



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VIZUÁLNÍ KONTROLA ROZMĚRŮ SOUČÁSTÍ

VISUAL INSPECTION OF COMPONENT DIMENSIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kadaňka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Jan Kadaňka
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vizuální kontrola rozměrů součástí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kontrola rozměrů je klíčovou kontrolou jakosti výroby, kterou lze kromě zažitého mechanického přístupu provádět ekvivalentně vizuálním přístupem. Vizuální kontrola může být v mnoha ohledech efektivnější jak z hlediska metodologie měření, tak z hlediska nákladů. Podstatou této práce bude vlastní návrh systému pro měření rozměrových parametrů strojních součástí s využitím kamerového systému na platformě Raspberry a profesionální platformě Cognex.

Cíle diplomové práce:

- 1/ Rešerše systémů pro vizuální kontrolu rozměrů.
- 2/ Popis technického vybavení – Raspberry Pi 4 vč. optiky, Cognex, osvětlovače.
- 3/ Technický návrh měřicího standu pro měření součástí.
- 4/ Realizace a vyhodnocení měření prostřednictvím platformy Raspberry.
- 5/ Realizace a vyhodnocení měření prostřednictvím platformy Cognex.
- 6/ Srovnání platforem a diskuze k výsledkům.

Seznam doporučené literatury:

PRINCE, Simon J. D., 2012. Computer vision: models, learning, and inference. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-01179-3.

SZELISKI, Richard, 2010. Computer Vision: Algorithms and Applications. London: Springer. Texts in computer science. ISBN 978-1-84882-934-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o porovnání průmyslového systému pro rozpoznávání objektů a měření s cenově dostupnou kamerou na platformě Raspberry Pie. V teoretické části je stručně popsáno několik metod pro měření rozměrů, které se v průmyslu běžně využívají spolu s obecným popisem technického vybavení pro záznam obrazu. V další části jsou popsány 3 průmyslové systémy pro obrazovou analýzu. Praktická část práce se zabývá návrhem měřicího standu, popisem technického vybavení, realizací měření pomocí obou platforem a následným zhodnocením.

ABSTRACT

This master thesis deals with the comparison of an industrial system for object recognition and measurement with an affordable camera on the Raspberry Pie platform. The theoretical part briefly describes several methods for measuring dimensions, which are commonly used in industry, along with a general description of technical equipment for image recording. The next section describes 3 industrial systems for image analysis. The practical part of the work deals with the design of the measuring stand, the description of the technical equipment, the implementation of measurements using both platforms and the subsequent evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Raspberry Pie, HQ kamera, Cognex, Python, OpenCV, NumPy, Inventor

KEYWORDS

Raspberry Pie, HQ camera, Cognex, Python, OpenCV, NumPy, Inventor



2021

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADAŇKA, Jan. Vizuální kontrola rozměrů součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 87 s. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Jan Kadaňka

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	MĚŘENÍ ROZMĚRŮ	19
2.1	Měření	19
2.1.1	Nejistota měření	19
2.2	Soustava SI.....	20
2.3	Definice délky	20
2.4	Principy měření délky	20
2.4.1	Mechanické měření	21
2.4.2	Ultrazvukové měření.....	22
2.4.3	Optické měření rozměrů.....	23
2.5	Technické vybavení pro záznam obrazu	24
2.5.1	Objektivy.....	24
2.5.2	Snímače.....	26
2.5.3	Osvětlení	27
3	SYSTÉMY PRO OBRAZOVOU ANALÝZU	29
3.1	Princip a použití	29
3.2	Průmyslová řešení	29
3.2.1	B&R – Smart kamery.....	29
3.2.2	Cognex	30
3.2.3	Camea – Uniscan	31
4	NÁVRH MĚŘÍCÍHO STANDU	33
4.1	Návrh konstrukce	33
4.2	Návrh držáku pro kameru RP.....	34
4.3	Návrh držáku pro kameru Cognex	35
4.4	Návrh držáku pro osvětlovač	36
4.5	Návrh držáku pro mikrometr.....	37
4.6	Kompletní sestava pro měření rozměrů	37
5	POUŽITÉ TECHNICKÉ VYBAVENÍ	41
5.1	Platforma Raspberry Pi	41
5.1.1	Raspberry Pi 3 Model B3.....	41
5.1.2	Raspberry Pi HQ kamera	42
5.1.3	Raspberry Pi 16 mm f/1.4 C objektiv	43
5.2	Systém Cognex	44

5.2.1	Cognex In Sight 2001 Mini camera.....	44
5.3	Kruhový osvětlovač MIC-56.....	45
5.4	Mikrometr.....	46
6	REALIZACE A VYHODNOCENÍ POMOCÍ SYSTÉMU RASPBERRY PI	47
6.1	Programovací jazyk Python.....	47
6.2	Knihovny.....	47
6.2.1	Picamera.....	47
6.2.2	OpenCV.....	47
6.2.3	NumPy.....	48
6.3	Instalace knihoven.....	49
6.4	Nastavení kamery.....	50
6.5	Zaznamenání obrazu.....	52
6.6	Detekce loga VUT.....	52
6.6.1	Barevné modely a transformace.....	53
6.6.2	Nalezení středu loga.....	54
6.6.3	Oříznutí snímku.....	55
6.7	Detekce hran.....	56
6.7.1	Výběr hran pro další výpočty.....	57
6.8	Výpočet vzdálenosti v pixelech.....	57
6.9	Přepočet na milimetry.....	58
6.10	Experimentální měření rozměru.....	59
7	REALIZACE A VYHODNOCENÍ POMOCÍ SYSTÉMU COGNEX.....	63
7.1	In-Sight Explorer.....	63
7.2	Připojení a nastavení kamerového snímače.....	63
7.3	Lokalizace a měření.....	65
7.4	Přepočet na milimetry.....	68
7.5	Experimentální měření rozměrů.....	69
7.5.1	Měření rozsahu.....	69
7.5.2	Měření opakovatelnosti.....	71
8	SROVNÁNÍ PLATFORMY A DISKUZU K VÝSLEDKŮM.....	73
9	ZÁVĚR.....	75
10	LITERATURA.....	77
11	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	81

12	SEZNAM TABULEK.....	83
13	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
14	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

1 ÚVOD

První optické porovnání rozměrů pochází už z doby, kdy lidé žili v tlupách a lovili divokou zvěř. Ve skupině zvířat lidé pozorováním zjistili, které z nich je největší a to ulovili. V průběhu času se měření rozměrů stávalo sofistikovanější. Například již ve starověku lidé používali části těla pro měření rozměrů (lokty, palce atd.) nebo ve středověku využívali mechanického porovnání, které v modifikované verzi zůstalo dodnes.

V dnešní době je měření rozměrů a kontrola jakosti nezbytnou součástí průmyslové, ale i malosériové výroby. Pro měření se používají přesně kalibrované nástroje založené na mechanickém nebo elektrickém principu. Někdy se tyto principy kombinují tak, že se mechanické čelisti přikládají k měřenému předmětu a elektronika v měřícím zařízení určí výsledný rozměr. Problémy nastávají, pokud je zapotřebí měřit velké množství rozměrů za krátký čas. V tento moment již není možné provádět vše za použití lidské síly, ale je potřeba automatizovat. Proto se pro měření využívají například ultrazvukové nebo laserové snímače. Ty dokážou velice rychle detekovat požadovaný rozměr, ale mohou být limitovány podmínkami prostředí.

V průmyslovém prostředí se již několik desítek let provádí nejrůznější měření automaticky. Principy jsou různé, ale vždy hraje velkou roli přesnost, rychlost vyhodnocení a efektivita. Proto se s výhodou používají systémy pro vizuální měření součástí. Lídrem v tomto oboru je společnost Cognex.

Cílem této diplomové práce je porovnat dva systémy na vizuální měření rozměrů. První je průmyslové řešení od již zmíněné firmy Cognex a druhé je kamerový systém na platformě Raspberry Pie. Aby bylo toto porovnání možné provést, byl navržen stand a držáky pro variabilní umístění obou řešení.

Optický snímač Cognex má tu výhodu, že jde již o plně funkční řešení s programovou podporou. Popis programu pro měření rozměrů je detailně popsán dále.

Kamerový systém Raspberry sám o sobě nemá programové vybavení na měření rozměry, tudíž byl program vytvořen v programovacím jazyku Python. Velkou výhodou pro tento jazyk je možnost implementace pokročilé knihovny na zpracování obrazu OpenCV. Program samotný je popsán v druhé polovině této práce.

Pro obě řešení byla provedena série měření, která je zhodnocena a provedena diskuse k získaným výsledkům.

2 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ

2.1 Měření

Pro ujasnění základních pojmů, které budou dále použity, je nutné uvést základní definice. Obor, který se zabývá měřením a aplikacemi měření se nazývá metrologie. Tento obor popisuje všechny teoretické i praktické aspekty měření, včetně výpočtu nejistot. **Měření** je proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině. Cílem měření je získání informací o měřené veličině. Měřená veličina je taková veličina, jejíž hodnota má být získána během měření. Pro specifikaci měřené veličiny je nutná znalost druhu veličiny, stavu daného jevu, tělesa nebo látky nesoucí veličinu. Do základních znalostí lze také zařadit znalost měřícího principu, který je základ měření, například použití Ohmova zákona pro měření napětí na zátěži nebo pro nepřímé měření teploty pomocí teploměru např. PT100.

Před samotným měřením je výhodné zvolit si metodu měření a následně postup měření. Metoda měření je generický popis logického organizování činností použitých při měření. Kvalifikovat metody měření lze různými způsoby, jako například: substituční metoda měření, diferenční metoda měření, nulová metoda měření, přímá metoda měření, nepřímá metoda měření. Postup měření, je možno definovat jako podrobný popis měření podle jednoho nebo více měřících principů a konkrétní metody měření založené na modelu měření. Výsledek měření je soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině. Nezbytnou součástí vyhodnocení je i určení přesnosti měření, tedy těsnosti shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny. Pravá hodnota, je taková hodnota, která se shoduje s definicí veličiny. Závěrem se naměřené hodnoty zpracují danou statistickou metodou a následně je výsledek měření uveden jako jedna naměřená hodnota spolu s nejistotou měření (Pospíšil, 2010; Svobodová, 2014).

2.1.1 Nejistota měření

Během měření existuje celá řada vlivů, ať už vnitřních nebo vnějších, a právě tyto vlivy je třeba chápat a náležitě s nimi pracovat při určení nejistoty měření. Nejistota měření se projevuje jako odchýlení naměřené hodnoty měřené veličiny od pravé hodnoty. Tato odchylka se v praxi vyznačuje jako určité rozmezí, ve kterém se s určitou pravděpodobností vyskytuje pravá hodnota. Aby se interval nejistoty udržel co nejmenší, je nezbytné odstranit všechny nejdůležitější zdroje systematických chyb a samozřejmě zvolit vhodné měřidlo spolu s vhodnou měřící metodou. Získaný interval, který se přiřadí k dané měřené veličině se nazývá nejistota měření. Pro tvrzení, že v určeném intervalu se zcela určitě nachází pravá veličina, by bylo nutné jednu nebo obě meze, v závislosti na fyzikální podstatě, umístit do záporného nebo kladného nekonečna. V souladu s GUM a VIM je nejistota měření definována jako: „Parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.“, (Ludvík, 2005).

Podle přístupu GUM je nutné vzít v potaz základní principy pro odhad nejistoty měření.

1. Veškeré složky nejistoty se vyjadřují pomocí směrodatné odchylky.
2. Předpokladem je korekce systematických chyb a možné nejistoty jsou nejistotami těchto korekcí.
3. Nulové korekce jsou přípustné pouze, když dané odchylky nemohou být korigovány, poté se musí stanovit nejistota spojená s korekcí.
4. Interval nejistot musí být symetrické.

Složky nejistot se dělí na dvě skupiny podle způsobu, jakým jsou vyhodnocovány. Jedna skupina nejistot měření je vyhodnocována postupem A, který zohledňuje nejistoty spojené s realizací měření. Druhá skupina nejistot měření je vyhodnocována postupem B, jež jsou zapříčiněny jinými zdroji a nejsou spojeny s realizací vlastního měření, většinou jsou to náhodné chyby a odchylky (Ludvík, 2005).

2.2 Soustava SI

Roku 1971 bylo na 14. generální konferenci pro váhy a míry vybráno celkem 7 základních veličin a k tomu 7 odpovídajících základních jednotek. Tato soustava se označuje SI z francouzského názvu „Système International des Unités“. Jako základní veličiny byly určeny délka, hmotnost, čas, elektrický proud, termodynamická teplota, svítivost a látkové množství. Základní jednotky k těmto veličinám jsou ve stejném pořadí metr [m], kilogram [kg], sekunda [s], ampér [A], kelvin [K], kandela [cd] a mol [mol]. K těmto základním jednotkám byly definovány také odvozené jednotky soustavy SI. Jako příklad odvozené jednotky je volt [V], který je možno převést na základní jednotky podle rovnice (1) (Holliday, 2013).

$$1 \text{ V} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1} \quad (1)$$

2.3 Definice délky

Délka je jedna ze základních veličin soustavy SI. V historii se pro měření délky používaly různé veličiny, ať to byly lokty nebo stopy, které přetrvaly v anglosaských zemích dodnes. Mezinárodně uznávaná základní veličina délky je metr. Definice metru se v průběhu času několikrát změnila. První oficiální definice byla, že jeden metr je roven jedné desetimiliontině vzdálenosti od severního pólu k rovníku. Z praktických důvodů se nicméně od této definice upustilo a metr byl definován jako vzdálenost mezi dvěma vrypy na tyči vyrobené ze slitiny platiny a iridia, tzv. standardním metru. Tento standardní metr je dodnes uložen v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry v Sèvres u Paříže. V roce 1983 dostal metr novou definici, která je platná dodnes a zní „Jeden metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu $1/299\,792\,458$ sekund“. Tato definice vychází z předpokladu, že rychlost světla je konstanta o velikosti $299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$. Druhý předpoklad je schopnost přesně měřit čas. Proto zde bude uvedena ještě jedna definice, a to definice jedné sekundy „Jedna sekunda je doba trvání $9\,192\,631\,777$ period světelného záření, emitovaného při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma konkrétními hladinami jeho velmi jemné struktury“ (Holliday, 2013).

2.4 Principy měření délky

Délku a rozměry obecně je možné měřit mnoha způsoby. Pro přehled je výhodné vytvořit určitou kategorizaci.

- Podle role člověka v měření
 - Subjektivní – měření je závislé na použité smyslu
 - Objektivní – měření je minimálně závislé na použití smyslu
- Podle metody
 - Přímé měření – hodnota měřené veličiny se určí přímo podle její definice
 - Nepřímé měření – hodnota měřené veličiny nevychází přímo z definičního vztahu

- Podle charakteru časové změny
 - Statické
 - Dynamické

Uvedené kategorie souvisí primárně se způsobem, jak je měřená veličina získána. Moderní přístup pro měření neelektrické veličiny jako je délka je v převedení měřené délky na elektrický signál, který je poté možné v elektrických obvodech zpracovat. Díky tomuto převedení je možno získat vyšší přesnost, citlivost, rychlost měření a další výhody. Nevýhody jsou větší náklady na měření a vyšší nároky na technickou realizaci. Délku je tak možné měřit pomocí měření jiné veličiny a dopočítání. Přehled je uveden tabulce 1 (Čech, 1990).

Tabulka 1: Vztah mezi veličinou a způsobem měření

<i>Získaná veličina</i>	<i>Měřená veličina</i>				
	Frekvence	Odpor	Elektrický náboj nebo napětí	Indukčnost	Kapacita
<i>Délkové rozměry</i>	Ultrazvuk	Dvou a tři elektrodové dotykové metody	Koeficient vazby vzájemných indukčností	Magnetický odpor	Vzdálenost elektrod

2.4.1 Mechanické měření

Při tomto typu měření se porovnává rozměr měřeného předmětu s velikostí měřící jednotky. K těmto účelům slouží skupina univerzálních měřidel, ze kterých je možno přímo odečíst naměřené hodnoty. Přehled spolu s přesnostmi je uveden v tabulce 2. Pro určitý typ měření se volí měřidlo podle rozsahu a podle požadavku na přesnost. V Evropské unii jsou běžně na měřidle uvedeny metrické rozměry (cm, mm) spolu s druhou stupnicí v palcích, pro anglosaské země (Fialová, 2006).

Tabulka 2: Přesnosti měřidel

Druh měřidla	Přesnost měření (mm)
Ocelové měřítko, obkročné a dutinové hmatadlo, šablony	0,2 – 0,5
Posuvné měřítko, dílenské kalibry, hloubkoměry	0,05 – 0,1
Mikrometr, pasametr	0,01-0,05
Základní měrky	0,001-0,005

Posuvné měřítko – posuvka

Tento typ měřidla je velice univerzální měřidlo s přesností 0,05 mm. Přesnost je dána především nonickou stupnicí tzv. nonius. Na hlavní stupnici se odečítají celé milimetry a na nomické se odečítá nonius, který je daný nonickou diferencí. Většina posuvek se vyrábí s diferencí 1/20. Mechanické se vyrábí s nejnižší hodnotou přesnosti 0,02 mm. U digitálních je možné se s přesností dostat až na 0,01 mm. Vhodné je pro měření vnějších rozměrů, vnitřních rozměrů nebo hloubky (Fialová, 2006). Mechanické posuvné měřítko je ukázáno na obrázku 1.



Obrázek 1: Posuvné měřítko (Foto vlastní)

2.4.2 Ultrazvukové měření

Ultrazvukové měření využívá pro měření mechanické kmity částic, které takto kmitají kolem rovnovážné klidové polohy, a to s frekvencí vyšší než 20 kHz. Ultrazvukové vlnění je možno rozdělit podle účinků na aktivní nebo pasivní. Aktivní lze při šíření prostředím zaznamenat jako změny fyzikálního nebo chemického charakteru. Příkladem může být ultrazvukové čištění, ultrazvukové svařování nebo emulzifikace. Pasivní má vůči aktivnímu podstatně menší výkon a používá se pro zjišťování vnitřních vad materiálu, diagnostiku v lékařství a také pro měřicí techniku. Měření pomocí ultrazvuku bývá realizováno metodou vhodnou pro konkrétní aplikaci. Základní metody jsou: metoda průchodová, metoda rezonanční, metoda impulsová odrazová, metoda frekvenční modulace, vizuální a holografické metody kam patří přímé zobrazení ultrazvukového pole, sonoholografie. Impulsová metoda je ze všech metod pro měření nejpoužívanější, protože přináší největší počet informací o zkoumaném předmětu. Tato metoda je založena na odrazu krátkých impulsů od zájmového předmětu (Obraz, 1984).

Měření pomocí ultrazvuku se v průmyslu hojně používá. Výhodou je možnost měření materiálů, které jsou průhledné, lesklé, tekuté nebo i práškové. Snímače bývají odolné vůči prachu, mlze, kouři a dají se pořídit s velkým měřicím rozsahem (40–8000 mm). Tento typ snímačů se používá tam, kde nelze použít optické senzory. Na trhu je mnoho firem, které vyrábí tento typ snímačů, jsou to například Schmachtl, Balluff, Sick, IFM. Snímač značky IFM s označením UGT592 je uveden na obrázku 2. Tento snímač je schopen určit vzdálenost v rozsahu 40-300 mm. Rozlišení je 1 mm. Komunikační rozhraní je IO-Link (IFM electronics, 2020).



Obrázek 2: Ultrazvukový senzor UGT592 (IFM electronics, 2020)

2.4.3 Optické měření rozměrů

Optické měření je založeno na využití základních vlastností světla. Světlo je elektromagnetické záření, které má vlnovou délku v rozmezí 0,1 až 100 μm . Záření, které má nejkratší vlnové délky je možné poznat podle fialové barvy, a proto se nazývá ultrafialové záření. Záření, které má nejdelší vlnové délky v daném rozsahu je rozpoznatelné podle červené barvy, proto se nazývá infračervené. Pro optické senzory a snímače se převážně využívá záření ve viditelné oblasti blízko infračervené oblasti. Optické snímače využívají většinou jeden ze základních zákonů pro šíření světla. Tyto zákony jsou reflexe, refraxe, rozptýlení, interference, difrakce, disperze, absorpce a optické vedení.

Základní vlastnost světla je jeho rychlost, která se určí pomocí vztahu (2), ve které vystupuje proměnná μ_0 což je permeabilita vakua a proměnná ϵ_0 , která vyjadřuje permitivitu vakua. Hodnoty velikosti těchto dvou proměnných jsou $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ a $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ (Tipek, 2003).

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299\,792\,458,7 \pm 1,1 [\text{ms}^{-1}] \quad (2)$$

Laserový dálkoměr

Aby bylo možné světelné paprsky používat pro měření musí mít senzory poměrně specifické vlastnosti. Především jde o dostatečný optický výkon zdroje s možností modulace, směrovost paprsků a jednoduchá konstrukce čidla. Podle těchto uvedených vlastností jsou vhodné zdroje polovodičové lasery. Pro malé vzdálenosti lze použít i luminiscenční diody. Laserové dálkoměry využívají odrazu paprsku od snímaného objektu. Energie odraženého paprsku se určí pomocí vztahu (3).

$$E_2 = k_1 k_2 k_3 \frac{d^2 E_1}{(2L)^2} \quad (3)$$

Proměnné, které vystupují v rovnici (3) jsou popsány v tabulce 3, která je uvedena dále.

Tabulka 3: Popis proměnných

Značka veličiny	Popis
L	Vzdálenost měřeného objektu v metrech
d	Průměr přijímací části čidla
k ₁	Činitel propustnosti vzduchu
k ₂	Činitel propustnosti optického systému čidla
k ₃	Činitel odrazivosti měřeného objektu

Díky rovnici (3) můžeme určit vzdálenost měřením pomocí určení hodnoty odražené energie. Další možnost je určit vzdálenost podle časového rozdílu, který je možné zaznamenat mezi vyslaným paprskem a zaznamenáním odraženého paprsku. Ze získané hodnoty času lze pomocí vztahu (4) určit vzdálenost předmětu (Zehnula, 1990).

$$L = \frac{c}{2} t \quad (4)$$

2.5 Technické vybavení pro záznam obrazu

Aby bylo možné zachytit daný moment v podobě digitální fotografie nebo filmu, je nutné k tomu mít potřebné vybavení. Do předminulého století, kdy byla pořízena první fotografie prošel tento obor významnou proměnou. Základní princip, pokud ho zobecníme, co to půjde zůstal nezměněný. Scénu se snažíme zachytit na médium, které může být fotografický film nebo moderní snímač o velikosti několika milimetrů čtverečních. Fotografování samozřejmě není jen o záznamovém médiu, ale neméně důležitý je objektiv a osvětlení scény, pro co nejpříznivější podmínky.

2.5.1 Objektivy

Sounáležitost objektivu se snímačem rozhoduje v největší míře o kvalitě vzniklé fotografie. Objektivy, které mají pevně nastavenou ohniskovou vzdálenost jsou schopny pořídit snímky ve vyšší kvalitě než objektivy, které mají možnost zoom, tj. variabilní změna ohniskové vzdálenosti (Tůma, 2004).

Ohnisková vzdálenost a zorný úhel

Ohnisková vzdálenost je definována jako vzdálenost mezi klasicky konstruovaným objektivem a rovinou filmu nebo snímače při zaostření na předmět, který leží z optického hlediska v nekonečnu. Když na objektivu měníme zaostření, tak posouváme rovinu ostrosti. Značka ohniskové vzdálenosti je malé písmeno *f* a základní jednotkou je milimetr [mm].

Pokud má objektiv ohniskovou vzdálenost například 15 mm, tak pokud bude dokonale zaostřovat objekt, který je v nekonečnu. Pokud se předmět přiblíží předmět bude rozmazaný, a tak je potřeba zvětšit vzdálenost středu objektivu od snímače. Na ohniskovou vzdálenost se váže ještě další parametr, který je zorný úhel. Podle ohniskové vzdálenosti a zorného pole dostaneme základní dělení objektivů, které je uvedeno v tabulce 4 (Digitální fotografie pro pokročilé, 2006).

Tabulka 4: Dělení objektivů

Název objektivu	Ohnisková vzdálenost [mm]	Zorný úhel [°]
Rybí oko	15	180
Širokoúhlé objektivy	20	94
	24	84
	35	62
Základní objektivy	50	46
Teleobjektivy	105	23
	180	14
	300	2

Světelnost objektivu

Dalším parametrem popisujícím objektiv bývá světelnost objektivu, která je ovlivněna konstrukcí objektivu, kde ji ovlivňuje poměr mezi ohniskovou vzdáleností a velikostí vstupního členu objektivu. Světelnost se označuje velkým písmenem F. Číselné hodnoty nabývá stejně jako clona objektivu. Pokud je objektiv světlejší tak je toto číslo menší. Pro světelný objektiv může být hodnota 1:1,2. Objektiv, který bude mít zřetelně horší světelnost může mít hodnotu 1:5,6 (Tůma, 2004). Objektivy, které mají možnost zoom, mají uvedené nejlepší a nejhorší hodnoty světelnosti, příklad popisu objektivu je uvedeno na obrázku 3.



Obrázek 3: Hodnoty objektivu (Foto vlastní)

Clona

Clona má na objektivu podobný smysl jako na oku zornice. Podle požadavku se buď přivře anebo otevře, tak reguluje množství světla, které proniká na vstup objektivu. Nastavení clony také ovlivňuje čas expozice, tj. doba po kterou na snímač dopadá světlo. Pokud chceme zachytit rychle se pohybující předmět, je dobré clonu otevřít na maximum a zkrátit čas expozice, aby snímek byl ostrý. Charakteristikou clony je clonové číslo, které udává poměr mezi ohniskovou vzdáleností a průměru otevření. Například pokud je ohnisková vzdálenost 100 mm a průměr otevření 25 mm, bude clonové číslo 4/1 neboli $f/4$ (Tůma, 2004).

2.5.2 Snímače

V předešlé části byl popsán objektiv a jeho hlavní charakteristiky. Snímač je další část, která ve velké míře ovlivňuje výsledný zachycený obraz. Hodnota, jež popisuje snímače se nejčastěji udává jako megapixel (Mpix), $1 \text{ Mpix} = 1\,000\,000 \text{ pix}$. Tato hodnota udává počet světlocitlivých buněk, které reprezentují jednotlivé body na digitální fotografii. Jestliže je bodů například 1920×1080 , což se na obrazovkách označuje jako full HD rozlišení, jsou potřeba 2 Mpix (Tůma, 2004).

Pro digitální záznam se dnes používají fotocitlivé snímače, které fungují na technologii polovodičů, jež využívají fotoelektrického jevu. Nejpoužívanější typy jsou CCD a CMOS. CCD (Charge-Coupled-Device) fungují tak, že v obrazových prvcích vzniká elektrický náboj, který je přenášen pomocí potenciálových jam, jinak řečeno pracuje se s elektrickým signálem v podobě vázaného náboje. Elektrický náboj, který vzniká je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření. Výstup CCD je napěťový signál, který se poté zpracovává a mění na digitální hodnoty, ale tyto změny probíhají v dalších komponentech, které nejsou v samotném čipu, tak se zvyšuje potřebná plocha. Snímač CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) pro svoji činnost používá elektronické integrované obvody. Vygenerovaná elektrický náboj ve fotodiodách je po předzpracování odváděn díky adresovatelné sběrnici do zesilovače signálu. CMOS snímače mají mnoho parametrů lepší oproti CCD, například nižší spotřebu energie, nižší cenu. Nevýhodou CMOS oproti CCD je nižší citlivost a vyšší šum.

Pokud zobecníme typ snímače, můžeme funkci snímače popsat jako převod intenzity dopadajícího záření na fotocitlivý snímač. Signál takto získaný je dále převeden na digitální signál pomocí A/D (analogově-digitálního) převodníku. Signál se snímá s danou vzorkovací periodou. Následně se signál kvantuje pro každý barevný kanál, většinou jsou tři kanály pro červenou, zelenou a modrou barvu tzv. RGB. Kvantování se provádí na daný počet jasových úrovní, který je určený počtem bitů A/D převodníku. Pro převodník, který pracuje s 8 bity je to celkem 256 jasových úrovní. Nejtmaší barevný tón se přiřadí k hodnotě 0 a nejsvětlejší k hodnotě 255. Ostatní jasové hodnoty jsou lineárně převedeny na konkrétní čísla. Standardně se používají již zmíněné 8bitové, 12bitové a 16bitové které poskytují 65 536 jasových úrovní, což ve třech barevných kanálech činí téměř 281,5 bilionu barev. U profesionálních zařízení je možné potkat i 24bitové nebo 32bitové převodníky. To kolik jasových úrovní jsme schopni rozpoznat se označuje jako bitová hloubka. Součet bitových hloubek pro všechny barevné kanály se označuje jako barevná hloubka (Kaplanová, 2009).

Snímače mají ještě jedno významné dělení, konkrétně podle způsobu, jakým načítají informace o světelné intenzitě. Základně jsou dvě kategorie: řádkové snímače a plošné snímače. Řádkové snímače se hojně používají například u skenerů. Principiálně jsou fotocitlivé buňky umístěny do jedné řady, která se postupně posouvá, aby pokryla celý snímek. Při každém takovém posunutí se ukládají data o jednom řádku a následně se

zpracují na celý snímek. Tato metoda je značně pomalá. Plošné neboli matriční snímače, jsou schopny zachytit celý snímek okamžitě (Digitální fotografie pro pokročilé, 2006).

2.5.3 Osvětlení

Světlo se jako barva vykresluje pomocí barevné teploty, kterou můžeme definovat pomocí Kelvinovy stupnice. Světlo na dolním konci stupnice 2000 K až 4000 K se označuje jako světlo teplé, například východ slunce, plamen svíčky. Světlo na opačném konci stupnice tedy 7000 K a více je studené, typicky zamračená obloha, jasná obloha. Denní světlo má barevnou teplotu zhruba uprostřed, tedy 5000–6000 K. Při zaznamenávání obrazu se barevná teplota reguluje pomocí softwaru na vyvážení bílé barvy (Waterman, 2009).

Pro co nejlepší výsledný snímek je nezbytné co nejlepší osvětlení. Pokud jsou světelné podmínky zlé, musí se použít zdroj umělého světla. Nejčastěji se používá blesk, který vzniká výbojem vysokého napětí v plynu xenonu. Barevná teplota je v rozmezí 5500 až 6000 K. Další používaný zdroj je výbojka, kde světlo vzniká díky elektrickému výboji v parách kovu v uzavřené baňce. Volba kovu charakterizuje teplotu světla. Dnes se hojně používají i LED osvětlovače, kde si můžeme vybrat z velké škály barevné teploty a nastavit tak požadované vlastnosti (Digitální fotografie pro pokročilé, 2006).

LED osvětlovače mají velkou životnost i díky možnost sestavení do požadovaného tvaru. Podle potřeby se diody uspořádávají do velkých kruhů nebo ploch. Existují tyto základní typy osvětlení (Kadlec, 2015).

- Horní osvětlení – používá se při sledování povrchové struktury částic nebo barevného rozlišení.
- Podsvícení – používá se pro analýzu velikosti částic a poskytuje možnost získat informace o tvaru a počtu.
- Boční osvětlení – používá se určení struktury nebo textury.

3 SYSTÉMY PRO OBRAZOVOU ANALÝZU

Analýzu obrazu používá lidský druh od nepaměti. V pravěku člověk využíval svůj zrak a zkušenosti, aby rozpoznal, jestli je získané jídlo požitelné, jestli se na něj z dále řítí nebezpečné zvíře nebo možnost úlovku. Během tisíciletí se tato analýza příliš neměnila. Vždy šlo o subjektivní hodnocení situací probíhajících okolo člověka. Ve srovnání s dnešními technicky založenými systémy je lidské vidění velmi rychlé, má schopnost filtrace nežádoucích jevů, změnit ostrost a dokáže zvýraznit objekt zájmu. Tyto popsané schopnosti jsou možné díky napojení na lidský mozek. Pro svou dokonalost je popsaný lidský systém pro analýzu nedostižnou inspirací pro ten průmyslový. V některých aplikacích je lidský zrak přesnější a rozezná požadovaný parametr spolehlivěji než stroj, který nedokáže odfiltrovat rušivé elementy, a pak může být program velice komplikovaný a tím i drahý. Strojové vidění má nicméně i své bezesporné výhody. Lidský zrak se nechá lehce ošálit optickými klamy, to u strojového vidění nenastane. Člověk si většinou během okamžiku zapamatuje pouze část toho, co viděl a stroj dokáže identifikovat velké množství předmětů ve zlomku vteřiny. Strojové vidění se tudíž v průmyslu zavádí především pro zvýšení efektivity a konzistentnosti kontroly. Dnes je běžné, že i zkušení kontrolní pracovníci jsou nahrazeni systémem pro kontrolu. Stroj se oproti člověku neunaví, pracuje bez přestávky a po jeho pořízení již nejsou nutné další náklady, vyjma energií (Kadlec, 2015).

3.1 Princip a použití

Obrazová analýza je založena na automatickém zpracování digitálního obrazu, který se získá pomocí snímacího prvku. Digitální obraz je dvoudimenzionální sít' hodnot, které reprezentují hodnotu na převodní stupnici pro stupně šedi. Pro barevný digitální obraz jde o třídimenzionální sít' hodnot, většinou se ale převádí na monochromatický obraz. Základní obrazový element je pixel, jež má tvar čtverce a jednu barvu. Počet pixelů udává rozlišení. Nutnou podmínkou pro vyhodnocení obrazu je dostatečná kvalita zařízení pro záznam, vhodné osvětlení a kontrast během zaznamenávání. Po zaznamenání dochází k obrazovým transformacím, převedením na monochromatický nebo binární obraz. Tyto změny se dějí, aby bylo možné odlišit objekty od pozadí tzv. prahování. Poté už je možné sledovat vlastnosti sledovaného objektu jako rozměr, tvar. Další výhodou těchto systémů je možnost využití pro kontrolu mimo viditelné spektrum. Obrazová analýza našla své uplatnění přes celé spektrum průmyslu. Nejruznější systémy potkáme v potravinářském a automobilovém průmyslu, ve strojírenství, v energetice a lékařství (Kadlec, 2015).

3.2 Průmyslová řešení

V této kapitole budou popsány dva průmyslové systémy pro vizuální kontrolu. Jeden poskytuje firma B&R a druhý od firma Cognex.

3.2.1 B&R – Smart kamery

Společnost B&R se podle údajů na svých stránkách pyšní plně integrovaným systémem strojového vidění do řídicího systému. Ve svých kamerách využívá inteligentní algoritmy pro zpracování obrazu a převratným osvětlovací systém. Škála produktů zahrnuje jednoduché kamerové senzory i pokročilé kamery s velkým výkonem. Produkty této firmy jsou plně flexibilní a hardware je možné podle potřeby škálovat. Kamery jsou vybaveny více jádrovými procesory a integrovaným FPGA pro předzpracování obrazu. Standardně se používají CMOS snímače s rozlišením 1,3 – 5 Mpix (Typy kamer, 2021).

Vestavěné funkce jsou uvedeny v následujícím výčtu (Smart Camera, 2021).

- Integrované monochromatické osvětlení
- Předzpracování a filtry
 - Binomický filtr
 - Filtr průměrné hodnoty
 - Sobelův filtr
 - Laplaceův filtr
- Rozpoznání 2D kódu
- Rozpoznání tvaru
- OCR
- Měření rozměrů



Obrázek 4: Smart kamera B&R (Typy kamer, 2021)

3.2.2 Cognex

Firma Cognex je největší, nejúspěšnější a nejznámější hráč na poli průmyslového rozpoznání obrazu. Jejich systémy se snaží napodobit lidský zrak, kde se každá jednotka skládá z optického vybavení, snímače a vysokorychlostní elektroniky. Tudiž vše pracuje společně, aby systém dokázal zachytit a analyzovat co vidí. Cognex se soustředí na řešení těch nejtěžších problémů ve zpracování obrazu (Cognex, 2021).

Produktová řada In-Sight

Kamery firmy Cognex jsou rozděleny do několika řad, podle množství funkcí každé řady. Nejnižší řada je označována 2000. Kamery této řady jsou modulární a je možné je osadit několika různými snímači a osvětlovači. Softwarové možnosti jsou kvůli nižšímu výkonu mírně omezeny. Objektiv má funkci autofokus a kamery má krytí IP 65.

Další řada je 7000. U této řady je oproti předchozí zvýšené rozlišení, které dosahuje až 5 Mpix. Krytí těchto kamer je IP 67.

Následující je řada 8000. Takto označené kamery jsou díky objektivu s lepšími parametry schopny snímat menší předměty, nebo rozpoznat více detailů.

Řada 9000 má ultra-vysoké rozlišení, které pro snímání plochy dosahuje 12Mpix a pro řádkové snímání 32Mpix.

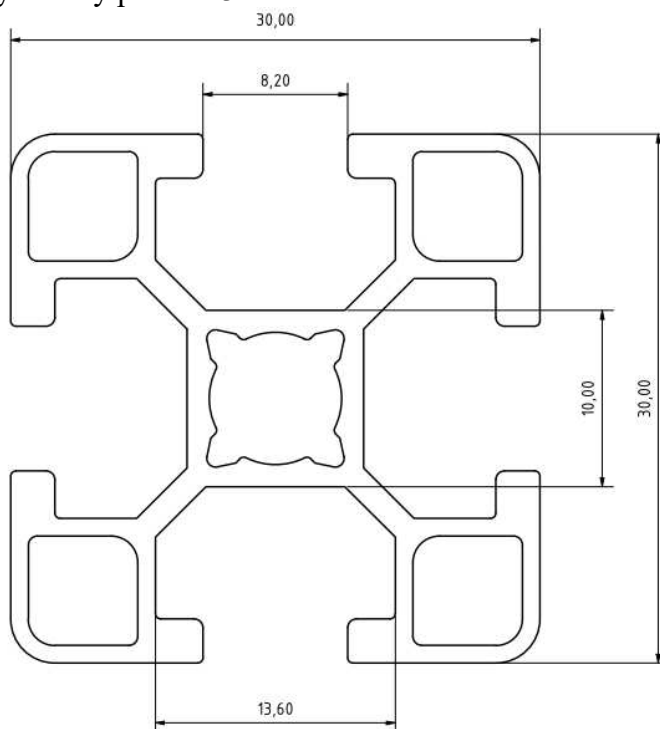
Poslední řada zde uvedená bude D900. Tyto kamery mají možnost hlubokého učení bez nutnosti napojení na počítač. Díky tomu jsou schopny se průběžně zdokonalovat s každým nasnímaným předmětem (Cognex, 2021).

3.2.3 Camea – Uniscan

Firma Camea je ryze českou společností, která na trhu působí více jak 25 let. Založila ji skupina výzkumníků působících na VUT. Camea vytvořila komplexní platformu průmyslových systémů pro optickou kontrolu kvality výroby, která nese označení Camea Uniscan. Téměř všechny komponenty tohoto systému si firmy vyvíjí sama a neustále je zdokonaluje a inovuje. Klíčové komponenty jsou inteligentní smart kamery, řídicí jednotka pro real-time zpracování dat, osvětlovací jednotky, aplikační software. Celou platformu nabízí optimalizovanou pro konkrétní projekt, ale nabízí i jednotlivé komponenty. Camea Uniscan se používá například pro optickou kontrolu součástek, kontrolu kontinuálních pásů, kontrolu lahví, kontrolu potisků, kontrola kvality balení a 3D rekonstrukce (Camea, 2016).

4 NÁVRH MĚŘÍČÍHO STANDU

Stand pro měření rozměrů bude plnit úlohu stativu pro obě kamery a osvětlovač. Současně bude možné nastavit výšku kamer a jejich umístění nad podložkou. Kamery bude možné současně připevnit ke konstrukci. Stand je navržen tak, aby byl robustní a měření rozměrů bylo opakovatelné za stejných podmínek. Proto byl jako hlavní nosný prvek konstrukce zvolen hliníkový profil o velikosti strany 30 mm. Náčrt řezu profilu je na obrázku 5. Komponenty pro uchycení obou kamer, osvětlovače a podložka pod mikrometr byly vytvořeny pomocí 3D tisku.



Obrázek 5: Náčrt profilu

4.1 Návrh konstrukce

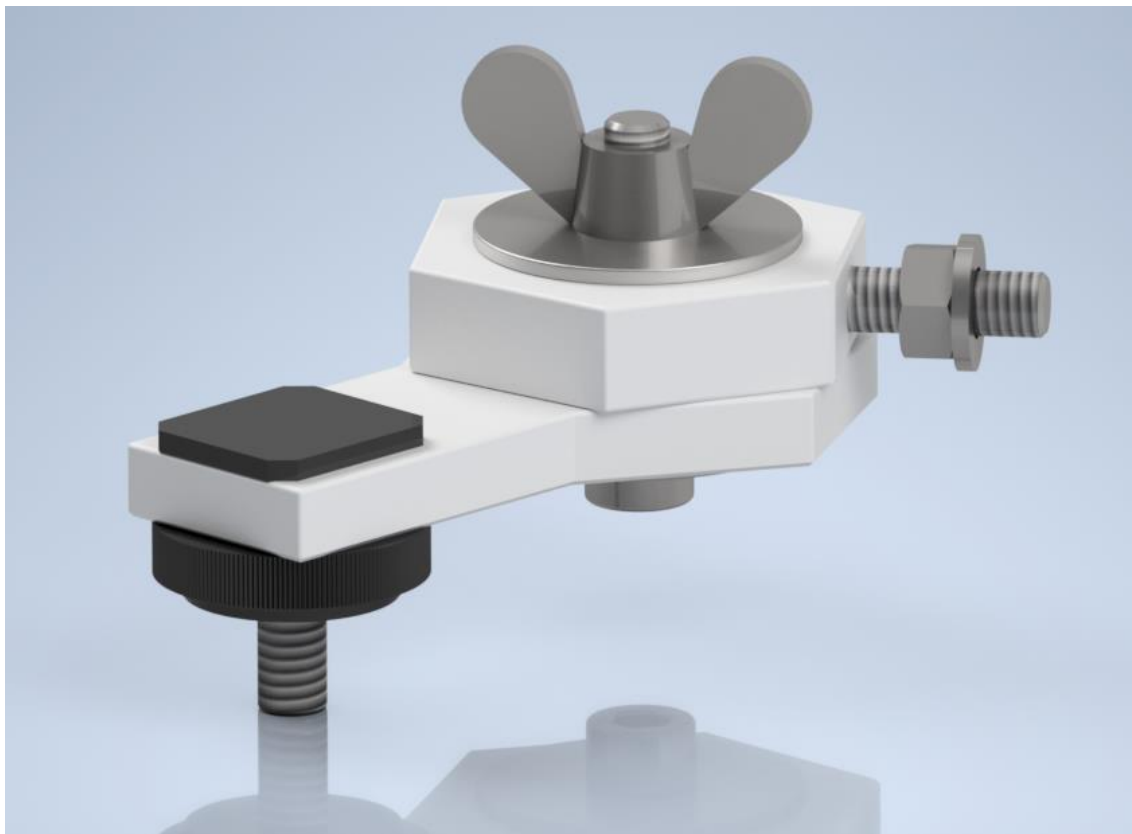
Hlavní konstrukce byla vytvořena s rozměry podstavy 500×300 mm. Celkem je tvořena deseti komponenty, bez spojovacího materiálu. Střední profil, který spojuje sloupy je možné nastavit do požadované výšky. Na pomocný sloup je možné umístit držák na kameru, a tak mohou mít kamery rozdílnou výšku nad podložkou. Maximální výška je 570 mm včetně podstavy. Na podstavu byla umístěna šedá podložky z tvrdé pěny. Model konstrukce je umístěn na obrázku 6.



Obrázek 6: Model konstrukce

4.2 Návrh držáku pro kameru RP

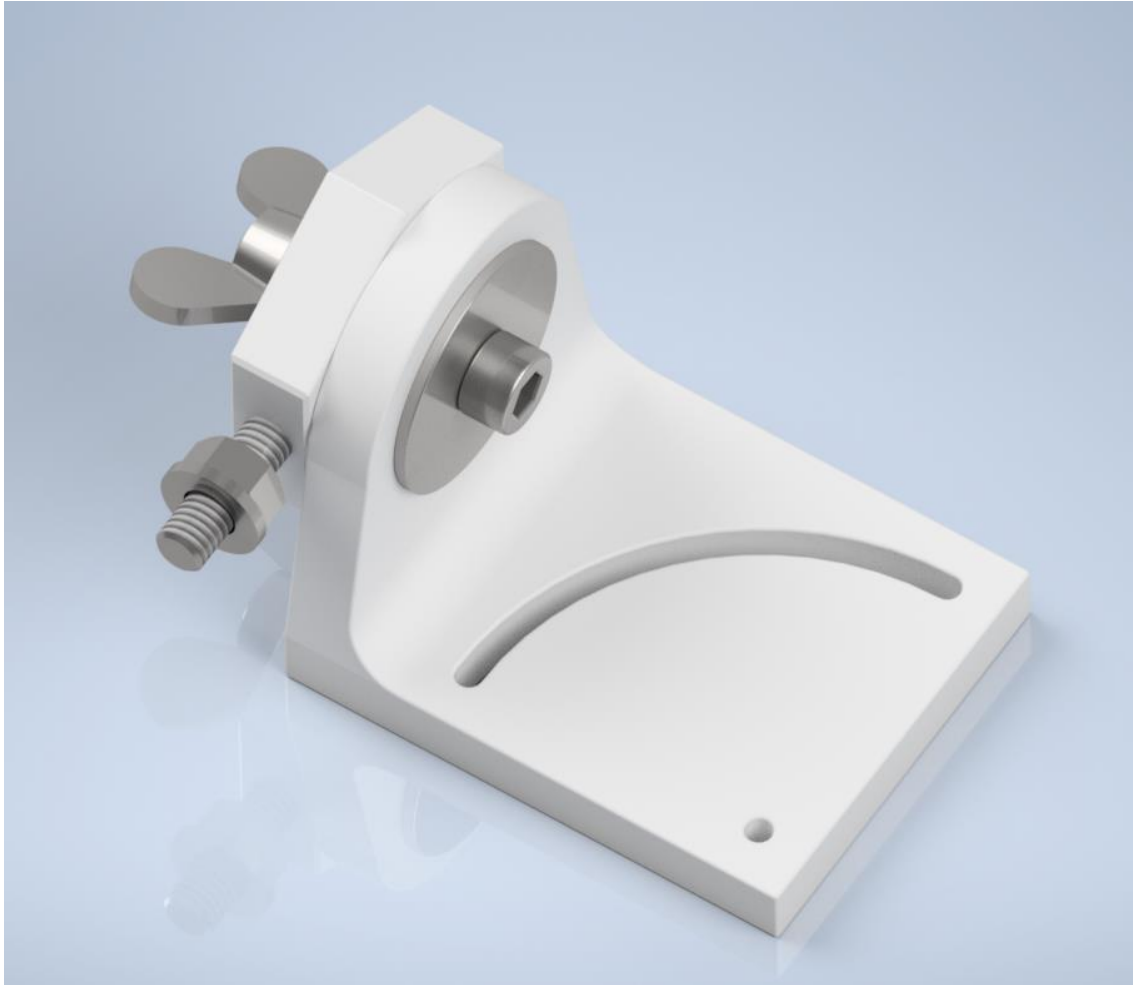
Aby bylo možné připojit kameru k profilované konstrukci je zapotřebí použít speciálních komponent. Komponenty byly vyrobeny pomocí 3D tisku z materiálu PLA na tiskárně značky Prusa MK3. Kamerový snímač je možné přichytit díky otvoru se stativovým závitem $\frac{1}{4}'' - 20$. Do profilu je naopak možné vložit matici do drážky profilu o velikosti M6. Tisk závitů M6 nebyl možný, proto je šroub železný a zašroubovaný do komponenty vytisknuté na 3D tiskárně. Dále bude šroub zajištěn kontra maticí s podložkou. Aby nebylo umístění kamerového snímače limitováno, byl navržen držák. Ten mimo propojení zmíněných komponent umožňuje i rotaci, aby bylo možné nastavit přesnou polohu. Rotace je umožněna díky radiálně umístěnému šroubovému spoji, vůči šroubu pro připojení. Rotace je možná o 360° . Kameru je možné přichytit díky speciálnímu stativovému šroubu UNC $\frac{1}{4}$ -20 spolu s maticí. Na obrázku 7 je model sestavy pro držák kamery Raspberry Pie.



Obrázek 7: Model držáku pro kameru RP

4.3 Návrh držáku pro kameru Cognex

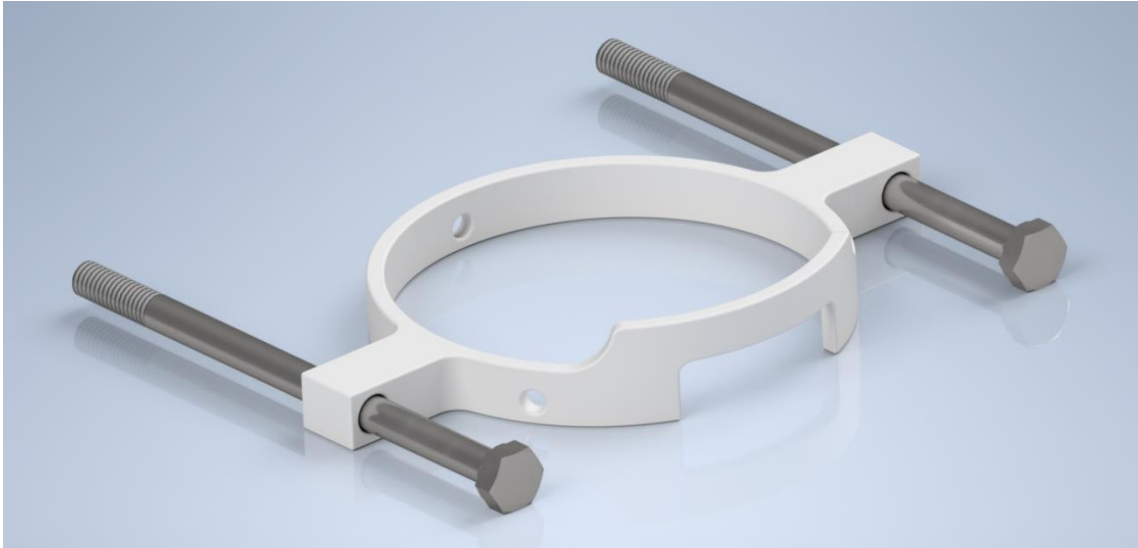
Pro kameru Cognex byl navržen držák podobného charakteru jako pro kameru RP. Část pro připojení ke konstrukci je shodná. Část pro připojení kamery se liší. Kamera Cognex má na spodní straně dvě díry pro šroub M3 se středovou roztečí 37 mm. Aby bylo možné kameru nastavit do požadované polohy, je opět možné rotace v radiálním směru k připojovacímu šroubu. Další možnost polohování je díky drážce o rozteči 3.1 mm, jejíž středová osa kopíruje čtvrt kružnici o poloměru 37 mm, se středem v díře o průměru 3.1 mm pro uchycení druhého šroubu. Model držáku pro kameru Cognex je na následujícím obrázku 8.



Obrázek 8: Model držáku pro kameru Cognex

4.4 Návrh držáku pro osvětlovač

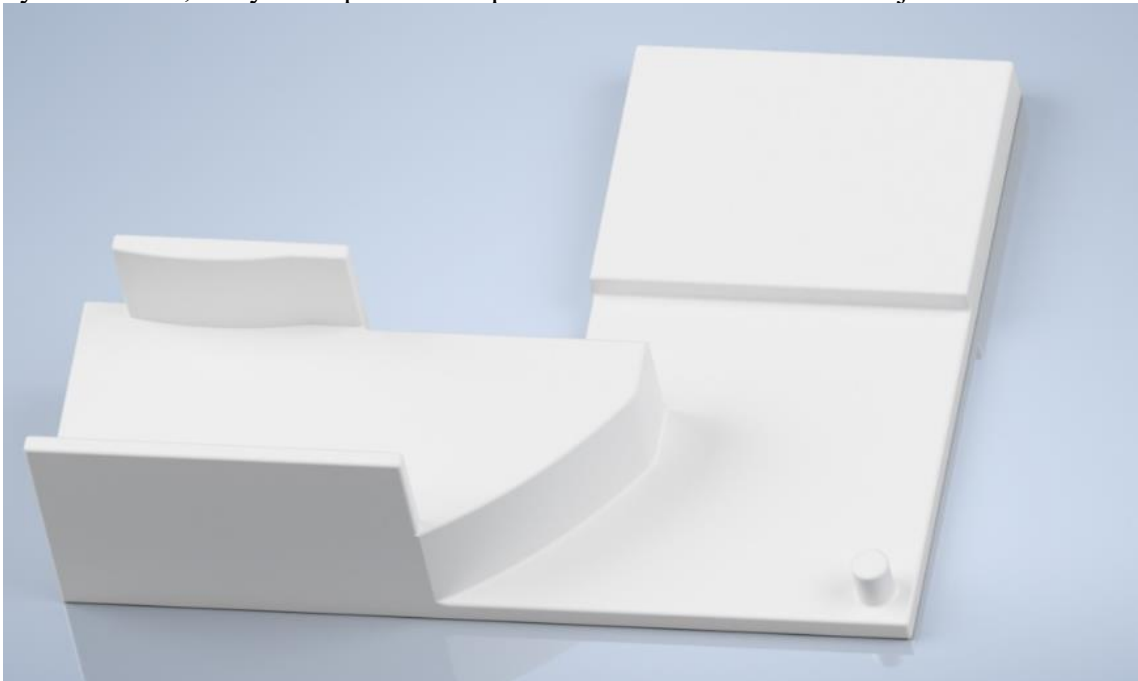
Pro osvětlovač bylo nutné vytvořit držák, který půjde připojit ke konstrukci. Na osvětlovači byly 3 díry se šrouby M4, kruhově rozmístěné s úhlovou roztečí 120°. Zmíněné šrouby byly využity pro připojení osvětlovač k držáku, který je umístěn na vnějším hraně osvětlovač. Pro připojení držáku ke konstrukci byly vytvořeny boční ramena s dírami o průměru 6.5 mm pro šrouby M6, kterými se držák připojí ke konstrukci. Model držáku osvětlovače je na obrázku 9.



Obrázek 9: Model držák osvětlovače

4.5 Návrh držáku pro mikrometr

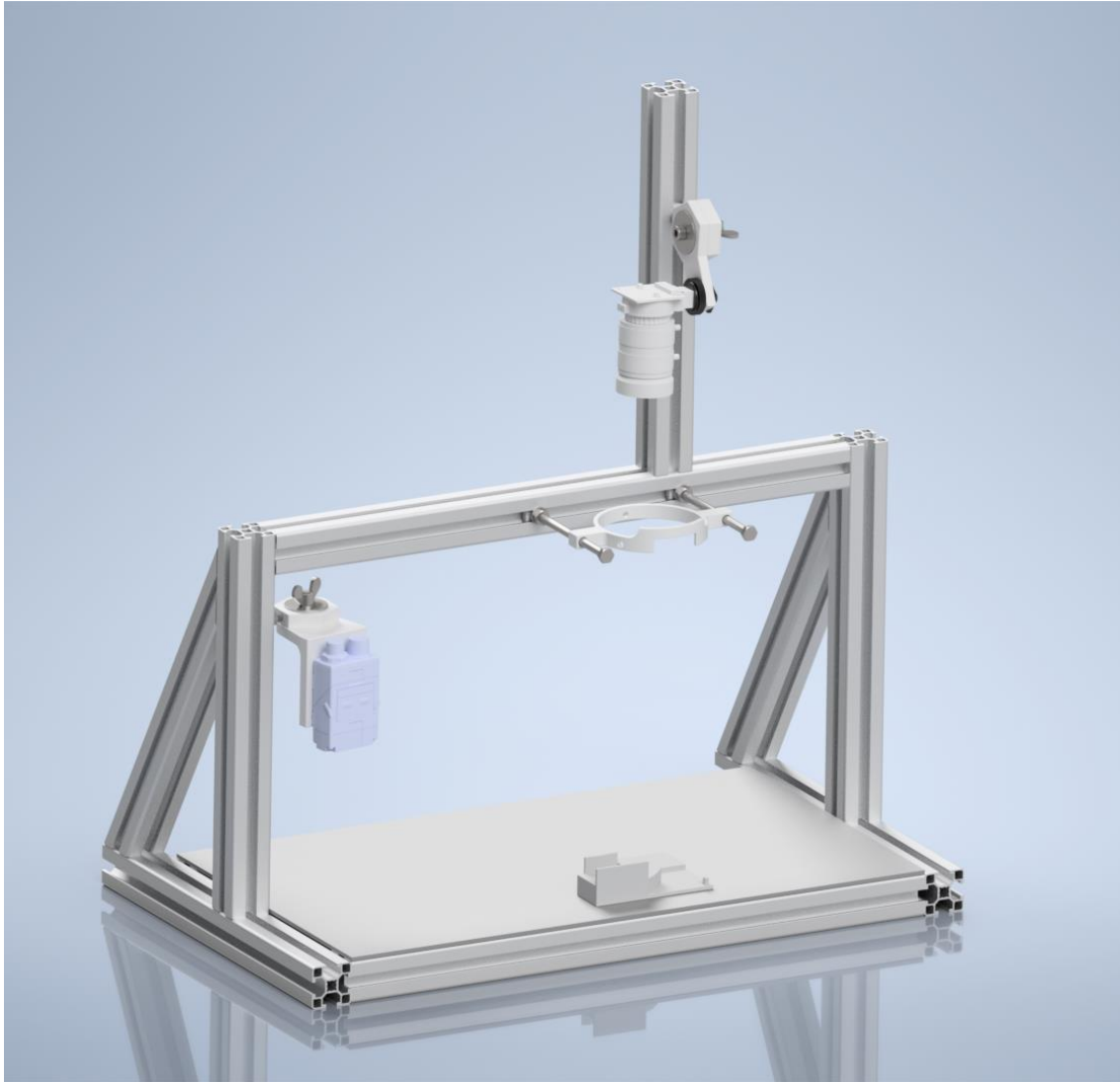
Měření rozměrů bude prováděno na mikrometru. Aby byl mikrometr stabilní bylo nutné vytvořit držák, který bude položen na podložce. Model tohoto držáku je na obrázku 10.



Obrázek 10: Model držáku mikrometru

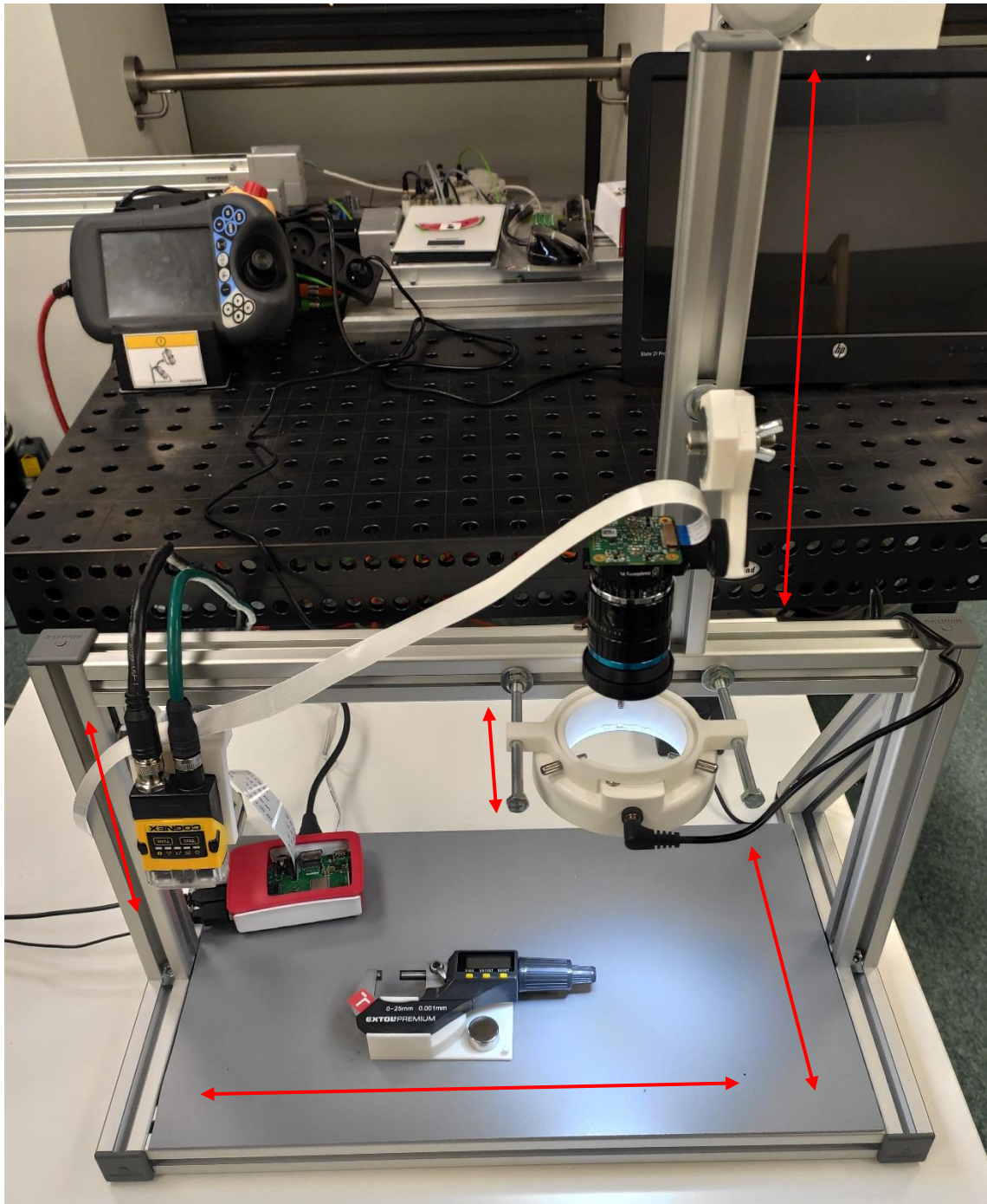
4.6 Kompletní sestava pro měření rozměrů

Na obrázku 11 je zobrazena kompletní sestava a rozmístění jednotlivých zařízení.



Obrázek 11: Kompletní sestava

Na obrázku 12 je skutečný stand na kterém bylo měřeno. Červené šipky ukazují možnost pohybu komponent. Po podložce se může měřený předmět libovolně pohybovat. Kamera Raspberry může být ve výšce až 60 cm nad podložkou. Osvětlovač má jeden stupeň volnosti, aby bylo možné nastavit poluhu přesně nad oblast měření. Obě kamery je možné rotovat díky spoji dvou hlavních komponent držáku.



Obrázek 12: Reálný stand pro měření (Foto vlastní)

5 POUŽITÉ TECHNICKÉ VYBAVENÍ

Pro účely této práce byla použita dvě technická řešení pro měření rozměrů součástí. První je platforma Raspberry Pi, která má možnost vytvoření libovolného programu a je limitována pouze schopnostmi programátora a hardwarem. Druhá platforma je systém od firmy Cognex, který je zvolen jako zástupce průmyslového řešení. Kamery a systémy této firmy jsou celosvětově velmi rozšířené v průmyslové automatizaci pro nespočet možností využití strojového vidění.

5.1 Platforma Raspberry Pi

Jako nízkonákladová platforma, která byla použita pro porovnání s průmyslovým řešením, bylo zvoleno Raspberry Pi s kompatibilním kamerovým snímačem a objektivem.

Raspberry Pi je miniaturní plně funkční počítač o velikosti kreditní karty. Má všestranné možnosti použití – jako výuková platforma, internetový prohlížeč, na hraní her. Navzdory jeho velikosti poskytuje dostatečný výkon a je možné ho používat místo stolního počítače. První série Raspberry Pi byla vytvořena v roce 2012 a první stovky kusů byly okamžitě prodány. Od té doby se celosvětově distribuovaly desítky milionů kusů ve dvou desítkách provedení a výkonnosti. Jednotlivé modely se od sebe převážně liší výkoností, ale také počtem USB portů a počtem GPIO. Na rozdíl od notebooku nebo chytrého telefonu, není možné Raspberry Pi používat bez dalších komponent stejně jako stolní počítač (Halfecree, 2018).

5.1.1 Raspberry Pi 3 Model B3

Stejně jako každý počítač je i Raspberry Pi složeno z několika základních komponent, kde každá má nezastupitelnou úlohu. První a tou nejdůležitější je řídicí čip. Je umístěn uprostřed na horní straně desky. Na první pohled je poznat díky kovovému krytu, pod nímž je umístěn integrovaný obvod, který obsahuje procesor (CPU) a grafický čip (GPU). Další komponenta, bez které by nemohlo Raspberry fungovat je operační paměť (RAM). Čip pro operační paměť je černý a je umístěn na dolní straně. Na horní straně se dále nachází kovová komponenta, která má na sobě vytačený znak Raspberry Pi a to malinu. Účelem tohoto zařízení je zajistit bezdrátové připojení jako je WiFi a Bluetooth. Jako další jsou na horní straně dva černé čipy. Ten větší zajišťuje zpracování dat z ethernetové portu a USB portů. Menší má na starosti řízení energie, která se přivádí pomocí micro USB portu. Vedle tohoto portu je HDMI konektor pro připojení monitoru. Následuje konektor pro připojení kamery, který nese označení CSI (Halfecree, 2018).

Následující parametry jsou převzaty z technické specifikace podle (Raspberry Pi 3 Model B+, 2020).

Parametry

CPU: 64bitový čtyřjádrový procesor Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 s taktem 1.4 GHz

GPU: Video jádro IV s taktem 400 MHz

RAM: 1 GB LPDDR2 SDRAM

ROM: micro SD karta 16 GB

Připojení k internetu: gigabitový ethernetový port, WiFi 2.4 GHz a 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac

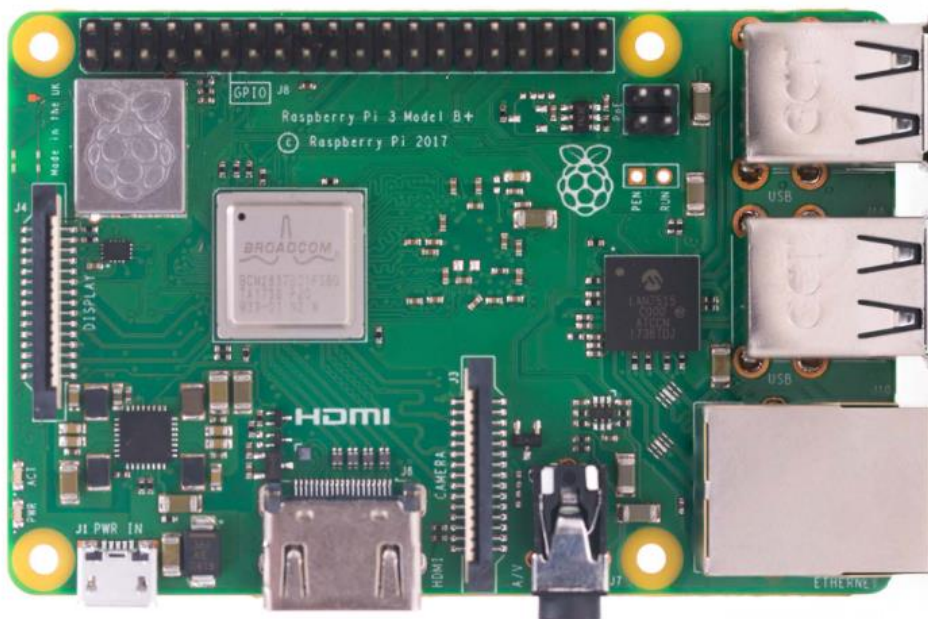
Bezdrátové připojení: Bluetooth 4.2, nízkoenergetický Bluetooth

Video výstup: HDMI 1.3

Audio výstup: 3.5 mm analogový konektor, HDMI 1.3

Připojení periférií: Sériové připojení fotoaparátu, sériové připojení displeje, 4x USB 2.0

Napájení: 5 V/2.5 A přes micro USB konektor



Obrázek 13: Raspberry Pi 3 Model B+ (Raspberry Pi 3 Model B+, 2020)

5.1.2 Raspberry Pi HQ kamera

Jako kompatibilní fotoaparát s Raspberry Pi byla zvolena RP HQ Camera. Fotoaparát je nejnovější fotoaparát značky Raspberry. Tento fotoaparát byl zvolen, kvůli možnosti napařit objektiv pomocí standardizovaného bajonetu CS a kvůli vysokému rozlišení. Fotoaparát obsahuje snímač od firmy Sony. Pro připojení k Raspberry Pi slouží konektor pro sériové připojení pomocí plochého kabelu (Raspberry Pi High Quality Camera, 2020).

Parametry

Snímač: Sony IMX477R skládaný, 12.3 Mpix, úhlopříčka snímače 7.9 mm

Výstup: RAW 12/10/8

Ohnisková vzdálenost: 12.5 mm – 22.4 mm

Připojení stativu: ¼“ – 20



Obrázek 14: Raspberry HQ kamera (Raspberry Pi High Quality Camera, 2020)

5.1.3 Raspberry Pi 16 mm f/1.4 C objektiv

Ke snímači byl vybrán objektiv od Raspberry. Objektiv má možnost ručního nastavení clony a zaostření. Objektiv má bajonet C tudíž je pro připojení k modulu fotoaparátu nutno použít spojku. Hlavní parametry jsou vypsány níže (Raspberry Pi 16 mm f/1.4 C objektiv, 2021).

Parametry

Optický formát: 1 “

Rozlišení: 10 Mpix

Ohnisková vzdálenost: 16 mm

Světelnost: f/1.4

Minimální vzdálenost předmětu: 200 mm



Obrázek 15: Raspberry Pi objektiv (Raspberry Pi 16mm f/1.4 C objektiv, 2021)

5.2 Systém Cognex

Firma Cognex byla již částečně představena v kapitole 3.2.2. Systémy pro optickou kontrolu od tohoto výrobce jsou velmi často k vidění v průmyslové automatizaci.

5.2.1 Cognex In Sight 2001 Mini camera

Pro účel této práce byla zvolena řada 2000, konkrétně kamera Cognex In Sight 2001 Mini, která v sobě kombinuje výkonnost systému In-Sight a jednoduchý, cenově dostupný snímač. Toto řešení je ideální použít na aplikace, kde se kontroluje přítomnost konkrétního prvku, správnost barev nebo správný tvar, čehož je možné využít automobilním, elektrotechnickým nebo potravinářským průmyslu. Tato řada je velmi modulární. Díky tomu je možné přizpůsobit systém na konkrétní požadavky. Modularita spočívá hlavně v možnosti změny objektivu, osvětlovače nebo přidání barevného filtru, aby byly podmínky pro vyhodnocování co nejlepší. Kamera má autofokus. Aplikace kamery se nastavuje pomocí programu In-Sight Explorer. Po nastavení již není nutné mít kameru připojenou k PC. Vytvořený program se vykonává nezávisle v kameře. Výstupem je výsledek o úspěšném nebo neúspěšném absolvování kontroly (pass/fail). Na horní straně kamery jsou kontrolní LED, které indikují napájení, stav zařízení, výsledek posledního testu, připojení k síti a chyby. Dále jsou na horní straně dvě tlačítka. Tlačítko označené „TRIG“ je pro manuální zachycení snímku a druhé tlačítko označené „TUNE“ nemá žádnou funkci. Níže jsou uvedeny parametry (In-Sight 2000 Series Vision Sensor, 2021).

Parametry

Rozlišení: 640 x 480, 800 x 600, 1280 x 960

Snímač: 1/3" CMOS, 4.8 x 3.6 mm

Bitová hloubka: 8 bitů pro monochromatický mód, 24 bitů pro barevný režim

Snímkovací frekvence: 40 fps pro monochromatický mód, 24 fps pro barevný mód

Ohnisková vzdálenost čočky: 6.2 mm tekutá čočka s automatickým ostřením

Připojení: Ethernet, napájení

Komunikační protokoly: OPC UA, PROFINET Class B, iQSS, SLMP, SLMP Scanner, Modbus TCP, PROFIBUS

Datový výstup: Splnění / nesplnění, číselný výstup

Osvětlovač: Difuzní bílý pro barevné snímání, červený pro monochromatické snímání



Obrázek 16: Kamera 2001 mini (In-Sight 2000 Series Vision Sensor, 2021)

5.3 Kruhový osvětlovač MIC-56

Pro zlepšení světelných podmínek při snímání, byl použit Kruhový osvětlovač MIC-56 od firmy Abetec. Tento osvětlovač se vyznačuje především kruhovitě rozmístěnými 56 kusy bílých LED, které vyzařují světlo o nízké teplotě podobné dennímu světlu. Napájecí adaptér má možnost manuálního nastavení intenzity osvětlení. Adaptér a osvětlovač je na obrázku 17.



Obrázek 17: Osvětlovač s adaptérem (Foto vlastní)

5.4 Mikrometr

Měření bylo prováděno na mikrometru Extol premium s rozsah 0-25 mm. Přesnost tohoto mikrometru je $\pm 0,002$ mm. Aby byl mikrometr na podložce stabilní a mohly na něm být měněny hodnoty, byl vložen do držáku, jehož model uvedený v kapitole 4.5. Pro lokalizaci bylo na mikrometr nalepeno logo VUT.



Obrázek 18: Mikrometr (Foto vlastní)

6 REALIZACE A VYHODNOCENÍ POMOCÍ SYSTÉMU RASPBERRY PI

Na platformě Raspberry Pi byl vytvořen program pro vyhodnocení rozměru součástí pomocí programovacího jazyka python, kde byly implementovány knihovny OpenCV, NumPy. Python je předinstalovaný programovací jazyk v operačním systému Raspberry Pi OS (Raspbian), který je odvozený od Debianu na bázi Linuxu.

6.1 Programovací jazyk Python

Programovací jazyk Python je vysokoúrovňový skriptovací jazyk k obecnému použití. Jazyk je dynamický s funkcí automatického řízení paměti. Oficiální webová stránka, kde jsou veškeré informace je <https://www.python.org/>. Za poslední dekádu se razantně zvedla popularita pythonu. Důvodem může být všestranné použití v odvětvích, která se dnes velmi rychle a dynamicky mění. Příkladem takových odvětví jsou umělá inteligence (AI), neuronální sítě, hluboké učení, internet věcí (IoT) a robotika. Další důvod pro vzrůst popularity mohou být jeho výhody oproti některým jiným jazykům. Výčet výhod je uveden dále (Fernández Villán, 2019).

- Python je považován za perfektní jazyk pro vědecké výpočty, protože jeho syntaxe je snadno pochopitelná a konzistentní, díky nejrozličnějším knihovnám nabízí podporu pro vědecké výpočty
- Podporuje rychlou tvorbu prototypů, jelikož je rychlé napsat kód, který bude podstatně kratší s porovnáním s jinými programovacími jazyky
- Nabízí vestavěné knihovny – NumPy, SciPy, scikit-learn
- Je to nezávislá platforma, kterou je možné používat skrz platformy (Windows, MacOS, Linux)

6.2 Knihovny

Jak již bylo zmíněno Python podporuje spoustu knihoven, díky kterým je možné implementovat pestrou paletu funkcí, které jsou optimalizované a vyvinuté přímo pro konkrétní programovací jazyk. V rámci tvorby programu pro rozpoznávání předmětů na platformě Raspberry Pi byly použity knihovny OpenCv - pro práci s bitmapami, Numpy - pro matematické operace, Picamera - pro načtení hodnot ze snímače.

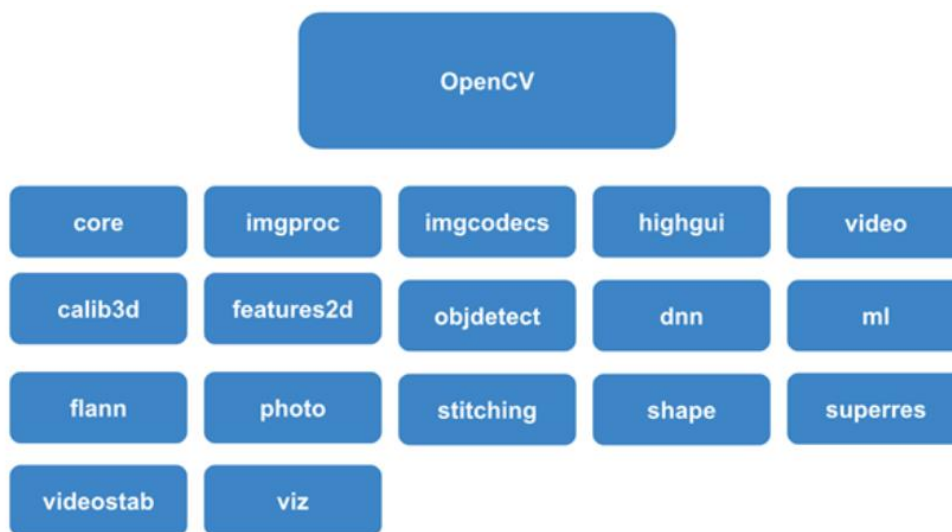
6.2.1 Picamera

Tato knihovna je základní knihovna pro obsluhu kamerového snímače napojeného na Raspberry Pie. Pro import této knihovny se používá příkaz `from picamera import PiCamera` a poté se proměnné pro označení kamery přiřadí třída `PiCamera()`. Součástí této třídy jsou funkce pro zobrazení snímku, rotaci, uložení do souboru, nahrávání videa, nastavení rozlišení a další. V rámci práce se knihovna využívá pro pořízení snímku o rozlišení 4056×3040 px.

6.2.2 OpenCV

Knihovna OpenCV je knihovna původně vytvořena pro programovací jazyk C++, ale je možné ji využívat i v programovacím jazyku Python, Java, Matlab. Knihovna je volně šiřitelná a je zdarma. Hlavní použití knihovny je pro zpracování obrazu a strojové vidění. Knihovna má více než 2500 optimalizovaných funkcí, kde podporuje nejen zmíněné

strojové vidění, ale i strojové učení a hluboké učení. Knihovna je rozdělena do modulů, kde každý má konkrétní funkci a toto rozdělení koresponduje s rozdělením problému strojového vidění (Fernández Villán, 2019). Diagram s rozdělením do modulů je na obrázku 19.



Obrázek 19: Moduly OpenCV (Fernández Villán, 2019)

Typické oblasti využití knihovny OpenCV jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Použití OpenCV (Fernández Villán, 2019).

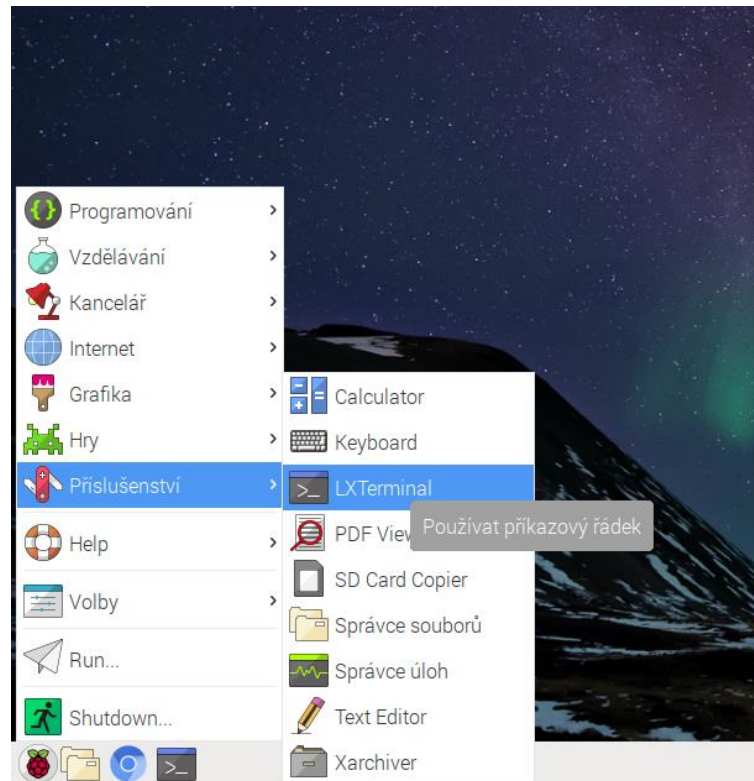
Spojování obrazu pro zobrazení ulic	Sledování pohybujícího předmětu
Nástroje pro 2D a 3D zpracování obrazu	Segmentace a rozpoznávání
Rozpoznání obličeje, gest a objektů	Analýza lékařských snímků
Interakce člověka s počítačem	Rozšířená realita
Automatická kontrola a dohled	Navigace a řízení robota nebo auta
Stereoskopické zobrazení pomocí dvou kamer	Detekce ospalosti a rozptýlení řidiče

6.2.3 NumPy

Knihovna NumPy je základní balíček funkcí pro vědecké výpočty v programovacím jazyce Python. Poskytuje možnost pracovat s objekty, které mají charakter vícerozměrného pole, dále různé odvozené objekty jako maskovací matice a pole. Funkce obsažené v knihovně jsou schopny rychle pracovat s poli a provádět matematické operace, logické operace, úpravu tvaru, výběr, třídění, diskrétní Fourierovy operace, základní lineární algebru, náhodné simulace a mnoho dalšího. Jádro knihovny NumPy je objekt nazvaný *ndarray*, který zapouzdřuje n-dimenzionální pole homogenních datových typů, přičemž mnoho operací je prováděno v kompilovaném kódu pro zvýšení výkonnosti. Datový typ *NumPy Array* má fixně danou velikost při vzniku a dále se nemění. Na rozdíl od datového typu *List*, který je součástí Pythonu a mění velikost dynamicky. Pokud se změní velikost, vytvoří se nové pole a originál se odstraní. Všechny elementy v tomto poli musí být stejného datového typu, proto budou zabírat stejnou velikost paměti. Na datovém typu *NumPy Array* má je možné provádět matematické a jiné operace z velkým množstvím dat, které jsou provedeny efektivněji (What is NumPy, 2021).

6.3 Instalace knihoven

Pro přidání knihoven v operačním systému Raspbian byl použit příkazový řádek, který lze nalézt v záložce *Příslušenství* v hlavní nabídce, jak je znázorněno na obrázku 20.



Obrázek 20: Postup spuštění příkazového řádku

Před instalací knihoven je dobré provést aktualizaci stávajících knihoven, které se provede příkazem `sudo apt update`. Ten načte informace o nejnovějších dostupných aktualizacích a vypíše kolik je dostupných balíčků pro instalaci. Pro instalaci aktualizací se zadá příkaz `sudo apt upgrade`, který vypíše, co bude aktualizovat a případně kolik místa to bude zabírat. Před samotnou instalací je potřeba potvrdit zadáním `y`. Dále byl nainstalován python pomocí příkazu `sudo apt install python3 idle3`.

Instalace knihovny OpenCV byla provedena pomocí příkazu `pip install opencv-contrib-python`. Kontrola verze knihovny OpenCV a pythonu se provede sérií následujících příkazů zadaných v příkazovém řádku.

```
python3
import cv2
cv2.__version__
```

Výsledek těchto příkazů je na obrázku 21. Tuto kontrolu bylo dobré provést pro dohledávání dokumentace ke konkrétní verzi knihovny.

Knihovna NumPy byla nainstalována pomocí příkazu `sudo apt install python3-numpy`. Pro kontrolu verze knihovny je možné použít podobnou sekvenci jako pro kontrolu knihovny OpenCV. Výsledek je na obrázku 21

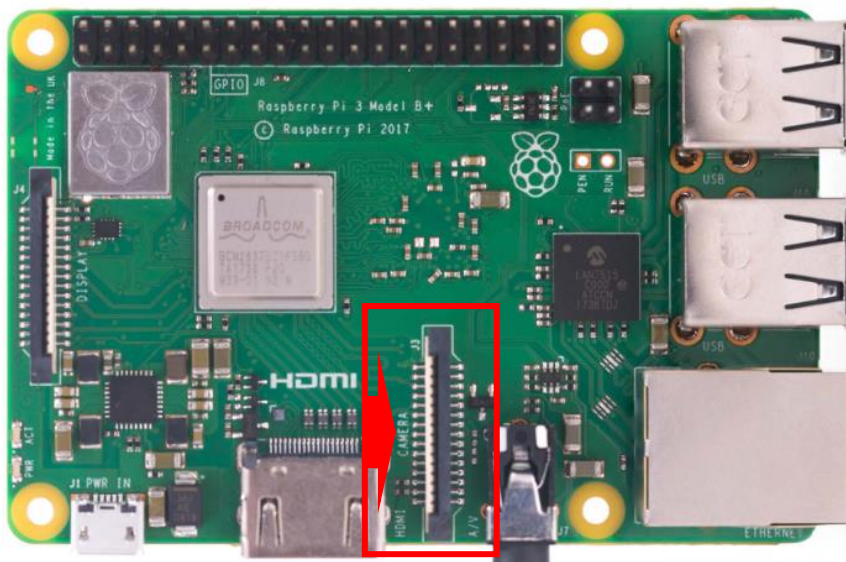
```
python3
import numpy as np
np.__version__
```

```
pi@raspberrypi: ~  
Soubor Upravit Karty Nápověda  
pi@raspberrypi:~ $ python3  
Python 3.5.3 (default, Apr  5 2021, 09:00:41)  
[GCC 6.3.0 20170516] on linux  
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.  
>>> import cv2  
>>> cv2.__version__  
'4.4.0'  
>>> import numpy as np  
>>> np.__version__  
'1.18.5'  
>>> □
```

Obrázek 21: Kontrola verze OpenCV

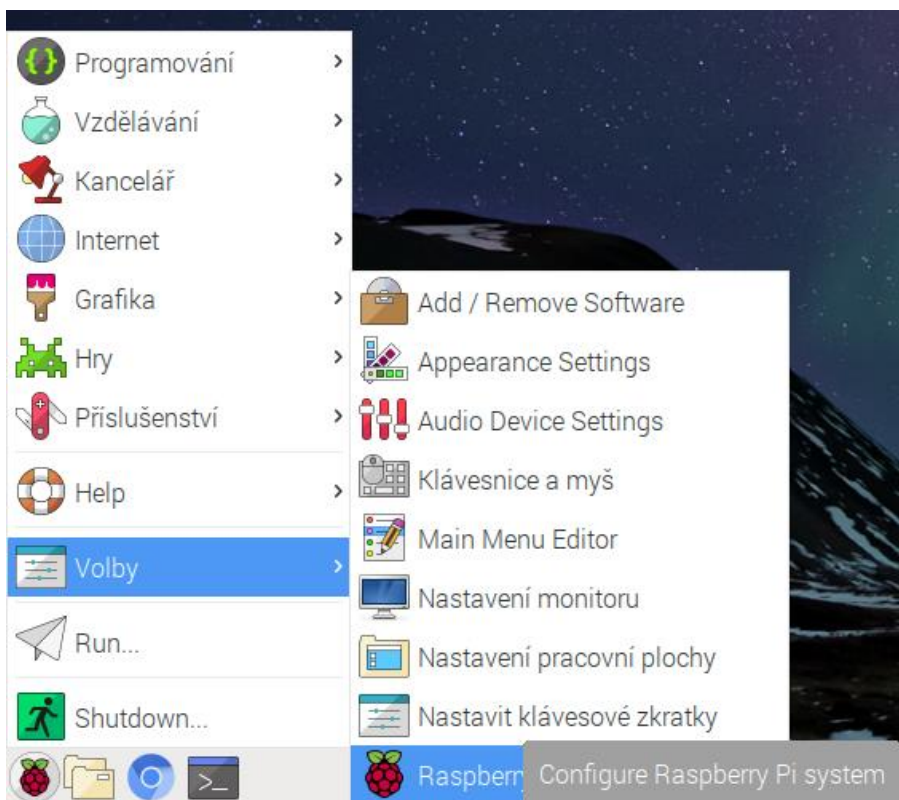
6.4 Nastavení kamery

Kamera se připojuje pomocí plochého kabelu, který se připojí do konektoru označeného na obrázku 22 pomocí červeného rámečku. Piny se připojí na stranu označenou šipkou. Připojení kamery je nutné dělat ve při vypnutém Raspberry.

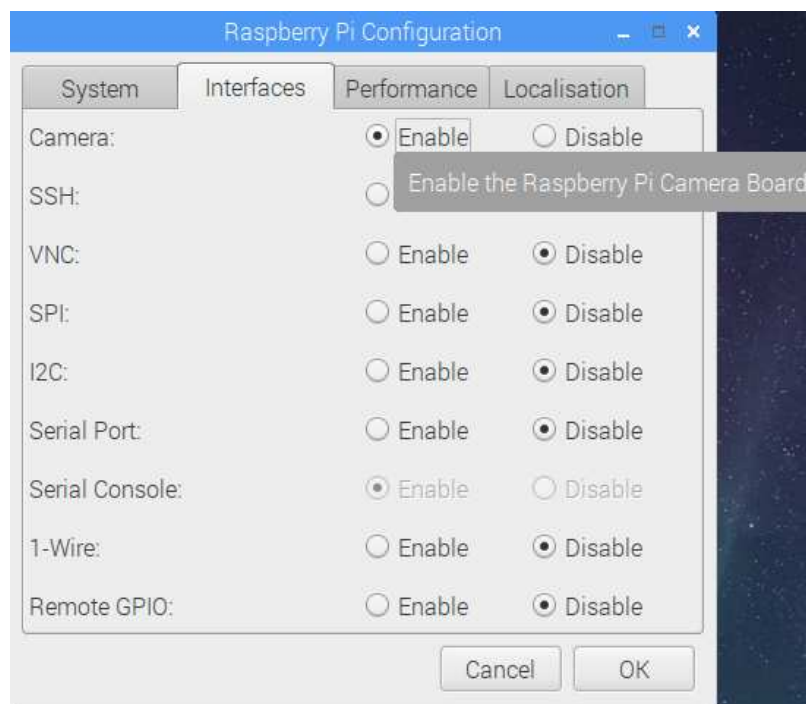


Obrázek 22: Zapojení kamery Raspberry Pi 3 (Raspberry Pi 3 Model B+, 2020)

V prostředí Raspbian je povolit používání kamery, které se provede programem *Raspberry Pi Configuration*. Program je umístěn v záložce *Volby* v hlavní nabídce, jak je znázorněno na obrázku 23. V programu se nastavení kamery nachází v záložce *Interfaces*, kde se kamera povolí. To je vidět na obrázku 24.



Obrázek 23: Postup spuštění Raspberry Pie Configuration



Obrázek 24: Zapnutí funkce kamery

Pokud je vše zapojené správně je možné kameru otestovat pomocí příkazu `raspistill -t 10000`, který po zadání do příkazového řádku zobrazí v nově vytvořeném okně aktuální video z kamery po dobu 10 s.

6.5 Zaznamenání obrazu

Objektiv je umístěný 31 cm nad podložkou. Tato výška byla zvolena, aby byl výsledný obraz ostrý a zobrazoval danou část mikrometru. Zaznamenání aktuálního obrazu se provádí pomocí knihovny Picamera. Před uložením pořízeného obrázku se obrázek otočí o 270°. Poté je nastaveno rozlišení na maximální hodnotu, kterou snímač dovoluje. Poté se snímek uloží pod názvem *Img* ve formátu *png*. Pořízení snímek je na obrázku 25.

```
camera = PiCamera()  
camera.rotation = 270  
camera.resolution(4056, 3040)  
camera.capture('Img.png')
```

Uložený obrázek se načte pomocí funkce `imread`.

```
Image = cv.imread('Img.png')
```



Obrázek 25: Uložený snímek bez vyhodnocování

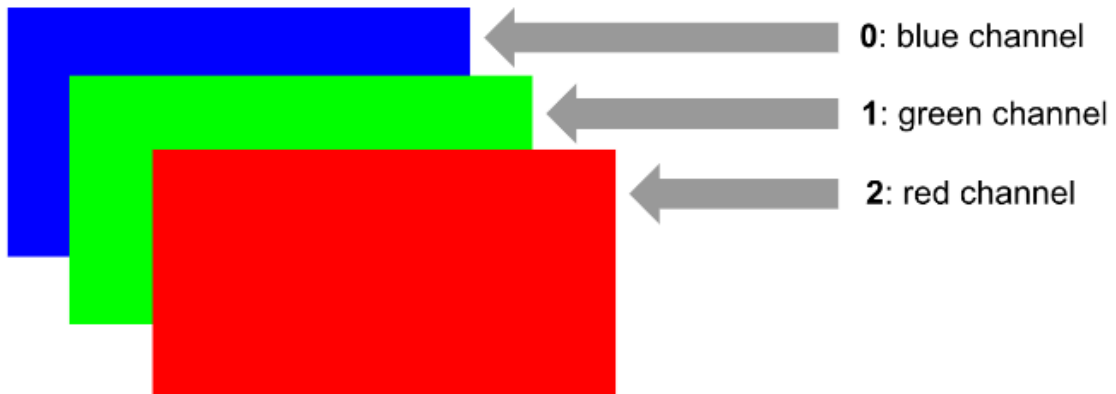
6.6 Detekce loga VUT

Snímek mikrometru má vysoké rozlišení a pokud bychom se na celém obrázku snažili najít hrany pro změření rozměrů bylo by to nemožné. Proto bylo na mikrometr umístěno logo VUT, které má výraznou červenou barvu, jež jde lokalizovat. Pro lokalizaci se využilo barevné transformace do barevného modelu HSV. Jakmile je logo nalezené, vyřízne se část obrazu, kde je hřídel mikrometru.

6.6.1 Barevné modely a transformace

Nejčastěji používaný barevný model, který se používá ve výpočetní technice je model RGB. Tento model je schopný popsat pomocí tří hodnot, které reprezentují intenzitu tří barevných kanálů, libovolnou barvu, která je v rozsahu definovaném barevnou hloubkou. Pokud je barevná hloubka 24 bitů, tak každý barevný kanál nabývá hodnot v celočíselném rozsahu 0 až 255 ($2^8 = 256$).

Knihovna OpenCV pracuje s mírně odlišným modelem BGR. Každý pixel je tak reprezentovaný tripletem hodnot, které reprezentují hodnoty pro modrou, zelenou a červenou barvu. Každopádně BGR model byl u této knihovny zvolen z historického hlediska. Barevné kanály jsou znázorněny na obrázku 26 (Fernández Villán, 2019).



Obrázek 26: BGR model (Fernández Villán, 2019)

Aby bylo možné najít červenou barvu použije se transformace do barevného modelu HSV. V knihovně OpenCV je k tomuto účelu vytvořena funkce `cvtColor`. Tuto funkci je možné použít pro desítky různých barevných transformací. Pro změnu do formátu HSV se využívají rovnice (5)(6)(7)(8) (W. Chen, 2007). Pro změnu na odstíny šedi se používá rovnice (9).

$$V = \max(B, G, R) \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\delta}{\max(B, G, R)} & \text{pokud } \max \neq 0 \\ 0 & \text{pokud } \max = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$H = \begin{cases} 60 \left(\frac{G - B}{\delta} \right) & \text{pokud } \max = R \\ 60 \left(\frac{B - R}{\delta} + 2 \right) & \text{pokud } \max = G \\ 60 \left(\frac{B - G}{\delta} + 4 \right) & \text{pokud } \max = B \\ \text{není definováno} & \text{pokud } \max = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta = \max(B, G, R) - \min(B, G, R) \quad (8)$$

$$GRAY = 0.114 \cdot B + 0.587 \cdot G + 0.299 \cdot R \quad (9)$$

Převod do odstínu šedi bude použitý v kapitole 6.7. Syntaxe pro převod do HSV a stupňů šedi je níže.

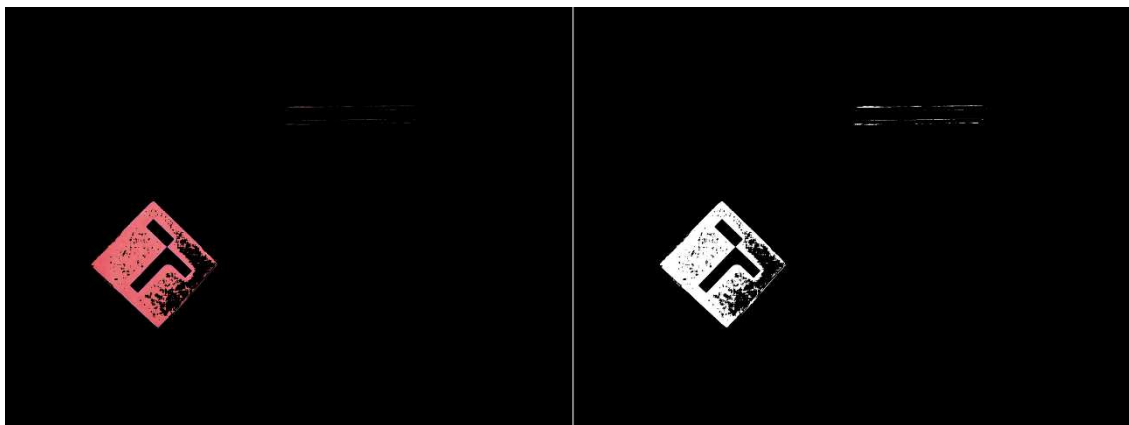
```
hsv_image = cv.cvtColor(BGR_image, cv.COLOR_BGR2HSV)
gray_image = cv.cvtColor(BGR_image, cv.COLOR_BGR2GRAY)
```

Aby bylo možné rozpoznat červenou barvu v nově vytvořeném obrázku ve formátu HSV je nutné zadat rozsah hodnot pro červenou barvu. K tomu se využije knihovna NumPy.

```
low_red = np.array([165, 70, 50])
high_red = np.array([180, 255, 255])
```

Pomocí vytvořených limitů a funkce `inRange` z knihovny OpenCV se získá obraz, kde bude pouze červená barva a ostatní se převedou na černou. Ten bude použit jako maska pro nalezení loga a převod obrázku pomocí prahování. Kód pro tyto změny je dále.

```
mask = cv.inRange(hsv_image, low_red, high_red)
ret, thresh = cv.threshold(mask, 200, 255, 0)
```



Obrázek 27: Zvýrazněné logo VUT

6.6.2 Nalezení středu loga

Lokalizace středu je provedena primárně pomocí dvou funkcí `findContours` a `boundingRect`. Funkce `findContours` nalezne hrany v binárním snímku. Funkce to provede pomocí metody `CHAIN_APPROX_SIMPLE` jenž komprimuje horizontální, vertikální a diagonální segmenty a ponechá pouze jejich koncové body. Toto se provádí v režimu `RETR_EXTERNAL`, kdy se načítají pouze vnější obrysy. Druhá použitá funkce je `boundingRect`, která vypočítá souřadnice horního levého rohu v obdélníku, který ohraničuje vstupní oblast. Dále určí výšku a šířku.

Vzhledem k tomu, že hran může být v obrázku libovolný počet a tím i počet obdélníků, které by je ohraničovaly, je třeba vybrat pouze správné. K výběru byl použit `for` cyklus, který postupně projde všechny nalezené hrany. Naleznou se souřadnice a velikost obdélníku a pokud je současně šířka a výška větší jak 500 px tak se nakreslí nalezený obdélník a dopočítá se střed vzniklého útvaru. Kód pro nalezení středu je dále. Na obrázku 28 je zobrazené označené logo a střed.

```
Contours, _ = cv.findContours(thresh, cv.RETR_EXTERNAL,
cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c in Contours:
    x,y,w,h = cv.boundingRect(c)
    if w > 500 and h > 500:
```

```

cv.rectangle(img, (x,y), (x+w, y+h), (0,0,0),2)
center_x = x + w/2
center_y = y + h/2
cv.circle(img, (int(center_x), int(center_y)),5, (0,0,0),2)

```



Obrázek 28: Označené logo VUT

6.6.3 Oříznutí snímku

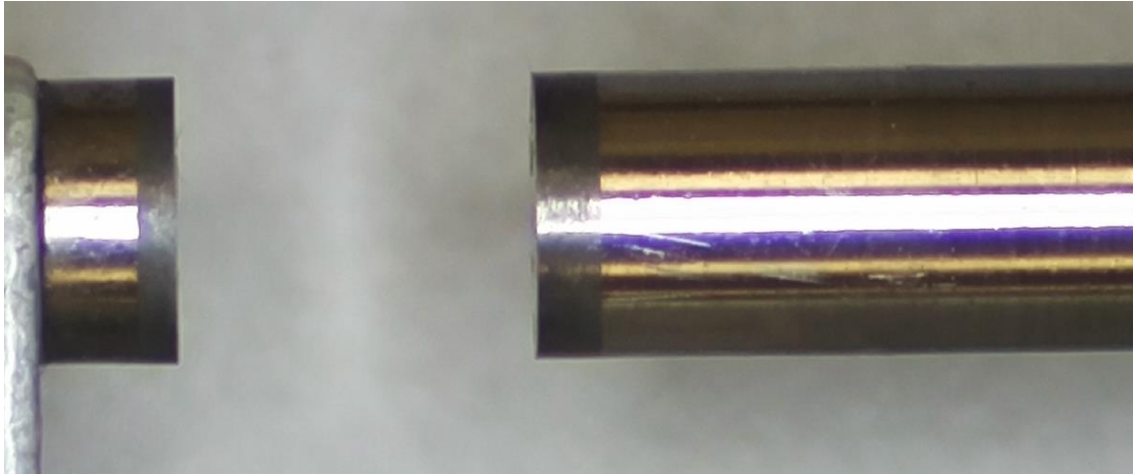
Pro oříznutí snímku byla vytvořena jednoduchá funkce, která podle zadaných parametrů vybere pouze tu část obrázku, kde je hřídel mikrometru. Vstupní hodnotou této funkce je obrázek, který bude oříznut. Poloha počátečního bodu ve vodorovném směru a délka hrany. Poloha počátečního bodu ve svislém směru a délka hrany. Výstup této funkce je nově oříznutý snímek. Dále je funkci zakomponována podmínka, aby ani jeden ze vstupních parametrů nebyl záporný. Pokud podmínka není splněna tak výstup bude vstupní obrázek beze změny. Funkce je zapsána dále.

```

def crop_image(img, y, y_length, x, x_length):
    if x >= 0 and x_length >= 0 and y >= 0 and y_length >= 0:
        crop_image = img[x:x+x_length, y:y+y_length]
    else:
        crop_image = img
    return cropped_image

```

Vstupními parametry jsou souřadnice středu loga VUT, které se upraví pomocí konstant. Výška oříznutého snímku byla nastavena na 500 px a šířka na 1200 px. Výsledný výřez je na obrázku 29.



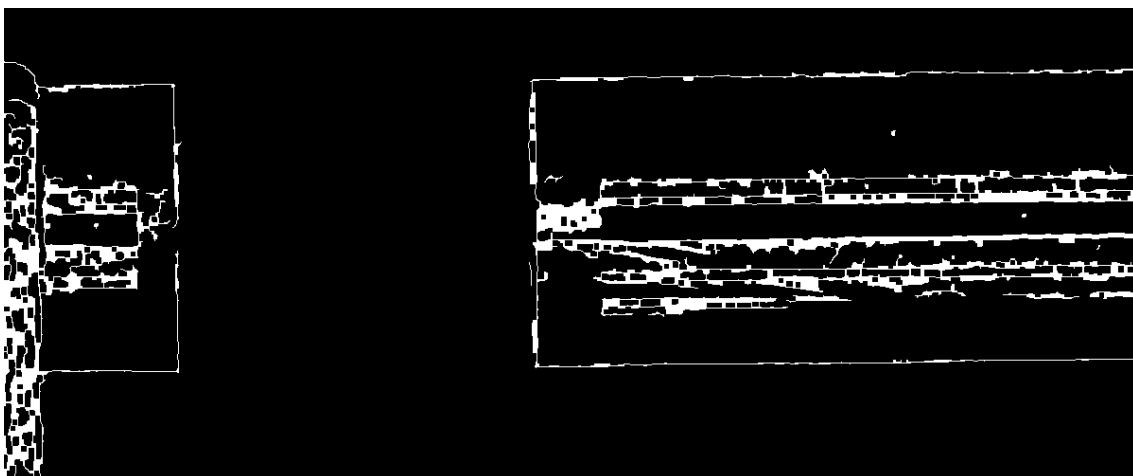
Obrázek 29: Výřez hřídele mikrometru

6.7 Detekce hran

Před detekcí samotnou se obrázek převede do odstínů šedi. Převod je popsán v 6.6.1. Detekce hran se provádí pomocí Cannyho hranového detektoru, který je součástí knihovny OpenCV. Celý algoritmus je popsán v (John Canny, 1986). Algoritmus postupně eliminuje šum Gaussovým filtrem, určí velikost a směr gradientu, provede prahování a sleduje hranu pomocí hystereze. V OpenCV je funkce označena `Canny` a má tři vstupní parametry (Szeliski Richard, 2021). První je obrázek pro hledání hran. Další dva jsou prahové hodnoty, které používá pro hledání hran.

Pro upravení nalezených hran se použijí morfologické transformace dilatace a eroze. Dilatace je operace, kdy se v binárním obraze zvětšují tloušťky jednotlivých hran a také se hrany, které jsou blízko u sebe spojí. Eroze je opak dilatace a má za úkol snížit tloušťku hran. Pomocí těchto dvou funkcí se hrany spojí. Pro měření byly obě tyto operace použity dvakrát. Na obrázku 30 je výsledný vzniklý obraz s nalezenými hranami.

```
gray = cv.cvtColor(cropped_img, cv.COLOR_BGR2GRAY)
edged = cv.Canny(gray, 40, 85)
edged = cv.dilate(edged, None, iterations = 2)
edged = cv.erode(edged, None, iterations = 2)
```



Obrázek 30: Nalezené hrany

6.7.1 Výběr hran pro další výpočty

Na upraveném snímku byly nalezeny hrany pomocí funkce `findContours`. Funkce `sort_contours` z knihovny `imutils`, porovná nalezené hrany tak, že budou seřazeny z levé strany k pravé.

```
cnts = cv.findContours( edged.copy(), cv.RETR_EXTERNAL,
cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
cnts = imutils.grab_contours(cnts)
(sort_cnts, _) = contours.sort_contours(cnts)
```

Pro nalezení správných hran se nyní opět používá funkce `boundingRect`, která ohraničí nalezené hrany. Funkce se používá dvakrát. V prvním případě se hledá minimální hodnota souřadnice `y`, aby se nalezené obdélníky vykreslily do stejné výšky a tím se i zabezpečila možnost, kdy by byl vybrán pouze střed měřicí hřídele. Poté se funkce použije podruhé a vybírají se takové obrazce, které mají šířku a výšku současně větší než 120 px. U těchto nalezených obdélníku se nastaví stejná výška na hodnotu 350 px, která pokryje celou měřicí hřídel. Funkcí `rectangle` se obdélníky nakreslí. Nalezené souřadnice a rozměry se uloží pro další zpracování

```
rects = np.zeros((10,4))
y_min = 10000
for c in sort_cnts:
    x,y,w,h = cv.boundingRect(c)
    if y < y_min:
        y_min = y
h_max = 350

for c in sort_cnts:
    x,y,w,h = cv.boundingRect(c)
    if w >= 120 and h >= 120:
        h = h_max
        y = y_min
        cv.rectangle(cropped_img, (x,y), (x+w, y+h), (0,0,0),2)
        rects[i]= ([x,y,w,h])
        i = i+1
```

6.8 Výpočet vzdálenosti v pixelech

Vzdálenost nalezených obdélníků se určí pomocí trigonometrického výpočtu. K výpočtu je třeba znát střed pravé hrany levého obdélníky a horní a dolní bod levé strany pravého obdélníku. Nalezené body jsou označeny různě velkými kružnicemi. Střed pravé strany levého obdélníku a střed levé strany pravého obdélníku je spojen čarou. K tomuto slouží následující kód.

```
j = 1
if rects[0,0] < 10:
    for k in rects:
        if not rects[j,0] <= 150:
            middle0 = np.array([0,0])
            middle0[0] = int(rects[0,0]+rects[0,2])
            middle0[1] = int(rects[0,1] + (rects[0,3]/2))

            middle1 = np.array([0,0])
            middle1[0] = int(rects[j,0])
            middle1[1] = int(rects[j,1] + (rects[j,3]/2))
```

```

high0= np.array([0,0])
high0[0] =rects[j,0]
high0[1] = rects[j,1]

low0 = np.array([0,0])
low0[0] = rects[j,0]
low0[1] = rects[j,1] + rects[j,3]

cropped_img = cv.line(cropped_img, (midle0[0],
midle0[1]), (midle1[0], midle1[1]), (255,0,0) ,1)

A1 = int(midle0[0])
A2 = int(midle0[1])
cv.circle(cropped_img, (A1,A2), 5, (255,0,0),1)

B1 = int(high0[0])
B2 = int(high0[1])
cv.circle(cropped_img, (B1,B2), 10, (255,0,0),1)

C1 = int(low0[0])
C2 = int(low0[1])
cv.circle(cropped_img, (C1,C2), 15, (255,0,0),1)
break
else:
    j= j +1

```

Z nalezených vrcholů se určí délky stran trojúhelníku pomocí rovnice (10), kterou se určí Euklidovská vzdálenost dvou bodů.

$$|AB| = \sqrt{(A1 - B1)^2 + (A2 - B2)^2} \quad (10)$$

```

a = np.sqrt( (B1 - C1)**2 + (B2 - C2)**2)
b = np.sqrt( (A1 - C1)**2 + (A2 - C2)**2)
c = np.sqrt( (A1 - B1)**2 + (A2 - B2)**2)

```

Vzdálenost pravé strany levého obdélníku a levé strany pravého obdélníku se tak určí jako výška na stranu a v trojúhelníku ABC. Pro výpočet byly využity kosinová věta a goniometrické funkce. Po úpravách je výsledná rovnice (11) použita pro výpočet vzdálenosti.

$$v_a = \sqrt{c^2 - \left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2a} \right)^2} \quad (11)$$

```

v = np.sqrt( c**2 - ( (a**2 + c**2 - b**2) / (2*a) ) **2)

```

6.9 Přepočet na milimetry

Pro přepočet na milimetry se používá jednoduchá funkce, která pomocí polynomu prvního stupně určí vzdálenost. Koeficienty pro výpočet byly experimentálně zjištěny. Měření probíhalo pro hodnoty 4,8 a 12 mm nastavených na mikrometru. Výsledky tohoto měření jsou v tabulce 6.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro kalibraci

	4 mm	8 mm	12 mm
	183	368	563
	181	369	562
	180	368	57
	181	371	558
	181	368	558
∅	181.2	368.8	559.6

Pokud vypočítané průměrné hodnoty aproximujeme přímkou tak bude mít předpis podle rovnice (12). Proměnná px je určená vzdálenost v pixelech.

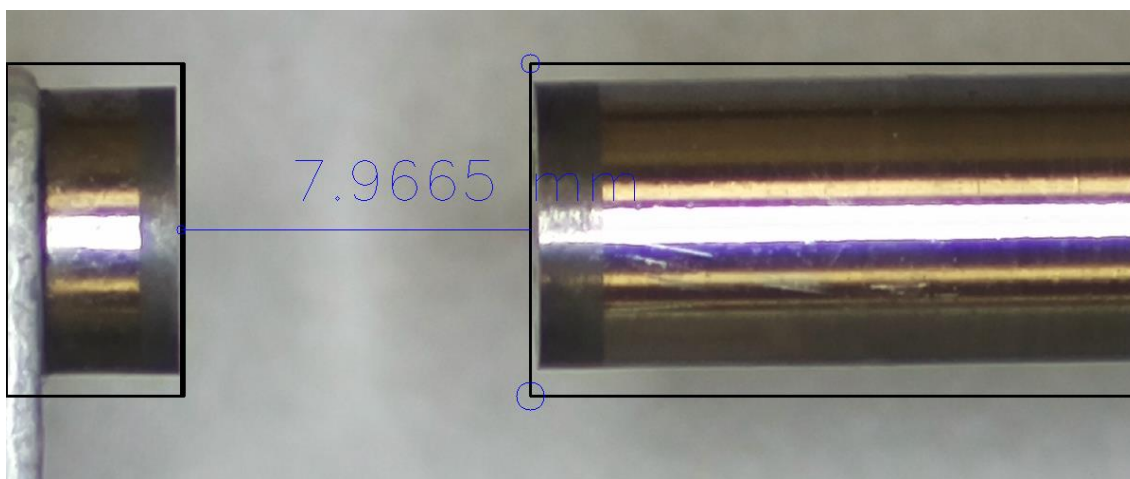
$$mm = 0.0211px + 0.1806 \quad (12)$$

Použitá rovnice ve funkci pro výpočet vzdálenosti v milimetrech.

```
def MM_distance(px):
    MM = 0.0211 * px + 0.1806
    return MM
```

Pro přehlednost je určená hodnota vložena do oříznutého obrázku na pozici (300,200). Hodnota je zaokrouhlena na 5 desetinných míst. Výsledný obrázek je uveden níže.

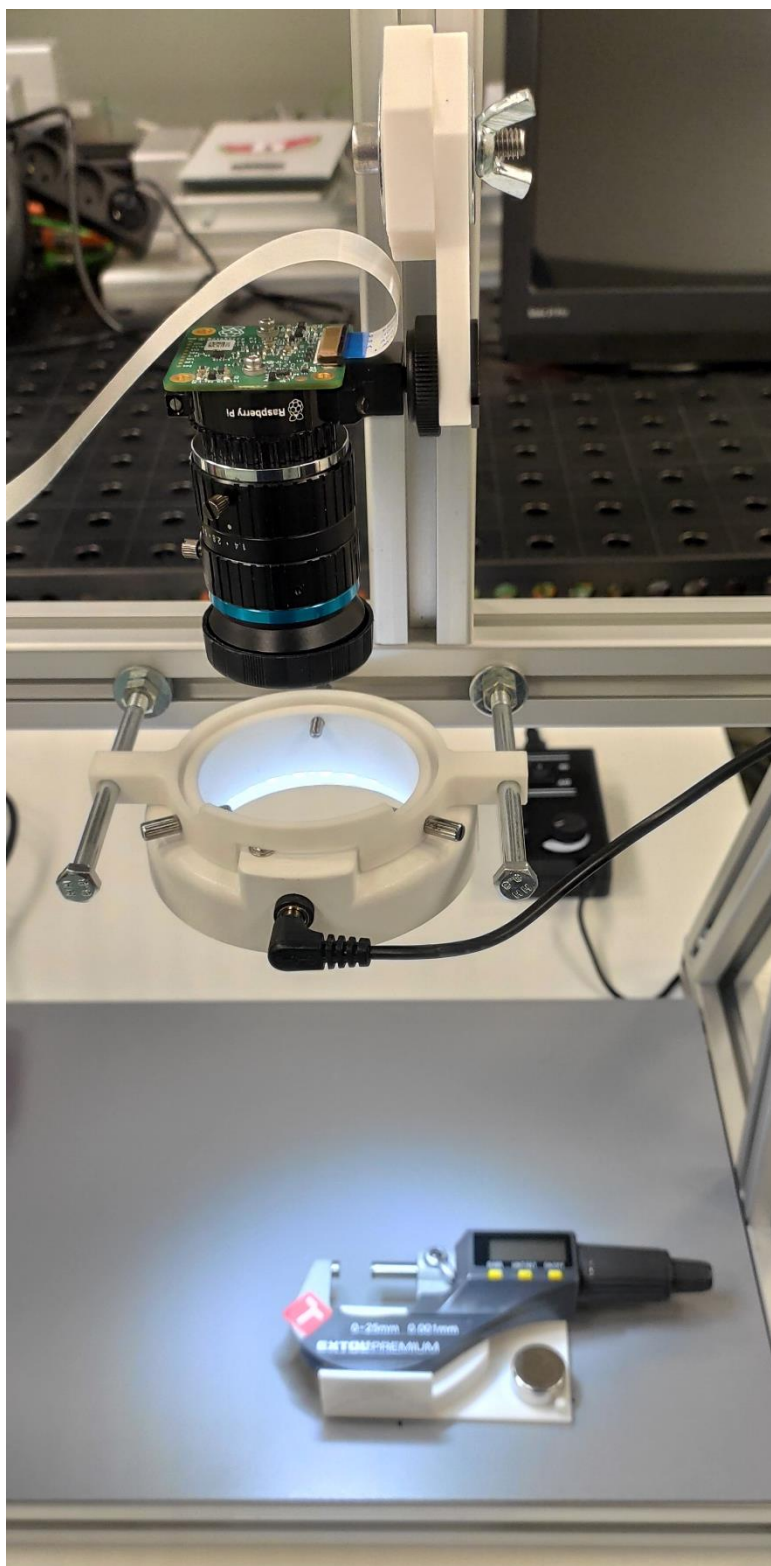
```
distance = MM_distance(v)
distance = round(distance, 5)
output_text = (str(distance) + ' mm')
cv.putText(cropped_img, output_text, (300,200),
cv.FORMATTER_FMT_DEFAULT, 2, (240,10,10))
```



Obrázek 31: Vykreslená hodnota do oříznutého snímku

6.10 Experimentální měření rozměru

Na obrázku 32 jsou zobrazeny vzájemné polohy mikrometru v držáku, osvětlovače a kamery s objektivem napojené na Raspberry Pie. Kamera byla umístěna 32 cm nad podložkou.



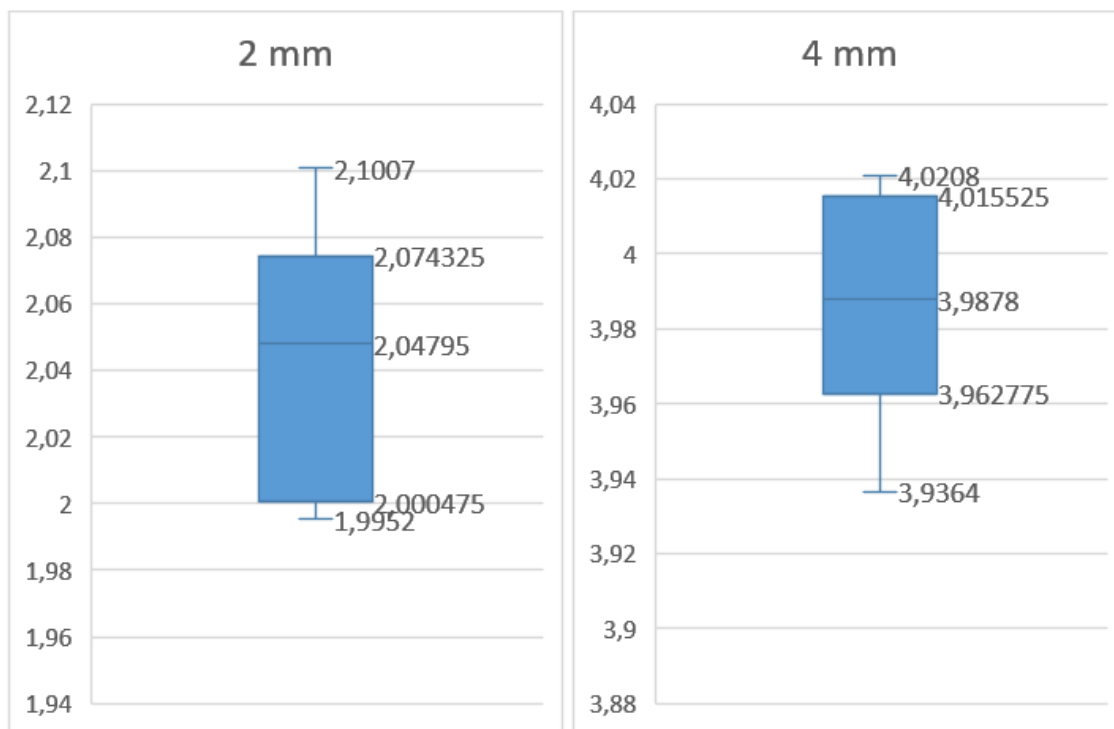
Obrázek 32: Měření na platformě Raspberry Pie (Foto vlastní)

Měření, které by ověřilo nastavení snímání a program samotný, bylo realizováno na šesti různých hodnotách, konkrétně 4,6,8,10 a 12 mm, přičemž se opakování opakovalo desetkrát. Naměřená data jsou v horní části tabulky 7 a v dolní části jsou uvedeny směrodatné odchylky pro jednotlivá měření.

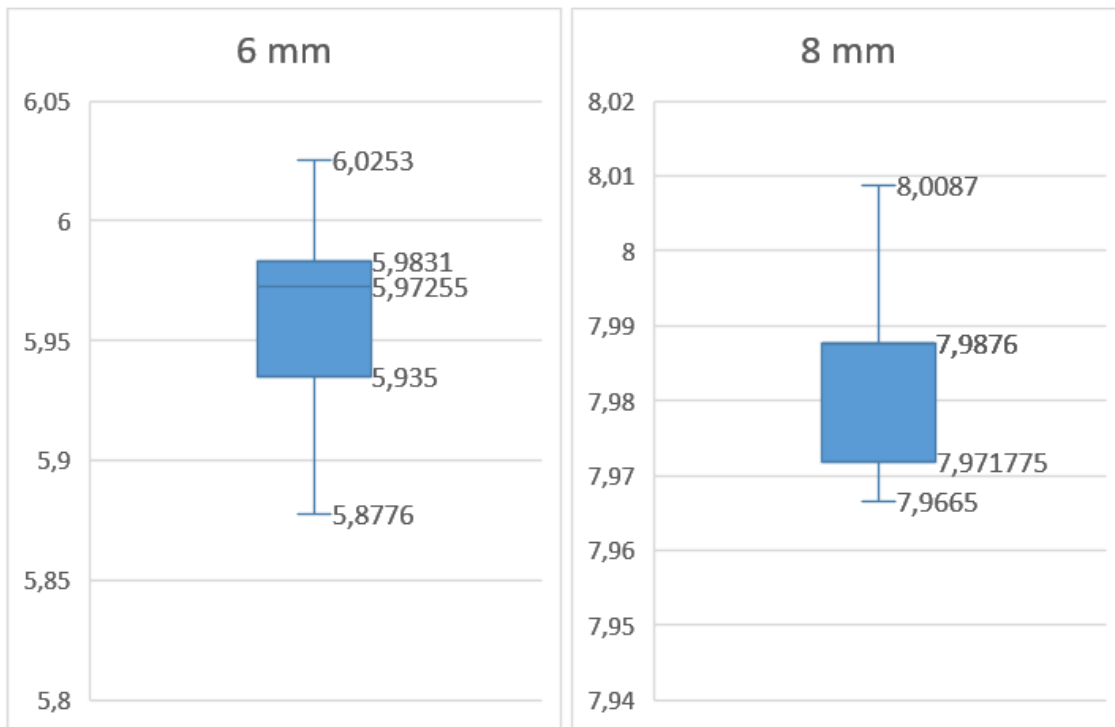
Tabulka 7: Naměřené hodnoty na pomoci kamery HQ Raspberry Pie

2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
1.992	3.9364	5.926	8.0087	9.8022	11.9122
2.1007	4.0208	6.0253	7.8821	9.9499	11.8911
2.0585	3.9786	5.9831	7.9876	9.8444	11.9544
2.0163	3.9786	5.9831	7.9665	9.9499	11.9333
2.0585	3.9997	5.8776	7.9876	9.971	11.9333
2.0374	3.9364	5.962	8.0087	9.9499	11.9122
2.0796	4.0208	5.962	7.9876	9.9288	11.9755
1.9952	3.997	5.8987	7.9876	9.971	11.9122
2.0796	4.0208	5.9831	7.9876	9.8866	11.9544
1.9952	3.9575	6.0042	7.8399	9.971	11.9312
Směrodatná odchylka pro 2 mm	Směrodatná odchylka pro 4 mm	Směrodatná odchylka pro 6 mm	Směrodatná odchylka pro 8 mm	Směrodatná odchylka pro 10 mm	Směrodatná odchylka pro 12 mm
0.03751	0.03125	0.04419	0.05375	0.05587	0.02396

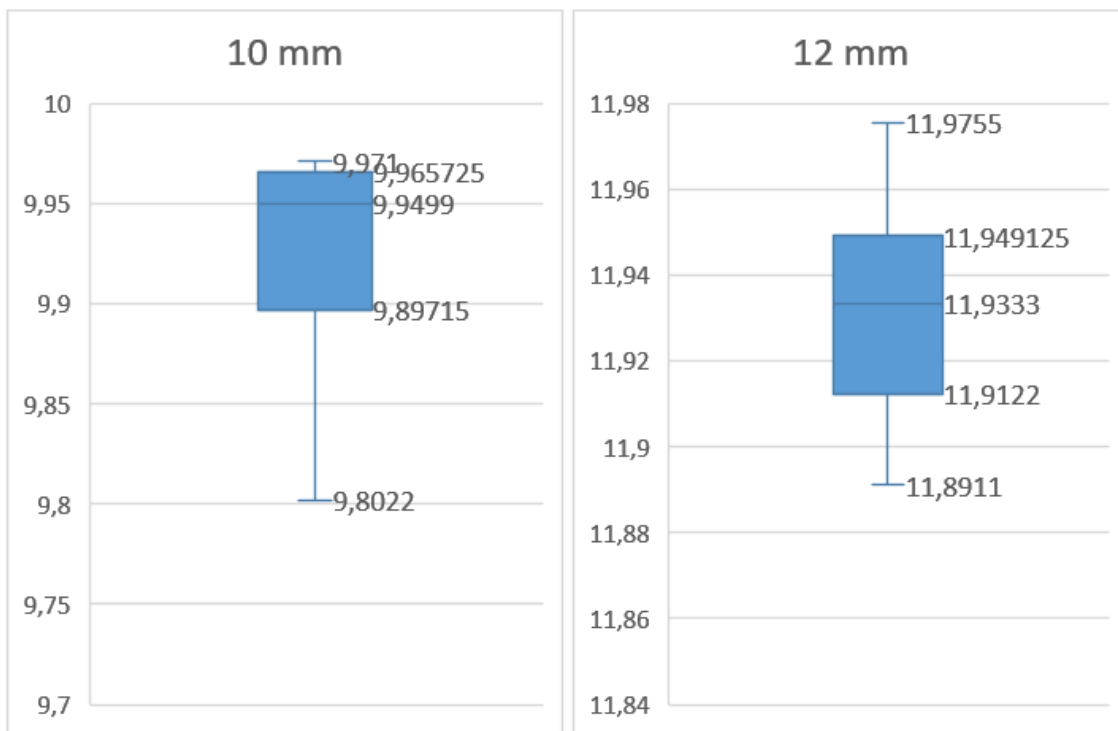
V následujících obrázcích jsou uvedeny krabicové grafy, které ukazují maximální hodnotu, horní kvartil, medián, dolní kvartil a minimální hodnotu.



Obrázek 33: Krabicové grafy pro měření 2 mm a 4 mm



Obrázek 34: Krabicové grafy pro měření 6 mm a 8 mm



Obrázek 35: Krabicové grafy pro měření 10 mm a 12 mm

7 REALIZACE A VYHODNOCENÍ POMOCÍ SYSTÉMU COGNEX

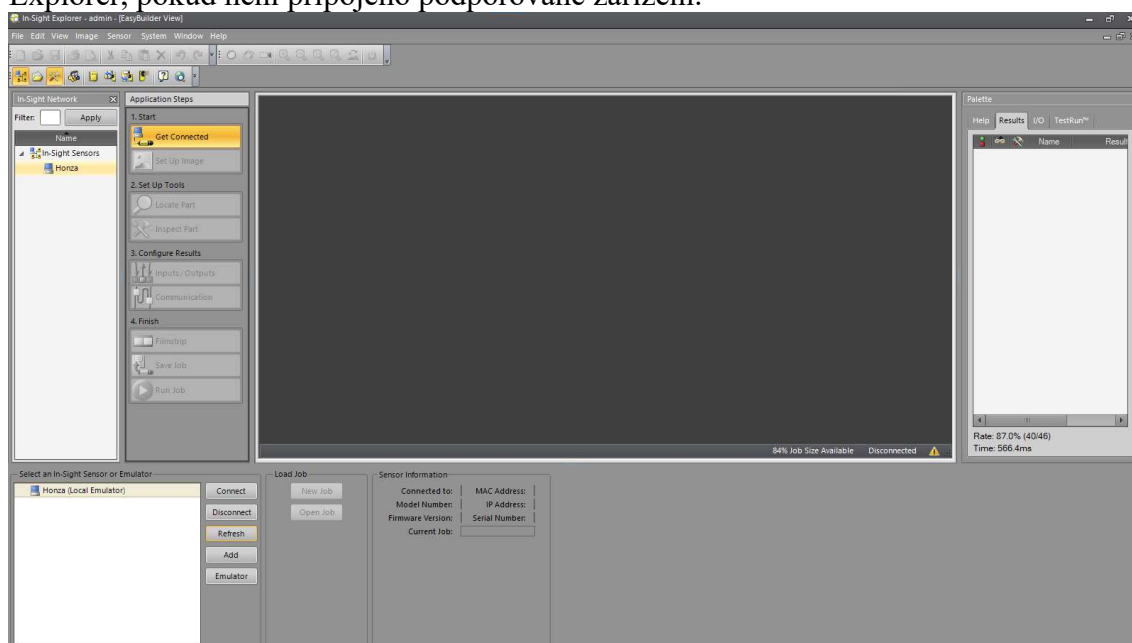
Aby bylo možné vytvořit program, který by využil snímač Cognex je nutné nainstalovat In-Sight Explorer, kde je možné nastavit parametry snímače.

7.1 In-Sight Explorer

In-Sight Explorer poskytuje výkonnou a zcela integrovanou konfiguraci, správu a uživatelské rozhraní systému strojového vidění. Vše je součástí jednoho softwarového balíčku. Program poskytuje dvě nezávislá vývojová prostředí, a to *Easy Builder* a *Spreadsheet*. Prostředí *Spreadsheet* je klasické vývojové prostředí pro In-Sight Explorer. Nabízí nejflexibilnější a plný set vývojových funkcí. Easy Builder je prostředí, kde se postupnými jednoduchými kroky nastaví aplikace. Má omezené funkce. Popřipojení kamery k programu se automaticky zobrazí takové prostředí, které daná kamera podporuje. V případě použité kamery Cognex In Sight 2001 Mini camera bylo zvoleno prostředí EasyBuilder, jelikož jde pouze o kamerový senzor nižší řady.

Instalace

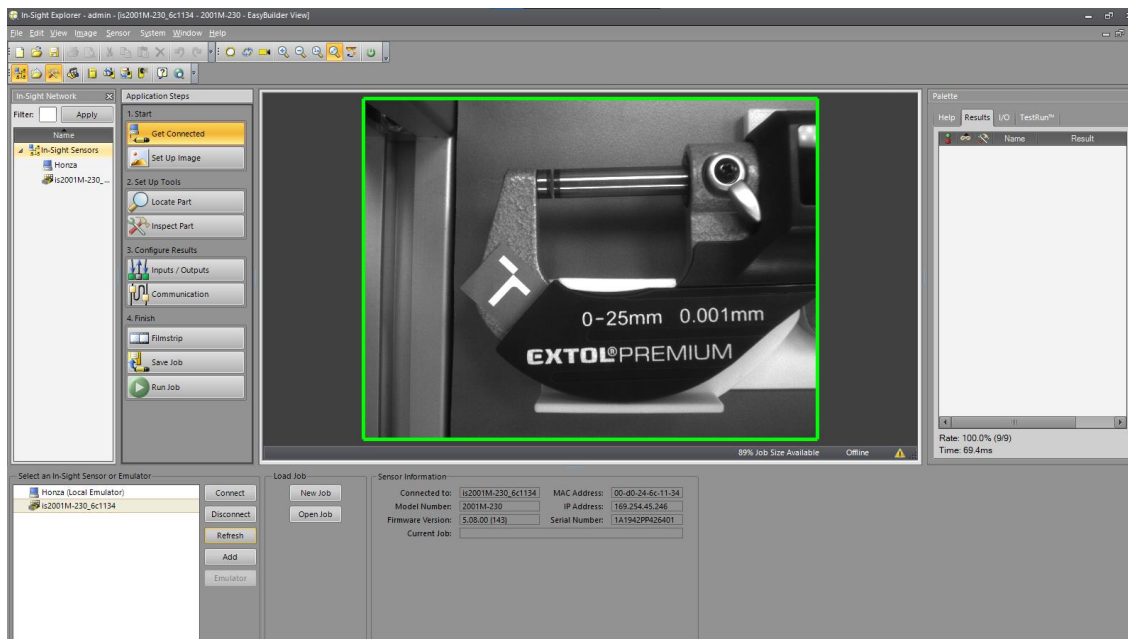
Program In-Sight Explorer volně dostupný na stránkách firmy Cognex. Odkaz na poslední verzi 6.1.3 z března roku 2021 je [zde](#). Instalace programu probíhá standardním způsobem jako většina programů pro Windows. Obrázek 36 zobrazuje program In-Sight Explorer, pokud není připojeno podporované zařízení.



Obrázek 36: In-Sight Explorer: prostředí programu

7.2 Připojení a nastavení kamerového snímače

Po připojení kamery přes ethernetové rozhraní a kliknutím na *Refresh* se přidá kamera na levé straně do dvou oken (*In-sight Network*, *Select an In-Sight Sensor or Emulator*). Poté se po výběru kamery v levé dolní nabídce může zvolit *Connect*, čímž se kamera spojí s PC. Toto je vidět na obrázku 37.



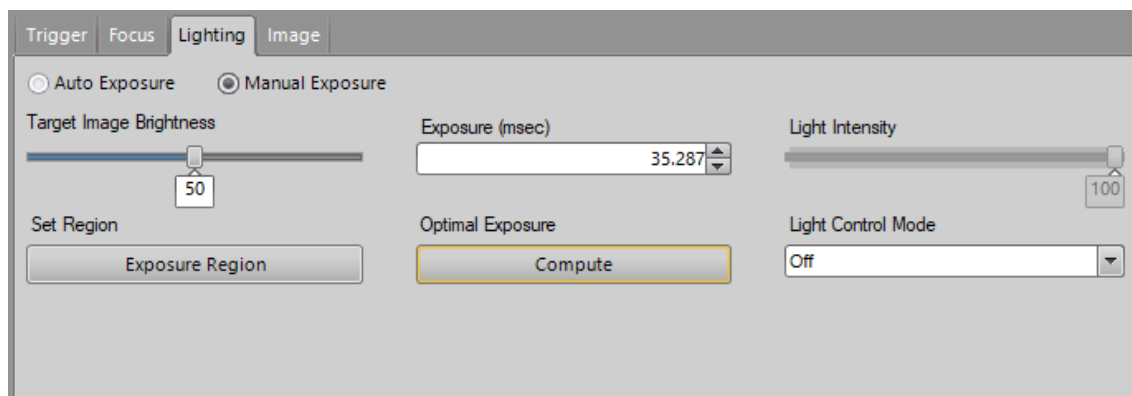
Obrázek 37: První snímek po připojení kamery

Jak je patrné z obrázku 37, kamera je připojena a odemkly se všechny možnosti ve sloupci s názvem *Application Steps* a zobrazila se podložka spolu s mikrometrem umístěným v držáku. V základním nastavení, při které byl pořízen snímek na obrázku 23 je zapnutý osvětlovač. Proto je snímek poměrně tmavý s výrazným středem od odrazu. Pro účely této aplikace bude vhodné osvětlovač vypnout. Tuto volbu je možné provést v záložce *Set Up Image*. Po kliknutí se v dolní části programu zobrazí 4 další záložky pro nastavení spouště, zaostření, osvětlení a snímku samotného. Nastavené spouště je na obrázku 36. V tomto nastavení byla provedena pouze změna v intervalu spouštění při online režimu, konkrétně z výchozí hodnoty 0 na 500, která je pro účely této aplikace dostačující.



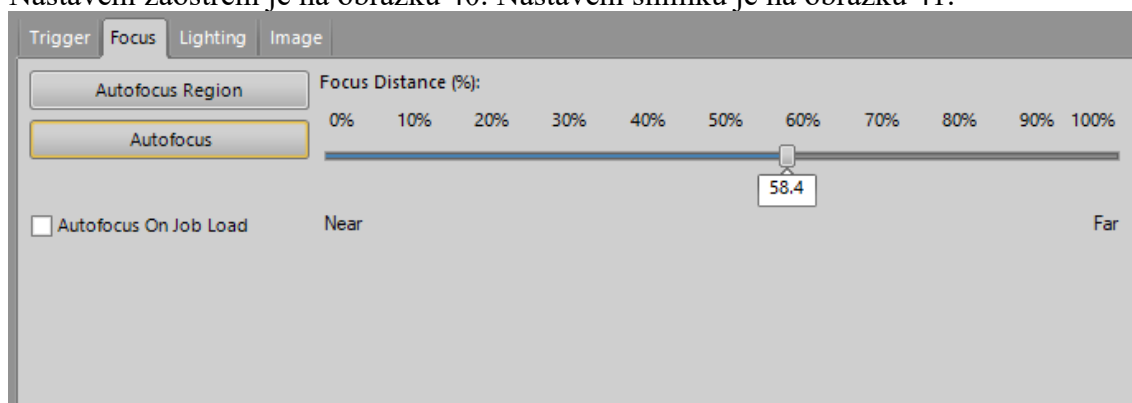
Obrázek 38: Nastavení spouště

Před nastavováním zaostření je vhodné vypnout osvětlovač. Tato možnost se objeví po kliknutí na *Lighting*. V tomto nastavení byl vypnut osvětlovač, expozice změněna na manuální režim a použita možnost automatického vypočítání doby expozice. Vhodně nastavené možnosti osvětlení jsou na obrázku 39.

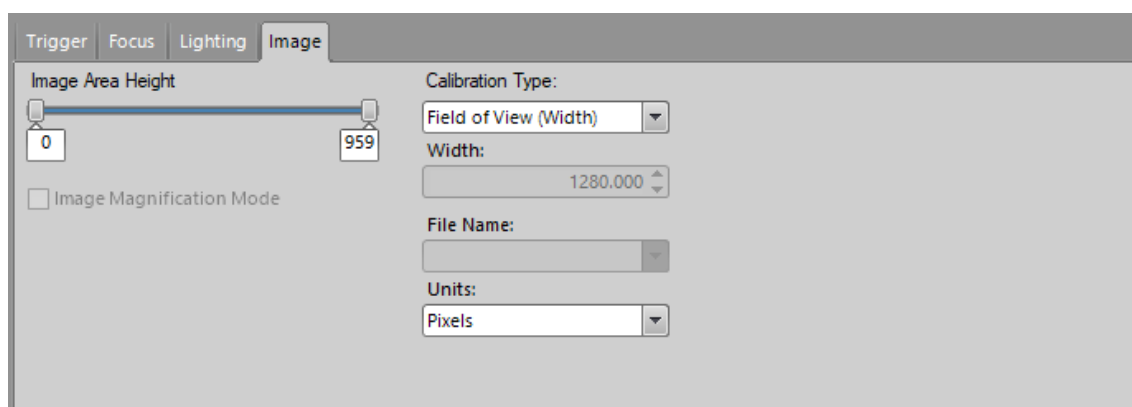


Obrázek 39: Nastavení osvětlovače

V nastavení zaostření bylo pouze použita možnost automatického nastavení ohniskové vzdálenosti a tím zaostření. Nastavení snímku je vhodné, pokud je zapotřebí omezit velikost záběru nebo změnit jednotky. V tomto nastavení nebylo nic měněno. Nastavení zaostření je na obrázku 40. Nastavení snímku je na obrázku 41.



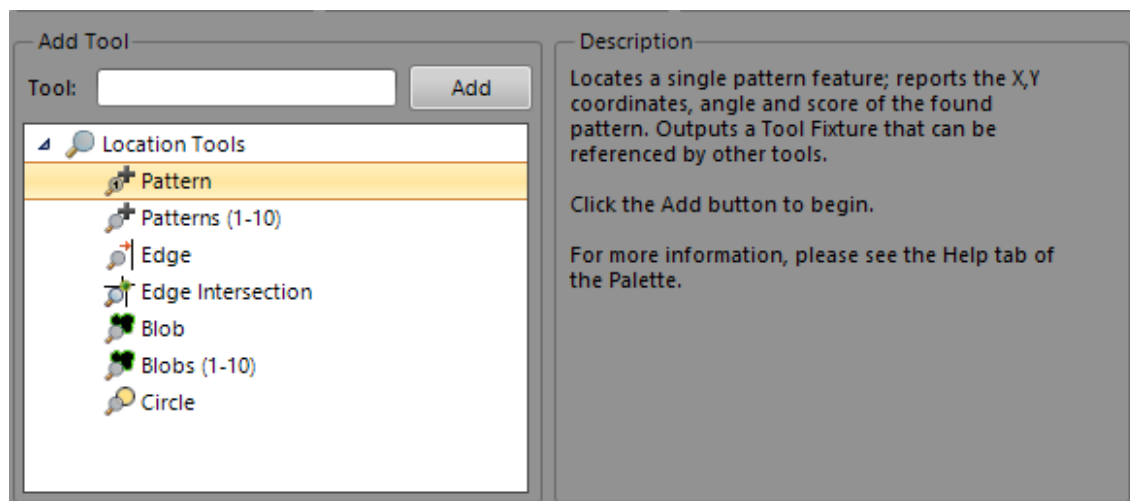
Obrázek 40: Nastavení zaostření



Obrázek 41: Nastavení snímku

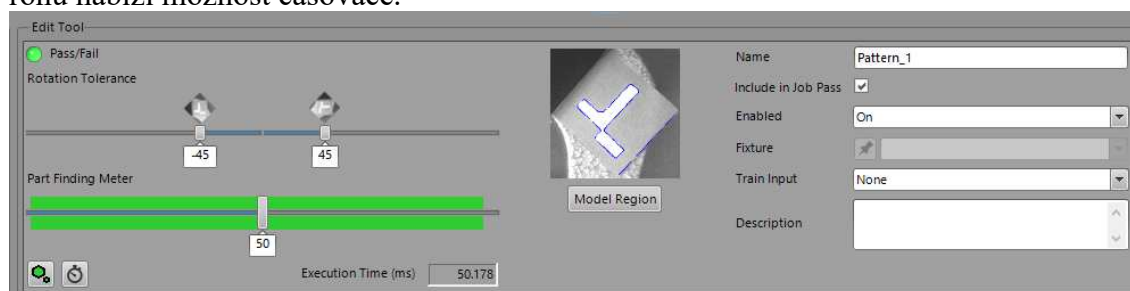
7.3 Lokalizace a měření

Tato část bude věnována nastavení lokalizace předem daného vzoru, kterým je logo VUT a následné detekci hran. V záložce Locate Part je celkem 7 různých možností. Po kliknutí na jednotlivé z nich se vpravo zobrazí krátký popis, jak je vidět na obrázku 42. Pro lokalizaci loga VUT byla vybrána možnost *Pattern*, která se potvrdí kliknutím na tlačítko *Add*. Poté se přes snímek zobrazí obdélníkový rámeček, kterým se nastaví umístění vzoru. Velikost, rotace a umístění se provádí pomocí myši. Potvrdí se tlačítkem OK.



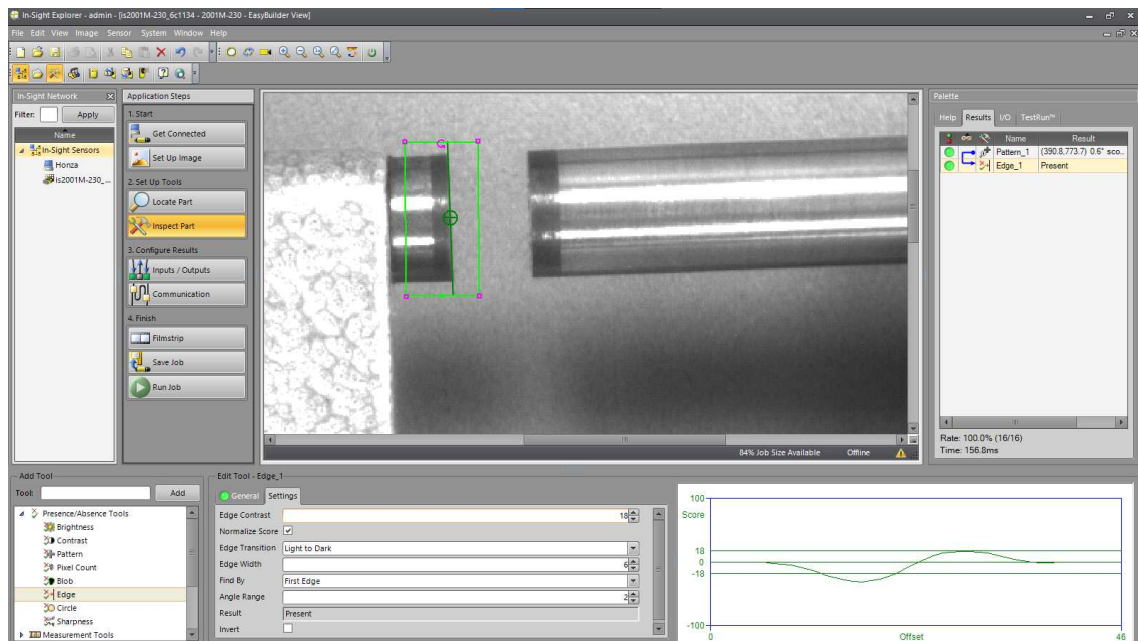
Obrázek 42: Nastavení lokalizace

Na obrázku 43 jsou zobrazeny možnosti nastavení lokalizace vzoru. V levé části je nastavení tolerance rotace a rozsahu shody trénovaného vzoru s nově pořízeným snímkem. V levém dolním rohu je zeleně označený symbol šestiúhelníku, kterým je možné zapnout rozměrovou toleranci na hledaný vzor. Druhý symbol v levém dolním rohu nabízí možnost časovače.

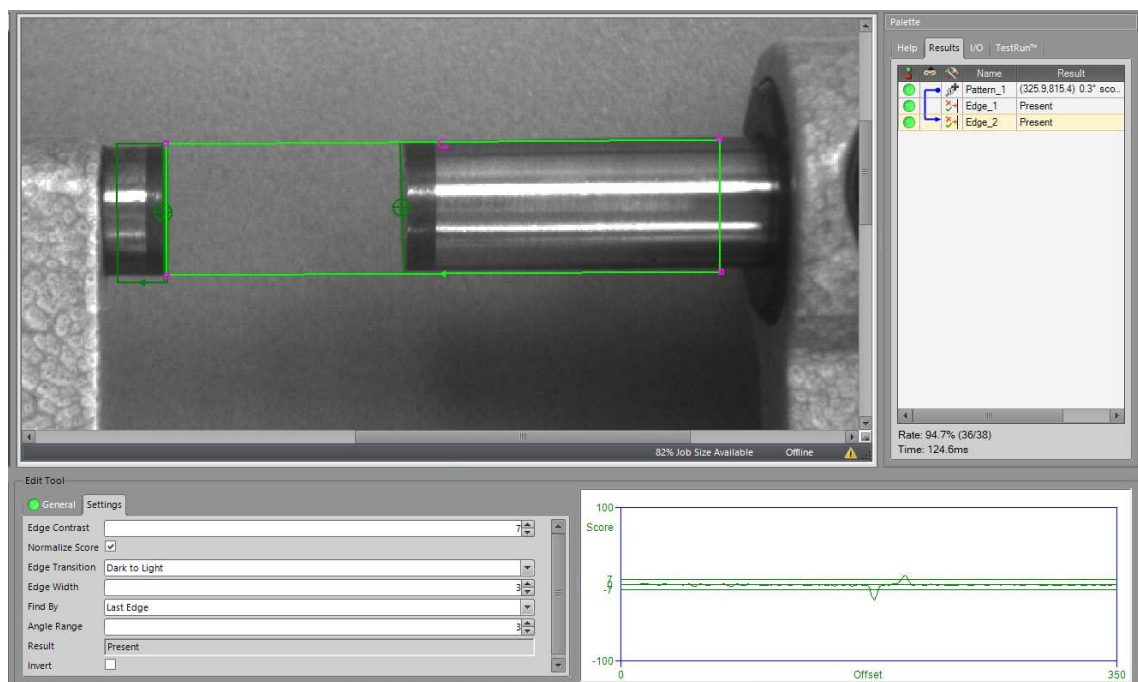


Obrázek 43: Nastavení vzoru

Nyní již je mikrometr lokalizovaný a je možné nastavit polohu hledaných hran, které se pak budou dále vyhodnocovat. Pro lokalizaci hran se využije záložka *Inspect Part*. V levé části se vybere možnost *Edge* a myší se nastaví místo, kde se bude hrana nacházet. V pravé dolní části je vidět křivka, která představuje ohodnocení kontrastu hrany. Pokud je hodnota záporná jde o přechod ze světlejší části do tmavší. Vyhodnocování probíhá ve směru šipky na straně zeleného rámečku. Na obrázku 44 je nastaven směr z prázdného prostoru k měřené hraně. V nastavení detekce hrany je vybrána možnost *Light to Dark*, aby byla detekována první hrana s daným kontrastem. Tloušťka hrany je nastavena na 2 px a rozsah natočení na 2. Přidání lokalizace další hrany probíhá obdobným způsobem. Rozdíl bude pouze v nastavení přechodu hrany, kde se vybere možnost *Dark to Light* a detekovat se bude poslední takto nalezená hrana. Nastavení pro druhou hranu je na obrázku 45.



Obrázek 44: Nastavení první hrany

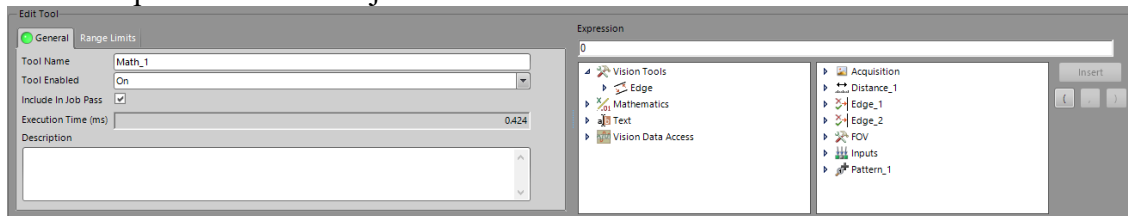


Obrázek 45: Nastavení druhé hrany

Další funkce nezbytná pro zjištění rozměrů v záložce *Measurement Tools* je *Distance*, kde se jako vstup nastaví získané hrany a výstup z této funkce bude vzdálenost středu hran v pixelech. Důležité nastavení pro tuto funkci je typ měření, kde bylo zvoleno měření *Mid-point to Mid-point* a dále byl nastaven rozsah, kdy výstup může být *True* nebo *False* pokud získaný rozměr je nebo není v daném rozmezí. Pro toto měření se nastaví rozsah 0 až 300, protože není potřeba vědět, zda je získaný počet pixelů v konkrétním rozsahu.

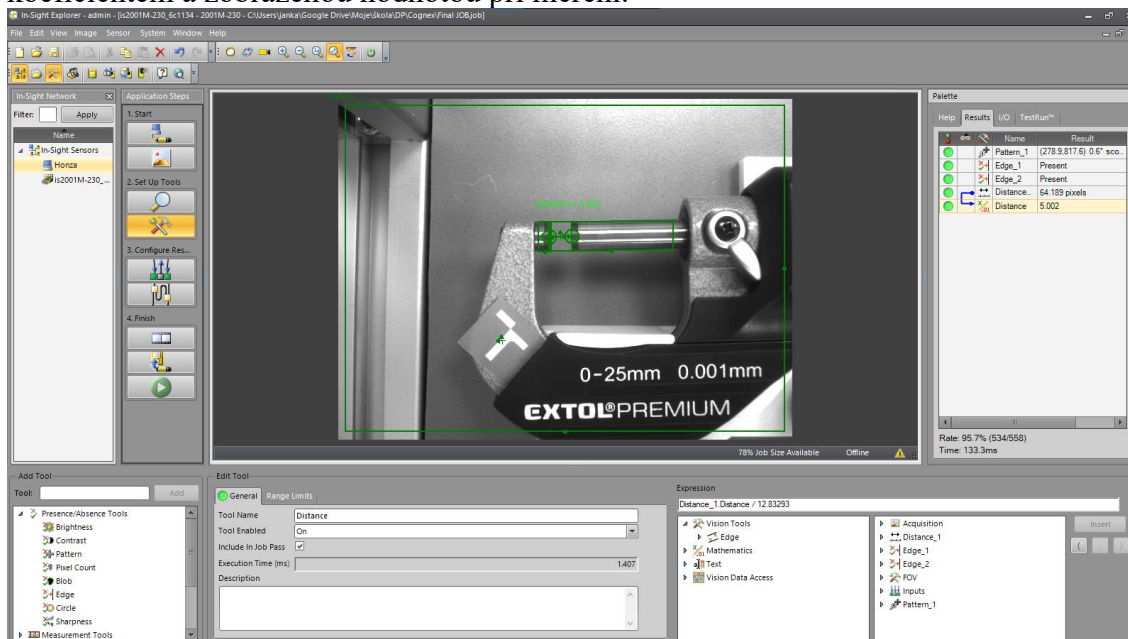
7.4 Přepočítání na milimetry

Počet pixelů nicméně není požadovaná vzdálenost a není příliš vypovídající. Pro přepočítání na milimetry je zapotřebí použít funkci *Math* v záložce *Math & Logic Tools*. V tomto nastavení je možné použít hodnoty a údaje získané z předchozích operací. Základní rozložení pro toto nastavení je na obrázku 46.



Obrázek 46: Nastavení matematického přepočtu

Pro určení hodnot pro přepočítání bylo provedeno 20 opakovaných měření. Na mikrometru byla nastavena hodnota 8 mm. Z průměrné hodnoty tohoto měření byl určen koeficient pro přepočítání na milimetry. Na obrázku 47 je nastavení výpočtu s už zadaným koeficientem a zobrazenou hodnotou při měření.



Obrázek 47: Výpis získané hodnoty

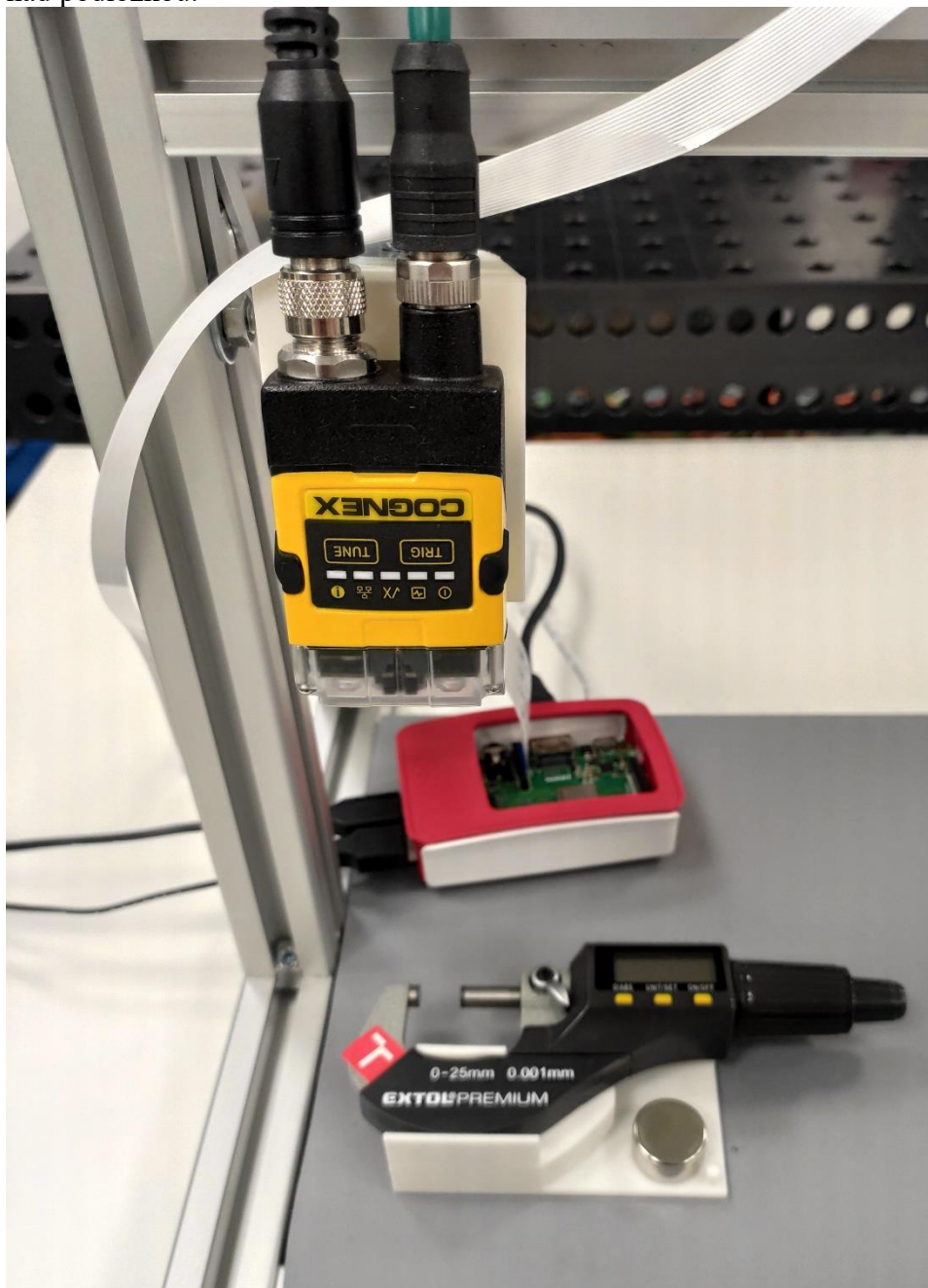
Tabulka 8: Naměřené hodnoty vzdálenosti v pixelech pro kalibraci

102.861	102.570	102.625	102.550	102.666
102.611	102.637	102.614	102.556	102.626
102.584	102.634	102.534	102.522	102.588
103.584	102.591	102.700	102.641	102.575

Průměrná hodnota vypočítaná z tabulky 8 je 102,6635. Po vydělení hodnotou na mikrometru (8 mm) má výsledný koeficient hodnotu 12,83293.

7.5 Experimentální měření rozměrů

Na obrázku 48 je zobrazeno měření pomocí kamery Cognex. Kamery byla umístěna 14 cm nad podložkou.



Obrázek 48: Měření pomocí kamery Cognex (Foto vlastní)

Aby bylo možné prokázat shodu získané hodnoty z platformy Cognex s údajem na mikrometru byly provedeny dva typy experimentálního měření. První se zaměřil na měření hodnoty v maximálním rozsahu. Druhý způsob se zaměřil na opakovatelnost měření při jedné nastavené hodnotě.

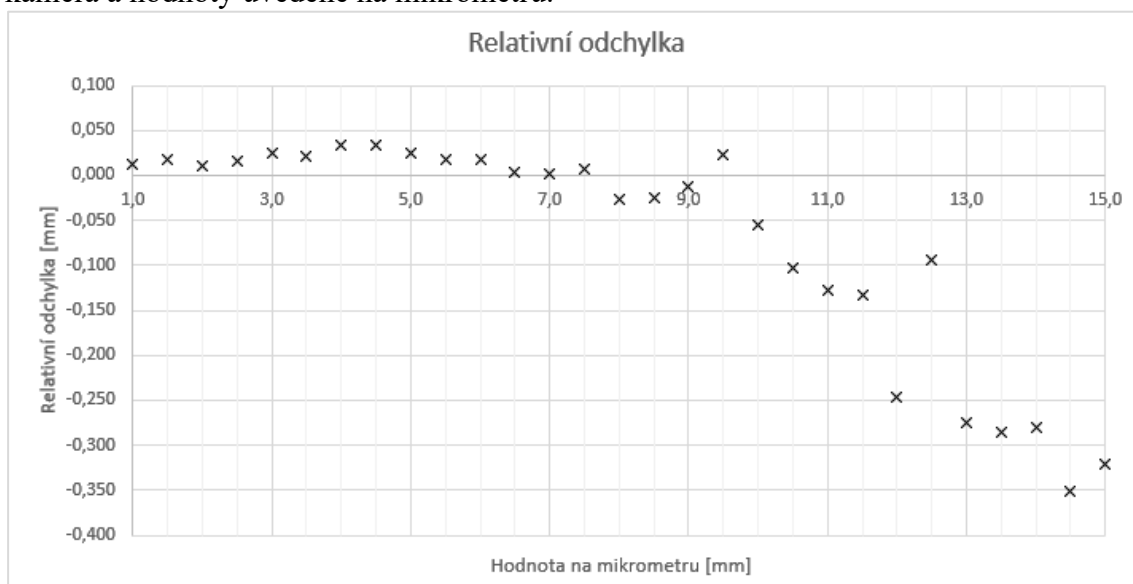
7.5.1 Měření rozsahu

Při tomto měření bylo provedeno celkem 29 měření, kdy se začalo na hodnotě 1 mm a po půl milimetru se přidávalo až do hodnoty 15 mm.

Tabulka 9: Data z měření rozsahu

Mikrometr	Cognex	Mikrometr	Cognex
1	1.012	8.5	8.475
1.5	1.518	9	8.987
2	2.01	9.5	9.523
2.5	2.515	10	9.945
3	3.024	10.5	10.397
3.5	3.522	11	10.872
4	4.033	11.5	11.367
4.5	4.534	12	11.754
5	5.024	12.5	12.406
5.5	5.518	13	12.725
6	6.017	13.5	13.214
6.5	6.504	14	13.72
7	7.002	14.5	14.148
7.5	7.507	15	14.679
8	7.973		

Na obrázku 49 je v grafu znázorněna relativní odchylka hodnoty, kterou vyhodnotila kamera a hodnoty uvedené na mikrometru.



Obrázek 49: Relativní odchylka hodnoty vyhodnocené kamerou Cognex a hodnoty na mikrometru

7.5.2 Měření opakovatelnosti

Během tohoto měření bylo provedeno 60 opakování měření pro nastavenou hodnotu na mikrometru. Celkově byly provedeny 2 série měření pro hodnoty 5 a 8 mm. Naměřená data jsou v tabulce 10 a tabulce 11.

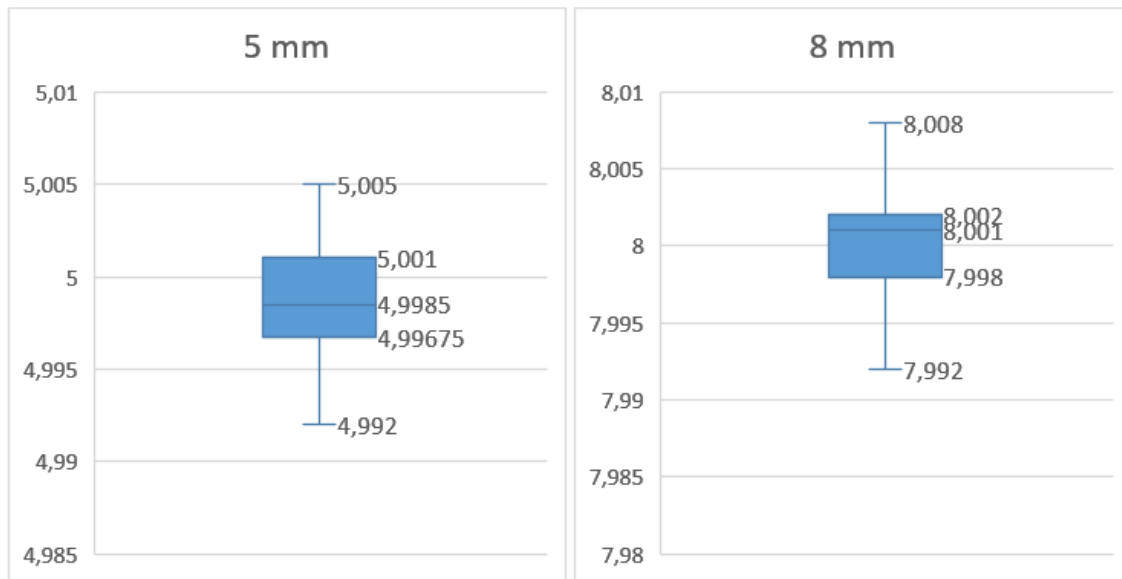
Tabulka 10: Data z měření opakovatelnosti - 5 mm

4.997	4.995	4.998	4.999	5.003	4.992
4.997	4.993	4.998	4.996	4.998	4.996
5.000	4.998	5.002	4.998	5.000	5.005
5.000	4.999	5.004	4.998	4.998	5.003
4.997	4.994	4.995	4.997	5.003	4.995
4.999	4.997	4.996	4.999	4.996	4.992
4.995	4.996	4.998	4.999	5.001	5.003
5.000	5.000	5.001	4.998	5.002	5.000
5.001	5.002	4.993	4.999	5.003	5.000
5.003	4.997	5.001	4.992	5.008	5.002

Tabulka 11: Data z měření opakovatelnosti – 8 mm

7.999	8.002	8.003	7.993	8.002	8.000
7.996	8.003	7.998	8.003	8.005	8.002
8.001	7.998	8.000	7.992	7.998	7.992
8.006	8.001	7.998	8.001	8.004	8.001
8.002	8.008	8.004	7.998	8.001	7.998
8.008	7.999	7.999	7.999	7.998	7.997
8.000	8.001	8.004	8.001	7.999	8.005
7.995	8.001	8.002	8.003	7.995	7.994
8.000	8.000	8.001	8.002	8.001	7.997
8.001	8.002	7.999	8.003	8.001	8.003

Na obrázku 50 jsou uvedeny krabicové grafy, které ukazují maximální hodnotu, horní kvartil, medián, dolní kvartil a minimální hodnotu pro provedené měření opakovatelnosti.



Obrázek 50: Krabicové grafy pro měření opakovatelnosti

8 SROVNÁNÍ PLATFORMEM A DISKUZU K VÝSLEDKŮM

Obě zkoumané platformy jsou schopny měřit rozměry. Velmi důležitý faktor, který ovlivňuje přesnost získaných výsledků u obou řešení jsou světelné podmínky a prvotní kalibrace pro nastavení přepočtu pixelů na milimetry.

Platforma Cognex

Toto průmyslové řešení se vyznačovalo velkou rychlostí zpracování obrazu, který dosahoval stovek milisekund. Dáno to je především nižším rozlišením snímače, ale také optimalizovanými algoritmy přesně pro tyto účely. Výhodou také je poměrně snadné nastavení programu pro vyhodnocování. Vždy je, ale nutné mít přesně dané cíle co se má měřit. Toto je dobře vidět na obrázku 49, kde se od měřené hodnoty 10 mm zhoršují výsledky. Způsobeno to by zkreslením měření při větším rozevření měřících hřidel. V rozmezí 1 až 10 milimetrů se naměřená hodnoty pohybovala v rozmezí $\pm 50 \mu\text{m}$.

Při opakovaném měření, kdy se bylo provedeno 60 měření při téměř stejných podmínkách v rozmezí pár minut jsou výsledky velmi dobré, Při měření 5 mm vyšel medián 4.9985. Při měření 8 mm vyšel medián 8.001.

Platforma Raspberry Pie

Zdánlivou výhodou tohoto řešení je vyšší rozlišení kamerového snímače. V průběhu práce se nicméně ukázalo, jako mírně problematické, protože zpracování snímku v rozlišení 12.3 Mpix probíhá několik vteřin. Záznam snímku a uložení snímku trvalo přibližně 25 s. Toto řešení by se po dalších úpravách dalo používat v místech s žádanou kvalitou snímku. Velký vliv na celkovém záznamu a vyhodnocení má samozřejmě i hardware Raspberry, který není primárně navržen ke grafickým výpočtům.

Stejně jako na platformě Cognex i zde hraje velkou roli zkreslení obrazu při měření většího rozměru. Tento problém by bylo možné eliminovat zvýšením vzdálenosti objektivu od předmětu. Nejpřesněji bylo měření pro 8 mm. Zde je medián měření 7.9876.

9 ZÁVĚR

V úvodu této práce je popsáno měření a jeho metody, které se běžně používají. Práce pokračuje obecným popisem technického vybavení pro záznam obrazu, tj. objektiv, snímač a osvětlovače.

V kapitole 3 jsou popsány průmyslové systémy pro obrazovou analýzu. Dvě ze tří firem jsou firmy světového významu a třetí je ryze česká firma s kořeny na VUT.

Dále byl popsán návrh měřicího standu, který byl vyroben z hliníkového profilu. K měřicímu standu jsou měřicí zařízení přichycena pomocí držáků, které mají možnost nastavení do požadované polohy. Držáky byly z velké části vyrobeny pomocí metody 3D tisku. V další kapitole je popsáno technické vybavení, které bylo použito pro měření rozměrů.

Těžištěm práce je návrh softwaru pro měření rozměrů na platformě Raspberry Pie 3. Program byl vytvořen v programovacím jazyku Python s využitím knihovny OpenCV a dalších. Popis programu je rozdělen do několika podkapitol. Na začátku je popsána instalace knihoven do operačního systému Raspbian a nastavení. Dále bylo řešeno zachycení obrazu pomocí kamerového snímače Sony. Obraz byl uložen a poté postupně zpracován. Důležitá část programu je lokalizace loga VUT, které bylo umístěno na měřený předmět – mikrometr. Následující kroky se věnují metodám použitým pro vyhodnocení obrazu a kalibracím pro přepočítání na milimetry. V neposlední řadě jsou uvedeny výsledky provedení měření, které jsou znázorněny v grafech. V další části je uveden popis programu In-Sight, který byl použit pro měření na platformě Cognex. Postupně jsou uvedeny jednotlivé kroky nezbytné pro nastavení programu. Na závěr této kapitoly jsou uvedeny dvě metody měření, kterými se ověřovalo nastavení programu a přesnost.

10 LITERATURA

- [1] POSPÍŠIL, Miroslav and Vladimír LUDVÍK. 2010. Sborníky technické harmonizace 2010: TERMINOLOGIE Z OBLASTI METROLOGIE [online]. 2. vydání. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, Praha. Available at: https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [2] SVOBODOVÁ, Helena. Vyjadřování přesnosti měřidel a měření. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 47 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [3] LUDVÍK, Vladimír. 2005. SBORNÍKY TECHNICKÉ HARMONIZACE 2005: NEJISTOTY MĚŘENÍ, PŘESNOST MĚŘENÍ, SPRÁVNOST MĚŘENÍ A OTÁZKY SPOJENÉ SE VZÁJEMNOU POROVNATELNOSTÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A S PROHLÁŠENÍM O SHODĚ S TECHNICKÝMI SPECIFIKACEMI [online]. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, Praha. Available at: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf
- [4] SOUKUP, Josef, SKOČILAS, Jan a Katedra strojů a mechaniky. Technická měření. Ústí n. L: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2014. ISBN 978-80-7414-730-2. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:a76ae8f0-c3fa-11e5-b93e-005056827e52>
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. Fyzika. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1
- [6] ČECH, Jaroslav. Technické měření oboru: určeno pro posl. pětiletého studia fak. strojní. Brno: VUT, 1990. ISBN 80-214-0092-7. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:2289ab40-c6fd-11e3-aec3-005056827e52>
- [7] FIALOVÁ, Dana a Vladislav GRADEK. Zámečnické práce a údržba: technologie: učebnice pro odborná učiliště. Praha: Parta, 2006. sv. 1. ISBN 80-7320-086-4. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:5a3f0f30-3875-11e6-ab2f-005056827e52>
- [8] OBRAZ, Jaroslav. Ultrazvuk v měřicí technice. Praha: SNTL, 1984. s. 112. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:4032df2f-26ad-387f-ad9e-6837addf3ef>
- [9] IFM ELECTRONICS GMBH. Ultrazvukové senzory: UGT592, 2020. IFM [online]. Essen. Dostupní také z: <https://www.ifm.com/cz/es/product/UGT592>

- [10] TIPEK, Alois a Pavel RIPKA. Master books on sensors: modular courses on modern sensors Leonardo da Vinci project CZ/PP-134026, [1], Part A. Praha: BEN - technical literature, 2003. s. 2-6. ISBN 80-7300-129-2. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:9dd38560-54f6-11e3-8c6a-005056825209>
- [11] ZEHNULA, Karel. Čidla robotů. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. s. 223. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:ef4d1939-6392-434f-9bbe-5d32adbddc7c>
- [12] TŮMA, Tomáš. Fotografujeme digitálně. Brno: Computer Press, 2004, s. 37. ISBN 80-251-0153-3. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:a42f9c90-3c76-11e6-beb0-001018b5eb5c>
- [13] Digitální fotografie pro pokročilé. Čestlice: Rebo, 2006, s. 79. ISBN 80-7234-506-0. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:fd9031f0-4779-11e7-80b4-001018b5eb5c>
- [14] KAPLANOVÁ, Marie. Moderní polygrafie. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009, s. 53. ISBN 978-80-254-4230-2. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:8bf1a1b0-3e4d-11e4-b6b9-001018b5eb5c>
- [15] WATERMAN, Jill. *Fotografujeme v noci a za slabého osvětlení*. Brno: Computer Press, 2009, s. 46. ISBN 978-80-251-2284-6. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:8f2ae040-19f2-11e5-bcc5-5ef3fc9bb22f>
- [16] KADLEC, Karel, KMÍNEK, Miloš, KADLEC, Pavel a Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích: technologie potravin. Ostrava: Key Publishing s.r.o., 2015. s. 467. ISBN 978-80-7418-232-7. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:193f1e5a-2676-40c8-8b34-cddf3512f18f>
- [17] Typy kamer: Smart kamery. 2021. Industrial automation [online]. B&R Strasse 1, 5142 Eggelsberg, Austria: B&R Industrial Automation. Available at: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/strojove-videni/smart-kamery/>
- [18] Smart Camera: Data sheet version: 1.01. 2021. In: *Industrial automation* [online]. B&R Strasse 1, 5142 Eggelsberg, Austria: B&R Industrial Automation. Available at: https://download.br-automation.com/BRP44400000000000000651968/MAVSC_ENG_V1.01.pdf?px-hash=1ed7afa457143e92e2f186b38d2ca639&px-time=1618397449
- [19] Cognex [online]. 2021. One Vision Drive Natick, MA 01760-2059: Cognex Corporation. Available at: <https://www.cognex.com/en-cz>

- [20] CAMEA: Vizuální kontrola kvality. 2016. *Průmyslové aplikace:: CAMEA* [online]. Brno: CAMEA, spol. s r.o. Available at: https://camea.cz/underwood/download/files/uniscan_cat_cs_20170314-02_web.pdf
- [21] HALFECREE, Gareth. 2018. *The official Raspberry Pi Be: How to use your new computer*. Station Road, Cambridge, CB1 2JH: Raspberry Pi Trading.
- [22] Raspberry Pi 3 Model B+. 2020. *Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi* [online]. Maurice Wilkes Building, St. John's Innovation Park, Cowley Road, Cambridge, CB4 0DS: Raspberry Pi (Trading) Limited. Available at: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/200206+Raspberry+Pi+3+Model+B+plus+Product+Brief+PRINT&DIGITAL.pdf>
- [23] Raspberry Pi High Quality Camera. 2020. *Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi* [online]. Maurice Wilkes Building, St. John's Innovation Park, Cowley Road, Cambridge, CB4 0DS: Raspberry Pi (Trading) Limited. Available at: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-high-quality-camera/>
- [24] Raspberry Pi 16mm f/1.4 C objektiv. 2021. *RPishop.cz* [online]. Available at: <https://rpishop.cz/objektivy/2459-raspberry-pi-16mm-teleobjektiv.html>
- [25] In-Sight 2000 Series Vision Sensor: Referencu Guide, Revize 6.1.3.4. 2021. *Cognex| Machine Vision and Barcode readers* [online]. Cognex Corporation. Available at: https://support.cognex.com/docs/is_613/ISE/EN/Manuals/is2000inst.pdf
- [26] In-Sight 2000 Vision Sensor. 2021. *Cognex| Machine Vision and Barcode readers* [online]. Cognex Corporation. Available at: <https://www.cognex.com/library/media/literature/pdf/19370.pdf>
- [27] FERNÁNDEZ VILLÁN, Alberto. 2019. *Mastering OpenCV 4 with Python*. Livery Place 35 Livery Street Birmingham B3 2PB, UK.: Packt Publishing.
- [28] What is NumPy 2021. *NumPy Documentation* [online]. The SciPy community. Available at: <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>
- [29] PRINCE, Simon J. D. 2012. *Computer Vision: Models, Learning and inference*. 2 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press 3.

- [30] W. Chen, Y. Q. Shi and G. Xuan, "Identifying Computer Graphics using HSV Color Model and Statistical Moments of Characteristic Functions," *2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2007, pp. 1123-1126, doi: 10.1109/ICME.2007.4284852.
- [31] SZELISKI, Richard, 2021. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer. Texts in computer science. ISBN 978-1-84882-934-3.
- [32] John Canny. *A computational approach to edge detection*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6):679–698, 1986.

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Posuvné měřítko (Foto vlastní)	22
Obrázek 2: Ultrazvukový senzor UGT592 (IFM electronics, 2020)	23
Obrázek 3: Hodnoty objektivu (Foto vlastní)	25
Obrázek 4: Smart kamera B&R (Typy kamer, 2021)	30
Obrázek 5: Náčrt profilu	33
Obrázek 6: Model konstrukce	34
Obrázek 7: Model držáku pro kameru RP	35
Obrázek 8: Model držáku pro kameru Cognex	36
Obrázek 9: Model držák osvětlovače	37
Obrázek 10: Model držáku mikrometru	37
Obrázek 11: Kompletní sestava	38
Obrázek 12: Reálný stand pro měření (Foto vlastní)	39
Obrázek 13: Raspberry Pi 3 Model B+ (Raspberry Pi 3 Model B+, 2020)	42
Obrázek 14: Raspberry HQ kamera (Raspberry Pi High Quality Camera, 2020) ...	43
Obrázek 15: Raspberry Pi objektiv (Raspberry Pi 16mm f/1.4 C objektiv, 2021) ...	44
Obrázek 16: Kamera 2001 mini (In-Sight 2000 Series Vision Sensor, 2021)	45
Obrázek 17: Osvětlovač s adaptérem (Foto vlastní)	46
Obrázek 18: Mikrometr (Foto vlastní)	46
Obrázek 19: Moduly OpenCV (Fernández Villán, 2019)	48
Obrázek 20: Postup spuštění příkazového řádku	49
Obrázek 21: Kontrola verze OpenCV	50
Obrázek 22: Zapojení kamery Raspberry Pi 3 (Raspberry Pi 3 Model B+, 2020) ...	50
Obrázek 23: Postup spuštění Raspberry Pie Configuration	51
Obrázek 24: Zapnutí funkce kamery	51
Obrázek 25: Uložený snímek bez vyhodnocování	52
Obrázek 26: BGR model (Fernández Villán, 2019)	53
Obrázek 27: Zvýrazněné logo VUT	54
Obrázek 28: Označené logo VUT	55
Obrázek 29: Výřez hřídele mikrometru	56
Obrázek 30: Nalezené hrany	56
Obrázek 31: Vykreslená hodnota do oříznutého snímku	59
Obrázek 32: Měření na platformě Raspberry Pie (Foto vlastní)	60

Obrázek 33: Krabicové grafy pro měření 2 mm a 4 mm	61
Obrázek 34: Krabicové grafy pro měření 6 mm a 8 mm	62
Obrázek 35: Krabicové grafy pro měření 10 mm a 12 mm	62
Obrázek 36: In-Sight Explorer: prostředí programu	63
Obrázek 37: První snímek po připojení kamery	64
Obrázek 38: Nastavení spouště	64
Obrázek 39: Nastavení osvětlovače	65
Obrázek 40: Nastavení zaostření	65
Obrázek 41: Nastavení snímku	65
Obrázek 42: Nastavení lokalizace	66
Obrázek 43: Nastavení vzoru	66
Obrázek 44: Nastavení první hrany	67
Obrázek 45: Nastavení druhé hrany	67
Obrázek 46: Nastavení matematického přepočtu	68
Obrázek 47: Výpis získané hodnoty	68
Obrázek 48: Měření pomocí kamery Cognex (Foto vlastní)	69
Obrázek 49: Relativní odchylka hodnoty vyhodnocené kamerou Cognex a hodnoty na mikrometru	70
Obrázek 50: Krabicové grafy pro měření opakovatelnosti	72

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vztah mezi veličinou a způsobem měření	21
Tabulka 2: Přesnosti měřidel	21
Tabulka 3: Popis proměnných	24
Tabulka 4: Dělení objektivů	25
Tabulka 5: Použití OpenCV (Fernández Villán, 2019).	48
Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro kalibraci	59
Tabulka 7: Naměřené hodnoty na pomoci kamery HQ Raspberry Pie.....	61
Tabulka 8: Naměřené hodnoty vzdálenosti v pixelech pro kalibraci.....	68
Tabulka 9: Data z měření rozsahu	70
Tabulka 10: Data z měření opakovatelnosti - 5 mm	71
Tabulka 11: Data z měření opakovatelnosti – 8 mm	71

13 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

GUM	Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement – Pokyn pro vyjadřování nejistot měření
VIM	Vocabulary of basic and general terms in metrology – Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii
FPGA	Field Programmable Gate Array – Programovatelné hradlové pole
GPIO	General-purpose input/output – Univerzální vstupní/výstupní pin

14 SEZNAM PŘÍLOH

- Program pro platformu Raspberry Pie
- Program pro platformu Cognex
- Snímky pořízený při měření 8 mm
- Výkresová dokumentace komponent vytvořených pomocí 3D tisku
- Modely ve formátu .stl, pro komponenty vytvořené pomocí 3D tisku