a prácu s programom sú prílohou tejto práce.

K meracej zostave ešte zostáva dokončiť lineárny pojazd, pretože sa jedná o kameru so skenovaním typu Pushbroom. V tejto fázi je preto možné pozorovať len 1 riadok pixelov, ktorý sa vo “waterfall” náhľade priemietá donekonečna pod seba a pri niektorých predmetoch sa môže zdať, že sa jedná o obraz daného predmetu. Testovacím účelom to však neprekáža.

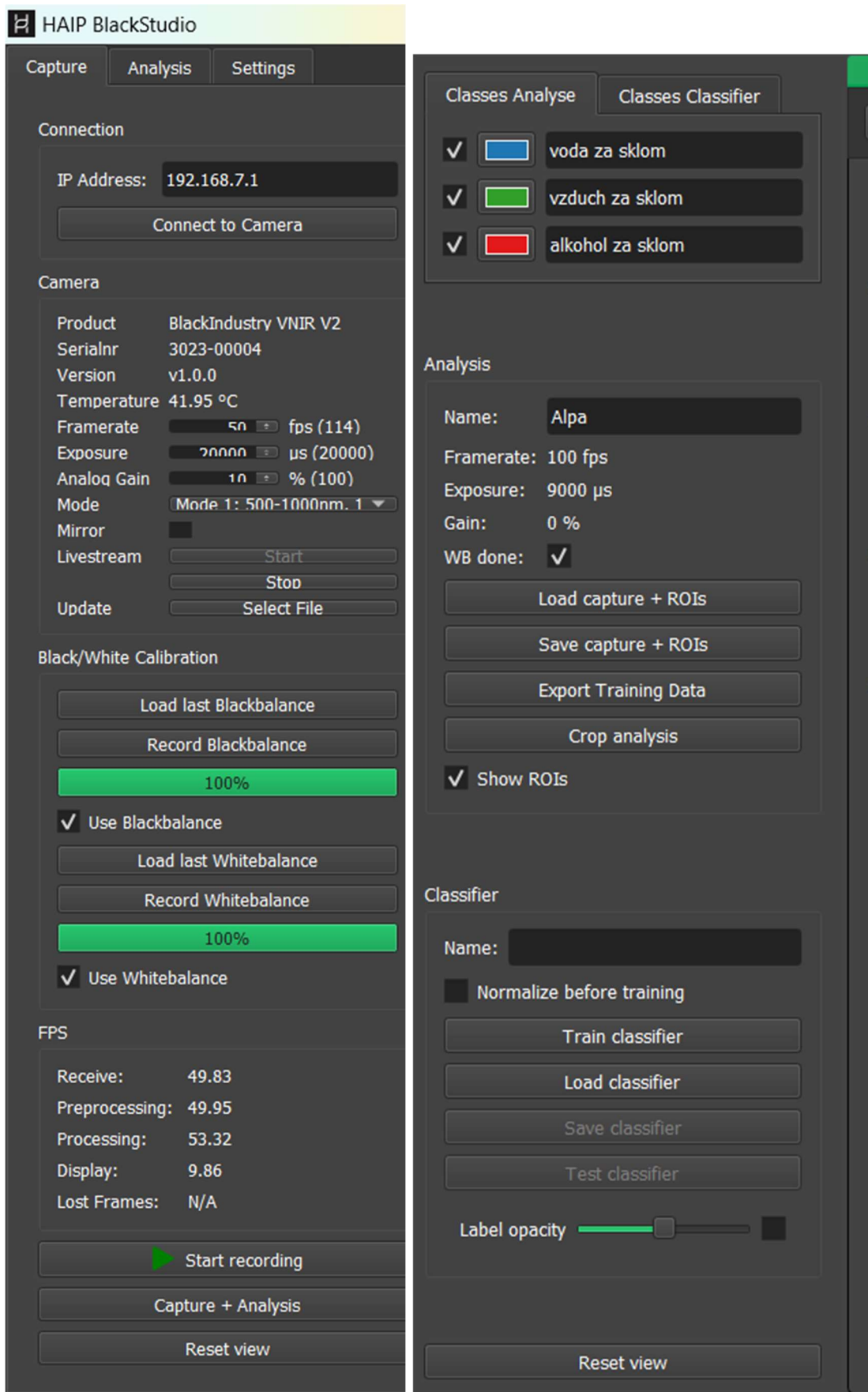
Prvotné výsledky boli najprv neuspokojivé. Kamera potrebuje dostatok svetla, v opačnom prípade je výstup zašumený a dáta nemožno správne vyhodnotiť. Svetelný zdroj musí navyše vyžarovať spojité spektrum, pretože inak by znovu došlo ku skresleniu výsledku. Preto bol ako zdroj sveta zvolená klasická vlákňová žiarovka. Taktiež je potrebné myslieť na to, aký rozsah vlnových dĺžok je vhodné zvoliť na jednotlivé materiály.



Obr. 2.3 - Experimentálna zostava s kamerou BlackIndustry. V tejto fáze je možné snímať len 1 riadok, nakoľko na lineárny pojazd ešte nie je dokončený

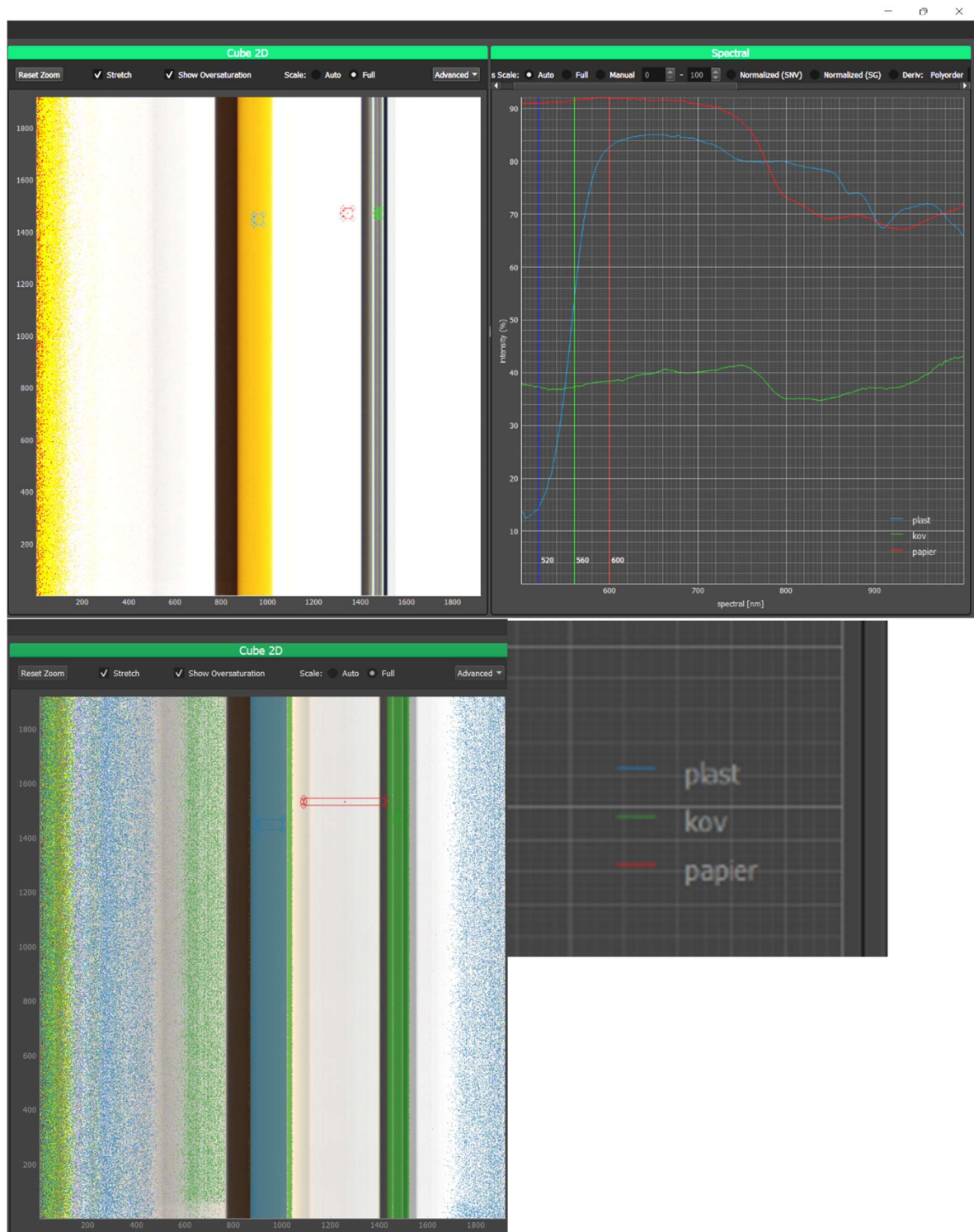


Obr. 2.4 - Rozhranie programu HAIP BlackStudio pre prácu s kamerou (živý náhľad vľavo hore, waterfall zložený obrázok vpravo hore, spektrálne čiary vľavo dole, krivka intenzity osvetlenia vpravo dole)



Obr. 2.5 - Ovládací panel (vľavo). Poskytuje možnosti nastavenia kamery, informácie v reálnom čase a možnosť kalibrácie. Analyzátor (vpravo) slúži na interpretáciu hyperspektrálnych dát.

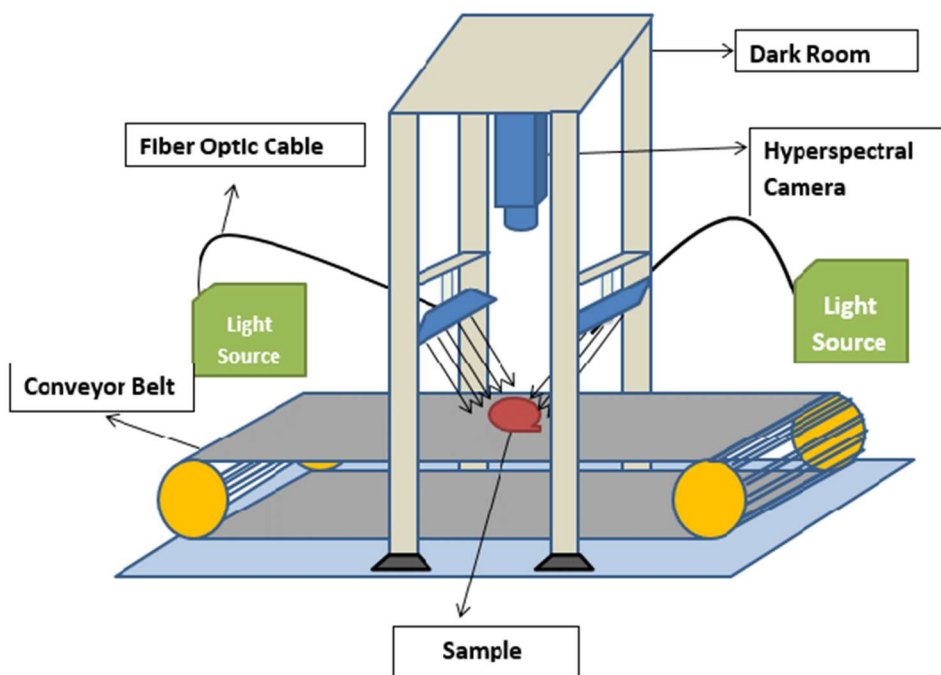
Po nasímaní snímku je nutné si zvoliť oblasti záujmu ROIs (Region of Interest), pomenovať ich a následne natréňovať klasifikátor, ktorý sa z vybraných ROIs naučí ich spektrálny podpis, na základe ktorého následne dokáže identifikovať ďalšie pixely na obrázku.



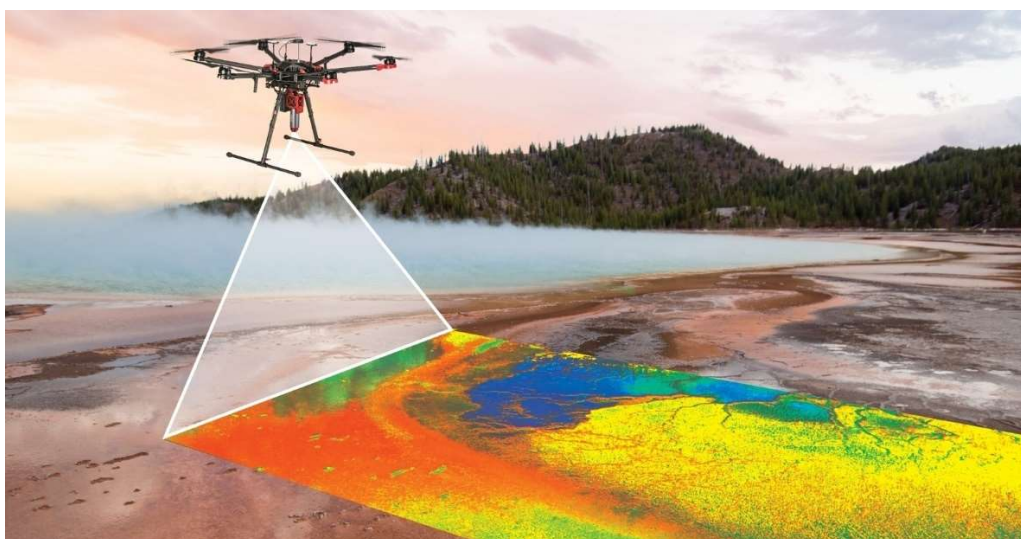
Obr. 2.6 - Spracovanie snímku a tréning klasifikátora v programe BlackStudio. Pozorovanými objektami boli plastová tyč a ocelový šesťhranný kľúč. Na snímku je stále prítomný šum, ktorý výrazne znižuje úspešnosť klasifikátora.

2.3. Návrh pracovnej stanice s využitím tejto kamery

Pred návrhom pracovnej stanice bolo potrebné sa oboznámiť s komerčne dostupnými riešeniami. V priemyselných aplikáciách sa väčšinou používajú dopravníkové pásy, nad ktorými je uchytená kamera s osvetlením. V ťažobnom priemysle a poľnohospodárstve je bežné použitie dronov, na ktorých je kamera uchytená. Vo vojenskom odvetví je možné dokonca použiť vesmírne družice.



Obr. 2.7 - Schéma uchytenia kamery nad dopravníkovým pásmom [68]



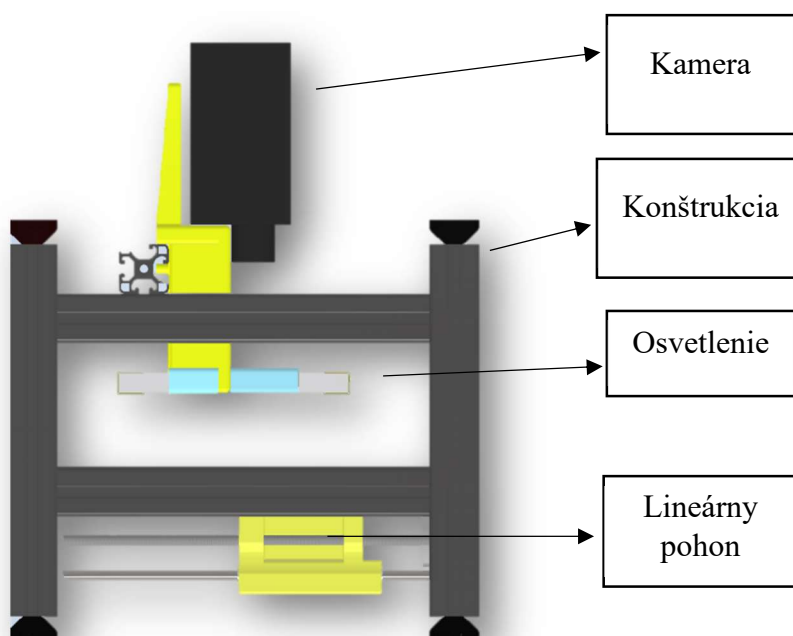
Obr. 2.8 - Prieskum zeme pomocou HS kamery uchytenej na drone [69]

Z dostupných riešení požiadavkám tejto práce najviac vyhovuje laboratórny set od firmy SPECIM, ktorý poslužil ako inšpirácia pre návrh vlastného skeneru.



Obr. 2.9 - Laboratórny skener od firmy SPECIM [70]

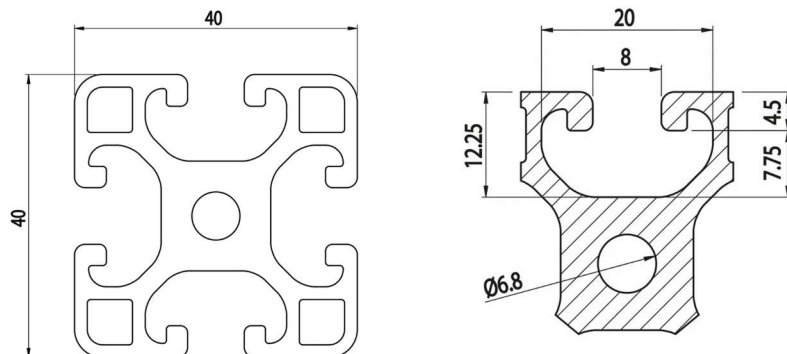
Medzi základné požiadavky takéhoto skeneru určite patrí robustná konštrukcia, ktorá je schopná tlmiť vibrácie a nedeformovať sa pod hmotnosťou kamery. Uchytenie musí byť univerzálne a malo by umožňovať ľahkú montáž a demontáž. Ďalej musí obsahovať osvetlenie vzorku z oboch strán, aby sa minimalizovali tieňe na snímkoch. Lineárny posuv vzorku je pravdepodobne realizovaný elektromotorom. V prípade konvenčného elektromotoru je potrebné rotačný pohyb previesť na lineárny.



Obr. 2.10 - Schéma usporiadania

2.3.1. Konštrukcia

Ako základ pre konštrukciu boli použité hliníkové profily IM 40-8, 40x40 so štvorcovým rezom určený na vytváranie bežných štruktúr, ľahký variant s hmotnosťou 1,77 kg/m a univerzálnou možnosťou pripojenia vďaka 4 drážkam na všetkých stranách profilu. Materiál je hliníková zliatina EN AW 6060 T5, tolerancia podľa normy EN 12020-2. [71]



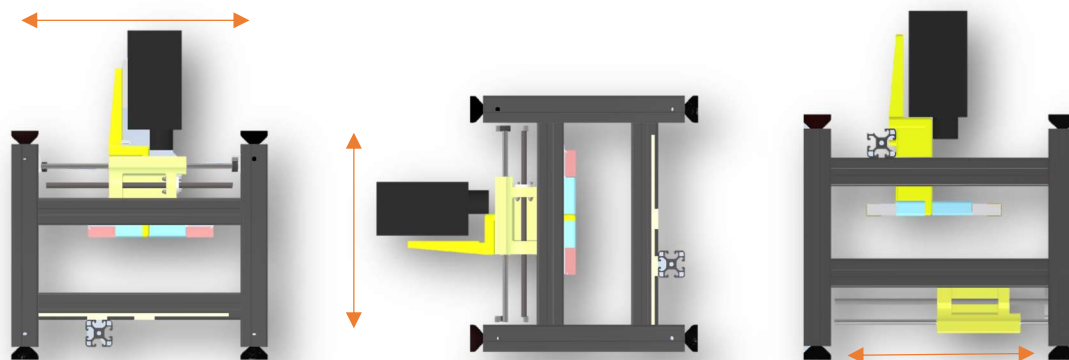
Obr. 2.11 - Nákres profilu IM 40-8 [71]

Rozmer konštrukcie na dĺžku bol daný zvoleným pohonom, ktorého maximálny pracovný rozsah činí 300 mm a bude bližšie popísaný v ďalšej kapitole. Šírka a výška sa odvíjali od predpokladu, aký veľký predmet bude potrebné skenovať. Objektív kamery je schopný zaostriť na pracovnú vzdialenosť v rozsahu 70 mm až nekonečno. Kameru je preto možné v držiaku posúvať. Aby bolo možné s konštrukciou manipulovať, bol z dôvodu výslednej hmotnosti a celkových rozmerov stanovený horný pracovný rozsah na 300 mm. Výsledný tvar je preto kocka o rozmeroch 380 x 380 x 380 mm a celkovej hmotnosti 10 kg.

Pri návrhu konštrukcie sa myslelo na to, že nie každý typ vzorky sa môže skenovať horizontálne a taktiež niektorými vzorkami (napr. guľového tvaru) nemožno pohybovať. Preto je konštrukcia navrhnutá univerzálna a môže sa používať v troch rôznych polohách: horizontálne, zvislo a horizontálne “hore nohami”.

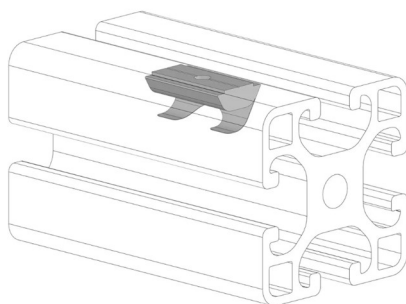


Obr. 2.12 - 3D model konštrukcie vymodelovaný v programe Autodesk Inventor 2024

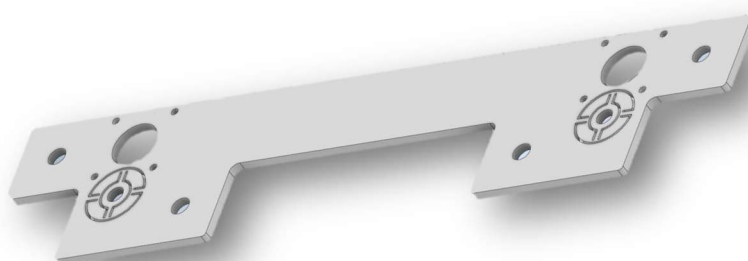


Obr. 2.13 - Náhľad konštrukcie v 3 pracovných polohách (zľava: kamera jazdí a predmet stojí, kamera jazdí zvislo a predmet stojí, kamera stojí a jazdí podložka s predmetom)

Na uchytenie vodiacich tyčí a motorov boli navrhnuté základne z ocelového plechu s hrúbkou 4 mm. Tie sa do drážok v konštrukcii prichytia štyrmi skrutkami o rozmeroch M8 x 15. Na uchytenie v drážkach sa používajú špeciálne matice. Ako kompenzácia výrobných nepresností sú v základniach okolo uloženia lineárneho vedenia navrhnuté pružné kĺby. Tie majú za úlohu zamedziť ohybu klzných tyčí a otláčaniu v uložení, ktoré by malo za následok zväčšenie radiálnej vôle v uložení.



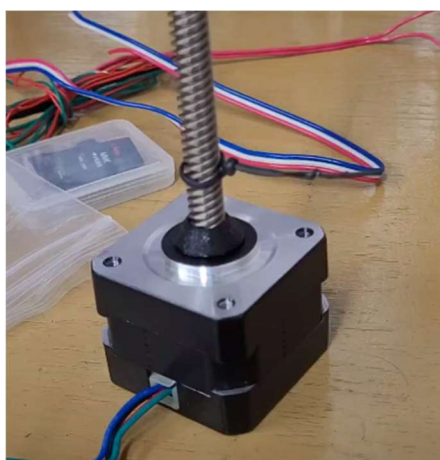
Obr. 2.14 - Matica do drážky IM 40-8 [71]



Obr. 2.15 – CAD model Základňa 1 (výkres v plnej kvalite je prílohou k tejto práci)

2.3.2. Pohon

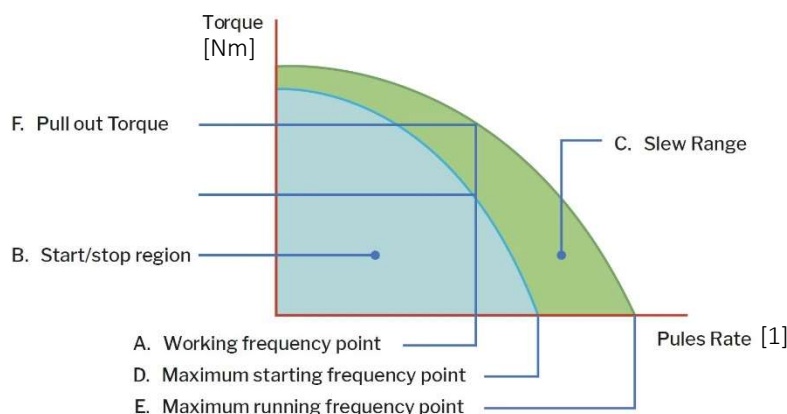
Základ pohonu tvoria dva krokové motory NEMA 17 s kódovým označením LDO-42STH34-1004L321E(PRU-ZL). Tieto krokové motory sa bežne používajú v 3D tlačiarňach na pohon osi Z. Motory majú rotor, ktorý je zároveň pohybová skrutka s lichobežníkovým závitom a dĺžkou 321 mm a nie je možné ho demontovať. Tento rozmer je preto kľúčovým v návrhu pracovného rozsahu a celkových rozmerov pracovnej stanice.



Obr. 2.16 - krokový motor NEMA 17

Tab. 2.1 - Technické špecifikácie krokového motoru [72]

	Špecifikácia		Špecifikácia
Počet fáz	2	Uhol/krok/dĺžka	$1,8^\circ \pm 0,9^\circ / 0,04$ mm
Nominálne napätie	DC 8V	Nominálny prúd	DC 1,0 A / fáza
Odpor vinutia (20°C)	$8 \cdot (1 \pm 20\%) \Omega$	Indukčnosť	$9,5 \cdot (1 \pm 20\%)$ mH
Tlačná sila	11 kg (107.8 N)	Záberný krútiaci moment	>20 mN.m
Smer otáčania	ACBDA CW	MAX štartovacia frekvencia	< 1000 PPS
MAX frekvencia	< 1300 PPS	Odpor izolácie vinutia	>100 M Ω (DC 500V)
HI POT	AC 600V/1 mA/ 1s	Trieda izolácie	B
Moment zotrvačnosti rotoru	117 g.cm ²	Hmotnosť	0,29 kg REF.



Graf 2-2 – Pracovná charakteristika obecného krokového motoru [73]

Konštrukčné výpočty pohybovej skrutky

Prevádzková osová sila Q [N]– vychádza zo scenáru, kde kamera s držiakom jazdí zvislo nahor. V tomto prípade je osová sila vyvíjaná na systém najväčšia. Keďže motory sú dva a pracujú spoločne, bude výsledná osová sila na jednu skrutku polovičná.

$$Q = (\text{hmotnosť kamery [kg]} + \text{držiaku [kg]})/2 * g [\text{m/s}^2] = (1,3 + 0,7)/2 * 9,81 \quad (2.1) \\ = 9,81 \text{ N}$$

Osová sila je približne 10x menšia ako maximálna dovolená osová sila udávaná výrobcom. Z toho vyplýva, že skrutka vyhovuje z hľadiska pevnosti.

Uhol stúpania γ , úhol boku β_n profilu a trecieho uhlu ϕ'

Pre závit Tr ... $\beta = 15^\circ$

Uhol stúpania:

$$\operatorname{tg} \gamma = \left(\frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} \right) = \left(\frac{4 \cdot 2}{\pi \cdot 7,25} \right) = 0,351 \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow \gamma = 19,35^\circ$$

Uhol boku:

$$\operatorname{tg} \beta_n = (\operatorname{tg} \beta \cdot \cos \gamma) = (\operatorname{tg} 15^\circ \cdot \cos 19,35^\circ) = 0,2528 \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow \beta_n = 14,19^\circ$$

Trecí uhol:

Koeficient trenia medzi oceľou a daným plastom nie je známy, a rôzne zdroje v literatúre uvádzajú hodnoty v rozmedzí 0,1 až 0,4. Preto bola zvolená stredná hodnota 0,25

$$\operatorname{tg} \varphi' = f' = \frac{f}{\cos \beta_n} = \frac{0,25}{\cos 14,19^\circ} = 0,258 \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow \varphi' = 14,46^\circ$$

Závit Tr8x8(P2x4) **nie je samosvorný**, pretože uhol stúpania $\gamma = 19,35^\circ$ je väčší než trecí uhol $\varphi' = 14,46^\circ$.

Maximálny krútiaci moment motoru

Pre osovú silu $Q = 107,8 \text{ N}$ a priemer závitu $d_2 = 7,25 \text{ mm}$

$$M_k = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = 107,8 \cdot \frac{7,25}{2} \cdot \operatorname{tg}(19,35^\circ + 14,46^\circ) = 261,70 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (2.5)$$

Účinnosť závitovej dvojice:

$$\eta_z = \frac{P_{od}}{P_{pr}} = \frac{Q \cdot v_p}{M_{kš} \cdot \omega_{š}} = \frac{Q \cdot v_p}{Q \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') \cdot \omega_{š}} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi')} = \quad (2.6)$$

$$\frac{\operatorname{tg} 19,35^\circ}{\operatorname{tg}(19,35^\circ + 14,46^\circ)} = 0,524$$

$$\eta_z = 52,4\%$$

Maximálna rýchlosť posuvu:

Výrobca udáva, že maximálna rýchlosť na ktorú sa môže motor rozbehnúť z nulových otáčok je 1000 PPS (pulses per second). Pri stúpaní závitu $a = 8 \text{ mm}$ a krokovaní $1,8^\circ / \text{krok}$ vyplýva vzťah:

$$v_{\max_start} = \frac{PPS \cdot a}{SPR \text{ (steps per revolution)}} = \frac{1000 \cdot 8}{\frac{360}{1,8}} = 40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.7)$$

Maximálne otáčky ktoré môže motor dosiahnuť celkovo sú potom 1300 PPS:

$$v_{\max} = \frac{PPS \cdot a}{SPR \text{ (steps per revolution)}} = \frac{1300 \cdot 8}{\frac{360}{1,8}} = 52 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.8)$$

Axiálna presnosť polohovania pohonu:

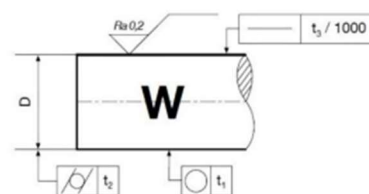
Pri stúpaní závitu $a = 8\text{mm}$ a krokování $1,8^\circ \pm 0,9^\circ$ / krok vyplýva vzťah:

$$\Delta x = \frac{a}{SPR} = 0,04 \pm 0,02 \text{ mm} \quad (2.9)$$

Okrem motorov a pohybovej matice je súčasťou pohonu lineárne vedenie pozostávajúce z dvoch vodiacich tyčí a štyroch lineárnych guľičkových ložísk. Axiálne zaistenie je realizované pomocou štyroch sťahovacích krúžkov DIN 705 o vnútornom priemere 8 mm.

Tab. 2.2 - Rozmerové tolerancie vodiacich tyčí [74]

Indukčne kalené a broušené vodiace tyče Cf53

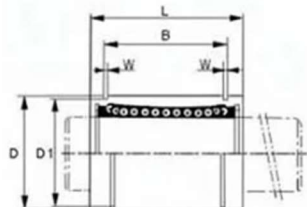


Průměr D	Hmotnost	Kód výrobku	Standardní délka	Prokalená vrstva SHD DIN ISO15787	Standardní tolerance hG	Kruhovitost t1	Válcovitost t2	Přímost t3
mm	Kg/m		mm	mm	μm	μm	μm	mm/m
4	0,10	W 4	4000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
5	0,15	W 5	6000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
6	0,22	W 6	6000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
8	0,39	W 8	6000	0,6 - 0,9	0/-9	4	6	0,16
10	0,62	W 10	6000	0,7 - 1,0	0/-9	4	6	0,12
12	0,89	W 12	6000	0,8 - 1,2	0/-11	5	8	0,12

Tab. 2.3 – Rozmerové tolerancie ložiska LM8UU [75]

Specifikace:

- Pro tyč: 8mm



Model number	Specification		Main dimensions									
	Number of ball rows	Weight(g)	Inscribed circle		Outer diameter		Length			W	D1	
			Dr(mm)	Tolerance	D(mm)	Tolerance	L(mm)	Tolerance	B			Tolerance
LM3UU	4	1.4	3	0-0.008	7	0-0.009	10	0-0.12				
LM4UU	4	1.9	4		8		12					
LM5UU	4	4	5	0-0.009	10	0-0.11	15	0-0.2	10.2	0-0.2	1.1	9.6
LM6UU	4	8	6		12		19		13.5		1.1	11.5
LM8UU	4	11	8		15	17	11.5	1.1	14.3			
LM8UU	4	16	8		15	24	17.5	1.1	14.3			
LM10UU	4	30	10		19	29	22	1.3	18			
LM12UU	4	31.5	12		21	30	23	1.3	20			
LM13UU	4	43	13		23	32	23	1.3	22			
LM16UU	4	69	16		28	37	26.5	1.6	27			

Radiálna vôľa pohonu:

Riadiálna vôľa vzniká v uložení vodiacich tyčí do základní (H12/h6) a v uložení ložisiek na vodiacich tyčiach (H6/h6). Odčítané zo strojníckych tabuliek, maximálne možné vôle uloženia tyčí v základni H12/h6 je 0,159 mm a uloženie tyčí a ložisiek H6/h6 je 0,018 mm. Celková vôľa systému je teda 0,177 mm. Radiálna vôľa však na kvalitu obrazu nemá vplyv, nakoľko sa pri skenovaní oba motory točia rovnakým smerom a celý systém je počas skenovania predopnutý vďaka krútiacim momentom.

2.3.3. Elektronika

Driver

Na ovládanie motorov bol zvolený jeden driver DRV 8825. Pre jeho nominálny prúd až 2,2 A je možné ovládať oba krokové motory cez jeden driver. Driver má v sebe zabudovanú prúdovú a tepelnú ochranu a podporuje 6 rozlíšení mikrokrokovania (Full, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{32}$). [76]



Obr. 2.17 - Driver RAMPS DRV8825 [76]

Mikrokrokovanie je metóda riadenia krokových motorov, ktorá sa zvyčajne používa na dosiahnutie vyššieho rozlíšenia alebo plynulejšieho pohybu pri nízkych rýchlostiach.

Krokové motory sa pohybujú v diskretných krokoch alebo zlomkoch otáčky. Napríklad krokový motor s uhlom kroku 1,8 stupňa vykoná 200 krokov na každú celú otáčku motora ($360 \div 1,8$). Tento diskretný pohyb znamená, že otáčanie motora nie je dokonale plynulé, a čím je otáčanie pomalšie, tým je menej plynulé v dôsledku relatívne veľkej veľkosti kroku. Jedným zo spôsobov, ako zmierniť túto nedostatočnú plynulosť pri nízkych rýchlostiach, je zmenšiť veľkosť krokov motora. [77]

Mikrokrokové riadenie rozdeľuje každý celý krok na menšie kroky, aby pomohlo vyhladiť otáčanie motora, najmä pri nízkych rýchlostiach. Napríklad krok 1,8 stupňa možno rozdeliť až 256-krát, čím sa dosiahne uhol kroku 0,007 stupňa ($1,8 \div 256$) alebo 51 200 mikrokrokov na jednu otáčku. [77]

Mikrokrokovanie sa dosahuje pomocou napätia modulovaného šírkou impulzu (PWM) na riadenie prúdu do vinutí motora. Driver posiela do vinutí motora dve sínusové vlny napätia, ktoré sú o fázovo posunuté o 90 stupňov. Kým sa prúd v jednom vinutí zvyšuje, v druhom vinutí sa znižuje. Tento postupný prenos prúdu vedie k plynulejšiemu pohybu a konzistentnejšiemu vytváraniu krútiaceho momentu ako pri plnofázovom alebo polfázovom riadení. [77]

Kompromis spočíva v tom, že so zvyšujúcim sa počtom mikrokrokov na jeden plný krok inkrementálny krútiaci moment drasticky klesá. [78]

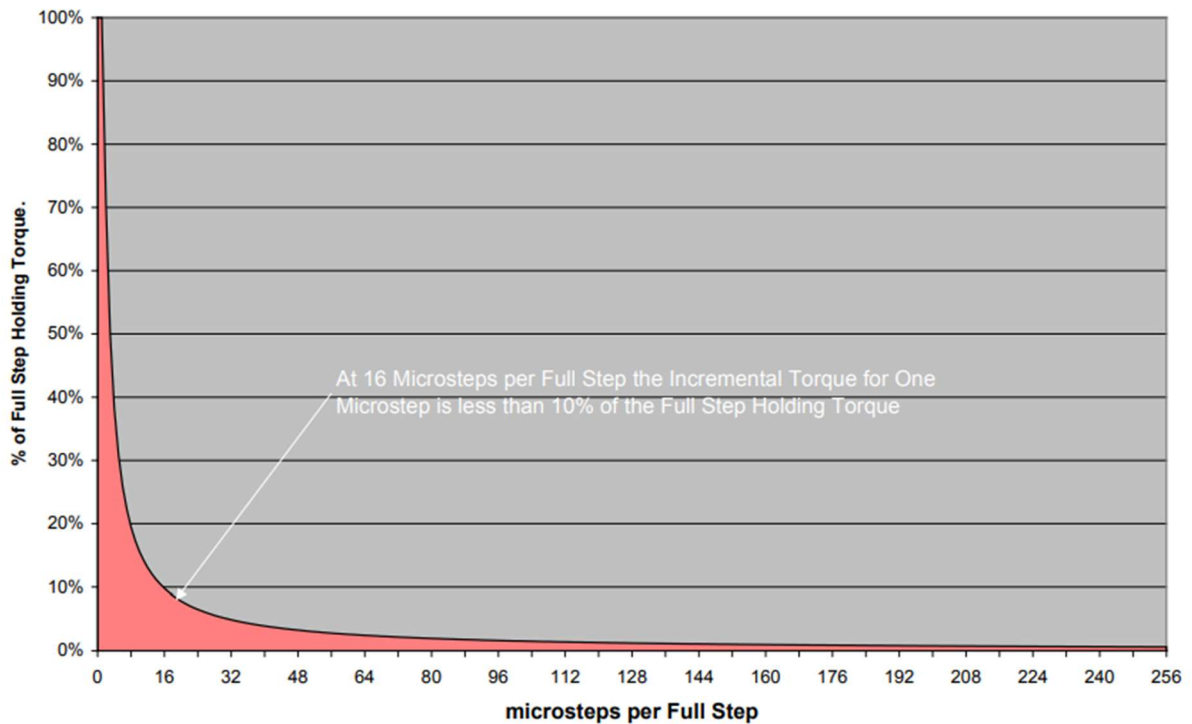
Dôsledkom toho je, že ak je záťažový moment spolu s trecím a záberným momentom motora väčší ako inkrementálny krútiaci moment mikrokroku, budú sa musieť realizovať ďalšie mikrokroky, kým kumulovaný krútiaci moment prekročí zaťažovací moment plus trecí a záberný moment motora. [78]

Tab. 2.4 - Tabuľkový prehľad poklesu krútiaceho momentu s rastúcim počtom mikrokrokov [78]

Incremental Torque per Microstep As the Number of Microsteps per Full Step Increase

Microsteps/full step	% Holding Torque/Microstep
1	100.00%
2	70.71%
4	38.27%
8	19.51%
16	9.80%
32	4.91%
64	2.45%
128	1.23%
256	0.61%

Incremental Torque per Microstep/Full Step



Graf 2-3 - Inkrementálny krútiaci moment na jeden mikrokrok/ celý krok [78]

Medzi výhody mikrokrokovania patria:

- Zníženie mechanického hluku
- Mechanicky hladší chod
- Menšie problémy s rezonanciami

Hoci mikrokrokovanie poskytuje väčšie rozlíšenie, lepšia presnosť sa prejaví len ak krútiaci moment neklesne pod hodnotu protimomentu.

Zníženie mechanického a elektromagneticky indukovaného hluku je však skutočným prínosom. Mechanický prenos krútiaceho momentu bude tiež oveľa jemnejší, rovnako ako zníženie problémov s rezonanciami. Tým sa dosiahne lepšia synchronizácia systému s open-loop riadením a menšie opotrebovanie mechanických častí. [78]

Mini počítač Raspberry Pi 3 Model B+

Na ovládanie driveru je potrebné využiť mikrokontroler s logikou 3,3V alebo 5V. Zvolený bol mini počítač Raspberry Pi 3, na ktorom je možné spustiť program pre ovládanie pohonu.

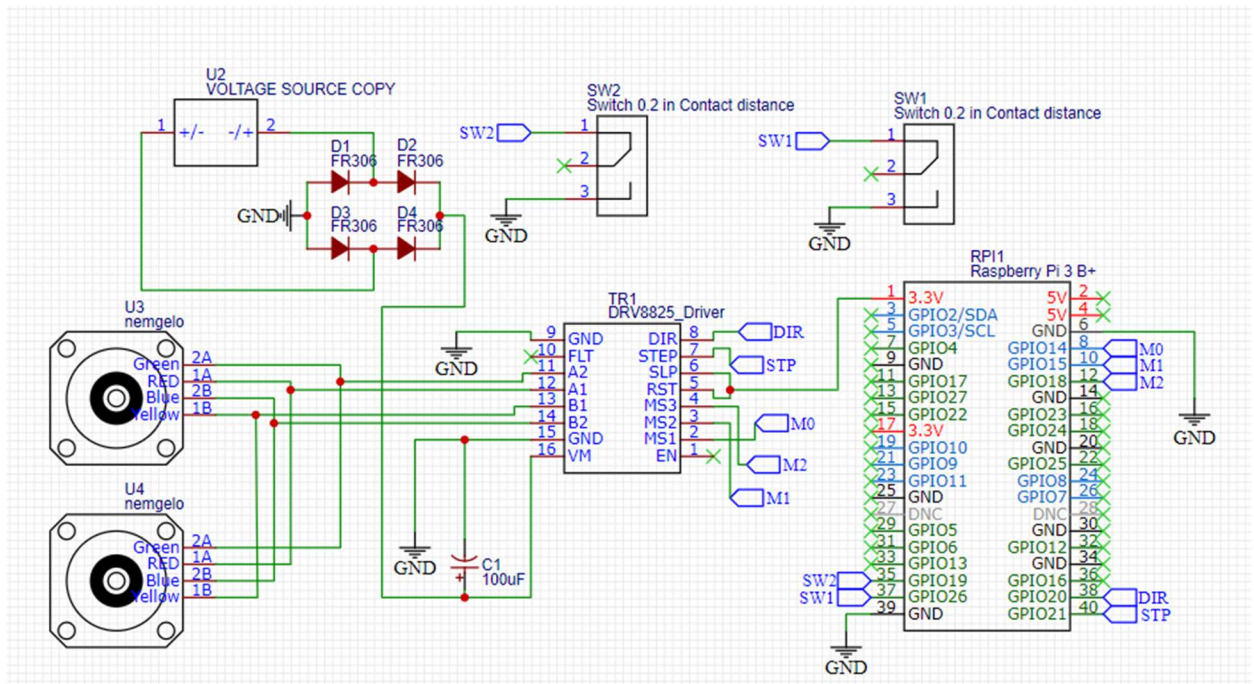
Raspberry Pi 3 je možné ovládať priamo prostredníctvom pripojenej klávesnice a monitoru alebo cez vzdialené rozhranie SSH alebo VNC. Keďže ďalší program na prácu s kamerou, HAIP BlackStudio, funguje len na operačnom systéme Windows, bola zvolená možnosť pripojenia prostredníctvom VNC. Na pripojenie k Raspberry bol použitý program RealVNC Viewer, ktorý je kompatibilný so všetkými bežne používanými operačnými systémami, takže pri práci bude možné použiť napríklad aj smartfón s operačným systémom Android alebo iOS.

Doska plošných spojov

Návrh dosky plošných spojov (DPS) je komplexný proces, ktorý zahŕňa viaceré kroky od počiatočného konceptu až po finálnu výrobu.

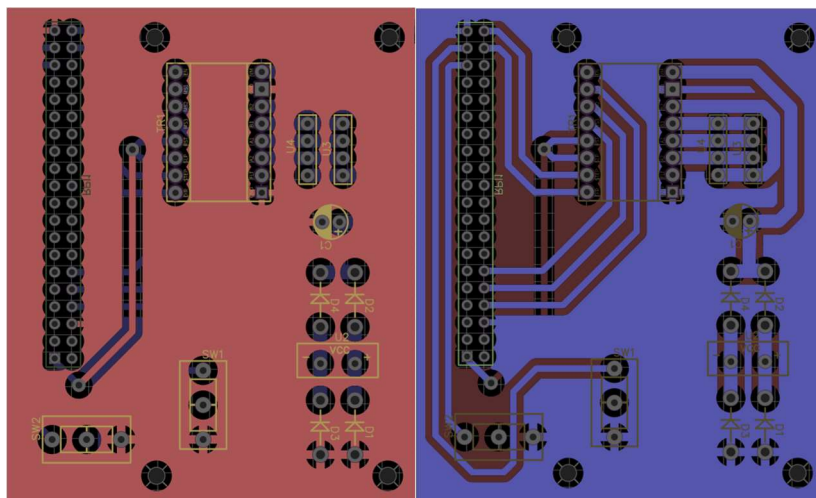
Návrh schémy v programe EasyEDA:

Schéma zapojenia zahŕňa konektory pre dva krokové motory, Raspberry Pi 3, Driver DRV 8825, dva mikrospínače, vstupné napájanie, kondenzátor a diódový usmerňovací mostík, ktorý slúži ako ochrana proti náhodnému prepólovaniu zdroja.



Obr. 2.18 - Schéma zapojenia DPS

Bola zvolená obojstranná DPS s jedným prekovením. Na DPS sa nachádza 12 komponentov a 16 trás o celkovej dĺžke 3464,5 mm. Na výpočet šírky trás bol použitý PCB Trace Width Calculator dostupný online.



Obr. 2.19 - Finálna podoba DPS v programe EasyEDA. Červená - predná strana, modrá - zadná strana.

Inputs:		
Current	2.5	Amps
Thickness	18	um

Optional Inputs:		
Temperature Rise	10	Deg C
Ambient Temperature	23	Deg C
Trace Length	56	mm

Results for Internal Layers:		
Required Trace Width	5.38	mm
Resistance	0.0101	Ohms
Voltage Drop	0.0254	Volts
Power Loss	0.0634	Watts

Results for External Layers in Air:		
Required Trace Width	2.07	mm
Resistance	0.0264	Ohms
Voltage Drop	0.0660	Volts
Power Loss	0.165	Watts

Notes:

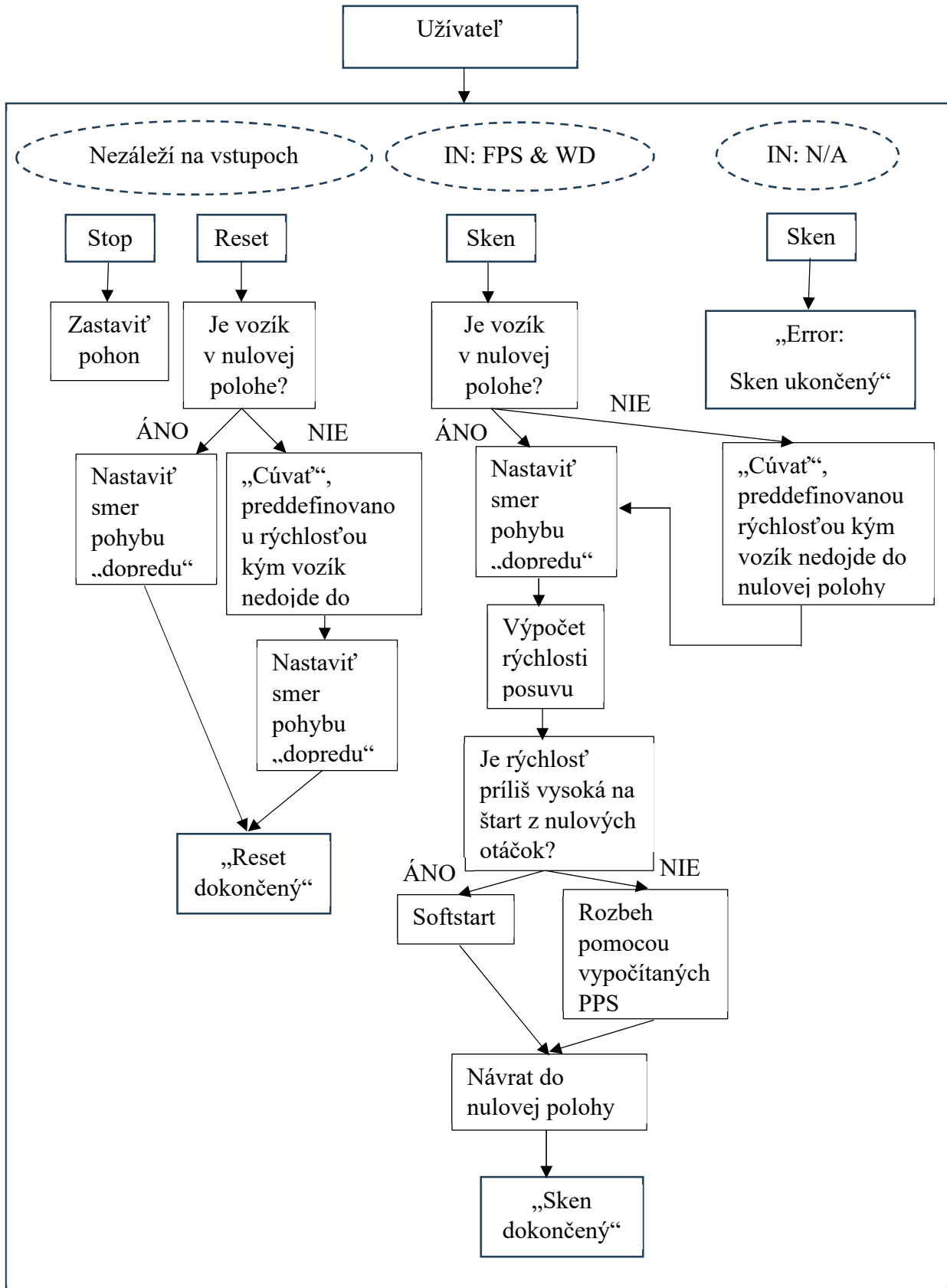
The trace width is calculated as follows:
 First, the Area is calculated:
 $Area[mils^2] = (Current[Amps]/(k*(Temp_Rise[deg. C])^b))^{1/c}$
 Then, the Width is calculated:
 $Width[mils] = Area[mils^2]/(Thickness[oz]*1.378[mils/oz])$
 For IPC-2221 internal layers: k = 0.024, b = 0.44, c = 0.725
 For IPC-2221 external layers: k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725
 where k, b, and c are constants resulting from curve fitting to the IPC-2221 curves

Obr. 2.20 - Šírka trasy pre maximálny prúd 2,5 A a maximálne oteplenie 10°C [79]

2.3.4. Softvér

Na jednoduché ovládanie rýchlosti posuvu bolo vytvorené grafické užívateľské rozhranie v programovacom jazyku Python. Kód využíva knižnice “RPi.GPIO” na ovládanie pinov Raspberry Pi, “time” na prácu s časom, “tkinter” na tvorbu grafického rozhrania a “threading”, ktorá umožňuje súbežný beh rôznych častí programu.

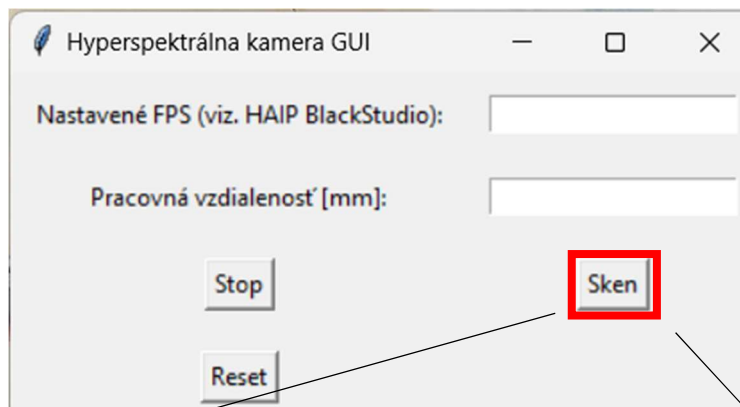
Kód funguje na princípe popísanom v diagrame nižšie:



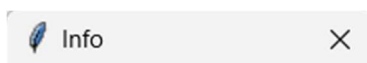
Obr. 2.21 - Vývojový diagram kódu

Popis funkcií v programe Hyperspektrálna kamera

1. Tlačidlo Sken:

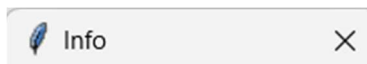


ÁNO:



i FPS: 120, WD: 150
Sken beží...
v= 12.0 mm/s

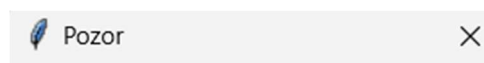
OK



i Sken dokončený!

OK

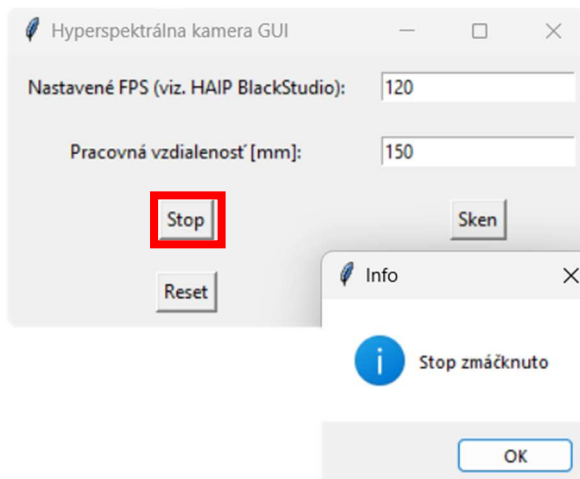
NIE:



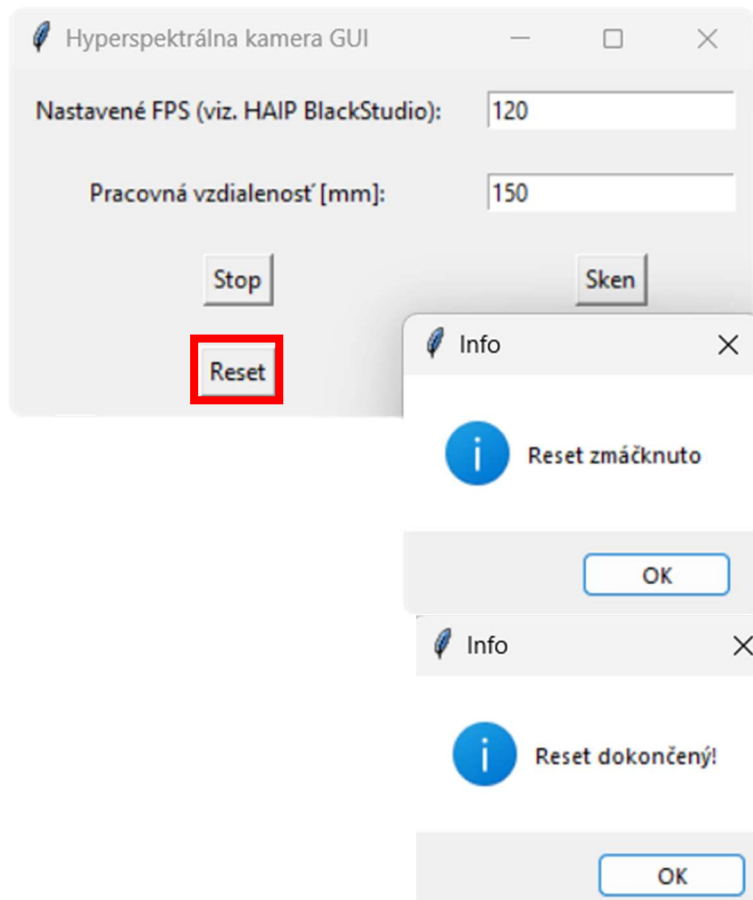
! FPS a WD musia byť vyplnené!

OK

2. Tlačidlo Stop:



3. Tlačidlo **Reset**:



Vzorec pre výpočet rýchlosti posuvu bol odvodený podľa nasledujúcich vzťahov:

$$t_{delay} = \frac{a \cdot f'}{FPS \cdot WD \cdot PIX \cdot k \cdot SPR} [s] \quad (2.10)$$

Pričom:

a [mm] – stúpanie závitu

f' [mm] – obrazová ohnisková vzdialenosť

FPS [Hz] – snímkovácia frekvencia kamery

WD [mm] – pracovná vzdialenosť od hlavnej optickej roviny objektívu

PIX [mm] – veľkosť 1 pixelu kamery

SPR [1] – počet krokov na otáčku

k [1] – korekčný súčiniteľ pre mikrokrokovanie (1 = FULL STEP, 2 = HALF STEP, 4 = 1/4 STEP, 8 = 1/8 STEP, 16 = 1/16 STEP, 32 = 1/32 STEP)

Frekvencia pulzov f_{PPS} sa určí ako:

$$f_{PPS} = \frac{1}{t_{delay} \cdot k} \text{ [Hz]} \quad (2.11)$$

A rýchlosť posuvu sa vypočíta ako:

$$v_p = \frac{a}{k \cdot SPR \cdot t_{delay}} \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.12)$$

Okrajové podmienky sú, že f_{PPS} nemôže byť vyššia než 1300 PPS (obmedzené HW) a pri $1000 < f_{PPS} < 1300$ musí motor najprv odštartovať nižšou rýchlosťou a následne zrýchliť.

2.3.5. Osvetlenie

Z dostupných možností bola zvolená možnosť osvetlenia pomocou halogénových žiaroviek R7s, vďaka jej výhodnému pomeru cena/výkon a možnosti použiť elektrický stmievač na reguláciu jasů.

Po konzultácii s výrobcom kamery bol odporučený výkon osvetľovacej sústavy najmenej 200W. Z dostupných riešení bola zvolená možnosť použitia 4 halogénových trubíc s patičkou R7s, chromatickou teplotou 2800K a výkonom 80W. Maximálny výkon je obmedzený zásuvkovým stmievačom, ktorý je dimenzovaný maximálne na 275W, čo je ale stále dostatočná hodnota.



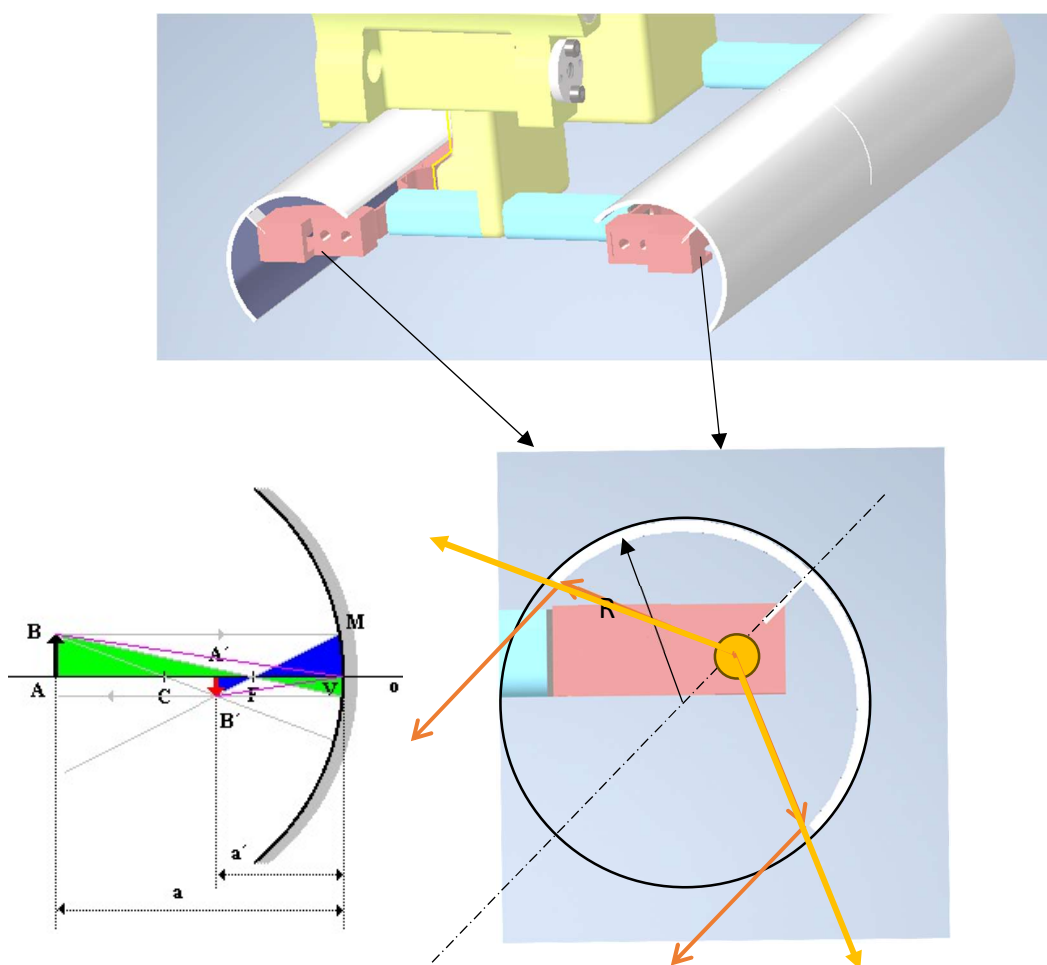
Obr. 2.22 - Žiarovka halogénová 80W/230V/R7s/118mm [80]

Tab. 2.5 - Parametre výrobku [80]

Všeobecné parametre výrobku			
Spotreba energie:	80 (kWh/1000h)	Trieda energetickej účinnosti:	G
Užitočný svetelný tok (Φ_{use}) označenie, či je svetelný tok všesmerový (360°),	1 380 lm Všesmerový (360°)	Chromatickosť zaokrúhlená na najbližších 100 K alebo rozsah náhradných teplôt chromatickosti	2800 K

široký kužel' (120°) alebo úzky kužel' (90°)		zaokrúhlený na najbližších 100 K, ktoré možno nastaviť	
Príkon v zapnutom stave (P_{on})	80,0 W	Spektrálne zloženie žiarivého toku v rozsahu 250 nm až 800 nm pri plnom výkone	
Výška:	118 mm		
Šírka:	12 mm		
Hĺbka:	12 mm		

Reflektory osvetlenia boli navrhnuté podľa zobrazovacej rovnice guľového zrkadla tak, aby odrazené svetelné lúče dopadali na rovinu, ktorá pretína os objektívu kamery. Tým pádom bude na túto oblasť dopadať svetlo vyžiarené žiarovkou priamo a aj odrazené, čo maximalizuje svetelný výkon. Materiál bol navrhnutý plech z pozinkovanej ocele s koeficientom odrazivosti 0,7, vďaka jeho dobrému pomeru hmotnosti a tepelnej odolnosti.



Obr. 2.23 - 3D model návrhu osvetlenia + detail (vpravo dole), žlté šípky vymedzujú svetelný kužel vyžiarený žiarovkou priamo a oranžové vyznačujú svetelný kužel odrazený od reflektoru. Schéma pre guľové zrkadlo (vľavo dole).

3. Praktická časť

3.1. Výroba

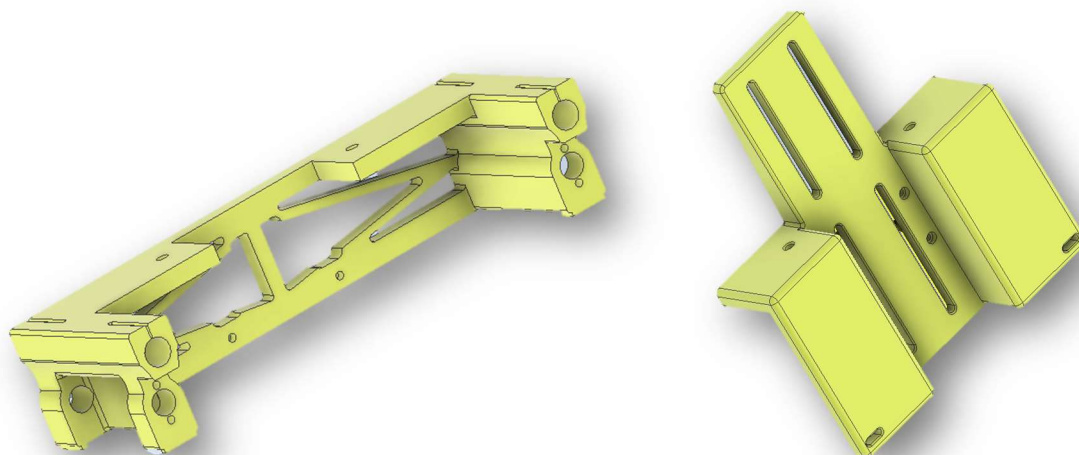
3.1.1. 3D tlač

Niektoré diely (s pracovným označením „vozík“ a „držiak kamery“) bolo potrebné vytlačiť na 3D tlačiarňi. Použitá bola tlačiareň Original Prusa XL, kvôli jej maximálnemu objemu až 360 x 360 x 360 mm.

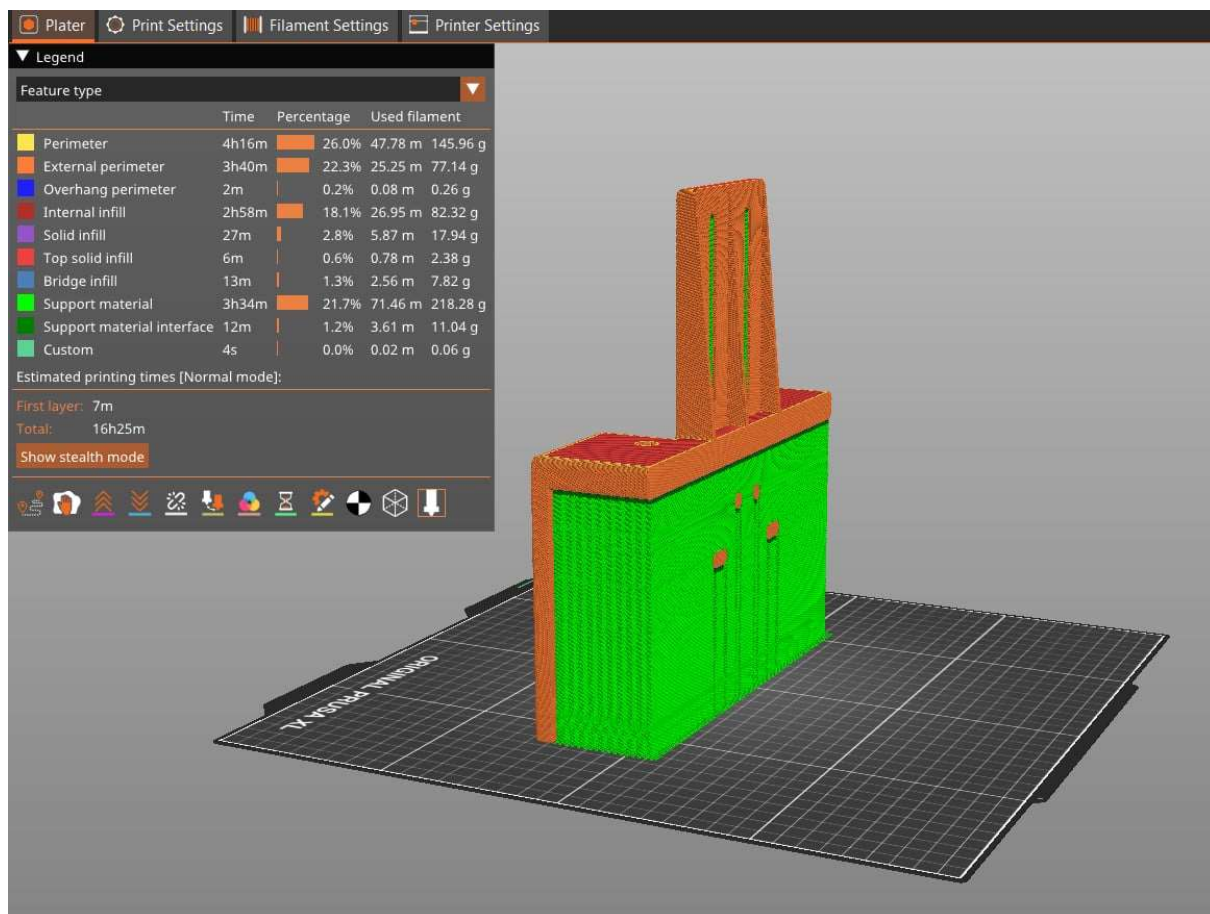
Ako materiál bol zvolený PET-G, ktorý je obľúbený v rôznych priemyselných odvetviach vrátane 3D tlače. PET-G kombinuje vlastnosti PET (polyetyléntereftalát) a glykolu, čo mu poskytuje vynikajúce mechanické a tepelné vlastnosti, ako aj jednoduchšie spracovanie. Teplota trysky bola nastavená na 240° C a teplota podložky na 80° C.

Medzi jeho hlavné výhody patrí:

- Vysoká Odolnosť – PET-G je známy svojou vysokou odolnosťou voči nárazom a opotrebeniu. Je flexibilnejší ako PET, čo znižuje pravdepodobnosť praskania alebo lámavosti.
- Jednoduchosť Spracovania – PET-G sa ľahko tlačí a je menej náchylný na deformácie počas chladenia v porovnaní s inými materiálmi, ako napríklad ABS. Má nízku tendenciu k tvorbe warpu (deformácie počas chladenia).
- Prilnavosť Vrstiev – PET-G ponúka dobrú prilnavosť medzi vrstvami, čo vedie k pevným a odolným výtlačkom.
- Bezpečnosť - Je netoxický a má nízky zápach počas tlače, čo ho robí vhodným pre použitie v domácich a vzdelávacích prostrediach.



Obr. 3.1 - 3D modely vozík (vľavo) a držiak kamery (vpravo) vymodelované v programe Autodesk Inventor 2024



Obr. 3.2 - Príprava 3D tlače. Čas tlače držiaka kamery bol približne 16,5 hodiny.



Obr. 3.3 - Držiak kamery. Finálny produkt. Kamera bude do držiaku uchytená pomocou skrutiek M5x15 a bude ju možné posúvať.

3.1.2. Základne pre pohon

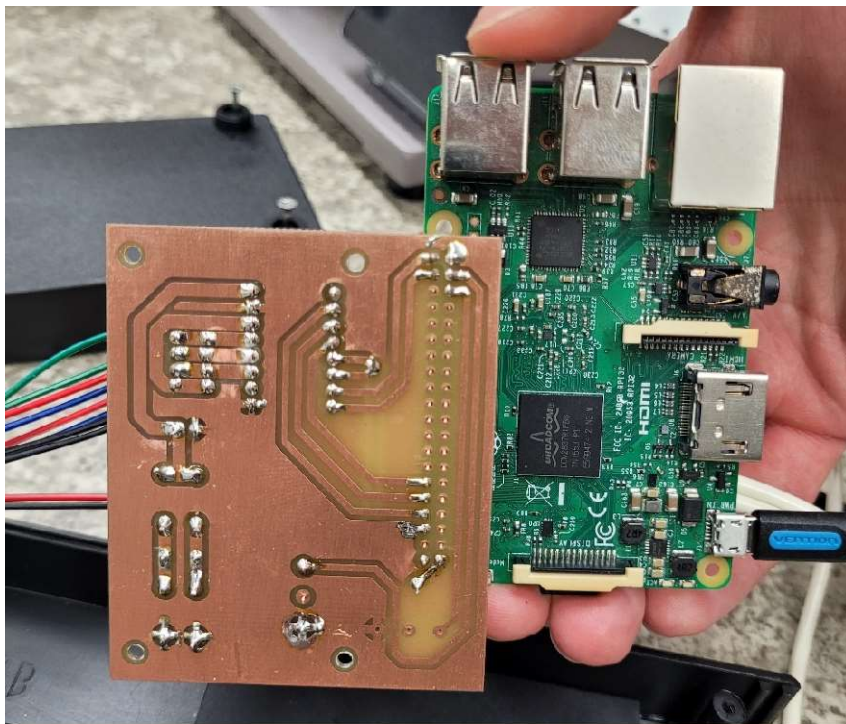
Základne pre uchytenie motorov a lineárneho vedenia boli na objednávku vypálené z oceľového plechu (ocel' S235) o hrúbke 4 mm. Technologické tolerancie CO₂ laseru odpovedajú norme ČSN ISO 2768m. Diery pre uloženie vodiacich tyčí boli upravené vrtákom a následne výhrubníkom.



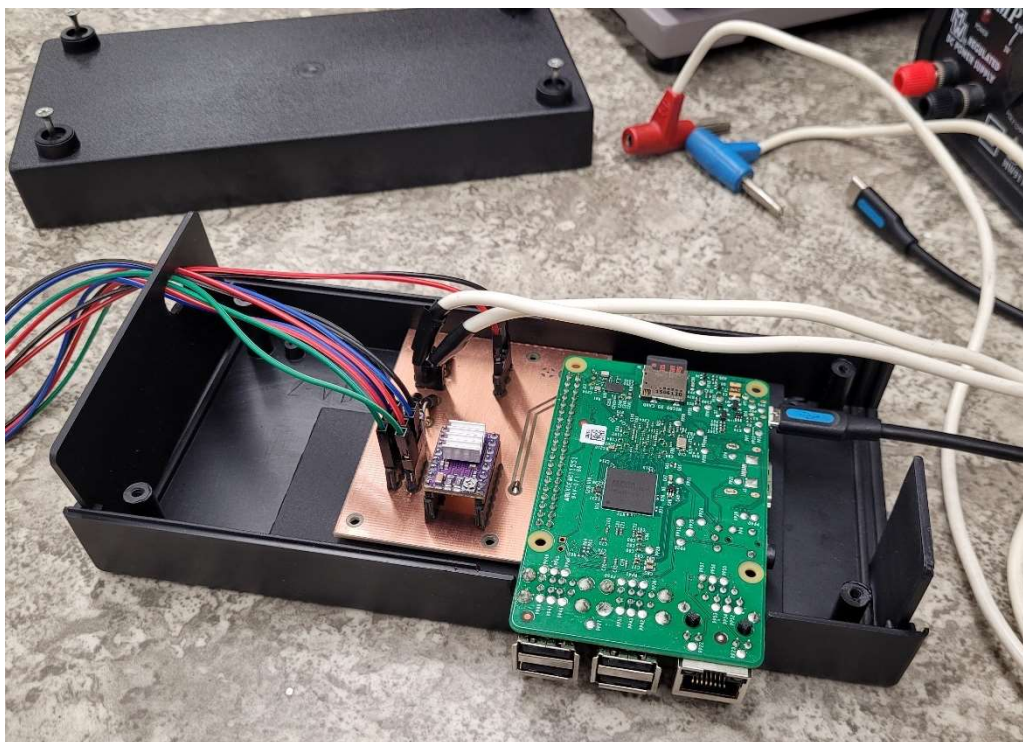
Obr. 3.4 - Výpalky z plechu

3.1.3. Elektronika

Doska plošných spojov bola vyrobená na zakázku podľa zaslaných Gerber súborov. DPS bolo ešte potrebné osadiť dutinkovými lištami, kondenzátorom a štyrmi diódami. Všetky komponenty boli typu THT (Through hole technology). Po pájkovaní bola vykonaná kontrola vodivosti spojov pomocou multimetra.



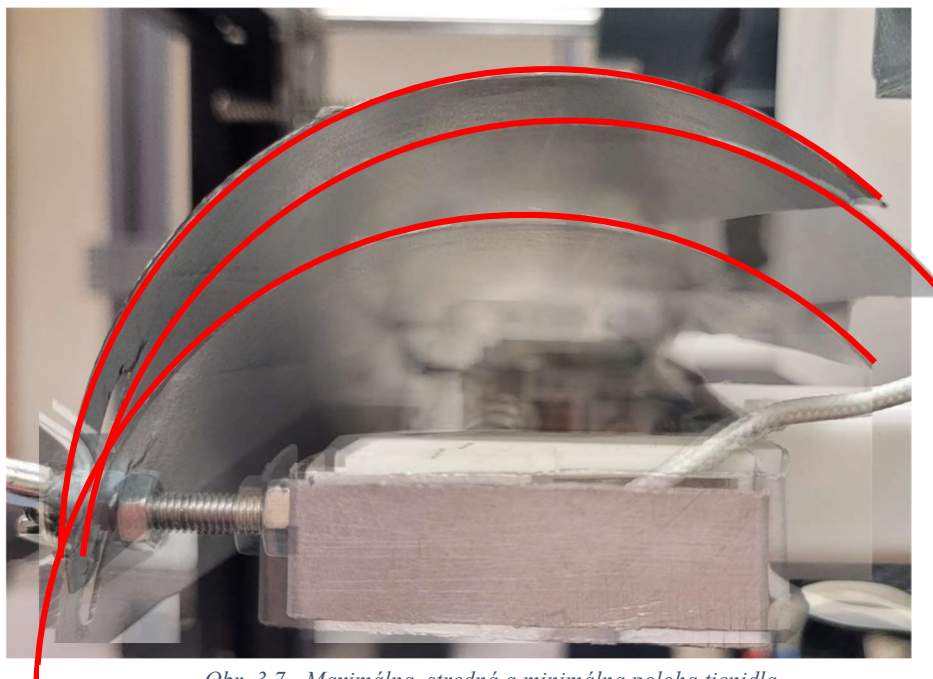
Obr. 3.5 - DPS + Raspberry Pi 3 po zostavení



Obr. 3.6 - Celá elektronika bola uložená do ochrannej krabičky aby sa zamedzilo jej poškodeniu. Z pravej strany vychádzajú vodiče pre pripojenie k zdroju a z ľavej pre pripojenie k pracovnej stanici

3.1.4. Osvetlenie

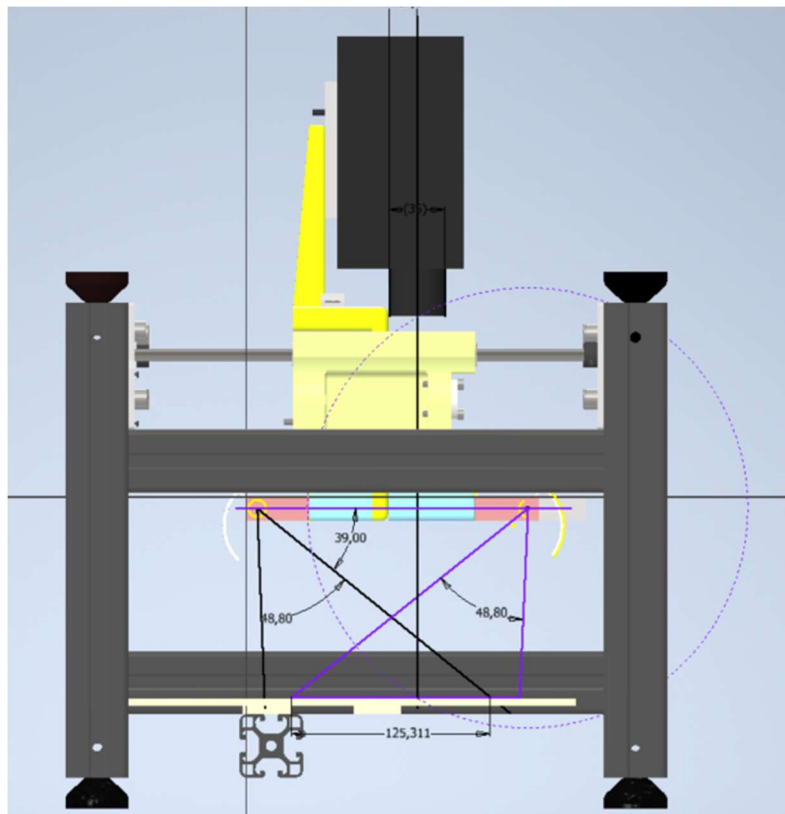
Kvôli rozmerom konštrukcie nebolo možné vyrobiť aretačný mechanizmus tienidiel podľa návrhu, pretože medzi tienidlom a kliečkou zostalo len približne 5 mm. Pôvodný návrh bol upravený, vďaka čomu došlo k posunutiu žiarovky mimo ohnisko. To znamená, že odrazený zväok lúčov nie je rovnobežný, ale rozbiehavý. V programe Autodesk Inventor 2024 bol grafickou metódou urobený prepočet, z ktorého vyplýva, že oblasť s maximom intenzity má na dĺžku približne 125 mm. Následne bola vykonaná kontrola rovnomernosti osvetlenia pomocou luxmetru.



Obr. 3.7 - Maximálna, stredná a minimálna poloha tienidla



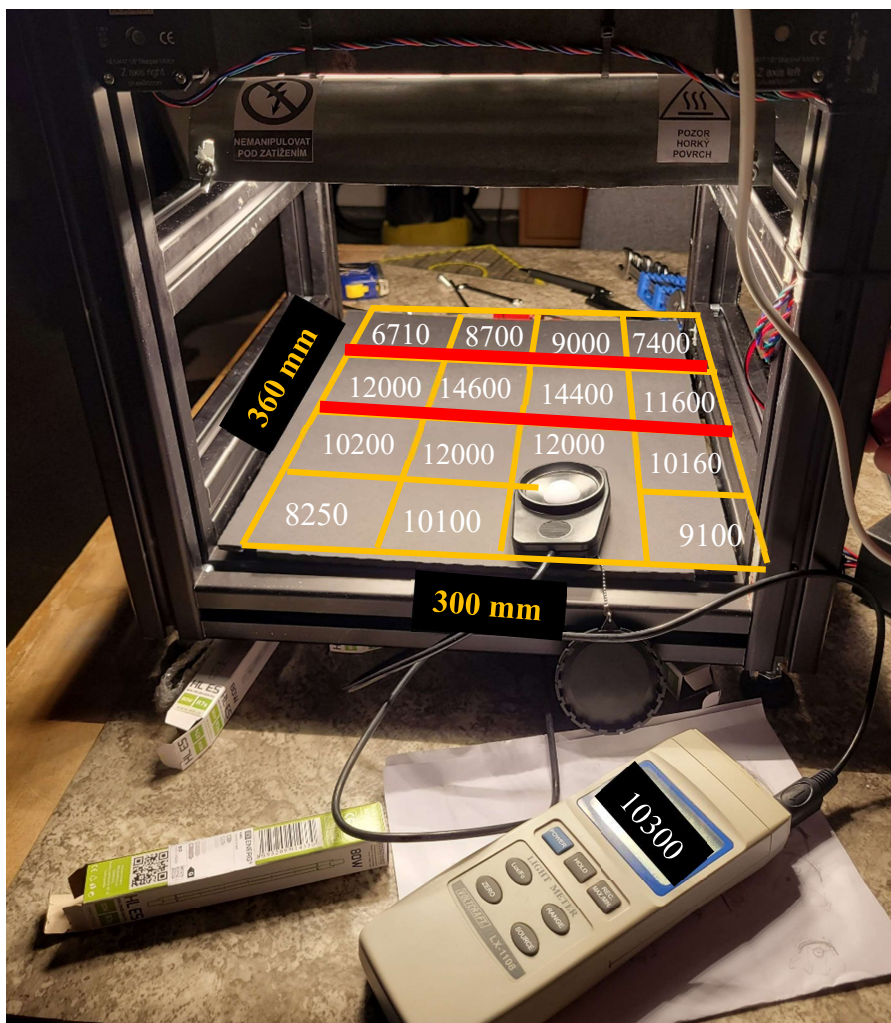
Obr. 3.8 - Kontrolný prepočet pre tiendilo v najnižšej polohe



Obr. 3.9 - Oblasť s maximom intenzity sa nachádza pod osou objektívu kamery a má rozmer približne 125 mm

Obr. 3.9 ukazuje, že najväčšia intenzita je v páse pod osou obej kamery (vyznačený červenou). Hodnota intenzity osvetlenia je vyššia v strede podložky v porovnaní s okrajmi, čo sa dalo očakávať, nakoľko sú použité dve halogenové žiarovky v jednom rade a ich svetelný kužeľ sa rozbieha do všetkých strán. Tento efekt by bolo možné zmierniť použitím tienidiel po bokoch konštrukcie.

Pri dlhšom pozorovaní sa zistilo, že kombinovaný výkon žiaroviek 275W spôsobil deformáciu podložky. Po vychladnutí podložka nadobudla pôvodný tvar.



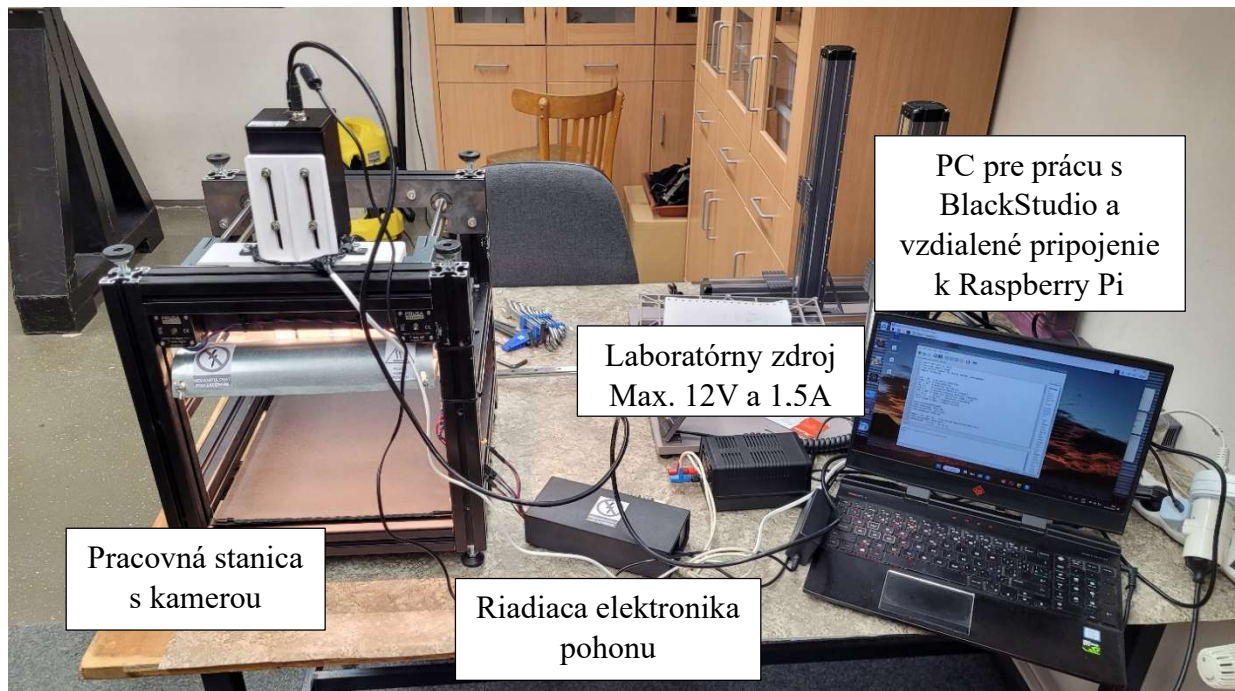
Obr. 3.10 - Kontrola rovnomernosti osvetlenia podložky pomocou luxmetru. Hodnoty na obrázku sú v jednotkách lx.

4. Praktická aplikácia a vyhodnotenie získaných dát

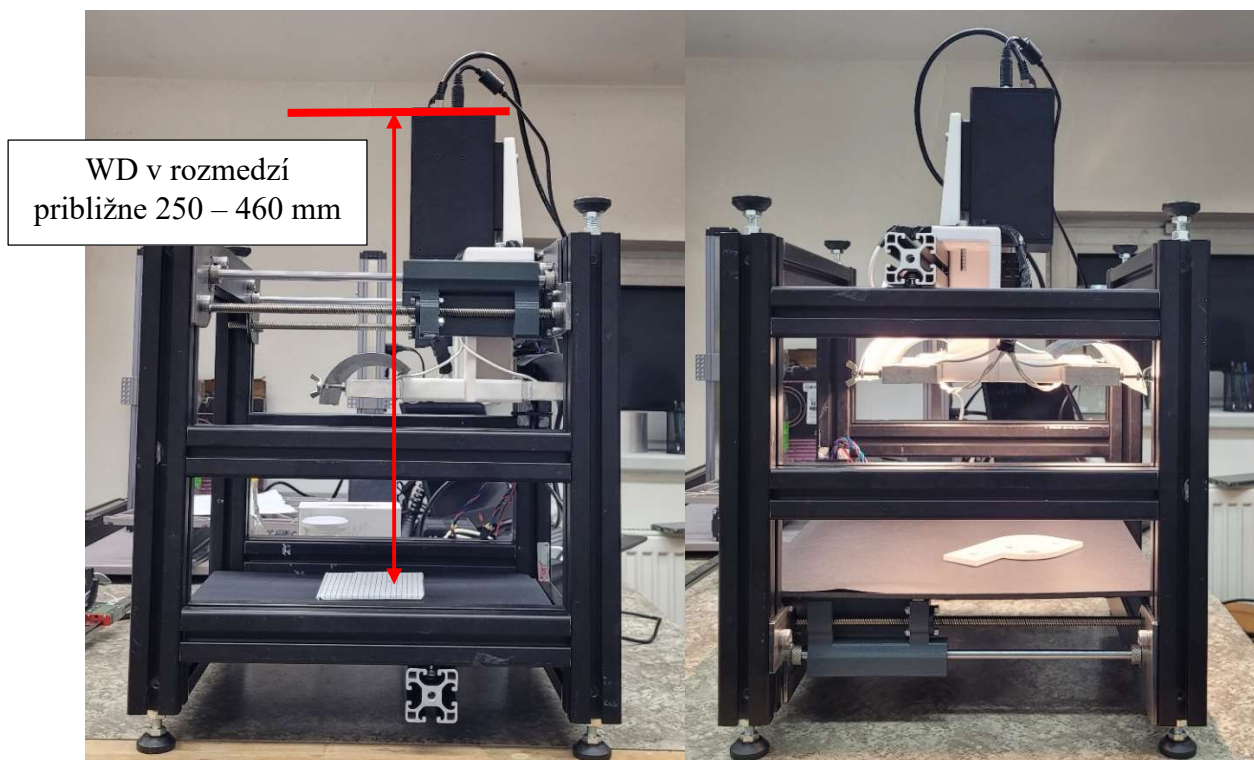
4.1. Testovanie v reálnych podmienkach

Prvé testy ukazujú, že stanica dokáže spoľahlivo zachytávať a spracovávať hyperspektrálne dáta. K práci je potrebné použiť zdroj striedavého napätia 230V AC pre napájanie kamery, osvetlenia, laboratórneho zdroja a počítaču. Riadiaca elektronika pohonu je napájaná z laboratórneho zdroja, ktorý pomocou transformátora poskytuje jednosmerný

prúd v maximálnom rozsahu 0- 1,5A a napätí 3-12V. Pre pohon motorov je potrebné minimálne napätie 8V DC. Raspberry Pi je pripojené k samostatnému zdroju s napätím 5V DC a max. prúdom 3A.

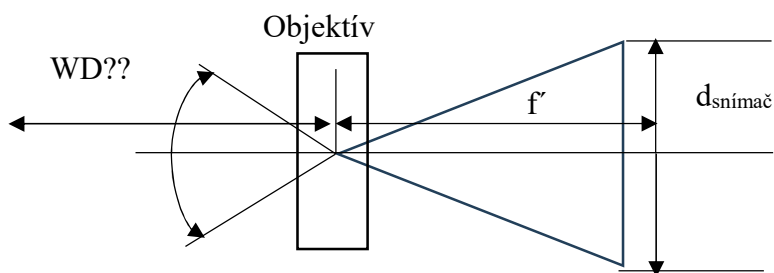


Obr. 4.1 - Pozorovacia sústava v praxi



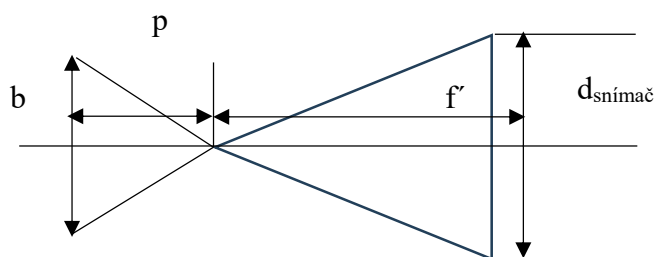
Obr. 4.2 - Kamera sa hýbe a podložka stojí (vľavo), kamera stojí a podložka sa hýbe (vpravo)

Problém nastal s určením pracovnej vzdialenosti. Z technických špecifikácii je možné učiť veľkosť senzoru a obrazovú ohniskovú vzdialenosť objektívu, ale pri skutočných šošovkách a objektívoch je náročné určiť polohu hlavnej optickej roviny.



Obr. 4.3 - Schéma skutočnej sústavy

Namiesto toho bola vytvorená náhradná sústava. Za pracovnú vzdialenosť (WD) bola dosadená vzdialenosť objektu od zadnej strany kamery viz obrázok 4.3. Následne sa vytvoril kontrolný snímok pravítka a odčítala sa hodnota zorného poľa b pre aktuálne WD. Parameter pre výpočet rýchlosti p náhradnej sústavy bol určený pomocou rovnice 4.1. Následne sa zistilo, že hlavná optická rovina leží 174,27 mm od zadnej steny kamery.



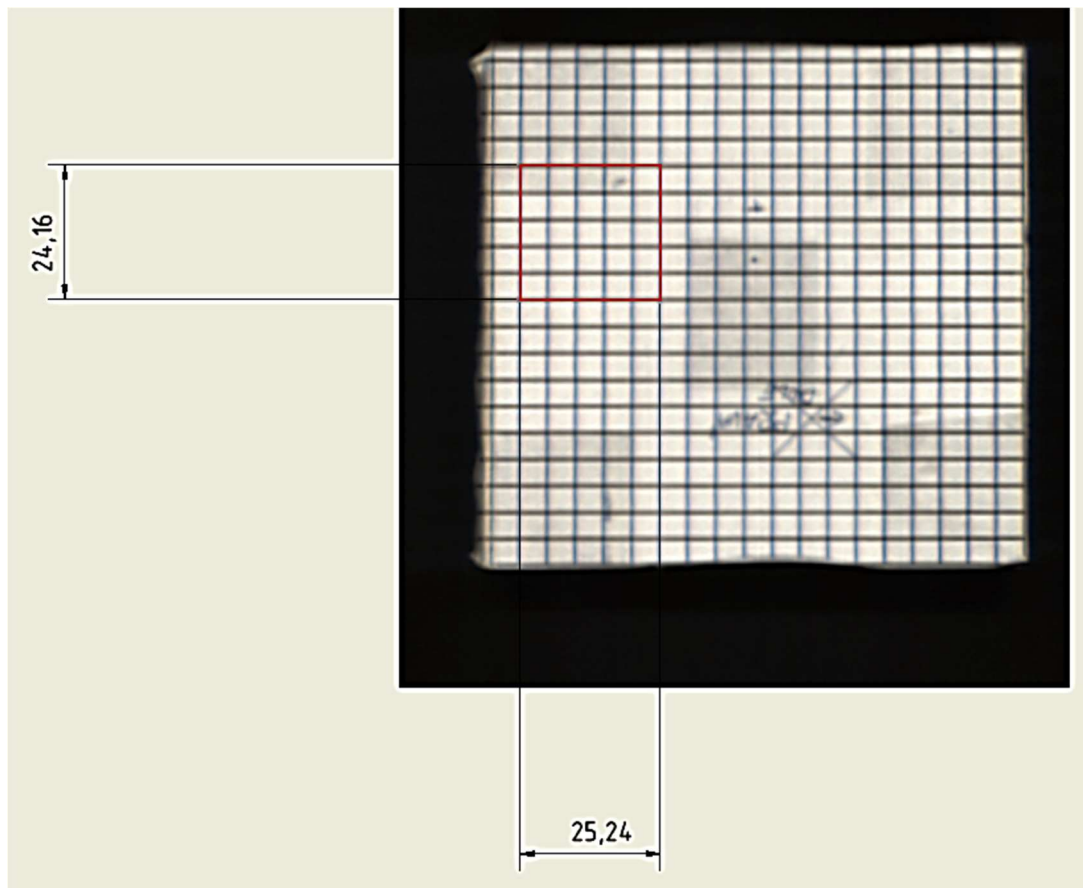
Obr. 4.4 - Schéma náhradnej sústavy

$$p = \frac{f' \cdot b}{d_{snímač}} \quad (4.1)$$

Nová rovnica pre výpočet rýchlosti vyzerá nasledovne:

$$t_{delay} = \frac{a \cdot f'}{FPS \cdot (WD - 174,27) \cdot PIX \cdot k \cdot SPR} [s] \quad (4.2)$$

Na kontrolu správnej rýchlosti posuvu bol použitý kaliber v podobe štvorčekového papiera so stranou najmenšieho štvorčeka $a = 5$ mm. Po oskenovaní snímku a následnom premeraní v programe Autodesk Inventor bol zaznamenaný rozdiel vo výške a dĺžke, ktorý predstavuje relatívnu chybu približne 4,3%. Do chyby je premietnutých viacero faktorov vrátane zaostrenia objektívu alebo softvérového spracovania obrázku v programe Inventor. Požadovaná presnosť je však na potreby merania dostatočná.



Obr. 4.5 - Kontrola nastavenia rýchlosti pomocou porovnania pomeru strán štvorčekového papiera

Pri ďalších testoch sa zistilo, že krokový motor začína preskakovať už pri rýchlosti 33 mm/s, čo je menej ako rýchlosť vypočítaná v návrhovej časti. Preskakovanie je spôsobené použitím polovičného kroku (mikrokrokovanie “HALF STEP”) ktoré znížilo krútiaci moment na 71% nominálnej hodnoty. Ďalší faktor je použitie zdroja s maximálnym výstupným prúdom 1,5A, čo nie je dostatočné na pohon oboch krokových motorov (1A/fáza pre jeden motor), a tým došlo k ďalšiemu zníženiu momentu (pri predpoklade lineárnej závislosti momentu na prúde sa týmto problémom znížil nominálny krútiaci moment na 75% nominálnej hodnoty). Celkovo tak maximálny krútiaci moment klesol na 53% nominálnej hodnoty.

Po odstávaní týchto problémov sa zistilo, že motor je výrobcom predimenzovaný a reálne zvládne až 1500 PPS z nulových otáčok bez preskočenia. Nakoľko pri týchto podmienkach zvládne pracovať len jeden motor (dostupný bol jedine zdroj s maximálnym výstupom 1,5A, ktorý zvládne napájať na plný výkon len jeden motor) a pri použití plného kroku sú hluk a vibrácie veľmi rušivé, finálne rozhodnutie bolo obmedziť maximálnu rýchlosť posuvu na 30 mm/s z nulových otáčok a 38 mm/s so softstartom.

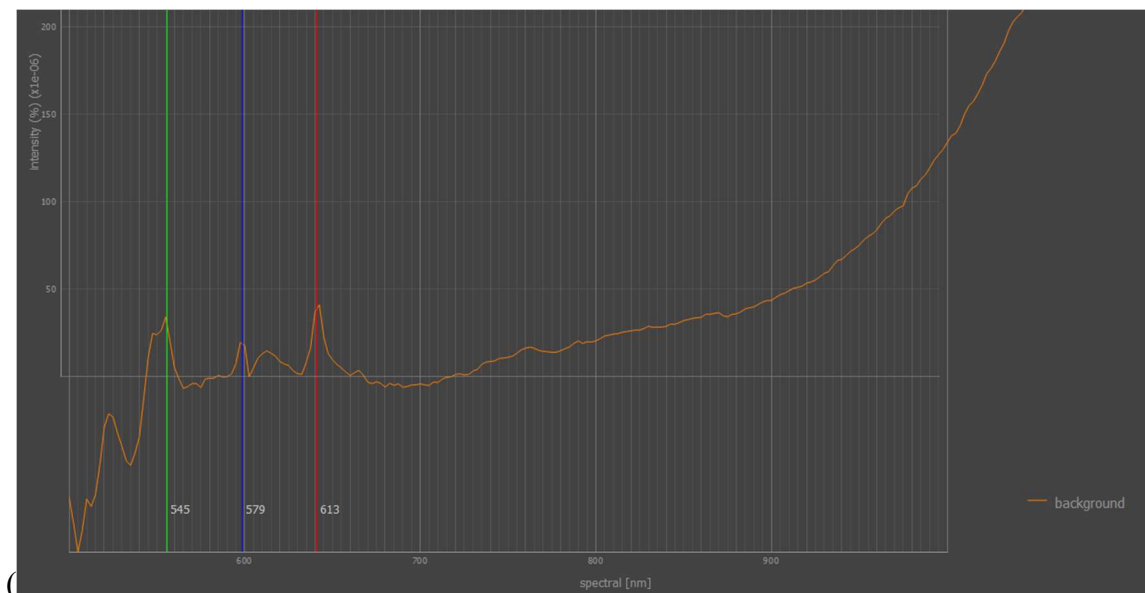
Benefitom použitia polovičného kroku je zisk väčšej presnosti polohovania. Po započítaní úbytku krútiaceho momentu od zdroja, mikrokrokovania a účinnosti závitovej dvojice (pasívne odpory) vyplynie vzťah:

$$M_{red} = M_k \cdot \eta \cdot K_1 \cdot K_2 = 261,7 \cdot 0,524 \cdot 0,75 \cdot 0,707 = 72,71 \text{ Nmm} \quad (4.3)$$

Na prekonanie momentu záťaže v zvislej polohe je potrebných 15,88 Nmm a na prekonanie záberného momentu ďalších 20 Nmm, čo je v súčte stále menej ako M_{red} , s dostatočnou rezervou pre pasívne odpory v lineárnych guľíkových ložiskách. Pri použití $\frac{1}{4}$ kroku by už bola hodnota M_{red} 39 Nmm, kde už nie je možné s istotou povedať že krútiaci moment bude dostatočný na prekonanie všetkých odporov.

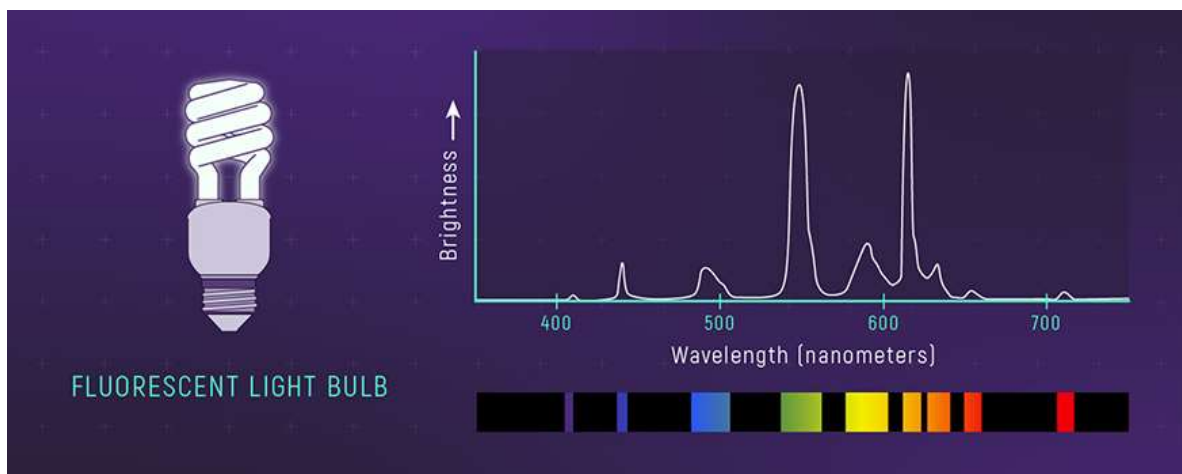
Výsledná presnosť polohovania Δx sa týmto zlepšila na hodnotu $0,02 \pm 0,02$ mm. Pri minimálnom zväčšení sústavy ($\beta = 8,75$) predstavuje obraz jedného pixelu (skutočná veľkosť $PIX = 0,004$ mm) veľkosť 0,035 mm, takže presnosť polohovania systému približne odpovedá hodnote jedného riadku pixelov premietnutých na podložku.

Ďalším testom bol záznam spektrálnej čiary získaný z čiernej podložky.

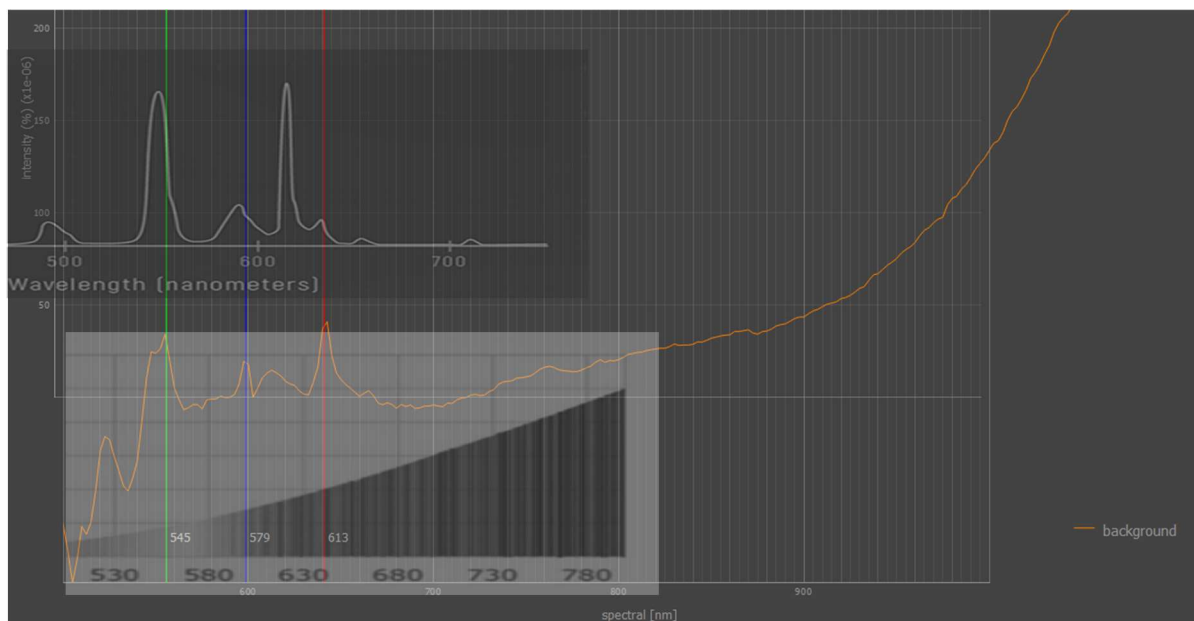


Obr. 4.6 - Spektrálna čiara z podložky

Pri zázname spektra podložky boli podľa očakávania objavené dva trendy. V rozsahu 500 až 650 nm dominuje spektrálna čiara fluorescenčnej žiarivky, ktorá je použitá na osvetlenie miestnosti. Od 650 nm vyššie prevláda spektrálna čiara halogénovej žiarovky, ktorá je použitá na osvetlenie vzorkov v pracovnej stanici (viz. tab. 2.5.).



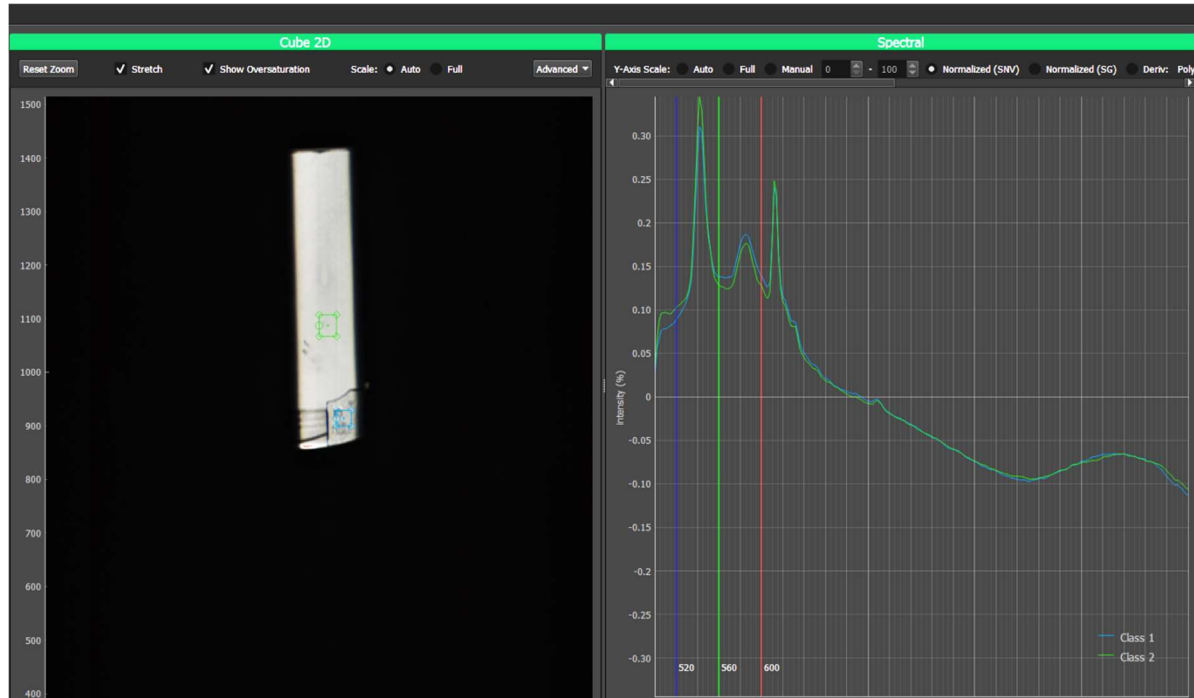
Obr. 4.7 - Spektrum fluorescenčnej žiarivky [81]



Obr. 4.8 - Porovnanie spektrálnych čiar fluorescenčnej žiarovky, halogénovej žiarovky (tab. 2.5) a získaného spektra z prístroja

4.2. Ukážkové snímky

Ako prvý testovaný objekt bol použitý zapaľovač, o ktorom bolo známe, že jeho vrchná časť je z kovu a spodná z plastu. Pri tomto snímku však nebolo možné rozlíšiť tieto dva materiály, nakoľko na ich povrch bola aplikovaná farba.



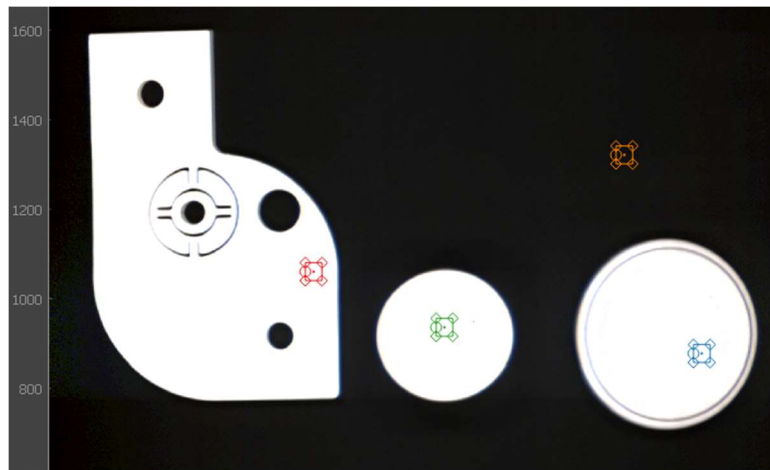
Obr. 4.9 - Snímka zapaľovača

V blízkej infračervenej oblasti je možné snímať napríklad živé objekty, kde je následne možné pozorovať cievy. Hemoglobín, ktorý sa nachádza v krvi, má špecifické absorpčné vlastnosti. Infračervené svetlo je menej absorbované hemoglobínom ako viditeľné svetlo. To znamená, že krvné cievy absorbujú menej infračerveného svetla a viac ho odrážajú alebo prechádzajú, čím sa zvýrazňuje kontrast medzi cievami a okolitým tkanivom.

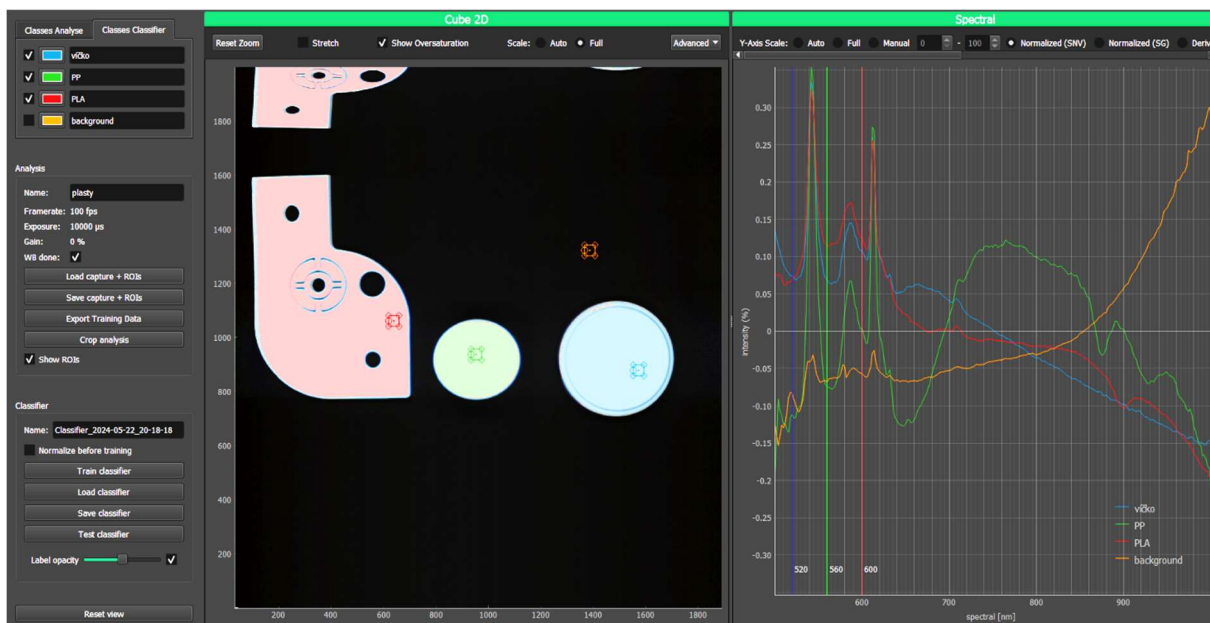


Obr. 4.10 - Snímka ruky v rozsahu vlnových dĺžok 750-1000 nm (blízka infračervená oblasť)

Asi najbežnejšou oblasťou použitia hyperpektrálnych kamier v priemysle je triedenie plastov. Každý plast odráža a pohlcuje svetlo inak preto je možné ich rozlíšiť s vysokou presnosťou.



Obr. 4.11 - Snímka dvoch rôznych druhov plastov a kovového viečka (materiály zľava: PLA, PP, oceľ nafarbená nabiele)

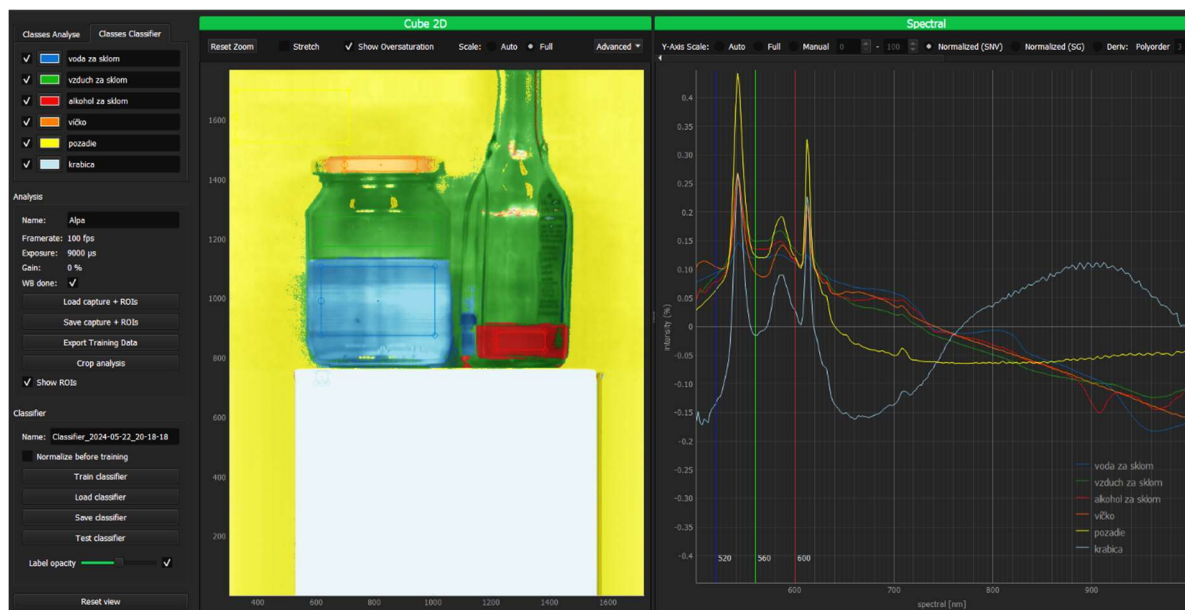


Obr. 4.12 - Klasifikácia materiálov v programe BlackStudio

Ďalšou možnosťou ako využiť hyperspektrálne snímky je rozoznávajúce rôznych druhov kvapalín, a to skrz nádobu (za predpokladu, že nádoba je v oboch prípadoch z rovnakého materiálu). Na obrázku 4.14 je vidno, že klasifikátor nedosahuje 100% presnosť. Nepresnosti v klasifikácii môžu byť spôsobené napríklad odleskami od leských materiálov.



Obr. 4.13 - Snímka sklenených nádob. Nádoba s vodou (vľavo), nádoba so 60% alkoholom (vpravo)



Obr. 4.14 - Klasifikácia v programe BlackStudio

Záver

Táto práca sa venovala metódam hyperspektrálneho zobrazovania a ich využitiu v praxi. Prvú časť predstavuje rešerš, ktorá bola zameraná na objasnenie princípov hyperspektrálnych kamier, metódam získavania hyperspektrálnych dát a ich následné spracovanie. Rešerš taktiež zahŕňa úvod do histórie vývoja hyperspektrálneho zobrazovania a jeho aplikácie v praxi. Záver rešerše sumarizuje výhody a nevýhody použitia hyperspektrálnych kamier oproti iným zobrazovacím technikám a približuje možný budúci vývoj tejto technológie.

V návrhovej časti bola predstavená hyperspektrálna kamera HAIP BlackIndustry VNIR v2. Návrhová časť ďalej popisuje prácu s kamerou, jej obslužným softvérom a pilotné meranie. Kamera sníma dáta na princípe skenovacej techniky push-broom, takže k nej bolo potrebné navrhnuť pracovnú stanicu. Táto časť ďalej popisuje návrh konštrukcie, pohonu, elektroniky, osvetlenia a obslužného softvéru.

V praktickej časti bol popísaný výrobný postup jednotlivých častí. Táto časť popisuje výrobu 3D tlačených dielov, osadzovanie THT komponentov na dosku plošných spojov, montáž a test osvetlenia. Test osvetlenia ukázal, že podložka pod kamerou sa teplotným namáhaním deformuje a nemôže byť vystavená plnému výkonu dlhšiu dobu. Pomocou luxmetru bola zmeraná intenzita osvetlenia v jednotlivých častiach podložky. Najvyššia intenzita bola nameraná pod optickou osou objektívu kamery a dosahuje hodnoty 14 600 lx.

V záverečnej časti bola otestovaná funkčnosť pracovnej stanice. Testovala sa presnosť riadenia rýchlosti, kde sa ukázalo, že pohon v aktuálnom nastavení nedokáže vyvinúť navrhovanú maximálnu rýchlosť. Je to spôsobené poklesom krútiaceho momentu v dôsledku mikrokrokovania a použitiu zdroja s nedostatočným výkonom. Na použitie v režime 1 (rozsah 500-1000 nm) to však nemá vplyv, pretože snímkovacia frekvencia kamery je maximálne 114 fps, čo pri maximálnej pracovnej vzdialenosti 470 mm predstavuje rýchlosť len 17,5 mm/s, čo je stále menej ako obmedzená maximálna rýchlosť pohonu (38 mm/s). Pri iných režimoch

s vyššou snímkovacou frekvenciou je nutné používať softvérovú funkciu „stretch“, ktorá pomer strán vyrovná. Ďalej bol vykonaný test presnosti nastavenia rýchlosti pomocou kalibru, ktorým bol štvorčekový papier so stranou najmenšieho štvorčeku 5 mm. Test ukázal že nepresnosť v pomere strán je len 4,3% a do tohto čísla spadajú aj ďalšie zdroje nepresností.

Druhá podkapitola záverečnej časti ukazuje sériu hyperspektrálnych obrázkov a ich následné spracovanie v programe Blackstudio. Zabudovaný klasifikátor v programe dokázal rozlíšiť rôzne vzorky materiálu s vysokou presnosťou, až na zapalovač, pri ktorom nebolo možné identifikovať materiál v dôsledku použitia krycej farby.

Odporúčania do budúcnosti zahŕňajú použitie výkonnejšieho zdroja, aby sa zvýšila maximálna rýchlosť posuvu, použitie iného materiálu podložky s lepšou tepelnou odolnosťou a prepracovanejší dizajn reflektorov, aby bola intenzita osvetlenia na šírku viac rovnomerná. Kvalitu dát by zvýšilo aj odtienenie kamery pre svetlom z miestnosti, pretože špičky fluorescenčnej žiarivky sú výrazné a môžu skresliť iné spektrálne čiary. Medzi ďalšie návrhy na zlepšenie patrí napríklad zvýšenie pracovného rozsahu posuvu, ktorý je momentálne 152 mm. Toto zlepšenie by si už ale vyžadovalo rozsiahlejšie úpravy návrhu a použitie iných komponentov pre lineárne vedenie.

Celkovo pracovná stanica spĺňa všetky potreby pre skenovanie menších predmetov do rozmerov (š x d) 300 x 150 mm vo vertikálnej aj horizontálnej polohe a využitie nájde v laboratórnom prostredí, kde pomôže s ďalším výskumom v oblasti hyperspektrálneho zobrazovania. Čas vytvorenia jedného snímku je približne 9 sekúnd. Stanicu je možné používať v troch polohách a to: podložka stojí a kamera jazdí horizontálne, podložka stojí a kamera jazdí vertikálne, kamera stojí a podložka jazdí horizontálne.

Zoznam použitej literatúry a zdrojov

- [1] SCHNEIDER, Armin a Hubertus FEUSSNER. *Biomedical engineering in gastrointestinal surgery*. London: Elsevier/Academic Press, 2017. ISBN isbn978-0-12-803230-5.
- [2] GOETZ, Alexander F.H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2009, **113**, 5-16 [cit. 2024-01-05]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2007.12.014
- [3] USGS. 1974 - Landsat 1 and 2 Overview. In: USGS. *USGS* [online]. 1974 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/media/images/1974-landsat-1-and-2-overview>
- [4] Elektromagnetické spektrum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2007, 2023 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_spektrum
- [5] FISCHER, Jan. *Optoelektronické senzory a videometrie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02525-X.
- [6] SMITH, Randall B. *Introduction to Hyperspectral Imaging* [online]. 1. MicroImages, Inc., 2012 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyrspec.pdf>
- [7] BORENGASSER, Marcus, William HUNGATE a Russell WATKINS. *Hyperspectral Remote Sensing* [online]. CRC Press, 2007 [cit. 2024-01-05]. ISBN 9781420012606. Dostupné z: doi:10.1201/9781420012606
- [8] MEERDINK, Susan, Simon HOOK, Dar ROBERTS a Elsa ABBOTT. The ECOSTRESS spectral library version 1.0. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2019, **230** [cit. 2024-01-05]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2019.05.015
- [9] ATA SCIENTIFIC INSTRUMENTS. SPECTROMETRY AND SPECTROSCOPY: WHAT'S THE DIFFERENCE?. In: ATA SCIENTIFIC INSTRUMENTS. *Www.atascientific.com.au* [online]. 2020 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>
- [10] WAVELENGTH OPTOELECTRONIC. What is a Spectrometer? UV, VIS and IR Spectrometer Explained. In: XUAN, Ng Ci. WAVELENGTH OPTOELECTRONIC. *Wavelength Optoelectronic* [online]. 2020 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://wavelength-oe.com/sk/articles/what-is-a-spectrometer/>
- [11] NĚMCOVÁ, Šárka. *Moodle podklady k předmětu Konstrukce optomechanických přístrojů*. 1.

- [12] Prism (optics). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_(optics))
- [13] Snellův zákon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Snellův_zákon
- [14] Sellmeier equation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sellmeier_equation
- [15] Grism. In: *Wikipedia* [online]. 2005 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Grism>
- [16] LU, Guolan a Baowei FEI. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 2014, **19**(1) [cit. 2024-01-05]. ISSN 1083-3668. Dostupné z: doi:10.1117/1.JBO.19.1.010901
- [17] What is Grism?. In: *Clear Physics* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: https://clear.physics.tamu.edu/research/html_codes/why_grism.html
- [18] BANNON, David, Taixia WU, Lifu ZHANG, Yi CEN, Jinnian WANG a Qingxi TONG. *Light weight airborne imaging spectrometer remote sensing system for mineral exploration in China* [online]. In: . s. 910406- [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2053098
- [19] HAGEN, Nathan a Michael KUDENOV. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering* [online]. 2013, **52**(9) [cit. 2024-01-05]. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.OE.52.9.090901
- [20] RAVIKANTH, Lankapalli, Digvir JAYAS, Noel WHITE, Paul FIELDS a 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, **10**(1), 1-33 [cit. 2024-01-05]. ISSN 1935-5130. Dostupné z: doi:10.1007/s11947-016-1817-8
- [21] MAHESH, S., D.S. JAYAS, J. PALIWAL a N.D.G. WHITE. Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *Journal of Stored Products Research* [online]. 2015, **61**, 17-26 [cit. 2024-01-05]. ISSN 0022474X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jspr.2015.01.006
- [22] SPECIM. Products. In: SPECIM. *Specim.com* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.specim.com/products/>
- [23] RESONON. Objective Lenses. In: RESONON. <https://Resonon.com> [online]. 2020 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://resonon.com/objective-lenses>

- [24] SPECIM. Hyperspectral lenses. In: *Specim.com* [online]. 2017 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: https://www.specim.fi/downloads/Hyperspectral_fore_lensesver1-15.pdf.
- [25] FLIR. Selecting a Lens for your Camera. In: FLIR. *Flir.com* [online]. 2017 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.flir.com/support-center/iis/machine-vision/application-note/selecting-a-lens-for-your-camera/>
- [26] EDMUND OPTICS. Lens Mounts. In: EDMUND OPTICS. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/lens-mounts/>
- [27] C-mount vs. CS-mount: Everything you should know about these lens types. In: *E-consystems* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: <https://www.e-consystems.com/blog/camera/technology/c-mount-vs-cs-mount-everything-you-should-know-about-these-lens-types/>
- [28] IFOV (INSTANTANEOUS FIELD OF VIEW). In: *Ssec.wisc.edu* [online]. [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.ssec.wisc.edu/sose/tutor/ifov/define.html>
- [29] PENCHEVA, T., D. PULOV, B. GYOCH a M. NENKOV. Design of CCD Optical System for Thermal IR Spectral Region. In: *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. IEEE, 2006, s. 173-178 [cit. 2024-01-05]. ISBN 1-4244-0550-5. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2006.365380
- [30] Frame rate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2005 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Frame_rate
- [31] NAKAMURA, Junichi. *Image sensors and signal processing for digital still cameras*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. ISBN 978-0-8493-3545-7.
- [32] KAMRUZZAMAN, M. a D.-W. SUN. Introduction to Hyperspectral Imaging Technology. In: *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation* [online]. Elsevier, 2016, s. 111-139 [cit. 2024-01-05]. ISBN 9780128022320. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-802232-0.00005-0
- [33] *Design of a turbulent flow facility and development of an algorithm for PIV*. 2018, 83.
- [34] WU, Di a Da-Wen SUN. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review — Part I. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. 2013, **19**, 1-14 [cit. 2024-01-05]. ISSN 14668564. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifset.2013.04.014
- [35] ADÃO, Telmo, Jonáš HRUŠKA, Luís PÁDUA, José BESSA, Emanuel PERES, Raul MORAIS a Joaquim SOUSA. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote*

- Sensing* [online]. 2017, **9**(11) [cit. 2024-01-05]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9111110
- [36] PRECISION HAWK. Sensors 101: The Basics of LiDAR, Thermal, Hyperspectral, and Multispectral Technology. In: PRECISION HAWK. *Precisionhawk.com* [online]. 2018 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.precisionhawk.com/blog/media/topic/sensors-101-basics-lidar-thermal-hyperspectral-multispectral-technology>
- [37] FLIR. Comparing Sensitivity of Thermal Imaging Camera Modules. In: FLIR. *Flir.eu* [online]. 2022 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.flir.eu/discover/cores-components/Comparing-Sensitivity-of-Thermal-Imaging-Cameras-Modules/>
- [38] KHAN, Muhammad, Hamid KHAN, Adeel YOUSAF, Khurram KHURSHID a Asad ABBAS. Modern Trends in Hyperspectral Image Analysis: A Review. *IEEE Access* [online]. 2018, **6**, 14118-14129 [cit. 2024-01-06]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2812999
- [39] LI, Qingli, Xiaofu HE, Yiting WANG, Hongying LIU, Dongrong XU a Fangmin GUO. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: achievements and challenges. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 2013, **18**(10) [cit. 2024-01-06]. ISSN 1083-3668. Dostupné z: doi:10.1117/1.JBO.18.10.100901
- [40] COLTOF, Gideon. *Hyperspectral Techniques Explained*. 1.
- [41] WANG, Yu, Nicholas REDER, Soyoung KANG, Adam GLASER a Jonathan LIU. Multiplexed Optical Imaging of Tumor-Directed Nanoparticles: A Review of Imaging Systems and Approaches. *Nanotheranostics* [online]. 2017, **1**(4), 369-388 [cit. 2024-01-06]. ISSN 2206-7418. Dostupné z: doi:10.7150/ntno.21136
- [42] ELMASRY, Gamal a Da-Wen SUN. Principles of Hyperspectral Imaging Technology. In: *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control* [online]. Elsevier, 2010, s. 3-43 [cit. 2024-01-06]. ISBN 9780123747532. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-374753-2.10001-2
- [43] Pushbroom vs. whiskbroom. In: *MDPI* [online]. 2023 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/3/595>
- [44] TROVATELLO, Chiara, Armando GENCO, Cristina CRUCIANO et al. Hyperspectral microscopy of two-dimensional semiconductors. *Optical Materials: X* [online]. 2022, **14** [cit. 2024-01-06]. ISSN 25901478. Dostupné z: doi:10.1016/j.omx.2022.100145
- [45] TSOULIAS, Nikos, Ming ZHAO, Dimitrios PARAFOROS a Dimitrios ARGYROPOULOS. Hyper- and Multi-spectral Imaging Technologies. In: ZHANG, Qin, ed., Qin ZHANG. *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2022, s. 1-11 [cit. 2024-01-06]. ISBN 978-3-030-89123-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-89123-7_65-1

- [46] Imec SNAPSHOT UAV VIS+NIR. In: *Imechyperspectral* [online]. [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.imechyperspectral.com/en/cameras/snapshot-uav-vis-nir>
- [47] BIOUCAS-DIAS, Jose, Antonio PLAZA, Gustavo CAMPS-VALLS, Paul SCHEUNDERS, Nasser NASRABADI a Jocelyn CHANUSSOT. Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* [online]. 2013, **1**(2), 6-36 [cit. 2024-01-06]. ISSN 2168-6831. Dostupné z: doi:10.1109/MGRS.2013.2244672
- [48] LEFEI ZHANG, , LIANGPEI ZHANG, DACHENG TAO, XIN HUANG a BO DU. Hyperspectral Remote Sensing Image Subpixel Target Detection Based on Supervised Metric Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2014, **52**(8), 4955-4965 [cit. 2024-01-06]. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2013.2286195
- [49] RAJABI, Roozbeh a Hassan GHASSEMIAN. Sparsity Constrained Graph Regularized NMF for Spectral Unmixing of Hyperspectral Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* [online]. 2015, **43**(2), 269-278 [cit. 2024-01-06]. ISSN 0255-660X. Dostupné z: doi:10.1007/s12524-014-0408-2
- [50] HALOUNOVÁ, Lena. *Dálkový průzkum Země*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN isbn80-01-03124-1.
- [51] MALENOVSKÝ, Zbyněk. *Quantitative remote sensing of Norway spruce (Picea abies(L.) Karst.): spectroscopy from needles to crowns to canopies*. Wageningen, 2006. Dizertace. Wageningen University.
- [52] Hyperspectral imaging for agriculture. In: *Imechyperspectral* [online]. [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.imechyperspectral.com/en/applications/hyperspectral-imaging-agriculture>
- [53] Headwall hyperspectral imagers delineate cancer tumor margins for surgery. In: *Laserfocusworld* [online]. 2016 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16558650/headwall-hyperspectral-imagers-delineate-cancer-tumor-margins-for-surgery>
- [54] ZHENG, Yan, Jiarui BAI, Jingna XU, Xiayang LI a Yimin ZHANG. A discrimination model in waste plastics sorting using NIR hyperspectral imaging system. *Waste Management* [online]. 2018, **72**, 87-98 [cit. 2024-01-06]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2017.10.015
- [55] ULRICI, A., S. SERRANTI, C. FERRARI, D. CESARE, G. FOCA a G. BONIFAZI. Efficient chemometric strategies for PET–PLA discrimination in recycling plants using hyperspectral imaging. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* [online]. 2013, **122**, 31-39 [cit. 2024-01-06]. ISSN 01697439. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemolab.2013.01.001
- [56] TATZER, Petra, Markus WOLF a Thomas PANNER. Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range. *Real-Time Imaging*

- [online]. 2005, **11**(2), 99-107 [cit. 2024-01-06]. ISSN 10772014. Dostupné z: doi:10.1016/j.rti.2005.04.003
- [57] Hyperspectral Imaging: Making the Invisible Visible. In: *Radiantvisionsystems* [online]. 2022 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.radiantvisionsystems.com/blog/hyperspectral-imaging-making-invisible-visible>
- [58] The Use of Hyperspectral Imaging in the Food and Beverage Sector. In: *Cappa* [online]. 2020 [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.cappa.ie/the-use-of-hyperspectral-imaging-in-the-food-and-beverage-sector/>
- [59] HYPERSPECTRAL IMAGING FOR OIL AND MINERAL EXPLORATION. In: *SPECIM* [online]. [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.specim.com/hyperspectral-imaging-applications/oil-and-mineral-exploration/>
- [60] THIN FILM THICKNESS INSPECTION BY HYPERSPECTRAL IMAGING. In: *SPECIM* [online]. [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.specim.com/hyperspectral-imaging-applications/thin-film-thickness-inspection-by-hyperspectral-imaging/>
- [61] HENRIKSEN, Martin, William PEDERSEN, Pernille KLARSKOV a Mogens HINGE. One step calibration of industrial hyperspectral cameras. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* [online]. 2022, **227** [cit. 2024-01-07]. ISSN 01697439. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemolab.2022.104609
- [62] SPECIM, SPECTRAL IMAGING LTD. Illumination sources. In: SPECIM, SPECTRAL IMAGING LTD. *SPECTRAL IMAGING MADE EASY* [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.specim.com/illumination-sources/>
- [63] Spectra Luminaires – synchronize the light spectrum of the luminaires with the spectrum of sunlight. In: *Ledluks* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: <https://www.ledluks.com/spectra-luminaires-synchronize-the-light-spectrum-of-the-luminaires-with-the-spectrum-of-sunlight/>
- [64] MANGALRAJ, P. a Byoung-Kwan CHO. Recent trends and advances in hyperspectral imaging techniques to estimate solar induced fluorescence for plant phenotyping. *Ecological Indicators* [online]. 2022, **137** [cit. 2024-01-07]. ISSN 1470160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2022.108721
- [65] Hyperspectral imaging. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008-2023 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging
- [66] CHURCH, Gemma. The future of hyperspectral imaging. In: *Electrooptics* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.electrooptics.com/viewpoint/future-hyperspectral-imaging>

- [67] *BLACKINDUSTRY VNIR V2 Camera - Product datasheet* [pdf]. 1. 2023.
- [68] KALKAN, Habil, Ahmet BILGI, Kadim TASDEMIR, Gizem ORTAç a Efkan DURMUS. *A HYPERSPECTRAL IMAGING SYSTEM FOR DETECTION OF DRIED FIGS WITH BLACK MOLD* [online]. In: . s. 4 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283508750_A_HYPERSPECTRAL_IMAGING_SYSTEM_FOR_DETECTION_OF_DRIED_FIGS_WITH_BLACK_MOLD#full-text
- [69] Airborne System Hyperspectral Remote Sensing. In: *Resonon - Hyperspectral Imaging Solutions* [online]. 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://resonon.com/hyperspectral-airborne-remote-sensing-system>
- [70] LabScanner 40 x 20. In: *SPECIM* [online]. 2023 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.specim.com/products/labscanner-40x20/#>
- [71] VSK-PROFILY. Hliníkový profil IM 40-8, 40x40, lehký. In: *VSK-PROFILY* [online]. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vsk-profil.cz/hlinikovy-profil-im-40-8-40x40-lehky/>
- [72] LDO MOTORS CO., LTD. *NEMA 17 datasheet*.
- [73] LIN ENGINEERING. Load Calculations And Tips For Using Stepper Motors. In: LIN ENGINEERING. *LIN ENGINEERING* [online]. 2020 [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.linengineering.com/news/load-calculations-and-tips-for-using-stepper-motors>
- [74] MAV. DORMER - technická příručka. In: MAV. *MAV* [online]. 2013 [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: https://www.mav.cz/dormer/Technicka_prirucka_2013.pdf
- [75] LASKAKIT. Lineární kuličkové ložisko LM8UU. In: LASKAKIT. *LaskaKit* [online]. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/linearni-kulickove-lozisko-lm8uu/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw9cCyBhBzEiwAJTUWNW_QE74r4ihW9tBY4qVq2W29Ou7Qvf8dbcnhZnbrBFIeLw4URYV_LhoC4fsQAvD_BwE
- [76] DRÁTEK. *RAMPS 1,4 DRV8825 driver pro krokové motory* [online]. In: DRÁTEK. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1025-ramps1.4-drv8825-driver-pro-krokove-motory.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA0bWvBhBjEiwAtEsoW5yVzqfClEp3ZADdzOneQALJ8n9oxncQn2g9xU6ayJhaddWY09GgjhOC1hwQAvD_BwE
- [77] COLLINS, Danielle. What is microstepping?. In: *Linear Motion Tips* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>
- [78] MICROMO. *Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities* [online]. 4 [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: https://www.rototron.info/wp-content/uploads/PiStepper_Microstepping_WP.pdf

- [79] ADVANCED CIRCUITS INC. PCB Trace Width Calculator. In: ADVANCED CIRCUITS INC. *4PCB* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>
- [80] B & B elektro s.r.o. In: *B & B elektro* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.bbelektro.cz/zarovka-halogenova-80w-230v-r7s-118mm-cira-svitivost-1380-lumen-usporna-nbb?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwh4-wBhB3EiwAeJsppJkAjW3dOy6lUG9WKHiuCVnsbPSDwbyCixipNLslfPkwm4PbjYmq2RoCv0QQAuD_BwE#
- [81] Spectrum of a Fluorescent Light Bulb vs. Spectrum of the Sun. In: *Webb Space Telescope* [online]. 2021 [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://webbtelescope.org/contents/media/images/01F8G7TT6ZPK2APENNVVEZ5DY8>

Zoznam obrázkov, rovníc, tabuliek a grafov

Zoznam obrázkov

Obr. 0.1 - Kontrola družicových snímok pomocou prenosného spektrometru (1972) [2]... 11	11
Obr. 0.2 - Družica Landsat I- [3]..... 11	11
Obr. 1.1- Elektromagnetické spektrum [2]..... 12	12
Obr. 1.2 - Všeobecná schéma spektrometru [11] 13	13
Obr. 1.3 - Rozklad bieleho svetla na mriežke a hranole [12] 15	15
Obr. 1.4 - lom lúča pri prechode z opticky redšieho do opticky hustejšieho prostredia [13] 15	15
Obr. 1.5 - Náčrt pre difrakciu na mriežke [11]..... 16	16
Obr. 1.6 - Princíp mriežkového hranola [17] 17	17
Obr. 1.7 – PGP, kombinácia hranol-mriežka-hranol [18] 17	17
Obr. 1.8 - rozličné druhy laditeľných filtrov (zľava filtračné koleso, LCTF, AOTF) [20].. 18	18
Obr. 1.9 - Schéma štyroch rôznych multispektrálnych rozdeľovačov lúčov (a) hranolový rozdeľovač lúča s tenkými vrstvami, (b) sekvencia dichroických zrkadiel, (c) hologramový optický rozdeľovač lúčov, (d) spektrálny náklonový rozdeľovač [19] 19	19
Obr. 1.10 - Princípy upevnenia jednotlivých objektívov [26]..... 20	20
Obr. 1.11 - Rozdiel medzi upevnením C mount a CS mount [27] 20	20
Obr. 1.12 - Zorné pole graficky 20	20
Obr. 1.13 - Okamžitý zorný uhol [29]..... 21	21
Obr. 1.14 - Princíp senzorov CMOS (vľavo) a CCD (vpravo) [33]..... 22	22
Obr. 1.15 - Rozdelenie skenovania na priestorové, spektrálne a snapshot [40]..... 25	25
Obr. 1.16 - Prehľad jednotlivých princípov skenovania [41]..... 25	25
Obr. 1.17 - porovnanie techník whiskbroom a pushbroom [43] 26	26
Obr. 1.18 - Porovnanie techník snapshot a staring [44] 28	28
Obr. 1.19- Kamera imec SNAPSHOT UAV NIR+SWIR [46]..... 29	29
Obr. 1.20- Ukážka spektrálneho miešania v jednom pixli [47]..... 29	29
Obr. 1.21- Plná šírka v polovici maxima (FWHM) [7] 30	30
Obr. 1.22- Full width at half maximum (FWHM) vs. spektrálne vzorkovanie [51] 31	31
Obr. 1.23- Hyperspektrálne letecké snímky testovacích polí s jahodami v Belgicku - s dovolením VITO a pcfuit. [52] 32	32
Obr. 1.24- Rakovinové tkanivo pozorované hyperspektrálnou kamerou [53] 33	33
Obr. 1.25– Klasifikácia plastov pomocou hyperspektrálneho zobrazovania [57]..... 33	33
Obr. 1.26 - Podiel tuku v kačacom mase [58] 34	34
Obr. 1.27 - Zloženie hornin zísakané zo satelitného snímku [59]..... 35	35
Obr. 1.28 - Princíp skenovania tenkých vrstiev [60]..... 36	36
Obr. 1.29 - výpočet hrúbky tenkej vrstvy [60] 37	37
Obr. 1.30 - vyhodnotenie povrchu 4 vzoriek [60] 37	37
Obr. 1.31- Schéma kľúčových krokov pri analýze hyperspektrálneho zobrazovania..... 38	38
Obr. 1.32 - Spektrálna čiara bežnej LED žiarovky v porovnaní so slnečným svetlom [63]... 42	42
Obr. 1.33 - Oblasti publikácii s témou hyperspektrálne zobrazovanie (Zľava: Poľnohospodárstvo, vedy o rastlinách, vedecké technológie, genetika a dedičnosť, environmentálne vedy, fyziológia, matematické výpočty, Biochémia, Matematika, Automatické riadenie) [64]..... 44	44
Obr. 2.1 - Technické špecifikácie [67] 45	45

Obr. 2.2 - kamera Blackindustry VNIR V2 [67]	45
Obr. 2.3 - Experimentálna zostava s kamerou BlackIndustry. V tejto fáze je možné snímať len 1 riadok, nakoľko na lineárny pojazd ešte nie je dokončený	47
Obr. 2.4 - Rozhranie programu HAIP BlackStudio pre prácu s kamerou (živý náhľad vľavo hore, waterfall zložený obrázok vpravo hore, spektrálne čiary vľavo dole, krivka intenzity osvetlenia vpravo dole).....	47
Obr. 2.5 - Ovládací panel (vľavo). Poskytuje možnosti nastavenia kamery, informácie v reálnom čase a možnosť kalibrácie. Analyzátor (vpravo) slúži na interpretáciu hyperspektrálnych dát.....	48
Obr. 2.6 - Spracovanie snímku a tréning klasifikátoru v programe BlackStudio. Pozorovanými objektami boli plastová tyč a oceľový šesťhranný kľúč. Na snímku je stále prítomný šum, ktorý výrazne znižuje úspešnosť klasifikátoru.....	49
Obr. 2.7 - Schéma uchytenia kamery nad dopravníkovým pásom [68]	50
Obr. 2.8 - Prieskum zeme pomocou HS kamery uchytenej na drone [69].....	50
Obr. 2.9 - Laboratórny skener od firmy SPECIM [70]	51
Obr. 2.10 - Schéma usporiadania	51
Obr. 2.11 - Nákres profilu IM 40-8 [71]	52
Obr. 2.12 - 3D model konštrukcie vymodelovaný v programe Autodesk Inventor 2024.....	53
Obr. 2.13 - Náhľad konštrukcie v 3 pracovných polohách (zľava: kamera jazdí a predmet stojí, kamera jazdí zvislo a predmet stojí, kamera stojí a jazdí podložka s predmetom)	53
Obr. 2.14 - Matica do drážky IM 40-8 [71].....	54
Obr. 2.15 – CAD model Základňa 1 (výkres v plnej kvalite je prílohou k tejto práci).....	54
Obr. 2.16 - krokový motor NEMA 17	54
Obr. 2.17 - Driver RAMPS DRV8825 [76]	59
Obr. 2.18 - Schéma zapojenia DPS	62
Obr. 2.19 - Finálna podoba DPS v programe EasyEDA. Červená - predná strana, modrá - zadná strana.	62
Obr. 2.20 - Šírka trasy pre maximálny prúd 2,5 A a maximálne oteplenie 10°C [79].....	63
Obr. 2.21 - Vývojový diagram kódu	64
Obr. 2.22 - Žiarovka halogénová 80W/230V/R7s/118mm [80].....	67
Obr. 2.23 - 3D model návrhu osvetlenia + detail (vpravo dole), žlté šípky vymedzujú svetelný kužeľ vyžiarený žiarovkou priamo a oranžové vyznačujú svetelný kužeľ odrazený od reflektoru. Schéma pre guľové zrkadlo (vľavo dole).	68
Obr. 2.24 - Schéma pre odraz lúčov od guľového zrkadla [65]	68
Obr. 3.1 - 3D modely vozík (vľavo) a držiak kamery (vpravo) vymodelované v programe Autodesk Inventor 2024	69
Obr. 3.2 - Príprava 3D tlače. Čas tlače držiaka kamery bol približne 16,5 hodiny.....	70
Obr. 3.3 - Držiak kamery. Finálny produkt. Kamera bude do držiaku uchytená pomocou skrutiek M5x15 a bude ju možné posúvať.	70
Obr. 3.4 - Výpalky z plechu	71
Obr. 3.5 - DPS + Raspberry Pi 3 po zostavení	72
Obr. 3.6 - Celá elektronika bola uložená do ochrannej krabičky aby sa zamedzilo jej poškodeniu. Z pravej strany vychádzajú vodiče pre pripojenie k zdroju a z ľavej pre pripojenie k pracovnej stanici.....	72
Obr. 3.7 - Maximálna, stredná a minimálna poloha tienidla	73
Obr. 3.8 - Kontrolný prepočet pre tienidlo v najnižšej polohe.....	74

Obr. 3.9 - Oblasť s maximom intenzity sa nachádza pod osou objektívu kamery a má rozmer približne 125 mm.....	74
Obr. 3.10 - Kontrola rovnomernosti osvetlenia podložky pomocou luxmetru. Hodnoty na obrázku sú v jednotkách lx.	75
Obr. 4.1 - Pozorovacia sústava v praxi.....	76
Obr. 4.2 - Kamera sa hýbe a podložka stojí (vľavo), kamera stojí a podložka sa hýbe (vpravo)	76
Obr. 4.3 - Schéma skutočnej sústavy.....	77
Obr. 4.4 - Schéma náhradnej sústavy	77
Obr. 4.5 - Kontrola nastavenia rýchlosti pomocou porovnania pomeru strán štvorcového papiera	78
Obr. 4.6 - Spektrálna čiara z podložky	79
Obr. 4.7 - Spektrum fluorescenčnej žiarivky [81].....	79
Obr. 4.8 - Porovnanie spektrálnych čiar fluorescenčnej žiarivky, halogénovej žiarovky (tab. 2.5) a získaného spektra z prístroja	80
Obr. 4.9 - Snímka zapalovača	80
Obr. 4.10 - Snímka ruky v rozsahu vlnových dĺžok 750-1000 nm (blízka infračervená oblasť).....	81
Obr. 4.11 - Snímka dvoch rôznych druhov plastov a kovového viečka (materiály zľava: PLA, PP, oceľ nafarbená nabiele).....	81
Obr. 4.12 - Klasifikácia materiálov v programe BlackStudio	82
Obr. 4.13 - Snímka sklenených nádob. Nádoba s vodou (vľavo), nádoba so 60% alkoholom (vpravo)	82
Obr. 4.14 - Klasifikácia v programe BlackStudio	83

Zoznam rovníc

(1.1)	12
(1.2)	12
(1.3)	14
(1.4)	14
(1.5)	14
(1.6)	15
(1.7)	16
(1.8)	20
(1.9)	22
(2.1)	55
(2.2)	56
(2.3)	56
(2.4)	56
(2.5)	56
(2.6)	56
(2.7)	56
(2.8)	57
(2.9)	57
(2.10)	66
(2.11)	67

(2.12)	67
(4.1)	77
(4.2)	77
(4.3)	78

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1 - Porovnanie metód snímania [39]	24
Tab. 2.1 - Technické špecifikácie krokového motoru [72]	55
Tab. 2.2 - Rozmerové tolerancie vodiacich tyčí [74]	57
Tab. 2.3 – Rozmerové tolerancie ložiska LM8UU [75]	58
Tab. 2.4 - Tabuľkový prehľad poklesu krútiaceho momentu s rastúcim počtom mikrokrokov [78]	60
Tab. 2.5 - Parametre výrobku [80]	67

Zoznam grafov

Graf 1-1 - Indexy lomu pre sklo BK7 [14]	16
Graf 1-2 - Typické spektrálne čiary halogénových žiaroviek [62]	41
Graf 1-3 - Priepustnosť atmosféry podľa vlnovej dĺžky [62]	43
Graf 2-1 - Spektrálna odozva kamery Blackindustry VNIR V2 [67]	46
Graf 2-2 – Pracovná charakteristika obecného krokového motoru [73]	55
Graf 2-3 - Inkrementálny krútiaci moment na jeden mikrokrok/ celý krok [78]	60

Zoznam použitého softvéru

1. EasyEDA
2. HAIP BlackStudio
3. Microsoft® Visual Studio Code
4. Autodesk Inventor Professional 2024
5. RealVNC Viewer

Zoznam príloh

1. Riadiaci kód v súbore .py
2. Výkres zostavy konštrukcie kliečky
3. Výrobný výkres uloženia pohonu
4. BLACKINDUSTRY VNIR V2 Camera - Product datasheet
5. Návod na obsluhu kamery BlackIndustry v2 od výrobcu HAIP
6. Návod na obsluhu softvéru BlackStudio od HAIP
7. Datasheet krokového motoru NEMA 17