



Zadání diplomové práce

Název:	Hardwarový přípravek pro přesné zacílení pohledu kamery v místnosti
Student:	Bc. Zuzana Jiráňková
Vedoucí:	Ing. Jakub Novák
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Návrh a programování vestavných systémů
Katedra:	Katedra číslicového návrhu
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Cílem práce je vytvoření speciálního HW přípravku pro zacílení pohledu průmyslové kamery z důvodu zisku vyššího rozlišení oblasti zájmu.

Přípravek se bude skládat z kamery, zrcadla a motorizovaného pohonu pro pohyb zrcadla ve dvou osách. Kamera se bude dívat na scénu v místnosti přes zrcadlo. Přípravek bude ovládán pomocí SW rozhraní. Na vstupu bude cílová souřadnice v místnosti a na výstupu bude pohyb jednotlivých pohonů tak, aby nastavené zrcadlo umožňovalo nasměrování pohledu kamery na cílovou souřadnici.

Úkoly:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti metod směřování kamer a dostupných zařízení.
- 2) Navrhněte systém pro snímání místnosti.
- 3) Navrhněte HW přípravek - schéma, komponenty a zapojení.
- 4) Vytvořte přípravek dle návrhu a firmware pro jeho ovládání.
- 5) Otestujte výsledný přípravek, jeho ovládání a zhodnoťte úspěšnost.
- 6) Prezentujte výsledky na reálném příkladu.



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

Hardwarový přípravek pro přesné zacílení pohledu kamery v místnosti

Bc. Zuzana Jiránková

Katedra číslicového návrhu

Vedoucí práce: Ing. Jakub Novák

6. května 2021

Poděkování

Ráda bych poděkovala zejména svému vedoucímu Ing. Jakubovi Novákovi za podporu a připomínky. Dále bych ráda poděkovala Bc. Aleksandru Bazkovi a kolegům z STMicroelectronics za věcné připomínky k hardwarové části práce a Bc. Petru Kasalickému za věcné připomínky k softwarové části. Děkuji i své rodině a kamarádům za podporu po celou dobu studia.

Prohlášení

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

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 2373 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů, tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (buť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu) licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 6. května 2021

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2021 Zuzana Jiráňková. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Jiráňková, Zuzana. *Hardwarový přípravek pro přesné zacílení pohledu kamery v místnosti*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2021.

Abstrakt

Cílem práce je vytvoření hardwarového přípravku pro zacílení pohledu průmyslové kamery, aby bylo možné získat vyšší rozlišení v zvolené oblasti zájmu. Zvoleným řešením bylo využití dvou kamer. Jedna je přehledová a druhá detailní, jejíž pohled je směřován pomocí zrcadla nakláněného v dvou osách. Vytvořené řešení umožňuje zacílit na hledaný objekt z přehledové kamery a získat jeho detail ve větším rozlišení druhou kamerou. Hlavním výsledkem práce je vytvořený hardwarový přípravek a jeho firmware k ovládní náklonu zrcadla.

Klíčová slova průmyslová kamera, zrcadlo, hardwarový přípravek, směřování pohledu, strojové vidění

Abstract

The aim of the work is to create a hardware system to focus the view of industrial camera in the sense of getting higher resolution in area of interest. A solution to use two cameras was chosen. The first one is an overview camera and the second one is a detail camera, which gaze is aimed by a mirror tilted in two axis. The created solution enables to aim to a wanted object from an overview camera and retrieve its detail in higher resolution by the detail camera. The main result of the work is the created hardware system and its firmware to control tilting of the mirror.

Keywords industrial camera, mirror, hardware device, gaze aiming, machine vision

Obsah

Úvod	1
1 Rešerše	3
1.1 Otáčení kamery pomocí pan-tilt systému	3
1.2 Saccade Mirror	4
1.3 Dvouosý goniometrický držák	5
1.4 Stereo snímky	6
2 Teoretický základ	7
2.1 Kamera	7
2.2 Objektiv	11
2.3 Ploché zrcadlo	15
2.4 Kapacitní akcelerometr	17
2.5 Krokový motor	18
2.6 Analytická geometrie	21
2.6.1 Výpočet vzdálenosti bodu od přímky	22
2.6.2 Výpočet bodu ve vzdálenosti po přímce	23
3 Návrh přípravku a realizace hardwarové části	25
3.1 Metodika měření	25
3.2 Vybraný hardware	29
3.2.1 Raspberry Pi 4B	31
3.2.2 Přehledová kamera – Raspberry Pi High quality camera	31
3.2.3 Detailní kamera – Basler ace acA2500-60um	32
3.2.4 Krokové motory 28BYJ-48 s řídicí deskou ULN2003A .	32
3.2.5 Senzor ISM330DHCX	34
3.3 Mechanické součásti	36
3.3.1 Otočný systém zrcadla	36
3.3.2 Držák hardwaru	38
3.3.3 Držák dvou kamer	38

3.4	Vytvořený prototyp	40
4	Realizace softwarové části	41
4.1	Ovládání senzoru ISM330DHCX	41
4.1.1	Nastavení senzoru	43
4.1.2	Kalibrace akcelerometru	45
4.1.3	Eliminace šumu	47
4.1.4	Výpočet pitch a roll	47
4.2	Ovládání motorů	49
4.3	Ovládání kamer	51
4.4	Interakce s uživatelem	53
4.5	Kalibrace snímané plochy	53
4.6	Zaměření cíle	55
5	Výsledky	59
5.1	Výsledky přesnosti měření vzdálenosti	59
5.2	Výsledky snímání za účelem zisku většího rozlišení	63
5.3	Výsledky snímání postav	67
6	Diskuze	71
	Závěr	75
	Literatura	77
A	Schéma napájecí rozdvojky pro krokové motory	85
B	Zdrojový kód kalibrace snímané místnosti	87
C	Zdrojový kód zaměření cíle	91
D	Seznam použitých zkratk	93
E	Obsah příloženého paměťového média	95

Seznam obrázků

1.1	Komerční řešení Workswell Safetis Outdoor PT [1], Overmotion 2-axis camera pan-tilt module [2], Mi Home Security Camera [3]	3
1.2	Vyvinutý prototyp Saccade mirror 3 [4]	4
1.3	Dvouosé goniometrické držáky firmy Standa [5, 6]	5
1.4	Systém pro snímání objektu z dvou směrů [7]	6
2.1	Basler kamera řádková (vlevo) a maticová (vpravo) [8]	7
2.2	Bayerův filtr [9]	9
2.3	Anatomie objektivu [10]	11
2.4	Ohnisková vzdálenost [11]	11
2.5	Clonové číslo [12]	12
2.6	Odvození výpočtu diagonálního zorného pole [13]	13
2.7	Grafické znázornění rovin a hloubky ostrosti	15
2.8	Grafické znázornění odrazu v jednotlivých zrcadlech [14, 15]	15
2.9	Odrazivost jednotlivých materiálů přes elektromagnetické spektrum [16]	16
2.10	Princip měření akcelerace v kapacitním akcelerometru [17]	17
2.11	Snímek 3D akcelerometru [18]	18
2.12	Princip ovládání unipolárního a bipolárního motoru [19]	19
2.13	Ovládací sekvence typu <i>half-step</i> [20]	21
2.14	Vzdálenost d mezi obecnými body P a Q	22
2.15	Vzdálenost d mezi bodem P a přímkou definovanou body A a B	22
2.16	Bod L ve vzdálenosti d od bodu K na přímce definované body A a B	23
3.1	Nákres snímané scény	25
3.2	Nákres k výpočtu úhlů zrcadla	27
3.3	Nákres výpočtu úhlů pro nenulovou výšku objektu	28
3.4	Chybný (červeně) a správný (zeleně) výběr bodu na přehledovém snímku pro nenulovou výšku objektu	29

3.5	Schéma zapojení hardwaru [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]	30
3.6	Raspberry Pi High quality camera [21]	31
3.7	Basler ace acA2500-60um [22]	32
3.8	Krokový motor 28BYJ-48 s vyznačením připojení cívek [28]	33
3.9	Model plošného spoje napájení pro dva krokové motory	33
3.10	Schéma zapojení adaptéru pro ISM330DHCX	35
3.11	Model adaptéru pro ISM330DHCX	36
3.12	3D model otočného systému zrcadla	37
3.13	Držák pro řídicí hardware	38
3.14	Vertikální úhel kamery <i>camerav</i>	38
3.15	Snímaná oblast s různou pozicí kamery vůči zrcadlu	39
3.16	Držák pro přehledovou a detailní kameru	39
3.17	Prototyp kamerového systému	40
4.1	Kalibrovací sestava	46
4.2	Ukázka číslování pinů z dokumentace Raspberry Pi [24]	49
4.3	Pomůcka pro určení kroků na otáčku	50
4.4	Termovizní snímek udávající teplotu 62,2 °C jádra motoru při cívce napájené po dobu zhruba 4 minut	51
4.5	Ukázka interaktivního okna se zacílením na objekt srdce	53
4.6	Vizualizace kalibrace místnosti	54
5.1	Kontrola zadání bodů kalibrace	59
5.2	Testovací sestava pro měření přesnosti vzdáleností	60
5.3	Výběr kalibračních bodů	61
5.4	Měření 1: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti 0 mm horizontálně a 150 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.	62
5.5	Měření 2: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti 150 mm horizontálně a 150 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.	62
5.6	Měření 3: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti −100 mm horizontálně a −50 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.	62
5.7	Testovací sestava pro získ většího rozlišení umístěna u stropu místnosti	63
5.8	Kontrola zadání bodů kalibrace	64
5.9	Výběr kalibračních bodů a vyznačení pozic jednotlivých magnetek	64
5.10	Měření 1: Vlevo detail magnetky tvaru kruhu z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery	65
5.11	Měření 2: Vlevo detail magnetky tvaru kapky z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery	65
5.12	Měření 3: Vlevo detail magnetky tvaru srdce z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery	66

5.13	Měření 4: Vlevo detail šablony s písmeny A z přehledového snímku a vpravo detail stejné šablony získané pomocí detailní kamery . . .	66
5.14	Testovací sestava umístěna u stropu pro snímání v nenulové výšce	67
5.15	Výběr kalibračních bodů a vyznačení pozic jednotlivých magnetek	68
5.16	Kontrola zadání bodů kalibrace	68
5.17	Měření 1: Vlevo snímek z přehledové kamery s vyznačením bodu zacílení, kdy není vidět horní část postavy. Vpravo zaměřená horní část postavy.	69
5.18	Měření 2: Vlevo snímek z přehledové kamery s postavou a vyznačením bodu zacílení. Vpravo snímek z detailní kamery s větším rozlišením obličeje.	69
A.1	Schéma zapojení napájecí rozdvojky pro krokové motory	85

Seznam tabulek

2.1	Převod palcového formátu na velikost diagonály v milimetrech [29]	8
2.2	Nejpoužívanější komunikační rozhraní [30]	10
3.1	Řídicí sekvence krokového motoru	34
4.1	Znaménko náklonu získané z inklinometru	56
5.1	Porovnání reálné a spočtené vzdálenosti v mm	61

Úvod

Kamerový systém je ve strojovém vidění stěžejním prvkem. V závislosti na požadavcích řešené úlohy je třeba vybrat vhodnou kombinaci kamery a objektivu. Charakteristika úlohy může vyžadovat vysoké rozlišení z důvodu zisku detailu snímaného objektu nebo může vyžadovat velké zorné pole z důvodu zisku informací z rozsáhlé oblasti zájmu.

Problém nastává u úlohy, kdy je nutné najednou snímat plochu ve velkém zorném poli a zároveň mít dostatečně vysoké rozlišení, aby bylo možné detekovat detaily specifikované úlohou. Praktickým příkladem může být snímání parkoviště se skenováním SPZ. Pokud je snímána větší plocha parkoviště, rozlišení detailů může být natolik malé, že není možné přečíst znaky SPZ. Jako další příklad lze uvést snímání části prostoru obchodu s pokladnami za účelem analýzy zákazníků pomocí detailu obličeje.

Prvním zdánlivým řešením tohoto problému může být použití většího snímacího čipu. Nicméně snímací čipy mají své standardizované velikosti, tudíž i maximální rozměry. Další možností je použít dva kamerové systémy. Jeden systém bude snímat velkou plochu, a tedy bude využívat objektiv s malou ohniskovou vzdáleností. Druhý systém bude využívat objektiv s větší ohniskovou vzdáleností v závislosti na požadavku rozlišení a bude získávat pouze malou oblast zájmu ve větším rozlišení.

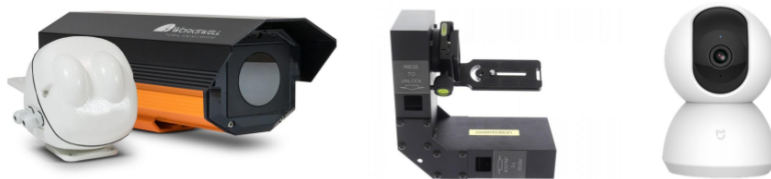
Aby bylo možné získávat snímky s větším rozlišením různých částí snímané plochy, je potřebné s kamerovým systémem otáčet tak, aby zacílil na požadovaný objekt. Celým systémem není vhodné otáčet, jelikož jeho váha bývá v jednotkách kilogramů a při takové váze není možné dosáhnout rychlého otočení systému. Alternativou k otáčení celé kamery je fixní upevnění kamery a nasměrování jejího pohledu do zrcadla, které pohled kamery zaměří na požadovaný cíl. Jelikož je hmotnost zrcadla nižší než hmotnost kamery, zvýší se i rychlost otáčení. Práce se zabývá navržením takového systému a zejména způsobu, jak směřovat pohled kamery pomocí zrcadla, přes které kamera obraz snímá.

Rešerše

Kapitola obsahuje analýzu již existujících řešení jak komerčních, tak i vědeckých pro směřování kamer a systémů sloužících pro náklon objektů. Každé řešení je popsáno s důrazem na zhodnocení jednotlivých výhod a nevýhod v souvislosti pro použití v přípravku.

1.1 Otáčení kamery pomocí pan-tilt systému

Pan-tilt systém je mechanismus, který otáčí a naklání na něm připevněný objekt. Na obrázku 1.1 lze vidět vlevo pan-tilt systém pro termokameru firmy Workswell. Kamera váží 3,7 kg a je přímo instalována na tomto systému, kdy se hýbe s celou kamerou. Nastavení úhlů systému je možné ovládat vzdáleně z aplikace.



Obrázek 1.1: Komerční řešení Workswell Safetis Outdoor PT [1], Overmotion 2-axis camera pan-tilt module [2], Mi Home Security Camera [3]

Dalším elektricky motorizovaným řešením je produkt firmy Overmotion (obrázek 1.1 uprostřed). Jedná se o dvouosý systém, který hýbe s celou kamerou. Je poháněn krokovými motory a je možné jej ovládat z mobilní aplikace. Použití tohoto systému je zejména na fotografické účely a to zejména k získávání časosběrného videa. Produkt jako svou přednost udává, že je schopný velice pomalého pohybu. Další firma, která nabízí pan-tilt systémy zejména pro těžší objekty (termokamery, parabolické antény, atd.), je firma

Flir [31]. Jejich systémy slouží zejména k ukotvení objektu v exteriéru s precizním ovládáním pozice v reálném čase. Nevýhodou může být velikost a příliš vysoká cena systému.

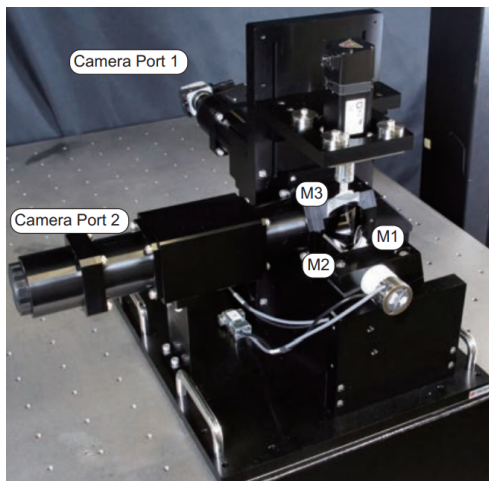
V neposlední řadě je možné najít velké množství domácích bezpečnostních kamer, kde je také kamera ukotvena v otočném systému. Na obrázku 1.1 vpravo je další příklad takového zařízení. Zde je také možnost hýbat s celou kamerou pro nastavení požadované snímané scény.

Z vědecké oblasti lze zmínit projekt popsany v článku [32], kde využívají pan-tilt systém k otáčení kamery ukotvené na pohybujiícím se robotu. Cílem projektu je sledovat vybraný objekt při pohybu robota.

Výše zmíněné pan-tilt systémy jsou vhodné k nastavení náklonu pro získání požadované scény, nebo pomalému pohybu (druhé řešení). Pro těžší kamery, jako je tomu u termokamery, existuje systém pro občasně nastavení pohledu nebo systém cenou pohybujiící se v řádu vyšších desítek až nižších stovek tisíc korun. Pro průmyslové kamerové systémy, které mohou mít dle typu zvolené kamery a objektivu větší hmotnost a je nutné snímat odlišné oblasti zájmu častěji, je řešení otáčení celé kamery kvůli její setrvačnosti nevyhovující.

1.2 Saccade Mirror

Saccade mirror je zařízení, které je vyvíjeno pod širším výzkumným projektem Dynamic Vision System. Výzkumem se zabývá Ishikawa Group Laboratory na University of Tokyo od roku 2001. Výzkum projektu Saccade Mirror má počátky v roce 2009. [33]



Obrázek 1.2: Vyvinutý prototyp Saccade mirror 3 [4]

Jedná se o systém kamery, čoček a zrcadel. Hlavním cílem systému je sledovat rychle se pohybujiící objekty. Pohled kamery je nastavován pomocí

dvou na sebe kolmých zrcátek, kdy jedno otáčí a druhé naklání pohled kamery. Uvádí, že pokud je potřebné otáčet pohled kamery rychle (v řádu milisekund), je potřebné co nejvíce zredukovat setrvačnost pohyblivých částí. Prototyp byl demonstrován pro využití v odvětví sportu na experimentu pozorování rychle se pohybujícího gumového míčku. [34]

V roce 2016 vznikla vylepšená verze nesoucí jméno Saccade Mirror 3 (obrázek 1.2), která má oproti původnímu prototypu místo jedné kamery dvě, a oproti dvěma pohyblivým zrcátkům tři. V porovnání s původní verzí lze získat namísto 60° zorného pole teoreticky až 360° . Směr pohledu je distribuován do dvou kamer, kdy jedna je vysokorychlostní s nižším rozlišením pro strojové vidění, pomocí které probíhá výpočet nové polohy zrcadel, a druhá slouží k záznamu ve vyšším rozlišení. Prakticky bylo dosaženo zorného pole 262° v jedné ose a 27° v druhé ose s nejrychlejší odezvou 10 ms při velikosti kroku 1° . Prototyp byl úspěšně otestován na sledování míčku u stolního tenisu a létajícího dronu. [4]

Pohyb zrcátka místo pohybu celého kamerového systému je správný směr, co se týče rychlosti systému. Systémy založené na otáčení celé kamery mají pomalou odezvu [4]. Prototyp Saccade Mirror exceluje v rychlosti směřování pohledu. Na druhou stranu jelikož využívá galvanometrická zrcadla s malou plochou, je zorné pole velice omezené.

1.3 Dvouosý goniometrický držák



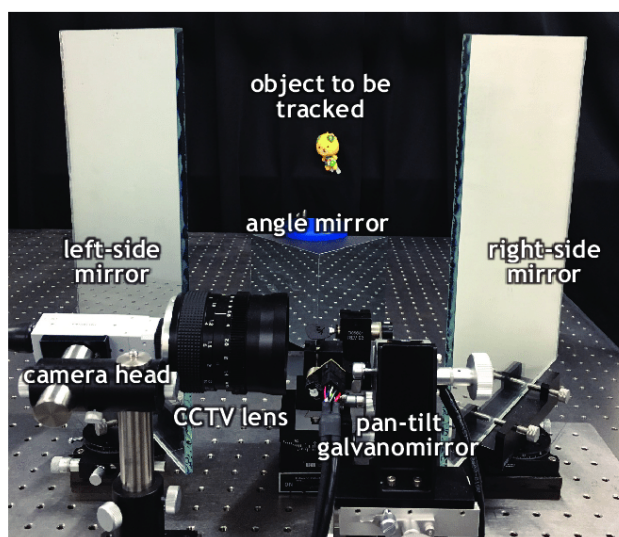
Obrázek 1.3: Dvouosé goniometrické držáky firmy Standa [5, 6]

Litevská firma Standa zabývající se opto-mechanickými produkty nabízí zakázkové výrobky včetně dvou držáků schopných se natáčet ve dvou osách. Prvním systémem (na obrázku 1.3 vlevo) je dvouosý goniometrický držák, který slouží zejména na kontrolu pozorovacích úhlů různých displejů. Rám držáku je vyroben z eloxovaného hliníku. Eloxování je elektrolytický proces, který dodá výrobkům z hliníkového materiálu korozní odolnost, tvrdost a otěrvzdornost [35]. Jako vrchní nátěr byla zvolena antireflexní černá barva, aby měření nebyla ovlivněna odrazy světla od nátěru. Rozměry rámu jsou zhruba 45×40 cm. Rám je otáčen pomocí dvou krokových motorů a výrobce nabízí verzi bez enkodéru i s enkodérem. [5]

Druhý dvouosý rám (na obrázku 1.3 vpravo) slouží na upevnění zrcadla o velikosti $20 \times 16 \times 3$ cm nebo jiných objektů do 6 kg. Oba rámy je možné upravit na požadovanou velikost a oba tyto výrobky používají k motorizaci tzv. *motorized rotation stage*. Jedná se o základny, které již mají zakomponovaný motor a je na ně přímo možné nasadit požadovaný rám. Základna, na které celý rám stojí, váží kolem 6 kg dle konkrétního modelu, a druhá základna, která obstarává náklon v druhé ose, váží 1 kg. [6]

Výhoda řešení je, že je možné objektem (zrcadlem) hýbat ve dvou osách zároveň a rám je opravdu pevný, na druhou stranu pouze základny s motory váží 7 kg. Včetně rámu bude celá sestava ještě těžší. Váha systému nevádí, pokud je položena na stole nebo jiné horizontální ploše. Při vertikálním upevnění mohou nastat problémy se silou motoru, jelikož rám bude působit vlivem gravitace proti směru otáčení motoru.

1.4 Stereo snímky



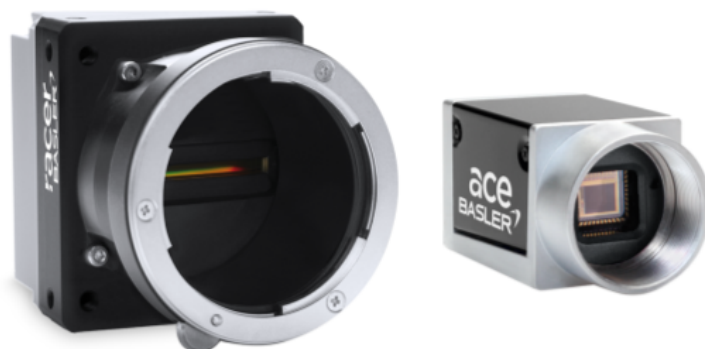
Obrázek 1.4: Systém pro snímání objektu z dvou směrů [7]

V konceptu popsáném v článku [7] a vyobrazeném na obrázku 1.4 je použit kamerový systém s pan-tilt systémem galvanometrických zrcátek pro ovládání pohledu kamery do navazujících zrcadel. Zde je použit pan-tilt systém pro přepínání mezi levým a pravým pohledem na snímáný objekt. V článku [7] je uvedeno, že je možné nasnímat 500 různých pohledů za sekundu, tedy dvě virtuální kamery získávají barevné osmibitové snímky o frekvenci 250 fps v rozlišení 512×512 px. Systém byl využit pro konstrukci 3D tvarů stacionárních i pohybujících se objektů.

Teoretický základ

V kapitole je obsažen teoretický úvod, který je vhodný pro pochopení problematiky. Kapitola se zabývá kamerami, objektivy, zrcadly, akcelerometry, motory a analytickou geometrií. Na těchto základech je založený výběr komponent (v hardwarové části) a algoritmus pro výpočet náklonu zrcadla v závislosti na poloze objektu (v softwarové části).

2.1 Kamera



Obrázek 2.1: Basler kamera řádková (vlevo) a maticová (vpravo) [8]

Stěžejním prvkem kamery je snímací čip skládající se z jednotlivých pixelů. Úlohou snímače kamery je v určitém časovém úseku (expozičním čase) zachytit paprsky procházející skrz objektiv. Kamera následně intenzitu zachycených paprsků v jednotlivých pixelech převede na číselné hodnoty, zapíše je do matice a přes komunikační rozhraní pošle do jiného zařízení k dalšímu zpracování. Kamery mají velké množství parametrů. Na jejich základě je možné zvolit

2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

kameru vhodnou k splnění požadavků zadané úlohy. Mezi takové parametry patří:

- **Velikost a formát senzoru** (*sensor size and format*) – Velikostí senzoru je myšlena velikost snímací části čipu. Uvádí se v milimetrech, pixelech a nebo v tzv. palcovém formátu. Poměr mezi velikostí v milimetrech a pixelech udává velikost pixelu. Převod mezi reálnými rozměry a počtem pixelů lze spočítat následovně [36]:

$$\begin{aligned} \text{sensor_width} &= \text{pixel_count_in_row} \cdot \text{pixel_width} \\ \text{sensor_height} &= \text{pixel_count_in_column} \cdot \text{pixel_height} \end{aligned} \quad (2.1)$$

U parametrů kamery se většinou používá palcové značení. Značení má původ v 50. letech 20. století a odvíjí se od jednopalcového vnějšího průměru senzoru zvaného *vidicon tube sensor*, který byl používán v té době u kamer a jeho zobrazovací oblast měla diagonální velikost 16 mm [29]. Vznikl z toho jakýsi převodový poměr 1" = 16 mm, který se používá dodnes. V tabulce 2.1 jsou vyobrazeny běžně používané formáty a jejich převod na milimetry:

Formát senzoru	Diagonála (mm)
1/3 "	6.00
1/2 "	8.00
1/1.8 "	8.93
2/3 "	11.0
1 "	16.0
4/3 "	21.6

Tabulka 2.1: Převod palcového formátu na velikost diagonály v milimetrech [29]

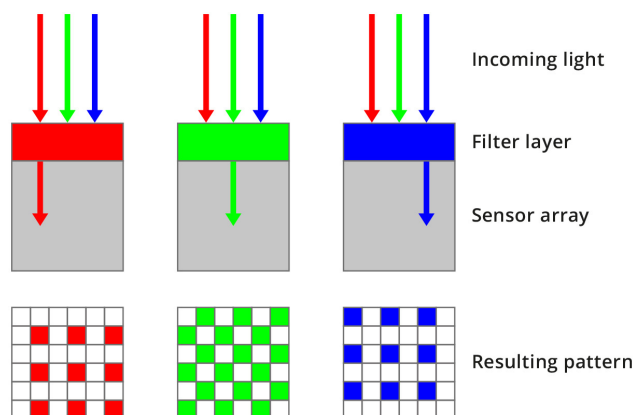
Podle velikosti senzoru lze kamery rozdělit do dvou hlavních skupin [30], které jsou vyobrazeny i na obrázku 2.1:

- **Maticové kamery** (*area scan cameras*) – Běžně dostupné kamery, jejichž snímací čip má velikost $m \times n$ pixelů. Pro nasnímání určité plochy stačí jeden snímek.
- **Řádkové kamery** (*line scan cameras*) – Snímač takovéto kamery má pouze jeden řádek. U tohoto systému je zpravidla kamera upevněná staticky a objekt se pod kamerou hýbe (např. na výrobní lince) a kamera jej řádek po řádku snímá a výsledný snímek je vytvořen softwarovým spojením těchto řádků. Řádková kamera mívá oproti maticovým kamerám i například 16 000 pixelů na řádek a umožňuje snímat s mnohem vyšší frekvencí. Lze s ní tedy

dosáhnout mnohem většího rozlišení a je možné si určit vlastní výšku snímku. Nevýhodou je, že rychlost výrobní linky (nebo jiného pojezdu) musí být synchronizována se snímkovací frekvencí kamery.

- **Konstrukce senzoru** (*sensor construction*) – Kamerové senzory se vyrábí dvěma hlavními technologiemi [37]:
 - **CCD (Charged Couple Device)** – Je založena na matici pasivních fotodiod, které se nabíjí po dobu expozičního času kamery. Následně je náboj převeden do společné elektroniky, kde je převeden na napětí. Jelikož se jedná o pasivní pixely a tedy není u každého pixelu vlastní elektronika, je jejich efektivita vyšší a tudíž jsou výsledné snímky kvalitnější. Na druhou stranu převedení náboje je pomalejší, tudíž není možné dosáhnout vysoké snímkovací frekvence.
 - **CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)** – Technologie je založená na matici aktivních pixelů. Každý pixel obsahuje 3 až 4 tranzistory, které převádí naakumulovaný náboj ve fotodiodě na napětí. Díky tomuto faktu je vyčítání výsledného snímku rychlejší. Na druhou stranu část plochy pixelu patří elektronice a tudíž je více náchylný na šum.

Pomocí výše popsaných konstrukcí senzoru je kamera schopna získat pouze černobílý (monochromatický) snímek. Pro získání barevného snímku je potřeba senzory upravit. Nad každý pixel je aplikován barevný filtr červené, zelené, nebo modré barvy. Nejpoužívanějším rozložením barevných filtrů je *Bayerův filtr*. Skládá se z 50 % pixelů zelené barvy (lidské oko je nejcitlivější na zelenou barvu [38]), 25 % červené barvy a 25 % modré barvy. Schéma Bayerova filtru je zobrazeno na obrázku 2.2. [9]



Obrázek 2.2: Bayerův filtr [9]

2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

Kamery obsahující senzor s Bayerovým filtrem jsou schopny detekovat vlnové délky ve viditelném spektru. V případě, že je potřebné detekovat záření o delších vlnových délkách (infračervené záření pro měření teploty) nebo kratších vlnových délkách (UV nebo rentgenové paprsky), přidávají se na senzory místo barevného filtru vrstvy z příslušných materiálů nebo pomocné obvody tak, aby zvýšily citlivost senzoru v daném rozmezí vlnových délek. Pro některé vlnové délky je potřebné mít objektiv ze speciálních materiálů, které je propouští. [39]

- **Bajonet** (*mount*) – Jedná se dle [40] o mechanický systém ukotvení objektivu ke kameře. Jednotlivé systémy se liší v tzv. *flange distance*, což je vzdálenost mezi snímačem kamery a vzdálenějším koncem závitu. Dále jsou také definovány průměrem závitu a TPI (threads per inch), tedy počtem závitů na 1 palec. Mezi nejpoužívanější bajonety ve strojovém vidění patří:
 - **C-mount** – Jedná se o nejčastěji používaný bajonet. Jeho vzdálenost mezi snímačem a závitem je 17,526 mm, průměr 1" (25,4 mm) s 32 závity na palec.
 - **CS-mount** – Méně populární verze C-mountu. Je o 5 mm kratší, tedy *flange distance* je 12,526 mm.

Mnoho výrobců kamer a objektivů nerespektuje *flange distance* určitého bajonetu, je tedy možné najít na kamerách možnost k vyladění tzv. **back focal length** [41, 42].

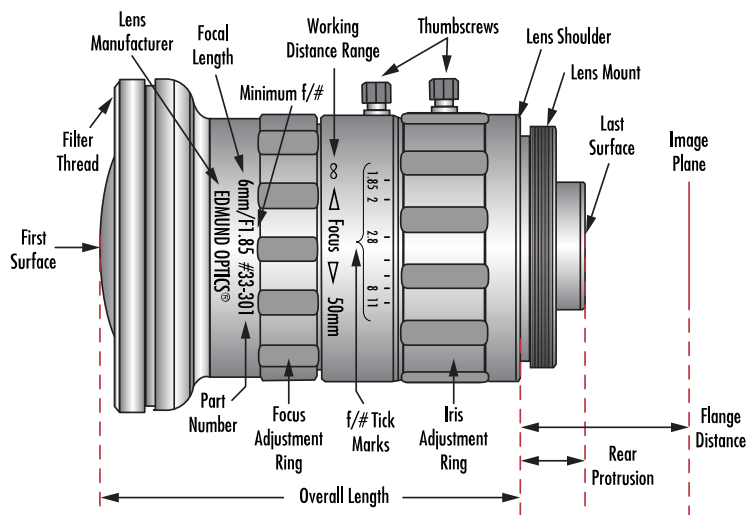
- **Komunikační rozhraní** (*camera interface*) – Určuje, jakým způsobem jsou obrazová data posílána do jiného zařízení. V tabulce 2.2 jsou vyjmenovány nejpoužívanější rozhraní ve strojovém vidění a jejich jednotlivé parametry.

	USB 3.1	CoaXPress	Camera Link ®
Rychlost přenosu	5 Gb/s	až 12,5 Gb/s	až 6,8 Gb/s
Max. vzdálenost	3 m	cca. 100 m	10 m
Počet zařízení	až 127	neomezeně	1
Konektor	MicroB/USB-C	RG 59/6/11	26pin
	GigE (PoE)	5 GigE (PoE)	10 GigE (PoE)
Rychlost přenosu	1 Gb/s	5 Gb/s	10 Gb/s
Max. vzdálenost	100 m	100 m	100 m
Počet zařízení	neomezeně	neomezeně	neomezeně
Konektor	RJ45/Cat 5e/6	RJ45/Cat 5e/6	Cat7/opt. kabel

Tabulka 2.2: Nejpoužívanější komunikační rozhraní [30]

2.2 Objektiv

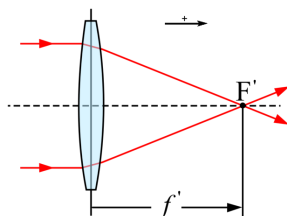
Samotná kamera nestačí k získání ostrého snímku. Je potřeba k ní připojit objektiv. Objektiv se skládá ze soustavy čoček, kde každá čočka ohýbá světlo tak, aby ve výsledku bylo možné získat na snímacím senzoru ostrý snímek. Kvalita objektivu závisí hlavně na preciznosti vybroušení jednotlivých čoček. [43]



Obrázek 2.3: Anatomie objektivu [10]

Stejně jako kamery, i objektivy mají mnoho parametrů (znázorněny na obrázku 2.3), které je optimalizují pro určitou úlohu [13, 10]:

- **Ohnisková vzdálenost** (*focal length*) – Jedná se o hlavní parametr, který je definován konstrukcí objektivu. Vyjadřuje vzdálenost optického centra od ohniskové roviny, kdy je objektiv zaostřen na objekt v nekonečnu. Tento parametr hraje důležitou roli při výpočtu zorného pole. Existují objektivy s pevnou ohniskovou vzdáleností (*fixed focal length*) a s proměnnou ohniskovou vzdáleností (*zoom lens*). V případě pevné ohniskové vzdálenosti je na objektivu jedno číslo, při proměnné rozsah čísel.



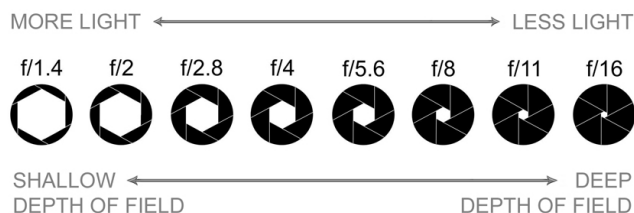
Obrázek 2.4: Ohnisková vzdálenost [11]

2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

- **Clonové číslo** (*f-number*, *aperture*) – Určuje, jak moc je objektiv zcloněný, tzn. jaké množství paprsků projde skrz objektiv. Jelikož mají objektivy různý průměr, snaha tohoto značení clony je, aby bylo univerzální pro všechny objektivy. Z toho důvodu je clonové číslo definováno:

$$f\text{-number} = \frac{D}{f}, \quad (2.2)$$

kde D značí průměr otvoru, kterým prochází světlo, a f ohniskovou vzdálenost. Pokud je nastavená clona $f/8$, znamená to, že průměr otvoru D je $\frac{1}{8}$ ohniskové vzdálenosti f . Jak je naznačeno na obrázku 2.5, je to důležitým parametrem při výpočtu hloubky ostrosti. Na objektivu bývá vyznačeno minimální clonové číslo. Pokud je clona nastavitelná mechanicky na objektivu, nastavuje se a případně aretuje pomocí otočného kroužku s vyznačenou stupnicí clonových čísel a aretačního šroubku.



Obrázek 2.5: Clonové číslo [12]

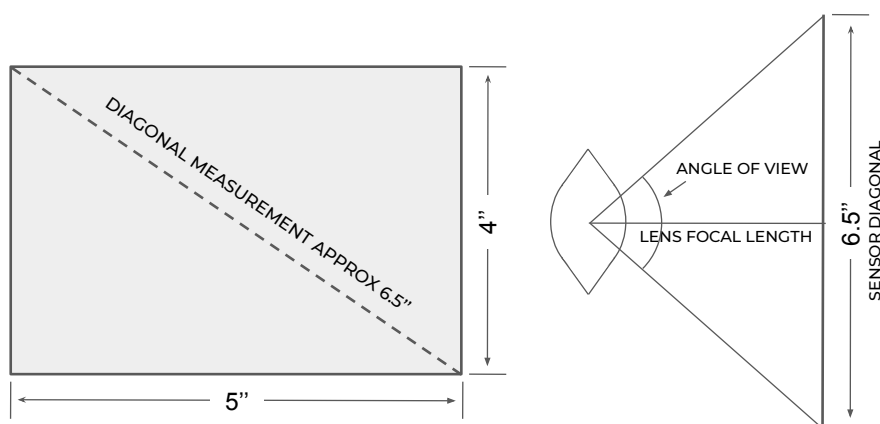
- **(Minimální) pracovní vzdálenost** (*(Minimum) working distance*) – Pracovní vzdálenost je vzdálenost objektu od přední čočky [44]. U objektivů se definuje minimální pracovní vzdálenost jako minimální vzdálenost, na kterou je možné s objektivem zaostřit. Objektivy tedy obecně lze zaostřit na vzdálenost od minimální pracovní vzdálenosti až na nekonečno. Pokud lze ostřit mechanicky, na objektivu je k tomuto účelu vymezen otočný kroužek s vyznačenou stupnicí od minimální pracovní vzdálenosti až po nekonečno (např. 0,15 až ∞ m) a případně aretační šroubek.
- **Bajonet** (*mount*) – Jedná se o mechanické upevnění objektivu ke kameře. Bajonet objektivu musí být shodný s bajonetem kamery, příp. lze použít redukci, pokud taková existuje. Stejně jako kamery i objektivy mohou mít možnost nastavení *back focal length* [41].
- **Formát senzoru** (*sensor format*) – Každý objektiv je uzpůsoben na určitý formát senzoru. Je tedy dobré, aby byl parametr pro kameru i objektiv stejný, případně aby objektiv byl uzpůsoben pro větší formát senzoru, než daná kamera obsahuje. Pokud by tomu bylo opačně, může se stát, že na kraje snímku nebude dopadat dostatečné množství světla.

Další parametry a vztahy, které je dobré znát pro výběr objektivu a jeho správné nastavení pro určitou úlohu:

- **Zorný úhel** (*angle of view*) - Dělí se na zorný úhel horizontální, vertikální a diagonální. Dle typu je definován následovně [45]:

$$\begin{aligned} AOV_H &= 2 \cdot \arctan\left(\frac{\text{sensor_width}}{2 \cdot f}\right), \\ AOV_V &= 2 \cdot \arctan\left(\frac{\text{sensor_height}}{2 \cdot f}\right), \\ AOV_D &= 2 \cdot \arctan\left(\frac{\text{sensor_diagonal}}{2 \cdot f}\right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

kde *sensor_width*, *sensor_height* a *sensor_diagonal* jsou rozměry snímacího senzoru kamery v jednotkách milimetrů. Parametr *f* značí ohniskovou vzdálenost. Odvození vztahů je znázorněno na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Odvození výpočtu diagonálního zorného pole [13]

- **Rozptylový kroužek** (*circle of confusion (CoC)*) – Jedná se o projekci bodu snímku jako kruhu s měřitelným průměrem. Dochází k tomu v případě, kdy je zaostřeno na určitou vzdálenost *d* a body, které jsou ve větší či menší vzdálenosti od vzdálenosti *d*, již nejsou promítnuty na snímač jako bod, ale jako kruh o určitém průměru. Ve výpočtech se hodnota CoC uvádí jako maximální horní limit. Jako hrubý odhad lze využít vztah $coc = \frac{d}{1730}$, kde *d* je diagonála snímače kamery v jednotkách milimetrů [46].

- **Hyperfokální vzdálenost** (*hyperfocal distance*) – Je definována jako vzdálenost od optického centra objektivu k nejbližšímu bodu, který je akceptovatelně ostrý, pokud je kamera zaostřena na nekonečno. Akceptovatelně ostrý se zde definuje pomocí *CoC*. Pro hyperfokální vzdálenost platí [13]:

$$H = \frac{F^2}{f \cdot c}, \quad (2.4)$$

kde

H = hyperfokální vzdálenost

F = ohnisková vzdálenost

f = clonové číslo

c = akceptovatelný rozptylový kroužek

- **Hloubka ostrosti** (*depth of field*) – Určuje rozsah, kde je obraz akceptovatelně ostrý (v závislosti na *CoC*). Nejdříve je dle [13] definováno:
 - **Nejbližší hloubka ostrosti** – Nejbližší rovina, kdy obraz začne být akceptovatelně ostrý, je definována:

$$ND = \frac{H \cdot D}{H + D}. \quad (2.5)$$

- **Nejvzdálenější hloubka ostrosti** – Nejvzdálenější rovina, kdy je obraz stále akceptovatelně ostrý:

$$FD = \frac{H \cdot D}{H - D}, \quad (2.6)$$

kde

ND = vzdálenost nejbližší zaostřené roviny

H = hyperfokální vzdálenost

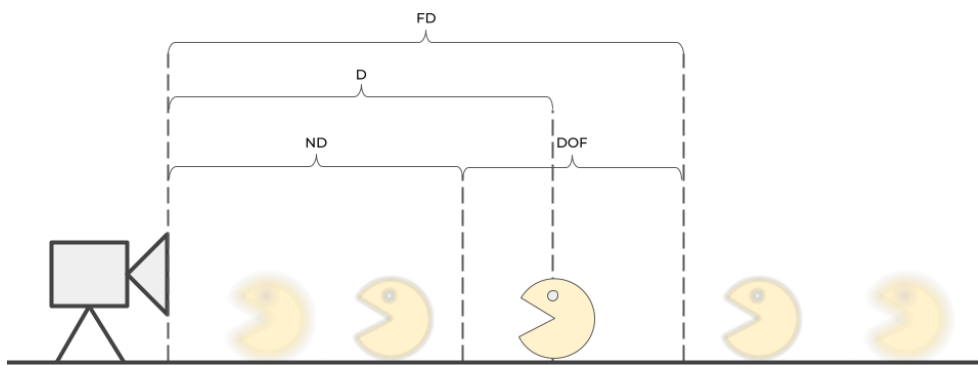
D = vzdálenost, na kterou je zaostřeno

FD = vzdálenost nejvzdálenější zaostřené roviny

Výslednou hloubku ostrosti (znázorněna na obrázku 2.7) lze spočítat následovně [13]:

$$DOF = FD - ND. \quad (2.7)$$

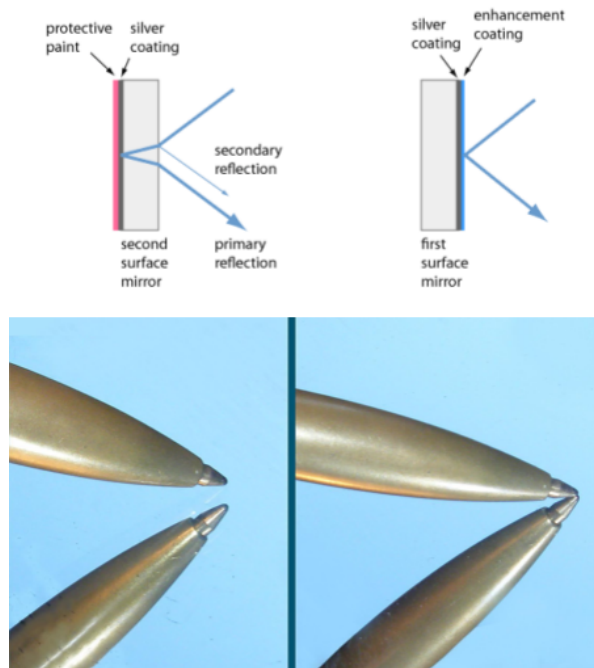
Pro speciální úlohy lze využít i speciálně uzpůsobené objektivy. Mezi ně například patří telecentrické objektivy, které propouští pouze paprsky rovnoběžné s optickou osou. Tyto objektivy jsou vhodné pro inspekci siluet objektů, zejména skleněných. Dále také 360° objektivy, díky kterým je možné kontrolovat daný objekt jak z horní části, tak i ze stran. [47, 48]



Obrázek 2.7: Grafické znázornění rovin a hloubky ostrosti

2.3 Ploché zrcadlo

Zrcadla jsou zřejmě nejstarší optická součástka používána lidmi na využití možností světla. Během Řecko-římské doby a středověku se zrcadlem rozuměl kus kovu, který byl vysoce vyleštěn. Jednalo se například o bronz, cín nebo stříbro. [49]

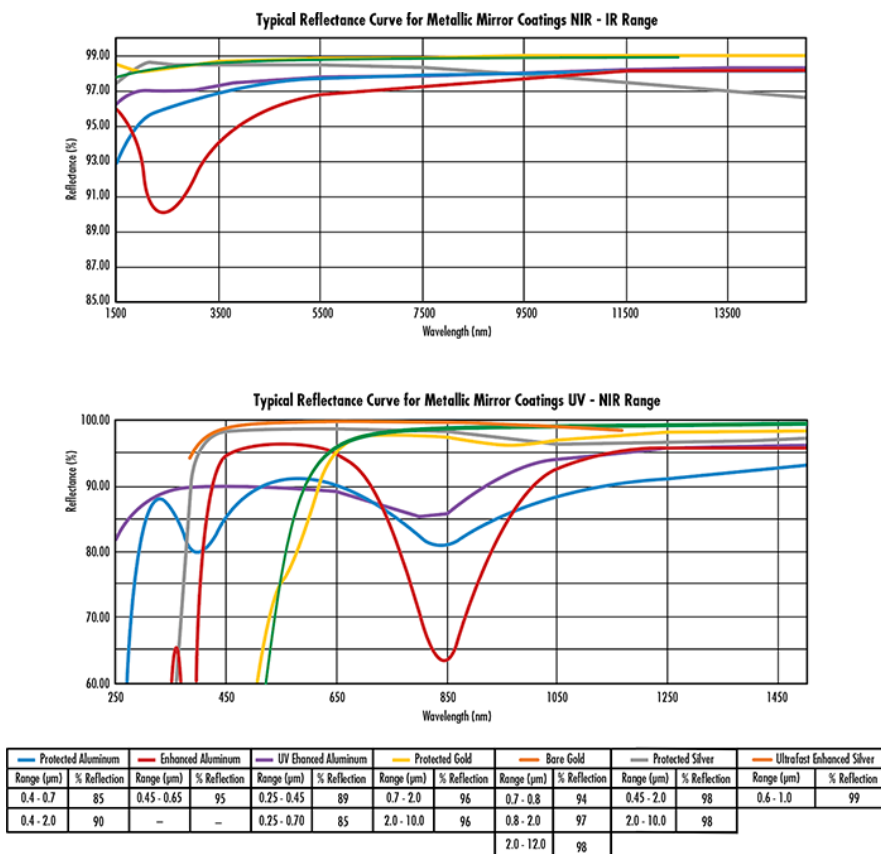


Obrázek 2.8: Grafické znázornění odrazu v jednotlivých zrcadlech [14, 15]

2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

Dnešní všeobecně používaná zrcadla se skládají z vrstvy substrátu (většinou skla), na které je ze spodní části tzv. odrazová vrstva (hliníková nebo stříbrná [50]) a ochranná vrstva. Hlavní výhodou tohoto uspořádání je, že odrazová vrstva je chráněna před škrábanci a oxidací a tudíž je zrcadlo více odolné [16]. Toto uspořádání se nazývá *second surface mirror*. V aplikacích s vysokými požadavky na kvalitu odrazu se tento druh zrcadel nepoužívá, jelikož na nich vzniká tzv. *ghosting* efekt. Efekt vzniká v důsledku toho, že část dopadajícího světla se odráží již od povrchu skla a je tedy mírně posunutá od odrazu z odrazové vrstvy. Z tohoto důvodu se v takových aplikacích využívá *first surface mirror*, kde je odrazová vrstva na přední straně substrátu. Ukázkou *ghosting* efektu a rozdíl odrazů jednotlivých zrcadel je možné vidět na obrázku 2.8.

Materiál odrazové vrstvy je v obecně používaných zrcadlech obvykle stříbro, nebo hliník z důvodu nejlepší odrazivosti ve viditelném spektru (odpovídá vlnové délce 400–700 nanometrů [51]). Stříbro odráží zhruba 95 % světla a hliník 90 % světla [50].

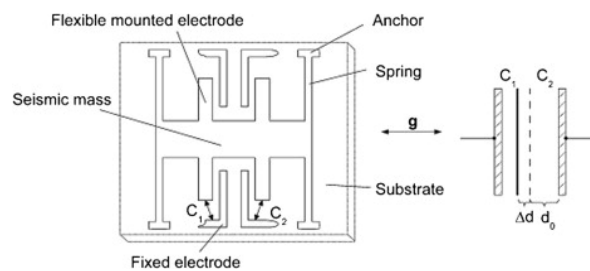


Obrázek 2.9: Odrazivost jednotlivých materiálů přes elektromagnetické spektrum [16]

V průmyslových řešeních se využívá *first surface mirror* z důvodů vyšší kvality odrazu, ale také kvůli větší diverzitě odrazových materiálů, kde každý poskytuje různou odrazivost přes celé elektromagnetické spektrum. Na obrázku 2.9 lze vidět typické odrazivosti materiálů odrazových vrstev, které nabízí výrobce Edmund Optics Inc. [16]. Pro odraz paprsku v plochém zrcadle platí zákon odrazu a tedy úhel dopadu je stejný jako úhel odrazu [52].

2.4 Kapacitní akcelerometr

Akcelerometr se řadí mezi pohybové senzory, konkrétně takový, který snímá akceleraci. Často se lze setkat ve spojení s akcelerometrem se zkratkou MEMS. Zkratka znamená *Micro electro mechanical system* a značí technologii, kdy se mechanické a elektro-mechanické komponenty vytváří technikou mikrofabrikace. Hlavní kritérium MEMS technologie je, že systém obsahuje alespoň jeden prvek, který má mechanickou funkci. [53]

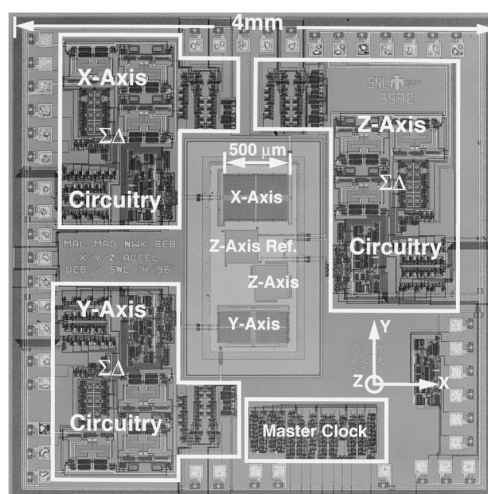


Obrázek 2.10: Princip měření akcelerace v kapacitním akcelerometru [17]

Mechanická část akcelerometru se obecně skládá z tzv. *seismic mass*. Jedná se o hmotu, která je pomocí pružin ukotvená k fixnímu rámu. V momentu, kdy na hmotu působí akcelerační síla, posune se ze své klidové polohy a deformuje pružiny, pomocí kterých je ukotvena. Jakmile akcelerační síla přestane působit, hmota se vrátí do své klidové pozice. Kapacitní akcelerometry měří akceleraci v závislosti na tom, jak se mění kapacita během působící akcelerace. Na pohyblivé hmotě jsou flexibilní elektrody a na rámu jsou fixní elektrody. Pro zjištění akcelerace je porovnávána kapacita mezi jednotlivými elektrodami, jak je ukázáno na obrázku 2.10. [17]

Struktura je schopna měřit akceleraci v jedné ose. Na trhu se lze setkat s akcelerometry, které jsou schopny snímat akceleraci v jedné, dvou nebo třech osách. Každá osa musí mít vlastní mechanickou strukturu. Na obrázku 2.11 lze vidět snímek tříosého akcelerometru. Uprostřed je možné vidět, že každá osa má svou vlastní mechanickou strukturu otočenou do svého směru.

Mimo mechanické struktury sensor obsahuje i další komponenty a obvody. Patří mezi ně analogově-digitální převodníky, obvod pro správu napájení a řízení logiky, obvody pro komunikační rozhraní (obecně se využívá rozhraní SPI a I²C), a jiné, které mohou být specifické pro daný typ akcelerometru. [54]



Obrázek 2.11: Snímek 3D akcelerometru [18]

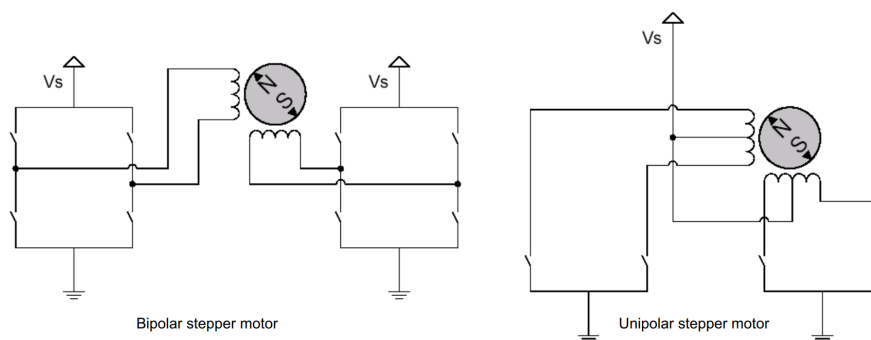
V dnešní době mají akcelerometry mnoho využití. Lze pomocí nich detekovat různá gesta jako například klik nebo dvojklik. Akcelerometry, které jsou schopny snímat data ve vysokých frekvencích lze použít jako vibrometry a kontrolovat pomocí nich stav motorů. Akcelerometr lze využít také jako inklinometr. Jedná se o zařízení, které má za úkol měřit náklon, sklon nebo úhel sklonu vzhledem k zemskému gravitačnímu vektoru [55]. Na tomto principu funguje v chytrých telefonech automatický náklon displeje, nebo lze realizovat různá gesta založená na definovaném pohybu s telefonem. V [55] je uvedeno, že inklinometry lze rozdělit do dvou následujících skupin:

- **Statické inklinometry** – Používají se zejména tam, kde je průměrná velikost akcelerace blízko zemské gravitaci, tedy daný objekt je v statické poloze, nebo se pohybuje jen mírně. Výpočet úhlu sklonu je výhradně z dat akcelerometru.
- **Dynamické inklinometry** – Využívají se pro aplikace, kde je zařízení vystaveno rychlému pohybu, vibraci nebo šokům. Pro korekci dat akcelerometru při rychlejším pohybu se používají data z gyroskopu.

2.5 Krokový motor

Krokové motory se používají zejména v aplikacích, kde je potřeba přesně definovaný posun. Známým příkladem použití krokových motorů je pohyb jednotlivých os u 3D tiskárny. Obecně motor samotný pracuje jako tzv. *open-loop system*, tzn. systém bez zpětné vazby [56]. To znamená, že pokud je potřeba vykonat 32 kroků a řídicí jednotka takový signál motoru pošle, není možné zjistit, zda byly všechny kroky vykonány. Pokud má motor pracovat v režimu

closed-loop a tedy kontrolovat, zda byl pohyb vykonán správně, je nutné přidat zpětnou vazbu. Zpětná vazba se může lišit podle specifikace aplikace. Základní zpětná vazba je enkodér (sleduje pozici osy motoru nebo rychlost [57]), můžou jí být ale i například senzory vzdálenosti či inklinometry, dle typu pohybu, ke kterému je motor použit.



Obrázek 2.12: Princip ovládání unipolárního a bipolárního motoru [19]

Na obrázku 2.12 lze vidět základní rozdělení krokových motorů dle druhu ovládání, které je dle [58]:

- **Unipolární motor** – Skládá se z dvou vinutí (cívek), kdy je vyvedena prostřední část jako separátní drát. Mají tedy 5 až 6 drátů (vyvedené středy jsou buď separátně, nebo dohromady). Vyvedené středy bývají permanentně zapojeny k napájení a konce cívek jsou dle potřeby uzemňovány, aby přes ně procházel proud. Podle toho, který konec cívky je uzemněn, se určuje směr procházejícího proudu.
- **Bipolární motor** – Skládá se z dvou vinutí (cívek), kdy jsou z motoru vyvedeny 4 dráty. Díky tomu, že vinutí není rozděleno na dvě poloviny a proud prochází celým vinutím, má větší točivý moment. Nevýhodou oproti unipolárním motorům je, že potřebují složitější obvod na ovládání (obecně se skládá z dvou H-můstek, pomocí kterých lze měnit směr proudu).

Mezi funkční parametry, dle kterých lze vybrat motor vhodný pro danou aplikaci patří [58]:

- **Velikost kroku** (*step size*) – Vyjadřuje, o kolik stupňů se osa motoru otočí na jeden krok. Některé motory mají v sobě zabudovanou převodovku s určitým převodovým poměrem, které umožňují získat menší velikosti kroku a většího točivého momentu. Naopak snižují celkovou rychlost motoru. Převodový poměr *gear_ratio* je udáván v dvou podobách, pro převodový poměr 64 v podobě zlomku $\frac{1}{64}$ nebo poměru 64:1.

Výslednou velikost kroku lze spočítat:

$$step_size = \frac{360}{steps_per_revolution} \cdot gear_ratio \text{ [deg]}. \quad (2.8)$$

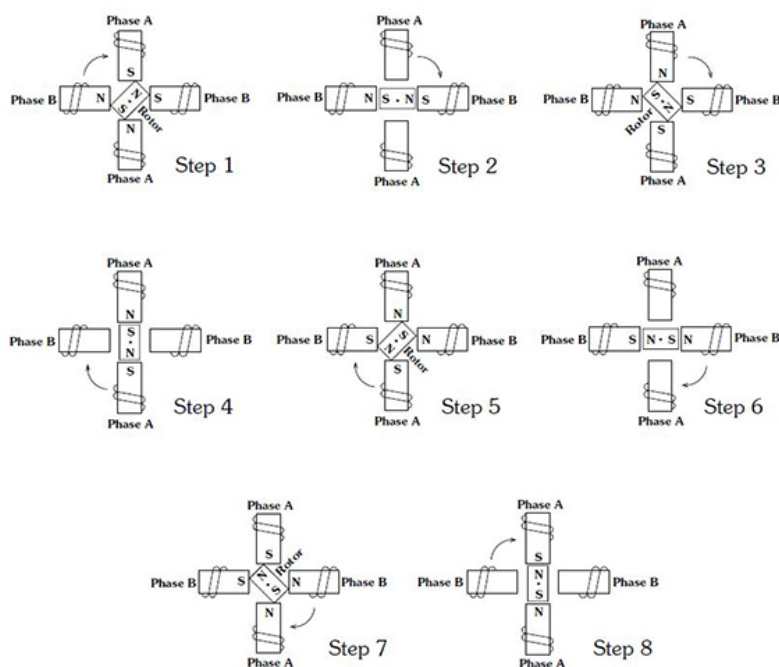
- **Točivý moment** (*torque*) – U krokových motorů se udávají následující druhy točivých momentů:
 - *Holding torque* – Potřebný točivý moment k otočení osy motoru při napájené cívce.
 - *Pull-in torque* – Točivý moment, proti kterému může motor zrychlit ze stacionární polohy bez vynechání kroku při otáčení konstantní rychlostí. Závisí na rychlosti kroku.
 - *Pull-out torque* – Zátěž, se kterou může motor pohybovat při provozní rychlosti. Závisí na rychlosti kroku.
 - *Detent torque* – Točivý moment potřebný k otočení osy motoru, pokud cívky nejsou napájeny.

Točivé momenty *pull-in* a *pull-out* jsou důležité při určení, zda osa motoru bude prokluzovat. V případě použití *open-loop* systému je kontrola nad počtem provedených kroků ztracena.

- **Tvar osy** (*shaft style*) – Osy mohou mít profil kulatý či D tvar, mohou mít ozubené kolečko přímo na ose nebo pro lineární pohyb mají hřídel vodícího šroubu [59].

Samotný pohyb osy motoru je vytvářen sekvencí spínání jednotlivých cívek v určitém pořadí. Způsoby, jak jednotlivé cívky spínat, jsou následující [58]:

- **Full-step with 1 coil energized** – Jedná se o spínání, kdy je v každém kroku napájena pouze jedna cívka. Na obrázku 2.13 odpovídá krokům 2, 4, 6, 8.
- **Full-step with 2 coils energized** – Oproti předchozímu přístupu jsou v každém kroku napájeny 2 cívky. Na obrázku 2.13 odpovídá krokům 1, 3, 5, 7. Má větší točivý moment než předchozí sekvence.
- **Half-step** – Vzniká spojením dvou předchozích přístupů. Díky tomu je možné získat 2× větší rozlišení kroků. Odpovídá celé sekvenci na obrázku 2.13.
- **Microstepping** – Jedná se o získání jemnějšího rozlišení kroků než v předchozích případech. Je založeno na postupném přepínání napájení cívek pomocí PWM (Pulse Width Modulation).

Obrázek 2.13: Ovládací sekvence typu *half-step* [20]

2.6 Analytická geometrie

Jedná se o matematickou disciplínu zabývající se vyjádřením geometrických útvarů pomocí rovnic v daném souřadnicovém systému. Pro potřeby práce je nutné znát výpočet vzdálenosti bodu od přímky a posun po přímce o určitou vzdálenost. Kvůli tomu je potřeba definovat parametrické vyjádření přímky a bodu v kartézském souřadnicovém systému. Bod A v kartézském souřadnicovém systému je dle [60] definován následovně:

$$A = [a_1, a_2]. \quad (2.9)$$

Pro různé 2 body A a B je dle [60] definován směrový vektor \vec{u} přímky AB:

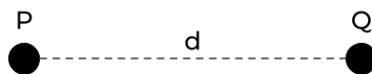
$$\vec{u} = (u_1, u_2) = B - A = (b_1 - a_1, b_2 - a_2). \quad (2.10)$$

Parametrická rovnice přímky $p(A, \vec{u})$, která je určena bodem A a směrovým vektorem \vec{u} s parametrem t , je dle [60] definována:

$$X = A + t \cdot \vec{u}; t \in \mathbb{R}, \vec{u} \neq 0. \quad (2.11)$$

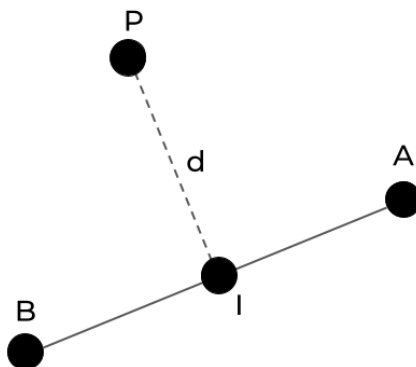
Základem pro výše zmíněné výpočty je znát vzdálenost d mezi obecnými body $P = [p_1, p_2]$ a $Q = [q_1, q_2]$, která je vyobrazena na obrázku 2.14 a definována:

$$d = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2}. \quad (2.12)$$

Obrázek 2.14: Vzdálenost d mezi obecnými body P a Q

2.6.1 Výpočet vzdálenosti bodu od přímky

Problém výpočtu vzdálenosti bodu od přímky (na obrázku 2.15) lze převést na nalezení průsečíku dvou na sebe kolmých přímek a následné vypočtení vzdálenosti mezi průsečíkem a zadaným bodem.

Obrázek 2.15: Vzdálenost d mezi bodem P a přímkou definovanou body A a B

Z bodu P je vytvořena přímka přiřazením normálového vektoru přímky AB jako směrového vektoru a definujeme přímky L_1 a L_2 následovně:

$$\begin{aligned} L_1 &= \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} b_1 - a_1 \\ b_2 - a_2 \end{pmatrix}, \\ L_2 &= \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} + s \cdot \begin{pmatrix} b_2 - a_2 \\ -b_1 + a_1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \tag{2.13}$$

Pro průsečík I platí, že leží přímkách L_1 i L_2 , tedy hledané parametry s a t vyhovují následujícímu vztahu:

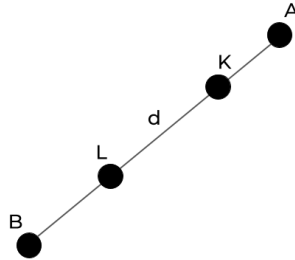
$$L_1 = L_2. \tag{2.14}$$

Po dosazení a úpravě lze vyjádřit parametry s a t :

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_2 - a_2 & -(b_1 - a_1) \\ -b_1 + a_1 & -(b_2 - a_2) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} a_1 - p_1 \\ a_2 - p_2 \end{pmatrix}. \tag{2.15}$$

Výsledný bod I lze spočítat dosazením parametru t do rovnice L_1 nebo dosazením parametru s do rovnice L_2 . Po zjištění souřadnic bodu I lze následně spočítat vzdálenost d mezi nalezeným bodem I a cílovým bodem P .

2.6.2 Výpočet bodu ve vzdálenosti po přímce



Obrázek 2.16: Bod L ve vzdálenosti d od bodu K na přímce definované body A a B

Nechť je přímka definována body AB a leží na ní bod K . Úlohou je zjistit souřadnice bodu L , který také leží na přímce AB a je ve vzdálenosti d od bodu K . Pro tento výpočet je potřeba, aby byl směrový vektor přímky AB normovaný (tedy jeho norma je 1). Normovaný, také zvaný jednotkový, vektor lze z obecného vektoru získat znormováním následovně:

$$\hat{u} = \frac{u}{\|u\|} = \frac{u}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}. \quad (2.16)$$

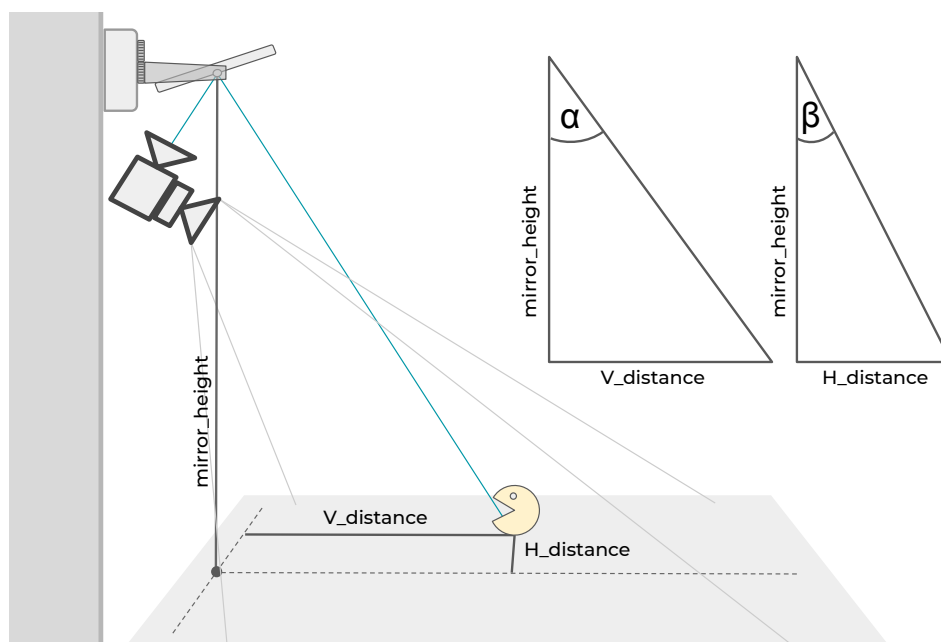
Výsledné souřadnice bodu L ve vzdálenosti d od bodu K na přímce AB lze spočítat následovně:

$$L = K + d \cdot \hat{u}. \quad (2.17)$$

Návrh přípravku a realizace hardwarové části

Kapitola se skládá z metodiky měření, kde je vysvětlen princip zjištění reálné vzdálenosti objektu od přípravku ze snímku přehledové kamery a následné určení náklonu zrcadla tak, aby jej detailní kamera správně zacílila. Dále je obsažen popis jednotlivých částí přípravku a použitý hardware.

3.1 Metodika měření



Obrázek 3.1: Nákres snímané scény

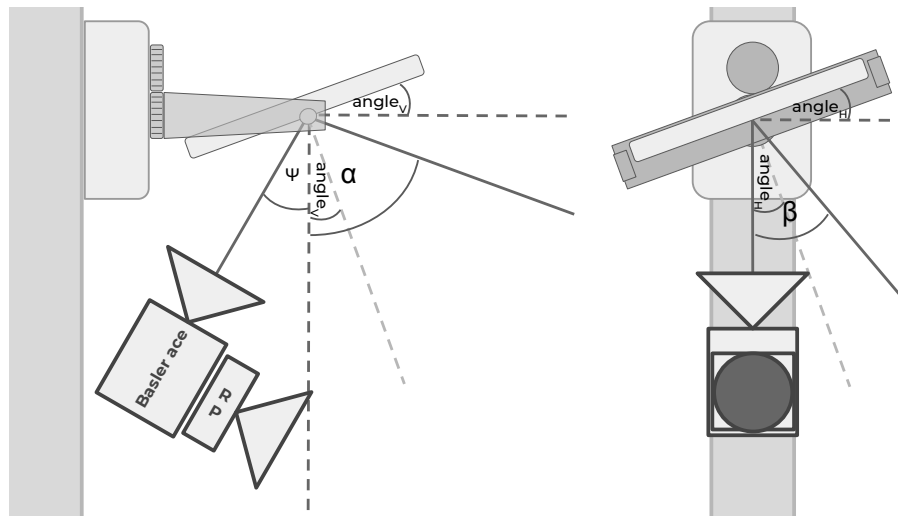
Kamerový systém se skládá z přehledové kamery, která snímá požadovaný prostor, a detailní kamery, která snímá oblast zájmu přes zrcadlo. Zrcadlo je možné naklonit v dvou na sebe kolmých osách. Pro zacílení hledaného objektu je potřebné zrcadlo správně nasměrovat. Výpočet výsledného náklonu zrcadla lze rozdělit na náklon ve vertikálním a horizontálním směru. Idea první části výpočtu je zobrazená na obrázku 3.1. Zde je nutné zjistit, jaký úhel svírá hledaný objekt s kamerou, přičemž se vrchol úhlu nachází uprostřed odrazové vrstvy zrcadla. Pro tento účel je zkonstruována imaginární svislá osa od středu odrazové vrstvy zrcadla k snímané ploše (na obrázku 3.1 *mirror_height*). Dále je pro výpočet svíraného úhlu potřebné zjistit vzdálenost hledaného objektu v horizontálním a vertikálním směru. Horizontální vzdálenost (na obrázku 3.1 *H_distance*) je spočtena od přímky, která je projekcí vertikální osy přehledové kamery na snímanou plochu. Vertikální vzdálenost (na obrázku 3.1 *V_distance*) je spočtena od přímky, která je na předchozí osu kolmá a prochází bodem imaginární svislé osy na snímané ploše. Poslední informace, která je potřebná k výpočtu, je vzdálenost odrazové vrstvy zrcadla od snímané plochy, tedy zkonstruované osy *mirror_height*. Následně lze vyjádřit úhly α a β znázorněné na obrázku 3.1 následovně:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctan\left(\frac{V_distance}{mirror_height}\right), \\ \beta &= \arctan\left(\frac{H_distance}{mirror_height}\right).\end{aligned}\tag{3.1}$$

Ke korektnímu určení vzdáleností *H_distance* a *V_distance* v reálných jednotkách je potřebné zjistit převod z informací v pixelech na reálné jednotky. K tomu účelu lze využít perspektivní transformaci. Transformace je realizována pomocí homografické matice [61]. K vytvoření matice je třeba namapovat body z reálného světa na snímek. Pro tento účel je potřebný referenční objekt známých rozměrů a tvaru (pro jednoduchost 2D objekt – obdélník, lichoběžník, nebo jiný tvar, který lze popsat konečným počtem bodů, minimálně však čtyřmi) a je možné jej nasnímat pomocí přehledové kamery. Výsledná matice po aplikaci na snímek odstraní perspektivu a převede informaci v jednotkách pixelů na reálné rozměry. Následně je možné zjistit horizontální a vertikální vzdálenost objektu od referenčních přímek.

Nyní je potřeba naklonit zrcadlo tak, aby mezi detailní kamerou a snímaným objektem byly výše vypočtené úhly. Pro náklon zrcadla v horizontálním směru *angle_H* (obrázek 3.2 vpravo) je optická osa nasměrovaná vertikálně. Ze zákona odrazu [52], říkájícího že úhel dopadu je stejný jako úhel odrazu, lze pro úhel β svíraný mezi optickou osou a hledaným objektem odvodit náklon zrcadla *angle_H*:

$$angle_H = \frac{\beta}{2}.\tag{3.2}$$



Obrázek 3.2: Nákres k výpočtu úhlů zrcadla

Pro vertikální úhel (obrázek 3.2 vlevo) je situace trochu odlišná. Optická osa je vůči zrcadlu ve vodorovné poloze v úhlu ψ , tudíž úhel svíraný mezi optickou osou a hledaným objektem není α , ale $\alpha + \psi$. Navíc, pokud je zrcadlo ve vodorovné poloze ve vertikálním směru, je úhel svíraný zrcadlem $2 \cdot \psi$. Z úhlu $\psi + \alpha$ (úhel svíraný mezi optickou osou a hledaným objektem) lze náklon zrcadla $angle_V$ vyjádřit následovně:

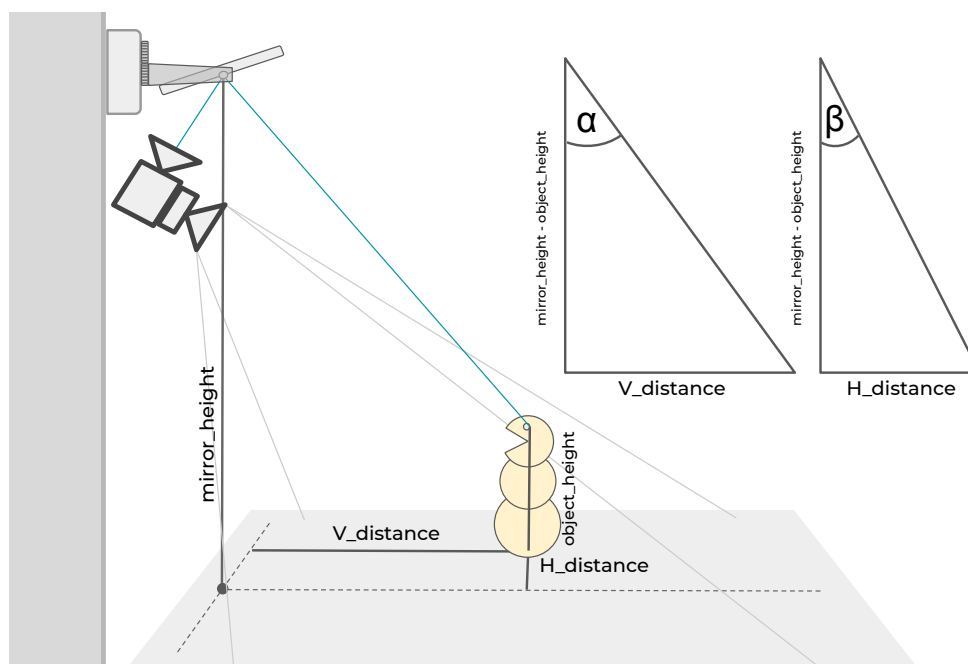
$$\begin{aligned}
 2 \cdot (\psi + angle_V) &= \psi + \alpha \\
 \psi + angle_V &= \frac{\psi + \alpha}{2} \\
 angle_V &= \frac{\psi + \alpha}{2} - \psi \\
 angle_V &= \frac{\alpha - \psi}{2}.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Výše popsaným způsobem je možné spočítat náklon pro objekty na snímané ploše, kdy je výška objektu $object_height$, čili vzdálenost od snímané plochy rovna nule. Pokud je potřeba zaměřit objekt v nenulové výšce, je výsledný náklon zrcadla jiný než pro zaměření v nulové výšce.

Na obrázku 3.3 je zobrazena idea výpočtu pro nenulovou výšku. Od bodu na snímané ploše je vedena kolmice o délce $object_height$ milimetrů. Výsledné úhly α a β od druhého bodu kolmice lze spočítat následovně:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \arctan\left(\frac{V_distance}{mirror_height - object_height}\right), \\
 \beta &= \arctan\left(\frac{H_distance}{mirror_height - object_height}\right).
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

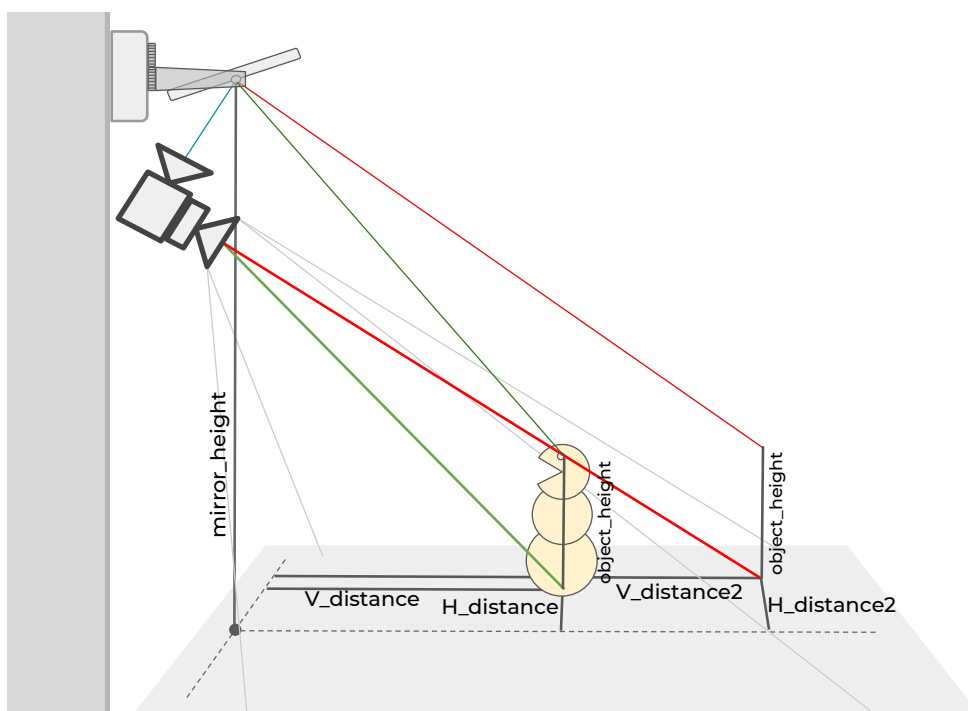
3. NÁVRH PŘÍPRAVKU A REALIZACE HARDWAROVÉ ČÁSTI



Obrázek 3.3: Nákres výpočtu úhlů pro nenulovou výšku objektu

Dalším krokem je určit, jak musí být tento bod vybrán na přehledovém snímku. Na obrázku 3.4 je znázorněn chybný a správný postup. Pomocí červených přímek je na obrázku 3.4 ukázán případ, kdy je na přehledovém snímku zvolen bod již v určité výšce (například obličej snímané postavy, nebo objekt ležící na stole). Jelikož snímek je 2D projekcí 3D světa, promítne se tento bod na snímanou plochu ve vzdálenostech $V_distance2$ a $H_distance2$. Tyto vzdálenosti jsou odlišné od vzdáleností požadovaného objektu a výsledná odchylka vzdáleností závisí na perspektivě přehledové kamery. Pokud jsou od těchto vzdáleností spočteny úhly α a β nezávisle na použití informace *object_height*, požadovaný objekt zrcadlem nezaměříme.

Správným postupem je na přehledovém snímku vybrat bod, který leží na snímané ploše kolmo pod požadovaným cílem. Po vyvedení pomyslné kolmice roviny snímané plochy ze zvoleného bodu o velikosti *object_height* (ve výpočtu odečtení výšky objektu od výšky zrcadla) je zjištěna správná pozice bodu. Následně jsou spočteny správné úhly α a β . Příkladem výběru takového bodu může být bod mezi chodidly u člověka. Na obrázku 3.4 je tento postup vyznačen zelenými přímkami.

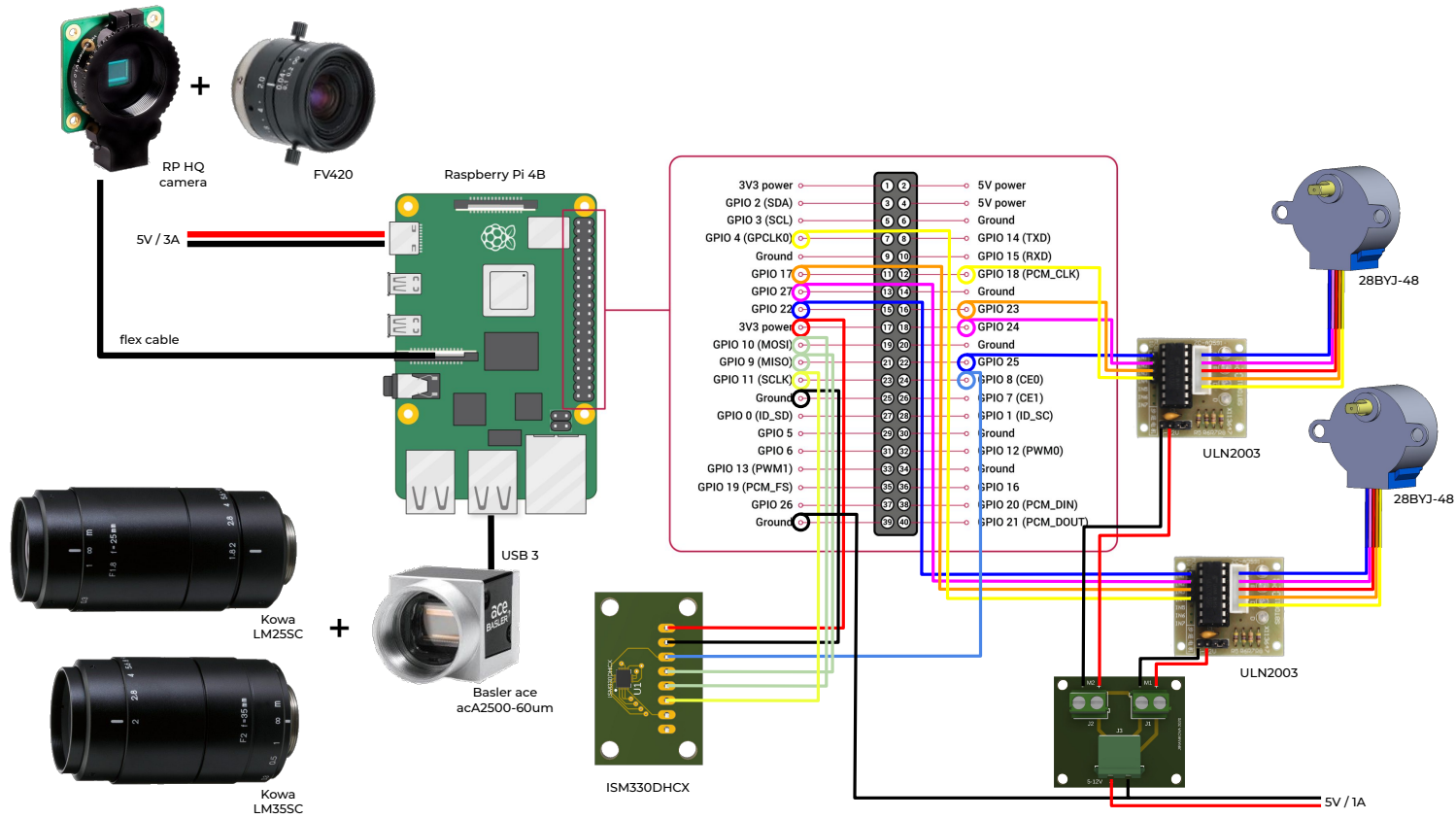


Obrázek 3.4: Chybný (červeně) a správný (zeleně) výběr bodu na přehledovém snímku pro nenulovou výšku objektu

3.2 Vybraný hardware

V následující sekci jsou popsány technické specifikace zvoleného hardwaru. Řídicí jednotkou celého přípravku je minipočítač Raspberry Pi 4B, na který jsou připojeny všechny periferie. Jako přehledová kamera slouží Raspberry Pi HQ camera s 4mm objektivem firmy Myutron připojena přes dedikovaný flexibilní kabel. Detailní kamerou je Basler ace s objektivy ohniskové vzdálenosti 25 a 35 mm firmy Kowa. Kamera je připojena přes rozhraní USB 3.0. K GPIO pinům minipočítače jsou připojeny dva krokové motory 28BYJ-48 starající se o náklon zrcadla. Dále je k pinům připojen inklinometr ISM330DHCX zajišťující zpětnou vazbu, který komunikuje přes rozhraní SPI. Schéma zapojení hardwarových komponent je znázorněno na obrázku 3.5.

Napájení celé sestavy zajišťují dva separátní zdroje. První slouží pro napájení Raspberry Pi s výstupním napětím 5 V a proudem 3 A a druhý pro krokové motory s výstupním napětím 5 V a proudem 1 A.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení hardwaru [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]

3.2.1 Raspberry Pi 4B

Zvolený minipočítač Raspberry Pi 4B obsahuje 64bitový procesor Broadcom BCM2711 (Quad core Cortex-A72) s pamětí RAM o velikosti 4 GB. Pro připojení periferií obsahuje dva USB 3.0 porty, dva USB 2.0 porty a 40 GPIO pinů. Dále je možné k němu připojit až 2 monitory přes micro-HDMI konektory (v rozlišení až 4K při 60 FPS). Pro připojení kamer V1, V2 a HQ disponuje separátním kamerovým konektorem. Z komunikačních standardů podporuje Bluetooth 5.0, Bluetooth Low Energy, gigabitový ethernet a 2.4/5.0 GHz IEEE 802.11ac bezdrátový standard. Lze jej napájet USB-C zdrojem o napětí 5 V/3 A nebo přes PoE (ke kterému je nutné mít příslušnou přídatnou desku). Úložiště minipočítače je zajištěno pomocí microSD karty, kde je nahrán operační systém Raspberry Pi OS (Raspbian) 32bit. Operační systém Raspberry Pi OS byl vybrán, jelikož je všeobecně pro tuto platformu doporučován [62].

3.2.2 Přehledová kamera – Raspberry Pi High quality camera

Přehledová kamera má za úkol snímat požadovanou scénu, tudíž má větší prioritu velikost zorného pole než rozlišení výsledného snímku.



Obrázek 3.6: Raspberry Pi High quality camera [21]

Jako přehledová kamera byla vybrána Raspberry Pi High Quality camera (obrázek 3.6). Jedná se o kameru se snímacím čipem Sony IMX477 o velikosti senzoru $6,287 \times 4,712$ mm (1/2.3") a rozlišení až 4056×3040 px. K snížení citlivosti snímače na infračervené vlnové délky obsahuje kamera IR filtr. Lze k ní připojit objektivy s bajonetem typu C a CS (obsahuje C-CS redukci) a vzdálenost mezi objektivem a snímacím čipem lze nastavit pomocí nastavitelného závitu. Upevnit lze kameru pomocí čtyř M2 šroubů nebo pomocí odjímatelného držáku na standardní kamerový závit. K samotnému Raspberry Pi je kamera připojena pomocí flexibilního kabelu. [63, 42]

3. NÁVRH PŘÍPRAVKU A REALIZACE HARDWAROVÉ ČÁSTI

Ke kameře byl zvolen objektiv FV0420 firmy Myutron. Jedná se o objektiv s fixní ohniskovou vzdáleností 4 mm, rozsahem pracovní vzdálenosti $0,1-\infty$ m, který je určen pro senzory maximálního formátu 1/2" [64]. Spolu s kamerou je možné získat zorné pole v rozsahu až 76° horizontálně a 60° vertikálně.

3.2.3 Detailní kamera – Basler ace acA2500-60um

Kamera, jejíž pohled je směřován zrcátkem, je Basler ace acA2500-60um (obrázek 3.7). Model obsahuje snímací čip PYTHON 5000 formátu 1" o velikosti $12,4 \times 9,8$ mm s rozlišením 2590×2048 px. Čip neobsahuje barevný filtr, kamera je tedy monochromatická. Její komunikační rozhraní je USB 3.0. Je možné ji upevnit pomocí čtyř M2 šroubů. [22]

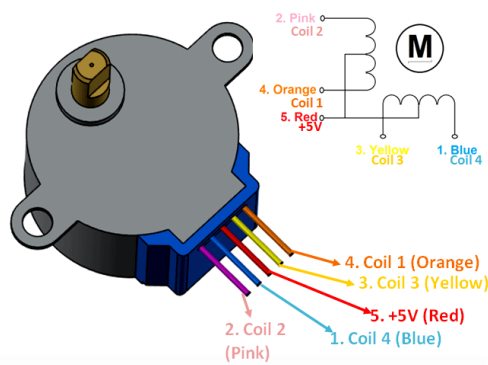


Obrázek 3.7: Basler ace acA2500-60um [22]

Ke kameře jsou připojovány 2 objektivy s ohniskovou vzdáleností 25 mm a 35 mm. Pomocí objektivu s ohniskovou vzdáleností 35 mm je demonstrována ukázka zacílení na objekt na snímané ploše pro získání většího rozlišení. Tento objektiv není možné použít na úlohu zacílení na obličej, jelikož ve vzdálenosti od kamery, kde se nachází obličej v různých částech místnosti, není možné dosáhnout takové hloubky ostrosti, aby bylo možné získat pokaždé ostrý obrázek. Pro tuto úlohu je využít objektiv s ohniskovou vzdáleností 25 mm. Oba objektivy byly vyrobeny firmou Kowa a jejich produktová čísla jsou LM25SC a LM35SC. Oba objektivy jsou určeny pro senzor formátu 1". [23]

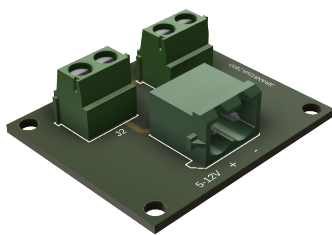
3.2.4 Krokové motory 28BYJ-48 s řídicí deskou ULN2003A

Krokové motory 28BYJ-48 slouží k pohybu náklonu zrcadla. Podle informací v dokumentaci [65] je úhel kroku $5,625^\circ/64$. To znamená, že počet kroků na celých 360° je roven $\frac{360^\circ}{5,625^\circ}$, což je 64. Hodnota platí pouze při řízení motoru v módu *half-step*. Pro řízení motoru ve *full-step* módu je počet kroků na otáčku 32. Pokud by motor neměl vestavěný převodový poměr, bylo by výsledných 64, resp. 32 kroků potřebných na jednu otáčku osy motoru. Dokumentace motoru uvádí, že převodový poměr je $\frac{1}{64}$, to znamená, že na jednu celou otáčku koncové osy motoru je nutné vykonat $64 \cdot 64 = 4096$, resp. $32 \cdot 64 = 2048$ kroků. Jelikož je tento motor velice populární, nevyhnul se detailnějšímu zkoumání a podle více zdrojů [66, 67, 68] není převodový poměr $\frac{1}{64}$, ale $\frac{1}{63,68395}$. Převodová soustava



Obrázek 3.8: Krokový motor 28BYJ-48 s vyznačením připojení cívek [28]

se totiž skládá z celkem 4 převodů, a to konkrétně: $\frac{32}{9} \cdot \frac{22}{11} \cdot \frac{26}{9} \cdot \frac{31}{10}$ [66], což udává převodový poměr 1/63,68395. Reálný počet kroků na otáčku pro *full-step* mód by měl být zhruba 2038 kroků, tj. o 10 kroků na otáčku méně, než se udává v dokumentaci. Pro ověření počtu kroků byla vymodelována a vytisknuta pomůcka, která bude detailněji popsána v softwarové části práce.



Obrázek 3.9: Model plošného spoje napájení pro dva krokové motory

Pro ovládání motoru je použita řídicí deska ULN2003A, která je obvykle s tímto motorem dodávána. Lze ji napájet v rozmezí 5 až 12 V. Zde je vzhledem k vstupnímu napětí motoru napájena 5 V. Jelikož jsou motory dva, byla navržena¹ rozdvojka² napájení (vyobrazena na obrázku 3.9). Pomocí řídicí desky je možné motor ovládat jako unipolární motor. Obsahuje 4 vstupy, kterými lze uzemňovat jednotlivé konce cívek, které jsou zobrazeny na obrázku 3.8. Přivedením hodnoty 1000 v pořadí $IN1$, $IN2$, $IN3$, $IN4$ na vstup je uzemněna cívka na pozici $IN1$. Začne přes ní procházet proud, vznikne

¹Návrh plošného spoje byl zhotoven v programu Autodesk Fusion 360. Zdrojový soubor plošného spoje je přiložen k práci.

²Schéma zapojení rozdvojky lze nalézt v příloze A.

3. NÁVRH PŘÍPRAVKU A REALIZACE HARDWAROVÉ ČÁSTI

magnetické pole a rotor se pootočí. Motor lze pomocí ULN2003A řídit ve třech módech a to *full-step* pouze s jednou cívkou sepnutou v jeden moment, *full-step* s dvěma cívkami sepnutými najednou (tzn. kroky jsou fázově o půl kroku posunuté oproti minulému módu) a *half-step* módu. Řídící sekvence jsou znázorněny v tabulce 3.1. V přípravku je použito ovládání pomocí řídicí sekvence *full-step* s dvěma cívkami sepnutými zároveň k zajištění většího točivého momentu.

Full-step mód – jedna cívka								
Krok	0	1	2	3	4	5	6	7
IN1	1	0	0	0	1	0	0	0
IN2	0	1	0	0	0	1	0	0
IN3	0	0	1	0	0	0	1	0
IN4	0	0	0	1	0	0	0	1

Full-step mód – dvě cívky								
Krok	0	1	2	3	4	5	6	7
IN1	1	0	0	1	1	0	0	1
IN2	1	1	0	0	1	1	0	0
IN3	0	1	1	0	0	1	1	0
IN4	0	0	1	1	0	0	1	1

Half-step mód								
Krok	0	1	2	3	4	5	6	7
IN1	1	1	0	0	0	0	0	1
IN2	0	1	1	1	0	0	0	0
IN3	0	0	0	1	1	1	0	0
IN4	0	0	0	0	0	1	1	1

Tabulka 3.1: Řídící sekvence krokového motoru

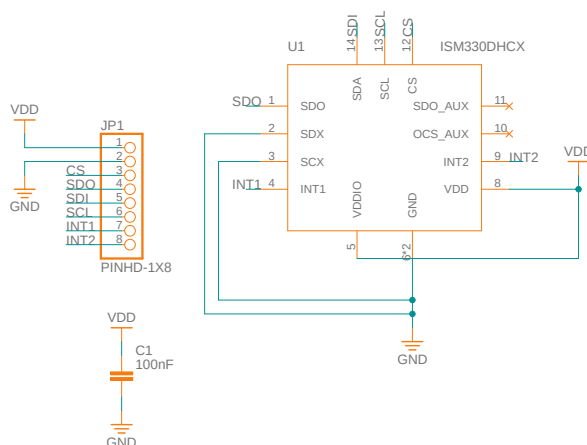
3.2.5 Senzor ISM330DHCX

Zpětnou vazbu pro krokové motory obstarává IMU (Inertial Measurement Unit) ISM330DHCX firmy STMicroelectronics. Pod pojmem IMU se rozumí kolekce měřících nástrojů, které shromažďují data o pohybu daného zařízení. IMU zpravidla obsahuje akcelerometr, gyroskop a magnetometr [69].

ISM330DHCX obsahuje 3D akcelerometr a gyroskop. Lze jej napájet napětím 1,71–3,6 V. Jako komunikační rozhraní lze využít SPI, nebo I²C, pro OIS (*Optical Image Stabilizer*) modul nabízí pomocné SPI rozhraní. V přípravku je používáno komunikační rozhraní SPI, jelikož umožňuje větší přenosovou rychlost [70]. Větší množství dat je možné uložit do FIFO s velikostí až 9 kB dat. Mezi další funkce modulu patří MLC (*Machine Learning Core*), pomocí

kterého je možné detekovat události vyhodnocené rozhodovacími stroji přímo v modulu a snížit tím celkovou spotřebu [71]. Umí také fungovat v tzv. *sensor hub* módu, kdy je schopný shromažďovat data z jiných senzorů a obsahuje různé *smart* vestavěné funkce. [72, 73]

V přípravku sensor zastává roli inklinometru. Jelikož je dostačující měřit náklon zrcadla pouze v stacionární poloze a ne při pohybu, je model statického inklinometru dostačující. Důvodem výběru senzoru ISM330DHCX nad IIS3DHHC, který je doporučený dle [55] pro úlohu statického inklinometru, je větší citlivost (0,061 mg/digit v porovnání 0,076 mg/digit). Dalším důvodem je větší paměť FIFO, jelikož v senzoru IIS3DHHC je možné uložit 32 vzorků akcelerace, zatímco v senzoru ISM330DHCX je možné uložit až 512 nekomprimovaných vzorků akcelerace [73, 74]. IIS3DHHC má proti ISM330DHCX nižší hustotu šumu ($45 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ v porovnání s $60 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ [74, 72]), kterou je ale možné dle [55] eliminovat průměrováním více vzorků.



Obrázek 3.10: Schéma zapojení adaptéru pro ISM330DHCX

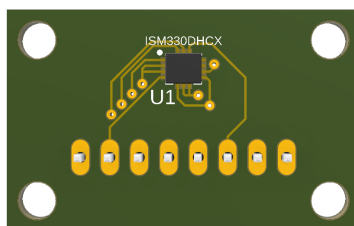
Senzor jako takový má rozměry $2,5 \times 3,0 \times 0,83$ mm [72] a aby s ním bylo možné komunikovat, je nutné jej připájet na PCB buď samostatně (adaptér, ke kterému je možné se pomocí konektoru připojit), nebo na společné PCB vedle ostatních součástek. Senzor existuje již s adaptérem na DIL24 socket pod názvem STEVAL-MKI207V1 [75], nicméně tento adaptér není možné připevnit napevno na jinou plochu.

Pro přípravku byl navržen³ plošný spoj adaptéru, který je možné upevnit pomocí čtyř M3 šroubů. Senzor je schopný fungovat v čtyřech módech komunikace (mohou být k němu připojeny externí senzory nebo více hostitelských zařízení) [72]. Pro tento přípravek sensor funguje v módu 1, kdy komunikuje

³Návrh plošného spoje byl zhotoven v programu Autodesk Fusion 360. Zdrojový soubor plošného spoje je přiložen k práci.

3. NÁVRH PŘÍPRAVKU A REALIZACE HARDWAROVÉ ČÁSTI

pouze s jedním hostitelským zařízením a podle toho je rozvržené připojení pinů na plošném spoji. Schéma desky je zobrazeno na obrázku 3.10 a výsledný model PCB je možné vidět na obrázku 3.11. Jedná se o dvouvrstvý tištěný spoj.



Obrázek 3.11: Model adaptéru pro ISM330DHCX

3.3 Mechanické součásti

Mimo hardwarové součástky přípravek dále obsahuje mechanické součásti. Jedná se o plastové (PLA) výtisky⁴, mezi které patří otočný systém pro zrcadlo, držák pro kamery a držák pro hardware. Dále obsahuje tři ložiska (vnitřní průměr 8 mm, vnější průměr 12 mm a šířka 8 mm), osu pro zrcadlo z kalené oceli o průměru 8 mm, upínací prvky pro osu a spojovací materiál. Do funkčního celku jsou spojeny pomocí dvou hliníkových tyčí čtvercového průřezu šířky 40 mm.

3.3.1 Otočný systém zrcadla

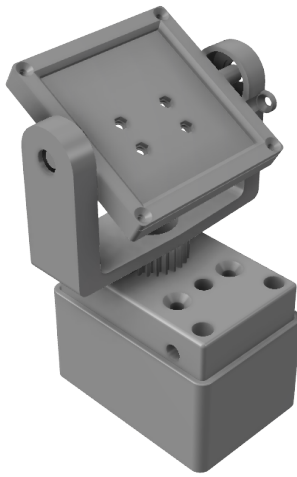
Dvouosý otočný systém zrcadla je navržen tak, aby střed náklonu zrcadla byl umístěn uprostřed zrcadla na jeho odrazovém povrchu. Na střed je zároveň nasměrována optická osa detailní kamery. Tímto je dosaženo skutečnosti, že při jakémkoliv náklonu je optická osa objektivu nasměrována do středu zrcadla a při náklonu je využita největší možná plocha.

Systém se skládá z několika částí. První částí je základna, v které je ukotven motor a pomocí koncového upevnění ukotvena ocelová osa, kterou motor pomocí ozubených koleček otáčí. Na osu je namontován prvek, v kterém jsou umístěna tři ložiska a koncové upevnění ocelové osy. V dvou ložiskách je ukotven držák na zrcadlo a inklinometr. Navazující držák se skládá ze samotné základny, kde je zasazen inklinometr a zrcadlo, a obvodového krytu zrcadla.

⁴Modely byly zhotoveny v programu Autodesk Fusion 360 a vytištěny pomocí tiskárny Prusa i3 MK3S. Zdrojové soubory ve formátu STL jsou přiloženy k práci.

Pod základnou je umístěn distanční kryt pro posun zrcadla více do prostoru. 3D model otočného systému je zobrazen na obrázku 3.12.

V držáku zrcadla bylo použito *first surface mirror* určené jako náhradní díl do projektoru. Z dostupných rozměrů bylo vybráno zrcadlo o rozměrech 120×70 mm a tloušťce 2 mm. Výrobce uvádí jako materiál substrátu sklo, materiál odrazové vrstvy není specifikován. Odrazová vrstva je chráněna fólií, kterou je potřeba před použitím zrcadla odlepit.



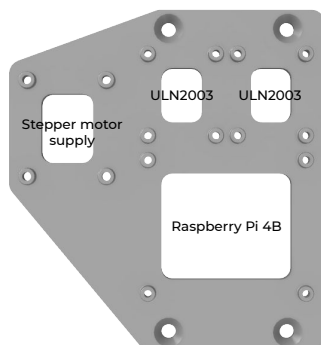
Obrázek 3.12: 3D model otočného systému zrcadla

K upevnění zrcadla do držáku bylo nutné zrcadlo uříznout na rozměr 70×70 mm. Na uříznutí skla je potřeba řezač skla (dle [76] existují diamantové a karbidové), dřevěná tyč, fixa a rovný povrch podložený měkkým materiálem. Aby při řezání zrcadla nebyla poškozena odrazová vrstva, je na zrcadle ponechána ochranná fólie a je otočeno fólií směrem dolů. Podle [76] je postup řezání skla následovný:

1. Povrch skla řádně vyčistit od nečistot.
2. Sklo položit na rovný povrch podložený měkkým materiálem (kus látky, noviny, ...), aby byly eliminovány nerovnosti.
3. Vyměřit požadovanou velikost a vyznačit, kde bude sklo řezáno.
4. Řezací kolečko jemně naolejovat. Pravítko či jiné vodítko srovnat s vyznačenou přímkou na skle. Pomalu od kraje ke kraji s mírným tlakem vést řezací kolečko podél vodítka směrem k sobě.
5. Sklo opatrně nadzvednout a položit pod řezanou linii dřevěnou tyč. Na obě strany skla zatlačit proti tyči, aby se sklo zlomilo.

3.3.2 Držák hardwaru

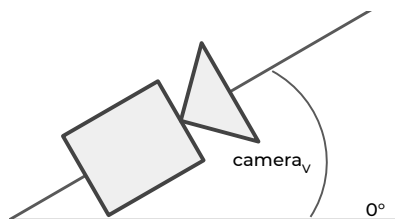
Dalším plastovým výtiskem je držák k hardwaru. Slouží k připevnění hardwarových desek – Raspberry Pi, dvě řídicí desky ULN2003 a rozdvojky napájení pro krokové motory.



Obrázek 3.13: Držák pro řídicí hardware

3.3.3 Držák dvou kamer

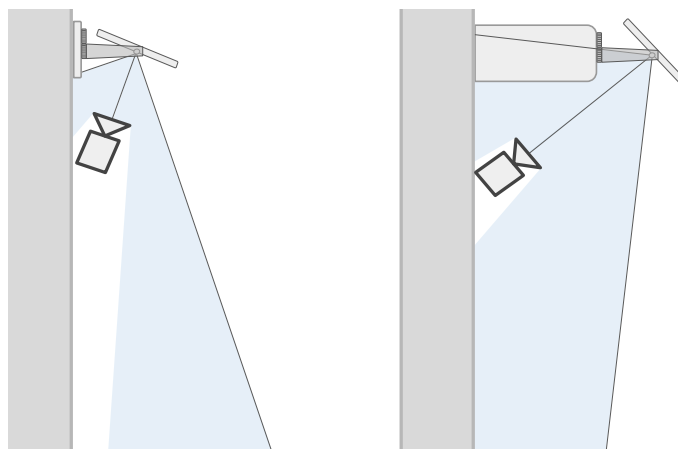
Pro obě kamery je potřeba určit, pod jakým vertikálním úhlem $camera_v$ budou vůči horizontální rovině (vyobrazeno na obrázku 3.14). U přehledové kamery je vertikální zorné pole zhruba 60° (tzn. -30° až 30° vůči optické ose kamery). Vertikální úhel $camera_v$ pro přehledovou kameru byl zvolen -60° , aby kamera snímala prostor začínající kolmo pod ní.



Obrázek 3.14: Vertikální úhel kamery $camera_v$

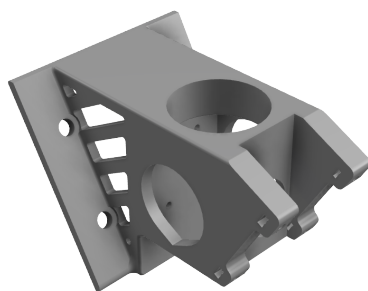
Pro náklon detailní kamery je nutné zvážit více faktorů. Jedním z nich je velikost celého přípravku. Pokud bude kamera mít vertikální úhel blízko 90° , bude celý přípravek kompaktní (zrcadlo bude přímo nad kamerou). Pokud se úhel náklonu bude blížit 0° , bude muset být otočný systém zrcadla oddělen od kamery.

Dalším faktorem rozhodování o vertikálním náklonu kamery je velikost a pozice snímaného zorného pole. Na obrázku 3.15 je znázorněn vliv pozice zrcadla od kamery. Pokud je zrcadlo nad kamerou, lze získat detail snímané plochy před přípravkem, ale snímanou plochu pod systémem si kamera zastíňuje. Naopak pokud je zrcadlo dál od kamerového systému, zorné pole do prostoru je menší, ale naopak je možné snímat i pod přípravkem. Výsledné rozměry snímaného pole přehledovou i detailní kamerou určuje výška, v které je přípravek připevněn. Je potřeba také zmínit, že s přibývajícím odklonem zrcadla od optické osy se plocha zrcadla zmenšuje.



Obrázek 3.15: Snímaná oblast s různou pozicí kamery vůči zrcadlu

V přípravku má detailní kamera vertikální úhel 60° od horizontální roviny, aby byl možný pohled i pod přípravek. Reálná schopnost zacílení pod přípravek je zobrazena na snímcích v kapitole 5. Výsledný držák dvou kamer je zobrazen na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16: Držák pro přehledovou a detailní kameru

3.4 Vytvořený prototyp

Na obrázku 3.17 lze vidět výsledný prototyp sestavený z výše popsaného hardwaru a mechanických součástí. Vytvořený prototyp je realizací konceptu pro problém získání detailního snímku pomocí otočného zrcadla.



Obrázek 3.17: Prototyp kamerového systému

Realizace softwarové části

V kapitole je detailně popsána softwarová část práce, tzn. kód ovládající výsledný přípravek.

Celý kód je psaný v jazyce Python 3, jelikož je pomocí něj možné ovládat potřebné periferie a kód je snadno rozšiřitelný pro průmyslové aplikace. Jako prototypovací prostředí byl použit Jupyter notebook, v kterém je i připravena ukázka použití výsledného přípravku. Softwarová část se skládá z kódů pro ovládání akcelerometru, dvou krokových motorů, přehledové a detailní kamery, interaktivního okna a aplikace, která periferie obsluhuje a spojuje. Každá z pěti komponent softwarové části má svou vlastní třídu pro obsluhu. Všechn zdrojový kód (včetně Jupyter notebooků s demonstrací aplikace a pomocnými výpočty) je přiložen k práci.

4.1 Ovládání senzoru ISM330DHCX

Senzor ISM330DHCX disponuje dvěma komunikačními rozhraními. Těmi jsou I²C nebo SPI. Kvůli rychlejší přenosové rychlosti, kterou SPI nabízí, je zde využito komunikační rozhraní SPI. Komunikaci a obsluhu akcelerometru zajišťuje třída *AccelerometerControl*.

První krok, který je nutné udělat, aby bylo možné rozhraní SPI v Raspberry Pi používat a tak ovládat senzor, je povolit jej v konfiguraci operačního systému. Povolit jej lze dle [77] dvěma způsoby – přes grafické rozhraní a nebo z příkazové řádky.

- **Přes grafické rozhraní**

1. Hlavní menu → *Preferences* → *Raspberry Pi Configuration*
2. Přepnout záložku na *Interfaces*
3. Povolit SPI

- **Přes příkazovou řádku**

1. V příkazové řádce spustit příkaz:

```
sudo raspi-config
```

2. Zvolit možnost *5 Interfacing options*
3. Povolit *P4 SPI*

Aby byly změny aplikovány, je v obou případech nutné Raspberry Pi restartovat. Pro obsluhu SPI rozhraní pomocí jazyka Python je použit balíček *spidev*. Pokud z nějakého důvodu není balíček v systému nainstalován, lze jej nainstalovat z příkazové řádky následovně:

```
pip install spidev
```

Pro použití *spidev* balíčku jej stačí naimportovat:

```
1 import spidev
```

Aby bylo možné senzor ovládat a tudíž ho nakonfigurovat a později z něj číst data, bude potřeba zkonstruovat dvě hlavní funkce – zapisování do registru a čtení z registru senzoru. Z dokumentace [72] v sekci *5.1.2 SPI bus interface* je možné zjistit, jak se senzorem komunikovat. Obecné schéma je následující:

- **bit 0:** $R\overline{W}$ – Tento bit určuje, zda je z registru čteno či zapisováno. Pro čtení z registru má bit hodnotu logické 1, pro zápis do registru má bit hodnotu logické 0.
- **bit 1-7** ADD[6:0] – Posledních 7 bitů adresy registru
- **bit 8-15** DI[7:0] (MSB vlevo) – Mód zápisu, data zapisovaná do senzoru
- **bit 8-15** DO[7:0] (MSB vlevo) – Mód čtení, data vyčtená ze senzoru

Stěžejní funkcí je pro SPI transakce funkce *xfer2*. Funkce narozdíl od funkce *xfer* neresetuje CS (*chip select*) pin mezi jednotlivými bloky dat [78]. Funkce na zápis a čtení registru vypadají následovně:

```
1 import spidev
2
3 bus = 0 # Je použito SPI0
4 device = 0 # Senzor má chip select připojen na pinu CEO
5 spi = spidev.SpiDev()
6 spi.open(bus, device)
7 spi.max_speed_hz = 5000000 # Maximální frekvence nastavena na 5 MHz
```

```

8
9 def write_reg(reg_address, data):
10     reg_address = reg_address & 0x7F
11     msg_to_send = [reg_address, data]
12     spi.xfer2(msg_to_send)
13
14 def read_reg(reg_address, number_of_bytes):
15     reg_address = reg_address | 0x80 # Chceme z registru číst,
16                                     # nultý bit musí být 1
17     msg_to_send = [reg_address]
18     for i in range(number_of_bytes):
19         msg_to_send.append(0x00)
20
21     return spi.xfer2(msg_to_send)[1:]

```

Na řádce 21 si lze všimnout, že jako výsledek funkce jsou vráceny všechny byty vyjma prvního (na indexu 0). Tento byte neobsahuje žádná data registru, který je vyčítán, jelikož v tomto bytu je získán obsah výstupního SPI registru senzoru při zasílání adresy požadovaného registru.

4.1.1 Nastavení senzoru

Před nastavením senzoru je dobré si ověřit, že komunikace funguje správně. Obecně u ST MEMS senzorů se funkčnost komunikace ověřuje vyčtením hodnoty registru WHO_AM_I na adrese 0Fh. Tento registr je *read-only* a je nastaven na fixní hodnotu. Pro různé senzory se však může hodnota lišit. Pro ISM330DHCX je hodnota **0x6b**. Ověřit funkčnost tedy lze následovně:

```

1 res = read_reg(0x0F)
2
3 if hex(res) != 0x6b:
4     print("SPI communication error!")

```

Dalším krokem je senzor tzv. zapnout. Lze tak učinit nastavením bitů ODR_XL[3:0] v registru CTRL1_XL (10h) na jinou hodnotu než *Power-down* (ODR_XL[3:0] = 0000), tedy frekvence snímání (ODR) je nastavena na nenulovou hodnotu. Senzor je nastaven na frekvenci snímání 833 Hz (ODR_XL[3:0] = 0111) a ponechán *full-scale* na ± 2 g, jelikož není očekávána větší síla než je gravitační. Tak je dosažena největší citlivost výstupních dat. Tedy byty FS[1:0]_XL jsou nastaveny na hodnotu 00.

V senzoru je možné nastavit bit zvaný *IF_INC* v registru CTRL3_C (12h). Nastavení tohoto bitu do hodnoty 1 zajistí, že při více bytovém přístupu automaticky inkrementuje adresu registru. V kombinaci s funkcí, která se nazývá

rounding je možné vyčítat větší množství dat efektivněji. Funkce je automaticky povolena pro výstupní registry FIFO a je také možné ji povolit pro výstupní registry akcelerometru a gyroskopu. Výhodou funkce je, že není nutné posílat adresu pro každý navazující registr zvlášť. Adresa se inkrementuje automaticky a jakmile se dočte poslední registr dané skupiny, automaticky se adresa nastaví zpět na adresu prvního registru v dané skupině. Přístup je vhodný pro použití v kombinaci s FIFO, kde je uloženo větší množství dat a je žádoucí je vyčíst rychle.

Akcelerometr je možné používat v čtyřech módech spotřeby, a to *Power-down*, *Low-Power*, *Normal* a *High-Performance* [73]. Jelikož není žádné omezení na spotřebu (senzor není napájen z baterie, kde by bylo potřebné co nejvíce snížit spotřebu) a naopak je žádoucí mít nejlepší možný výkon, co se týče šumu, bude použit *High-performance* mód (HP), tedy bit *XL_HM_MODE* je nastaven na hodnotu 0 v registru *CTRL6_C* (15h).

Jelikož bude pro každý výpočet náklonu kvůli eliminaci šumu nasbíráno větší množství dat, bude vhodné si data ukládat do FIFO a poté je pomocí jedné SPI transakce vyčíst najednou. FIFO lze využívat v následujících módech:

- **Bypass mode** – Data se do FIFO neukládají a tím pádem zůstává prázdná.
- **FIFO mode** – Data se do FIFO ukládají do té doby, než se nezaplní.
- **Continuous mode** – Kontinuální FIFO update, nová data nahrazují ta stará.
- **Continuous-to-FIFO mode** – Chování FIFO se změní z Continuous na FIFO podle nastavené spouštěcí události.
- **Bypass-to-Continuous mode** – Chování FIFO je Continuous, pokud je nastavená spouštěcí událost aktivní, jinak je obsah FIFO vyresetován.
- **Bypass-to-FIFO mode** – Chování FIFO je v módu FIFO, pokud je nastavená spouštěcí událost aktivní, jinak je obsah FIFO vyresetován.

Pro tento případ je nejvíce vyhovující FIFO mód, který je zapnut při žádosti o zjištění náklonu zrcadla. Při každé žádosti je získáno 180 vzorků, proto bity *WTM[7:0]* v registru *FIFO_CTRL1* (07h) jsou nastaveny na hodnotu 1011 0100. Registr *FIFO_CTRL2* (08h) obsahuje poslední bit *WTM[8]*, ale není ho potřeba měnit. V registru je nutné nastavit bit *STOP_ON_WTM* k omezení hloubky FIFO na 180 vzorků. V registru *FIFO_CTRL3* (09h) následně nastavením bitů *BDR_XL_[3:0]* na hodnotu 0111 je nastaveno ukládání hodnot akcelerometru do FIFO s frekvencí 833 Hz.

Před začátkem snímání dat se v registru *FIFO_CTRL4* (0Ah) FIFO mód zapne nastavením bitů *FIFO_MODE[2:0]* na hodnotu 001. Po ukončení snímání dat se vypne nastavením bitů na hodnotu 000.

Počáteční nastavení senzoru vypadá následovně:

```

1 write_reg(0x10, 0x70) # CTRL1_XL (10h)
2 write_reg(0x12, 0x04) # CTRL3_C (12h)
3 write_reg(0x15, 0x00) # CTRL6_C (15h)
4
5 write_reg(0x07, 0xB4) # FIFO_CTRL1 (07h)
6 write_reg(0x08, 0x80) # FIFO_CTRL2 (08h)
7 write_reg(0x09, 0x07) # FIFO_CTRL3 (09h)

```

4.1.2 Kalibrace akcelerometru

Pro aplikace, kde je vyžadována větší přesnost než 1° , je vhodné akcelerometr zkalibrovat [79]. Cílem kalibrace je určit 12 kalibračních parametrů tak, aby v libovolné statické pozici byla velikost akceleračního vektoru A rovna 1 g:

$$|A| = \sqrt{X_g^2 + Y_g^2 + Z_g^2} = 1, \quad (4.1)$$

kde X_g , Y_g a Z_g je hodnota akcelerace v osách X, Y a Z v jednotkách g.

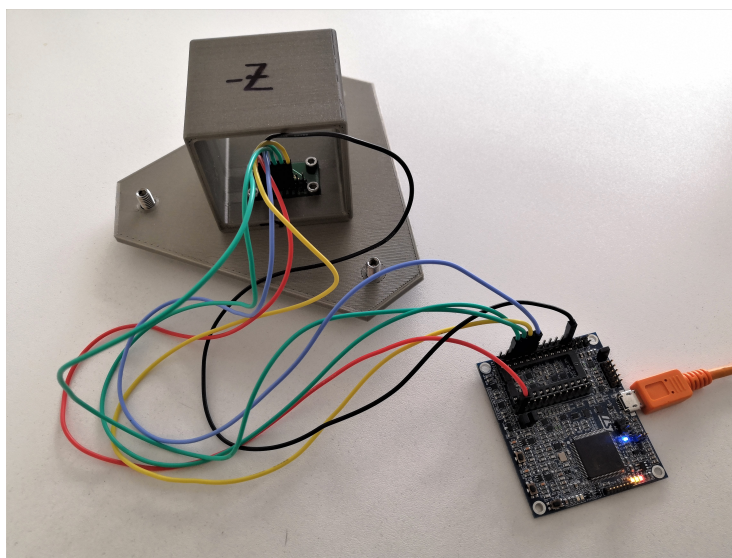
Při kalibraci jsou zjišťovány multiplikatívni a aditivní konstanty a také parametry vychýlení mezi osami senzoru a výsledným zařízením. Vztah mezi normalizovanými hodnotami $Y = [X_n, Y_n, Z_n]^{1 \times 3}$ a naměřenými hodnotami $w = [X_{meas}, Y_{meas}, Z_{meas}, 1]^{1 \times 4}$ je definován následovně [79]:

$$Y = w \cdot X$$

$$= \begin{bmatrix} X_{meas} & Y_{meas} & Z_{meas} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{M_{11}}{X_{scale}} & \frac{M_{21}}{X_{scale}} & \frac{M_{31}}{X_{scale}} \\ \frac{M_{12}}{Y_{scale}} & \frac{M_{22}}{Y_{scale}} & \frac{M_{32}}{Y_{scale}} \\ \frac{M_{13}}{Z_{scale}} & \frac{M_{23}}{Z_{scale}} & \frac{M_{33}}{Z_{scale}} \\ -X_{offset} & -Y_{offset} & -Z_{offset} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

kde matice $X^{4 \times 3}$ je matice parametrů, které jsou při kalibraci určeny. Skládá se z parametrů *scale* a *offset* pro každou osu a matice $M^{3 \times 3}$, která koriguje odchylku mezi senzorem a zařízením, na kterém je senzor nainstalován.

Použitá soustava pro kolekci dat, která je na obrázku 4.1, je inspirována soustavou vyobrazenou v [80]. Pro tento účel byla vymodelována a vytištěna podstava, která je výškově nastavitelná ve třech bodech, a pouzdro pro senzor, aby jej bylo možné natočit do všech 6 potřebných směrů os (X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-). Dále je také potřebná kruhová vodováha pro kontrolu vodorovnosti testovací podstavy. Čím větší přesnost kalibrace je požadována, tím kvalitnější a přesnější vodováhu je nutné použít. U nastavitelné podstavy je potřeba zajistit, aby byla dokonale rovná a vodovážná. Pokud jedna z těchto podmínek nebude splněna, kalibrace přesnost dat sníží.



Obrázek 4.1: Kalibrovací sestava

Pro logování dat byl použit přípravek STEVAL-MKI109V3 spolu s logovacím softwarem⁵. Software slouží pro rychlé prototypování z hlediska nastavení registrů tak, aby daný senzor vykonával požadovanou funkci. Lze pomocí něj logovat data do textového souboru. Samotný postup kalibrace je následovný:

1. Upevnit senzor do krytu tvaru kvádrů.
2. Nastavitelnou podstavu uvést do vodovážné polohy pomocí kruhové vodováhy.
3. Připojit senzor k desce STEVAL-MKI109V3 a celou soustavu připojit k počítači přes microUSB.
4. Pomocí softwaru UNICO nastavit senzoru ODR 833 Hz, spustit komunikaci a ověřit, že senzor komunikuje.
5. Položit celou soustavu na místo (např. na vedlejší stůl), kde bude izolována od jakéhokoliv nechtěného pohybu.
6. Postupně obracet krychli na každou její stranu a logovat data po dobu zhruba 10 s pro každou stranu zvlášť (čím déle budou jednotlivá data logována, tím přesnější kalibrace bude, ale bude nutné zpracovávat více dat). Dohromady je získáno 6 souborů s daty: X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-.
7. Zpracovat data a získat 12 kalibračních konstant.

⁵Logování dat bylo realizováno pomocí softwaru Unico-GUI.

Následná kalibrace probíhá pomocí *Least square method* popsané v [79]. Pro odhadnutí parametrů jsou zkonstruovány matice $Y^{6 \times 3}$ a $w^{6 \times 4}$ s daty v jednotkách mg, kde řádky matice $w^{6 \times 4}$ jsou průměr hodnot získaných v jednom z 6 měření:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1000 \\ 0 & 0 & -1000 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & -1000 & 0 \\ 1000 & 0 & 0 \\ -1000 & 0 & 0 \end{bmatrix} w = \begin{bmatrix} \overline{X_{Z+}} & \overline{Y_{Z+}} & \overline{Z_{Z+}} & 1000 \\ \overline{X_{Z-}} & \overline{Y_{Z-}} & \overline{Z_{Z-}} & 1000 \\ \overline{X_{Y+}} & \overline{Y_{Y+}} & \overline{Z_{Y+}} & 1000 \\ \overline{X_{Y-}} & \overline{Y_{Y-}} & \overline{Z_{Y-}} & 1000 \\ \overline{X_{X+}} & \overline{Y_{X+}} & \overline{Z_{X+}} & 1000 \\ \overline{X_{X-}} & \overline{Y_{X-}} & \overline{Z_{X-}} & 1000 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Výslednou matici kalibračních hodnot $X^{4 \times 3}$ odhadneme následovně:

$$X = [w^T \cdot w]^{-1} \cdot w^T \cdot Y. \quad (4.4)$$

4.1.3 Eliminace šumu

Data z akcelerometru, i zkalibrovaná, stále obsahují šum. Šum je do dat zanesen dle [55] z šumu elektroniky, kolísáním napájecího napětí, chyby ADC, termomechanickými efekty a jinými zdroji. Obvykle je vlastní bílý šum každého senzoru uveden v dokumentaci. Pro senzor ISM330DHCX je v dokumentaci uvedena typická hustota šumu v HP módu $60 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ a maximální $100 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Pokud je tedy ODR akcelerometru nastaveno na 833 Hz s použitím HP módu, získáme RMS šumu $\sqrt{\frac{833}{2}} \cdot 60 = 1,2 \text{ mg}$, obdobně pro maximální $\sqrt{\frac{833}{2}} \cdot 100 = 2 \text{ mg}$ [81]. Podle [55] je možné signál s šumem reprezentovat následovně:

$$\hat{X} = X + N(0, \sigma^2), \quad (4.5)$$

kde $N(0, \sigma^2)$ reprezentuje Gaussovský bílý šum. Pokud je signál \hat{X} zprůměrován s velikostí okna \mathbf{n} , výsledný signál bude vypadat následovně:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{X}_i = X + N\left(0, \frac{\sigma^2}{n}\right). \quad (4.6)$$

Čím více vzorků je použito pro eliminaci šumu, tím menšího rozptylu Gaussova rozložení je docíleno. V aplikaci je použito 180 vzorků, a tedy směrodatná odchylka (z maximálního RMS šumu) je $\sqrt{\frac{2^2}{180}} = 0,14 \text{ mg}$.

4.1.4 Výpočet pitch a roll

Aby byl eliminován šum při výpočtu náklonu senzoru, resp. zrcadla, je nasnímáno pro jednu hodnotu dvojice *pitch* a *roll* 180 vzorků pomocí FIFO.

Registry obsahují horní a spodní část celkové hodnoty jednotlivých os. Z dokumentace i aplikační nóty [72, 73] lze zjistit, že stačí registry spojit a jsou získány 16bit hodnoty v dvojkovém doplňku, tzn.

$$\begin{aligned} X_{raw}[i] &= raw_data[i \cdot 6 + 1] \&\& raw_data[i \cdot 6 + 0], \\ Y_{raw}[i] &= raw_data[i \cdot 6 + 3] \&\& raw_data[i \cdot 6 + 2], \\ Z_{raw}[i] &= raw_data[i \cdot 6 + 5] \&\& raw_data[i \cdot 6 + 4]. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Data již mají informaci o znaménku, tzn. jsou datového typu *int16*. Následně je těchto 180 dat zprůměrováno:

$$\begin{aligned} X_{avg} &= \frac{1}{180} \sum_{i=0}^{179} X_{raw}[i], \\ Y_{avg} &= \frac{1}{180} \sum_{i=0}^{179} Y_{raw}[i], \\ Z_{avg} &= \frac{1}{180} \sum_{i=0}^{179} Z_{raw}[i]. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dalším krokem je aplikovat senzitivitu, která je z dokumentace [72] pro FS ± 2 g 0,061 mg/LSB:

$$\begin{aligned} X_{mg} &= X_{avg} \cdot 0,061, \\ Y_{mg} &= Y_{avg} \cdot 0,061, \\ Z_{mg} &= Z_{avg} \cdot 0,061. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Hodnoty jsou nezkalibrované X, Y a Z v jednotkách mg. V předposledním kroku je potřeba aplikovat kalibrační matici X a převést hodnoty z mg do g, tzn.:

$$[X_g, Y_g, Z_g] = \frac{[X_g, Y_g, Z_g, 1000] \cdot X}{1000}. \quad (4.10)$$

V posledním kroku jsou vypočítány hodnoty *pitch* a *roll* v rozsahu (-90° , 90°) dle [82] s upravenými osami X a Y tak, aby odpovídaly orientaci senzoru v zrcadle (tedy *pitch* odpovídá vertikálnímu úhlu a *roll* horizontálnímu úhlu):

$$\begin{aligned} pitch &= \arctan \left(\frac{Y_g}{\sqrt{X_g^2 + Z_g^2}} \right), \\ roll &= \arctan \left(\frac{X_g}{\sqrt{Y_g^2 + Z_g^2}} \right). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Funkce *atan* v jazyce Python vrací hodnotu v jednotkách [rad]. Pro převod radiánů na stupně platí následující vztah:

$$1 \text{ rad} = \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right)^\circ \quad [83]. \quad (4.12)$$

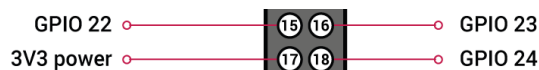
4.2 Ovládání motorů

Pro ovládání motorů slouží třída *StepperControl*. Každá instance ovládá jeden motor. K ovládání krokového motoru z Raspberry Pi je potřebné pouze umět nastavit piny, na kterých jsou připojené motory, jako výstupní a poté piny nastavit buď na hodnotu logické 0 nebo 1 s určitým časovým odstupem. K tomuto úkolu bude potřebný modul *RPi.GPIO* a modul *time*. Nainportovat je lze následovně:

```
1 import RPi.GPIO as GPIO
2 import time
```

Raspberry používá 2 schémata číslování pinů [84] a to:

- **GPIO.BOARD** – Odpovídá číslování pinů na desce na konektoru P1.
- **GPIO.BCM** – Odpovídá číslování pinů na Broadcom SOC.



Obrázek 4.2: Ukázka číslování pinů z dokumentace Raspberry Pi [24]

Na obrázku 4.2 lze vidět oba způsoby číslování. Pro BCM číslování pinu GPIO 22 odpovídá BOARD číslování 15. V kódu je použito číslování *BCM*. Nyní je potřeba nastavit piny, na kterých je připojen motor, jako výstup a nastavit všechny na hodnotu logické 0. Piny pro ovládání motoru jsou inicializovány kódem níže:

```
1 stepper_pins = [25, 24, 23, 18]
2 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
3
4 GPIO.setup(stepper_pins, GPIO.OUT, initial=GPIO.LOW)
```

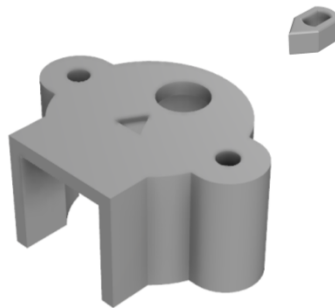
Nyní lze definovat funkci pro vykonání jednoho kroku a poté funkci pro vykonání *n* kroků určitým směrem:

```
1 step = 0
2 pin_order = [[1,1,0,0],[0,1,1,0],[0,0,1,1],[1,0,0,1]] * 2
3
4 def set_step(pin_values):
5     GPIO.output(stepper_pins, pin_values)
6
```

4. REALIZACE SOFTWAREVÉ ČÁSTI

```
7 def move_stepper(direction, steps, delay = 0.004):
8     for _ in range(steps):
9         set_step(pin_order[step])
10        step = (step + direction) % step_mod
11        time.sleep(delay)
```

Jelikož jsou z akcelerometru získávána data ve stupních, je nutné zajistit konverzi mezi stupni a kroky. Pro tento převod je vhodné znát, kolik kroků je opravdu potřebných na celých 360° .



Obrázek 4.3: Pomůcka pro určení kroků na otáčku

K tomuto účelu byl vytvořen jednoduchý držák⁶ s vyznačeným počátkem a jednoduchý ukazatel na osu motoru (obrázek 4.3). Pomocí následujícího kódu byl hledán počet kroků, pro který ukazatel začne i skončí na počátku i po větším počtu opakování (50).

```
1 steps_per_rev = 2048
2 for _ in range(50):
3     move_stepper(1, steps_per_rev)
```

Jakmile je znám správný počet kroků na celou otáčku, lze definovat funkci na převod úhlů na kroky následovně:

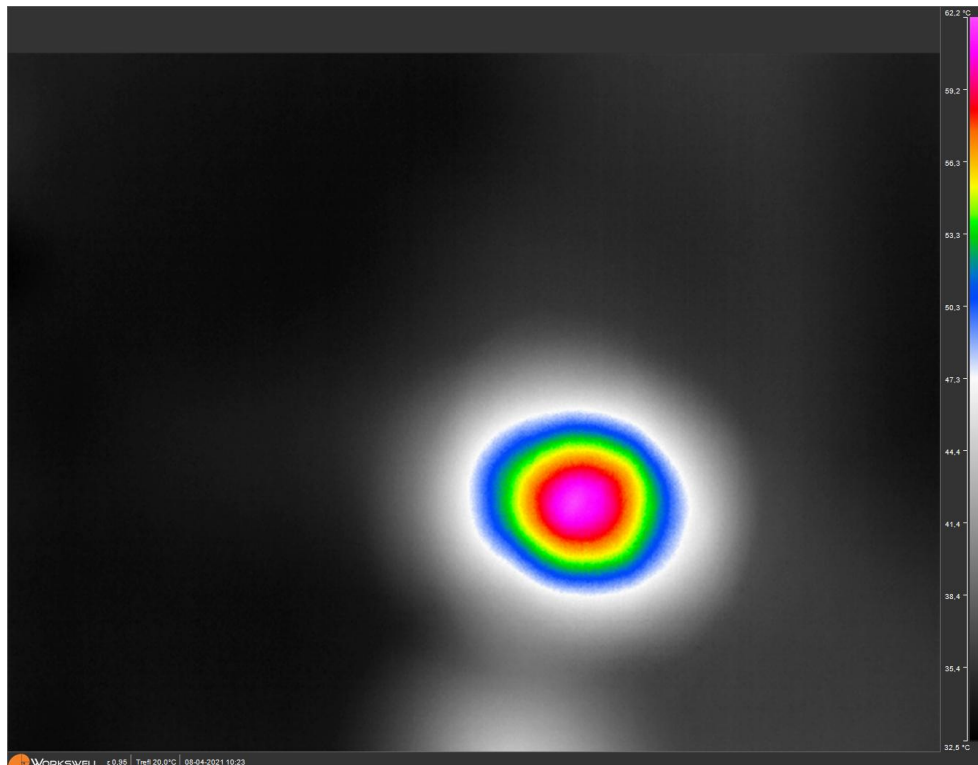
```
1 def move_stepper_by_deg(deg_to_move, delay):
2     direction = (-1 if deg_to_move < 0 else 1)
3     steps = int((abs(deg_to_move)*steps_per_rev/365) + 0.5)
4     move_stepper(direction, steps, delay)
```

⁶Model držáku byl zhotoven v programu Autodesk Fusion 360. Zdrojové soubory ve formátu STL jsou přiloženy k práci.

Po každém provedeném pohybu motorů je dobré nastavit krok na hodnotu 0000, aby cívky nebyly zbytečně napájeny.

```
1 def motor_rest():  
2     set_step([0,0,0,0])
```

Pokud jsou motory napájeny delší dobu, zahřívají se na teplotu kolem 62 °C, jak je možné vidět na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Termovizní snímek udávající teplotu 62,2 °C jádra motoru při cívce napájené po dobu zhruba 4 minut

4.3 Ovládání kamer

Inicializace a získávání snímků jak z přehledové, tak i detailní kamery, zajišťuje třída *CameraControl*.

Raspberry Pi High Quality kamera je připojena přes flexibilní konektor. Rozhraní je podobně jako rozhraní SPI nutné povolit v konfiguraci přes

4. REALIZACE SOFTWAREVÉ ČÁSTI

příkazovou řádku nebo grafické rozhraní. Znovu je nutné Raspberry Pi restartovat, aby se změny projeví. Po restartování je k otestování kamery možné využít příkaz v příkazové řádce [85]:

```
raspistill -o image.jpg
```

K ovládání přehledové kamery slouží python balíček *picamera*. V operačním systému Raspbian by měl být nainstalován, pokud není, je možné jej nainstalovat pomocí [85]:

```
sudo apt-get install python-picamera python3-picamera
```

Z kamery je potřeba umět získat jednorázový snímek, který je ukládán do struktury *PiRGBArray* (třidimenzionální numpy pole). Funkce je definována následovně:

```
1 from picamera import PiCamera
2 from picamera.array import PiRGBArray
3 import time
4
5 camera = PiCamera(resolution = (2048, 1520))
6 raw_capture = PiRGBArray(camera)
7
8 time.sleep(2) # Zahřátí kamery
9
10 def grab_one():
11     camera.capture(raw_capture, 'bgr')
12     picture = raw_capture.array
13     raw_capture.truncate(0)
14     return picture
```

Ačkoliv je nativní rozlišení přehledové kamery 4056×3040 px, bylo použito rozlišení poloviční (s ohledem na zaokrouhlení, které balíček *picamera* vyžaduje). Vybraný model přehledové kamery je poměrně nový a balíček *picamera* zatím nenabízí plnou podporu.

Pro ovládání detailní kamery je použit balíček *pypylon*. Jedná se o python wrapper Basler Pylon Camera Software Suite. Aby bylo možné wrapper použít, je potřebná instalace softwaru Pylon od firmy Basler. Postup instalace Pylon softwaru na operační systém Raspbian je možné nalézt v aplikační nótě [86]. Následně lze nainstalovat balíček *pypylon* v příkazové řádce pomocí:

```
pip3 install pypylon
```

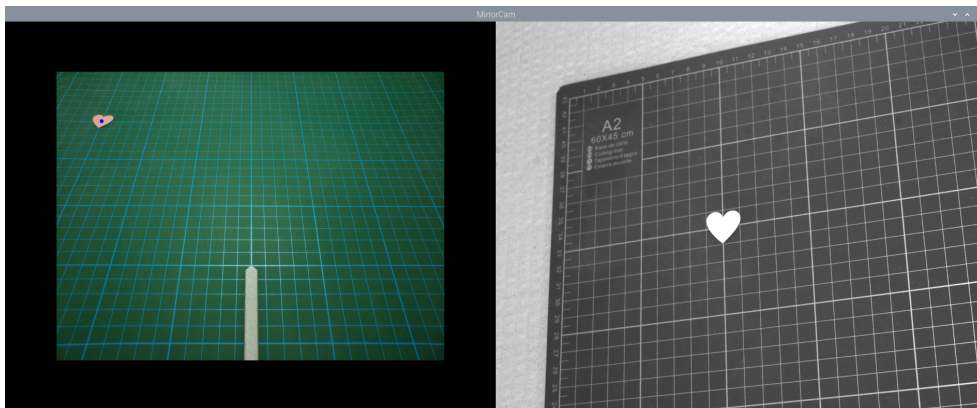
Pro detailní kameru je také mimo inicializace kamery a získání snímku možné nastavit expoziční čas. Kód pro obě funkce je inspirován z dokumentace balíčku *pypylon-opencv-viewer* [87], který je také založen na *pypylonu* a byl

vytvořen členy ImproLabu. Jelikož kamera snímá přes zrcadlo, je výsledný snímek překlopen vodorovně. Svislé překlopení není nutné, jelikož je kamera upevněna vzhůru nohama.

4.4 Interakce s uživatelem

Demonstraci interakce s uživatelem obstarává třída *ImageInteraction*. Jedná se o interaktivní okno (obrázek 4.5) založené na balíčku *opencv*, kde jsou zobrazovány snímky z obou kamer, a je možné s ním interagovat. Mezi implementované interakce patří:

- snímání kliknutí v snímku (na které jsou dle situace vázány různé callbacky),
- obnovení scény pomocí klávesy *r*,
- uložení zobrazovaných snímků pomocí klávesy *s*,
- ukončení interakce pomocí klávesy *q*.



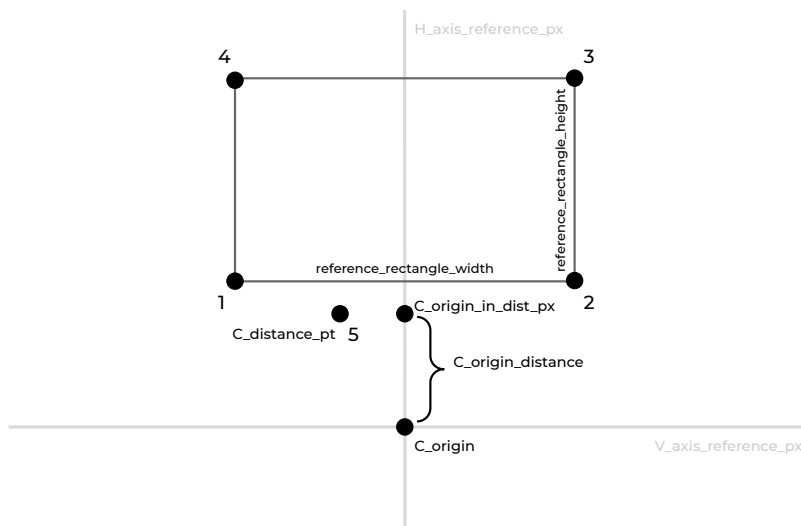
Obrázek 4.5: Ukázka interaktivního okna se zacílením na objekt srdce

4.5 Kalibrace snímané plochy

Kalibrace snímané plochy je funkcí třídy *MirrorControlApp* obsluhující výslednou aplikaci. Kalibrace je důležitá, aby byly získány relevantní výpočty úhlů pro náklon zrcadla. Díky kalibraci je zjištěna homografická matice H sloužící k odstranění perspektivy a převodu z prostoru pixelů do prostoru reálných jednotek (milimetrů). V průběhu kalibrace je zkonstruován bod *C_origin*, který je projekcí bodu ve středu povrchu zrcadla na zem. Skrz bod jsou vedeny dvě

4. REALIZACE SOFTWAREVÉ ČÁSTI

na sebe kolmé přímky $H_reference_axis$ a $V_reference_axis$. Od těchto přímek následně probíhá výpočet vzdálenosti v horizontálním a vertikálním směru.



Obrázek 4.6: Vizualizace kalibrace místnosti

Na obrázku 4.6 je zobrazena vizualizace kalibrace a potřebné informace pro její realizaci. Mimo informace obsažené v obrázku 4.6 je potřeba znát i vzdálenost plochy zrcadla od země. Stěžejními prvky kalibrace jsou body 1 až 5. Body 1 až 4 náleží kalibračnímu obdélníku. Obdélník by měl být přiměřené velikosti k poměru snímané místnosti, aby byl přepočten na reálné jednotky přesněji. Pro malý snímaný prostor (například pokud jsou snímány objekty na stole) je dostačující velikost obdélníku A5, pro větší snímací prostor může mít obdélník rozměry v jednotkách metrů. Jako referenční objekt lze také například využít dělicí čáry na parkovišti nebo jiné body, které mezi sebou mají pravý úhel a jsou známy vzdálenosti mezi nimi. Bod 5 ($C_distance_pt$) může být kdekoliv v snímané místnosti, je ale nutné znát vzdálenost ve vertikálním směru ($C_origin_distance$) od projekce bodu středu zrcadla na zem, tedy na obrázku vzdálenost od bodu (C_origin). Samotný postup kalibrace je následovný:

1. Zvolení 4 bodů v snímku, které ohraničují kalibrační obdélník v pořadí definovaném na obrázku 4.6.
2. Zvolení bodu $C_distance_pt$ na snímku.
3. Zadání rozměrů kalibračního obdélníku $reference_rectangle_width$, $reference_rectangle_height$ a vzdálenosti $mirror_height$ mezi snímanou plochou a povrchem zrcadla v milimetrech.
4. Zadání hodnoty $C_origin_distance$ v milimetrech.

Ze zvolených bodů 1 až 4 a šířky a výšky kalibračního obdélníku je možné spočítat pomocí funkce *cv2.findHomography* transformační matici H s mapováním bodů:

- Souřadnice $[X, Y]$ bodu 1 $\rightarrow [0, \text{reference_rectangle_height}]$
- Souřadnice $[X, Y]$ bodu 2 $\rightarrow [\text{reference_rectangle_width}, \text{reference_rectangle_height}]$
- Souřadnice $[X, Y]$ bodu 3 $\rightarrow [\text{reference_rectangle_width}, 0]$
- Souřadnice $[X, Y]$ bodu 4 $\rightarrow [0, 0]$

Snímek, na kterém byly voleny body kalibrace, je nazván *calibration_img*. Body definující přímkou horizontální reference v prostoru pixelů jsou následovné:

$$\begin{aligned} H_axis_reference_px_0 &= \left[\frac{\text{calibration_img.width}}{2}, 0 \right], \\ H_axis_reference_px_1 &= \left[\frac{\text{calibration_img.width}}{2}, \text{calibration_img.height} \right]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Pomocí funkce *cv2.perspectiveTransform* jsou získány body přímky *H_axis_reference*, které jsou body přímky *H_axis_reference_px* v prostoru reálných rozměrů. Bod *C_origin_in_dist_px* je zkonstruován tak, že leží na přímce *H_axis_reference_px* a souřadnice *y* odpovídá bodu *C_distance_pt* zvolenému v snímku při kalibraci, tedy:

$$C_origin_in_dist_px = [H_axis_reference_px_0, C_distance_pt_1]. \quad (4.14)$$

Souřadnice bodu *C_origin* v prostoru reálných souřadnic jsou získány posunem transformovaného bodu *C_origin_in_dist_px* (pomocí funkce *cv2.perspectiveTransform*) po přímce *H_axis_reference* směrem ke kameře.

Ke zkonstruování vertikální přímky *V_axis_reference* byl použit jako výchozí bod *C_origin* a druhý bod byl dopočítán po normále přímky *H_axis_reference* ve vzdálenosti stejné, jakou jsou body horizontální přímky.

Kalibrací byly získány všechny potřebné parametry, které se nemění se změnou hledaného cíle. Pokud je se soustavou jakkoliv hýbáno, je nutné kalibraci provést znovu.

Nástin zdrojového kódu je možné nalézt v příloze B.

4.6 Zaměření cíle

V následujícím algoritmu 1 je popsána stěžejní část firmwaru přípravku, která je také funkcí třídy *MirrorControlApp*. Algoritmus ze zadaných pixelových

4. REALIZACE SOFTWAREVÉ ČÁSTI

souřadnic $[X, Y]$ a výšky objektu $object_height$ vypočítá jeho vzdálenost v horizontálním a vertikálním směru v jednotkách milimetrů, zjistí pod jakým úhlem musí zrcadlo v obou osách odrážet optickou osu detailní kamery a vypočítá výsledné úhly pro zrcadlo.

Algoritmus 1 Zaměření cíle v bodu $[X, Y]$ ve výšce $object_height$

- 1: Převedení informace souřadnic $[X, Y]$ z pixelů na jednotky v mm pomocí transformační matice H
 - 2: Vypočtení vzdáleností od vertikální a horizontální osy počátku
 - 3: Vypočtení, pod jakým úhlem vzhledem k $object_height$ by mělo zrcadlo odrážet střed optické osy vertikálně a horizontálně
 - 4: Vypočtení náklonu zrcadla v obou osách tak, aby zrcadlo odráželo optickou osu pod cílovými úhly
 - 5: Vypočtení rozdílu cílového náklonu zrcadla od aktuálního
 - 6: **while** Rozdíl úhlů v nějaké ose je větší než $0,3^\circ$ **do**
 - 7: Otočení motorů v obou směrech o příslušné úhly
 - 8: Počkání 0,5 sekundy na ustálení akcelerace
 - 9: Zjištění aktuálního náklonu zrcadla
 - 10: Vypočtení rozdílu cílového náklonu zrcadla od aktuálního
 - 11: **end while**
 - 12: Nastavení motorů do stavu 0000
-

Objekt je zvolen v zobrazeném snímku přehledové kamery pomocí nalknutí v interaktivním okně. Následně jsou souřadnice bodu převedeny do prostoru reálných rozměrů pomocí funkce $cv2.perspectiveTransform$.

Kvadrant	vertikální	horizontální
1	+	-
2	+	+
3	-	+
4	-	-

Tabulka 4.1: Znaménko náklonu získané z inklinometru

Poté jsou spočteny vzdálenosti od přímek $H_axis_reference$ a $V_axis_reference$. Spolu se vzdáleností je získán i parametr směrového vektoru. Parametr směrového vektoru určí, na jakou stranu se bod od dané přímky nachází. Informace o směru je vhodná k určení směru náklonu zrcadla, jelikož senzor vrací hodnoty úhlů v rozsahu $(-90^\circ, 90^\circ)$. V tabulce 4.1 lze vidět jednotlivá znaménka výstupu inklinometru v jednotlivých kvadrantech snímané oblasti. Vertikální a horizontální úhly jsou spočteny ze vzdáleností (již se znaménkem

udávající směr) a výšky *object_height* následovně:

$$\begin{aligned} V_a &= \arctan\left(\frac{V_distance}{mirror_height - object_height}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \\ H_a &= \arctan\left(\frac{H_distance}{mirror_height - object_height}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Ze získaných úhlů V_a a H_a se výsledné úhly pro náklon spočítají následovně:

$$\begin{aligned} V_mirror &= \frac{V_a - 30}{2} + calib_coef_V, \\ H_mirror &= \frac{H_a}{2} + calib_coef_H. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Parametry *calib_coef_V* a *calib_coef_H* slouží ke korekci výsledného náklonu zrcadla v případě, že soustava není nainstalována vodovážně. Korekce je nutná z toho důvodu, že vypočtené úhly se vztahují ke kameře. Akcelerometr ale měří náklon vůči zemské gravitaci. Pokud je sestava vychýlena, náklon zrcadla neodpovídá náklonu vyžadovanému pro kameru. Vzhledem ke způsobu, jakým jsou tvořeny referenční přímky (zejména přímka *H_axis_reference_px*), je korekce v horizontálním směru (*calib_coef_H*) funkční pouze v malém rozsahu. Pokud je přípravek v této ose vychýlen více, výsledné výpočty úhlů i přes korekci budou chybné.

Následně je zjištěn rozdíl mezi aktuálním a nově vypočítaným náklonem, převeden na kroky a zrcadlo je nakloněno. Po ukončení pohybu je zkontrolováno, zda bylo dosaženo výsledného náklonu na přesnost $0,3^\circ$. Přepočtení rozdílu náklonu na kroky a vykonání pohybu je opakováno do dosažení požadované přesnosti. V posledním kroku jsou motory nastaveny do stavu 0000, aby se předešlo jejich přehřívání.

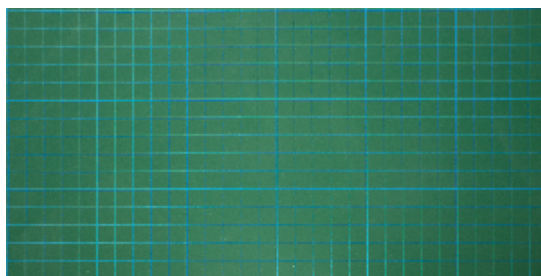
Nástin zdrojového kódu je možné nalézt v příloze C.

Výsledky

Následující kapitola obsahuje dosažené výsledky s vytvořeným přípravkem. Celkem byly provedeny tři experimenty. První experiment byl zaměřen na vyladění algoritmu a na přesnost vypočítané vzdálenosti objektu od kamery. Druhý experiment byl zaměřen na rozdíl v rozlišeních pro drobné předměty. Poslední experiment byl zaměřen na snímání objektů v nenulové výšce od snímané plochy, jako objekt testování bylo vybráno snímání obličeje postavy. Jednotlivé experimenty byly provedeny na laboratorních datech, v terénu měření provedeno nebylo.

5.1 Výsledky přesnosti měření vzdálenosti

Pro následující experiment byla sestava (obrázek 5.2) umístěna na stole na podložce. Podložka má na povrchu natištěnou mřížku s vyznačenými vzdálenostmi o granularitě 1 cm. Jako kalibrační obdélník lze využít předmět známé velikosti, nebo obdélníkovou část vyznačené mřížky. K detailní kameře byl použit objektiv s ohniskovou vzdáleností 25 mm.



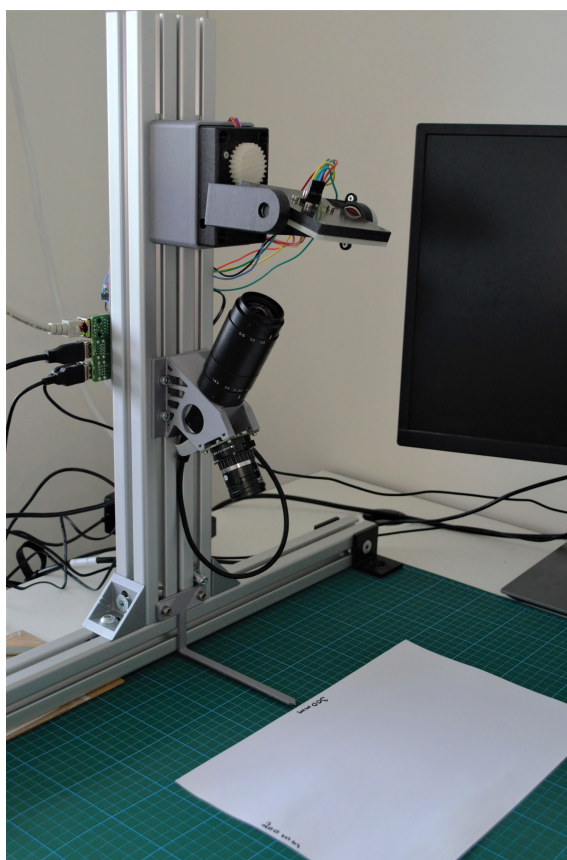
Obrázek 5.1: Kontrola zadání bodů kalibrace

Předmětem experimentu bylo zkontrolovat, že kalibrací, odstraněním perspektivy a výpočtem vzdálenosti od zkonstruovaných přímek lze přesně měřit vzdálenost objektu od přípravku. Správné určení vzdáleností je základem

5. VÝSLEDKY

správného směrování pohledu kamery. Na tomto základu staví algoritmus vypočtení úhlů svíraných mezi kamerou a objektem a následně náklon zrcadla.

Nejdříve byla provedena kalibrace. Na obrázku 5.3 lze vidět výběr kalibračních bodů. Šířka kalibračního obdélníku je 300 mm a výška obdélníku je 150 mm. Vzdálenost plochy zrcadla od snímané plochy je 400 mm a vzdálenost nakliknutého počátku souřadnic od reálného počátku je 0 mm (pomocná šipka⁷ je ve stejné vzdálenosti jako střed zrcadla). Výsledek kalibrace je možné vidět na obrázku 5.1.



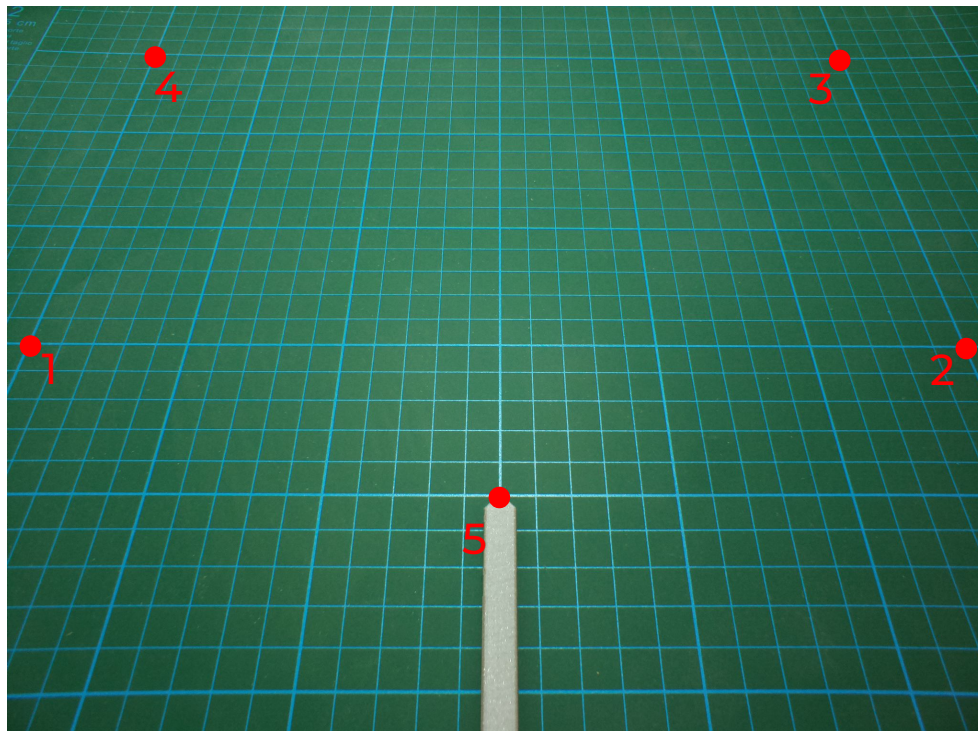
Obrázek 5.2: Testovací sestava pro měření přesnosti vzdáleností

Se soustavou byla provedena tři měření. Magnetka tvaru srdce byla pokládána na podložku s mřížkou v určité vzdálenosti. Na přehledovém snímku byl zvolen střed magnetky a následně bylo provedena konverze do prostoru reálných rozměrů a spočtena vzdálenost od referenčních přímek. V měření byla testována přesnost výpočtu vzdálenosti ve vertikálním a horizontálním směru.

⁷Model šipky byl zhotoven v programu Autodesk Fusion 360. Zdrojový soubor ve formátu STL je přiložen k práci.

5.1. Výsledky přesnosti měření vzdálenosti

Prezentované výsledky níže byly voleny tak, aby byl ověřen správný výpočet v různých směrech. Číselné výsledky jednotlivých měření jsou zapsané v tabulce 5.1, obrazové výsledky je možné vidět na obrázcích 5.4, 5.5 a 5.6.

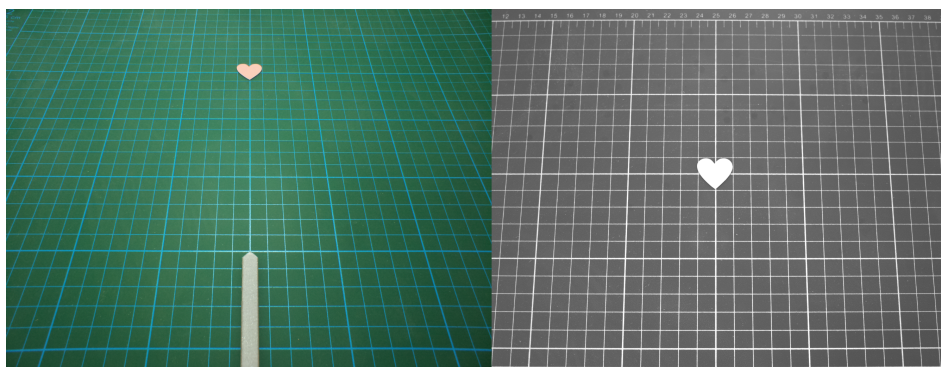


Obrázek 5.3: Výběr kalibračních bodů

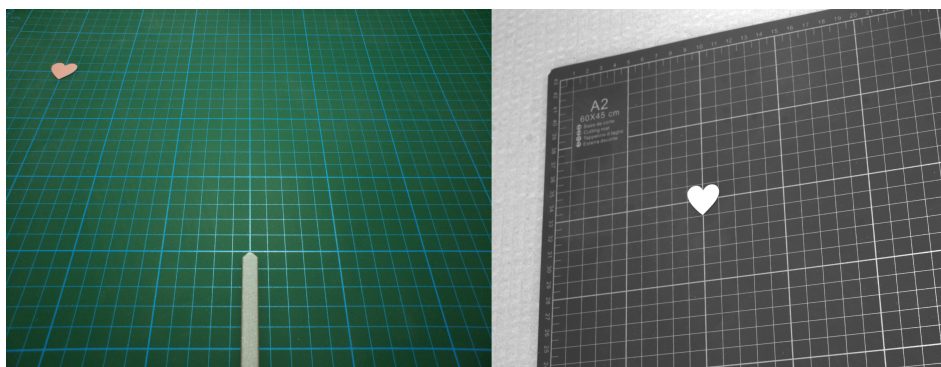
	Horizontální			Vertikální		
	Reálná	Změřená	Rozdíl	Reálná	Změřená	Rozdíl
Měření 1	0	0,38	0,38	150	150,19	0,19
Měření 2	150	148,8	-1,2	150	150,2	0,2
Měření 3	-100	-100,4	-0,4	-50	-50,87	-0,87

Tabulka 5.1: Porovnání reálné a spočtené vzdálenosti v mm

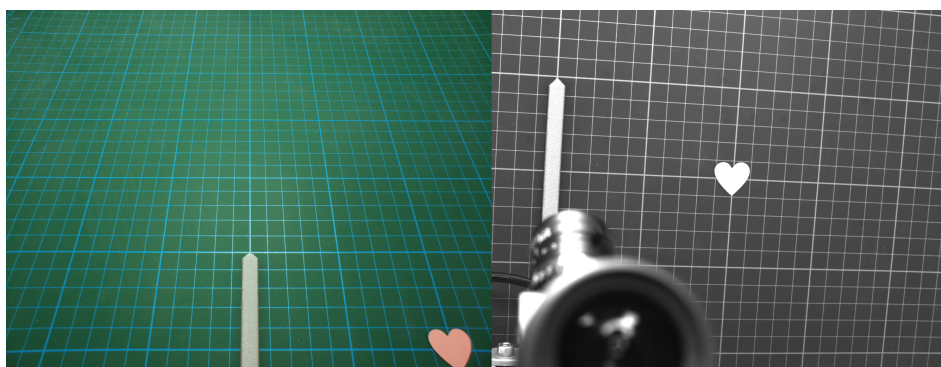
5. VÝSLEDKY



Obrázek 5.4: Měření 1: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti 0 mm horizontálně a 150 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.



Obrázek 5.5: Měření 2: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti 150 mm horizontálně a 150 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.

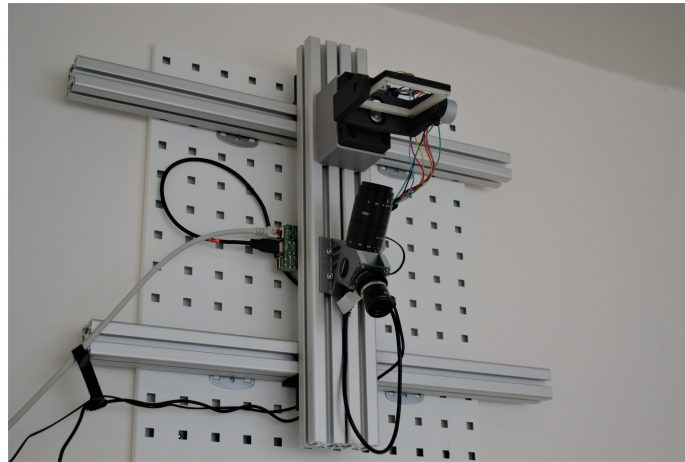


Obrázek 5.6: Měření 3: Vlevo je snímek z přehledové kamery, kdy byla magnetka ve vzdálenosti -100 mm horizontálně a -50 mm vertikálně. Vpravo je snímek detailní kamery po zacílení na magnetku.

5.2 Výsledky snímání za účelem zisku většího rozlišení

V následujícím experimentu byla sestava (obrázek 5.7) umístěna na zed' nad vchodové dveře. Jelikož je nyní snímaná plocha násobně větší než v předchozím experimentu a je žádoucí získat vysoké rozlišení oblasti zájmu, byl pro tento experiment zvolen objektiv s ohniskovou vzdáleností 35 mm.

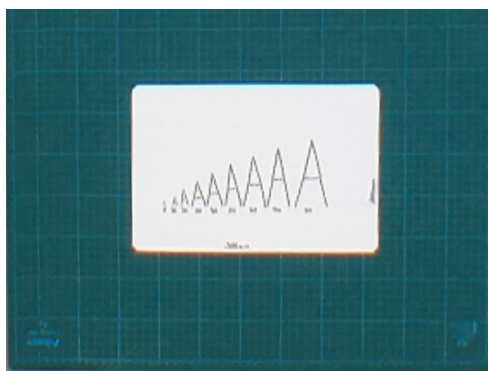
Narozdíl od předchozí sestavy, kde bylo možné přímo připojit monitor, klávesnici a myš, byl systém v tomto případě ovládán přes vzdálený přístup. Operační systém Raspbian již má v sobě nainstalovaný software VNC Server. Aby bylo možné jej použít, je nutné aplikaci povolit v konfiguraci operačního systému. Následně je možné se vzdáleně připojit z jiného zařízení pomocí aplikace VNC Viewer. Bez registrace je nutné mít zařízení a Raspberry v jedné síti. Pokud je Raspberry registrované a přidáno k danému účtu, je možné se k němu připojit i pokud je druhé zařízení v jiné síti, stále ale musí mít obě zařízení připojení k internetu. Aby byla plocha Raspberry Pi viditelná, je nutné v konfiguraci operačního systému nastavit výchozí rozlišení desktopového prostředí. Pokud výchozí rozlišení není nastaveno a k Raspberry Pi není připojen monitor, nelze získat grafický výstup.



Obrázek 5.7: Testovací sestava pro zisk většího rozlišení umístěna u stropu místnosti

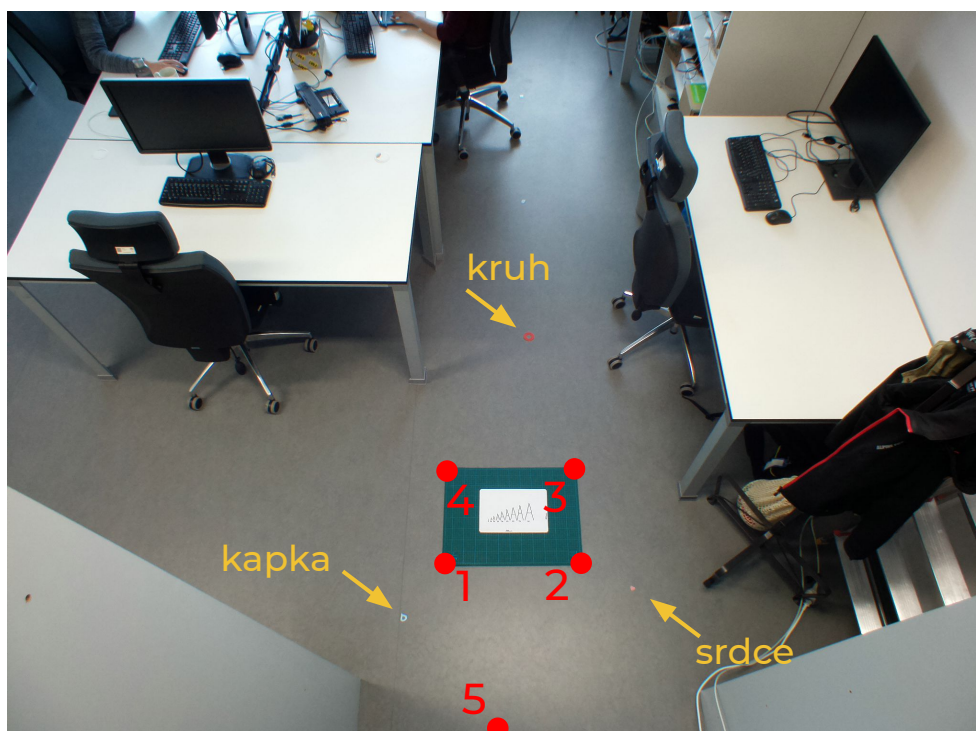
Na snímanou plochu byly umístěny tři různé magnetky tvaru kruhu, kapky a srdce a šablona s písmeny A o výšce v rozsahu 5 až 80 mm. Jako kalibrační obdélník byla použita podložka s mřížkou z předchozího experimentu o rozměrech 600×450 mm. Na obrázku 5.9 lze vidět výběr jednotlivých bodů a polohy jednotlivých magnetek a šablony s písmeny. Výška plochy zrcadla od snímané plochy je 2970 mm. Na obrázku 5.8 je možné vidět kontrolu provedení kalibrace.

5. VÝSLEDKY



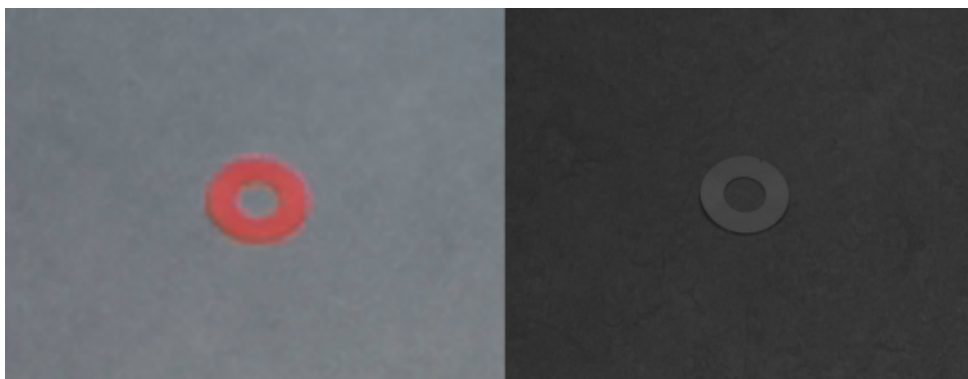
Obrázek 5.8: Kontrola zadání bodů kalibrace

Předmětem testování bylo zjistit zisk vyššího rozlišení pomocí detailní kamery. Na obrázcích 5.10, 5.11, 5.12 a 5.13 je možné vidět rozdíl detailu magnetek a písmen z přehledové kamery a detail pořízeného snímku z detailní kamery. Největší rozdíl lze vidět u písmene A o výšce 5 mm, kdy na přehledovém snímku již není možné písmeno rozeznat.

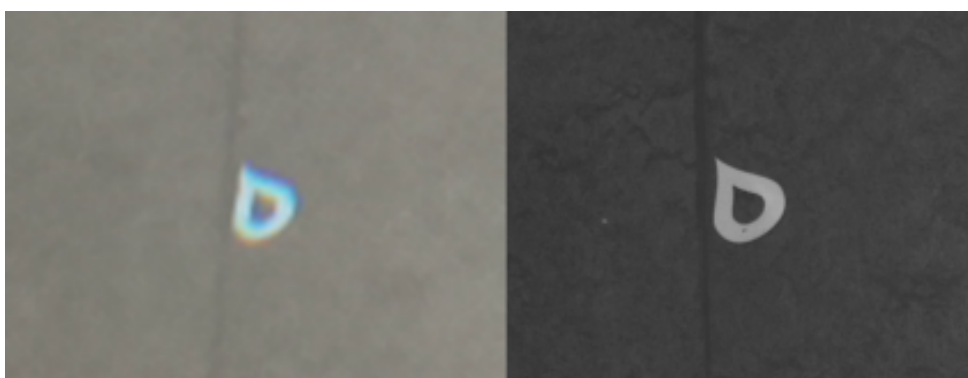


Obrázek 5.9: Výběr kalibračních bodů a vyznačení pozic jednotlivých magnetek

5.2. Výsledky snímání za účelem zisku většího rozlišení

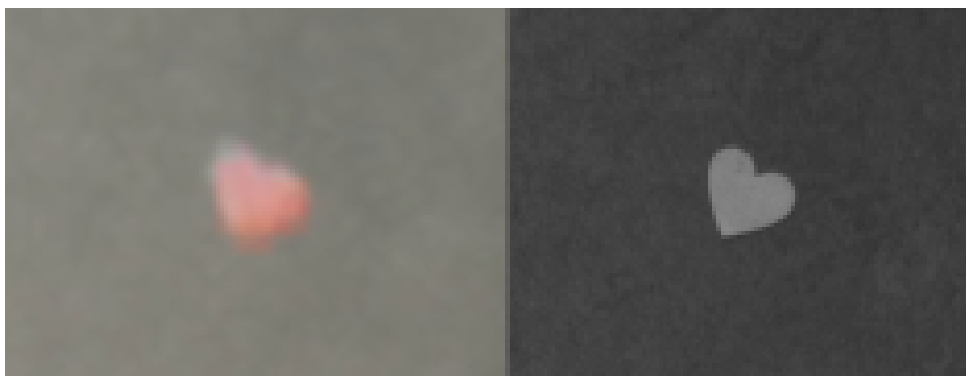


Obrázek 5.10: Měření 1: Vlevo detail magnetky tvaru kruhu z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery

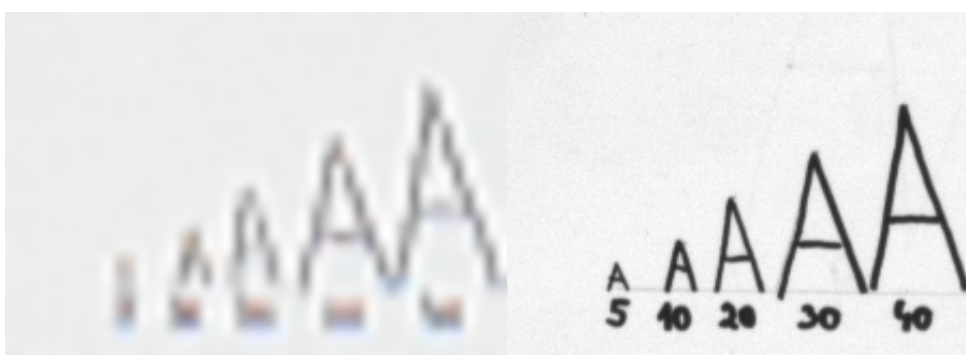


Obrázek 5.11: Měření 2: Vlevo detail magnetky tvaru kapky z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery

5. VÝSLEDKY



Obrázek 5.12: Měření 3: Vlevo detail magnetky tvaru srdce z přehledového snímku a vpravo detail stejné magnetky získané pomocí detailní kamery



Obrázek 5.13: Měření 4: Vlevo detail šablony s písmeny A z přehledového snímku a vpravo detail stejné šablony získané pomocí detailní kamery

5.3 Výsledky snímání postav



Obrázek 5.14: Testovací sestava umístěna u stropu pro snímání v nenulové výšce

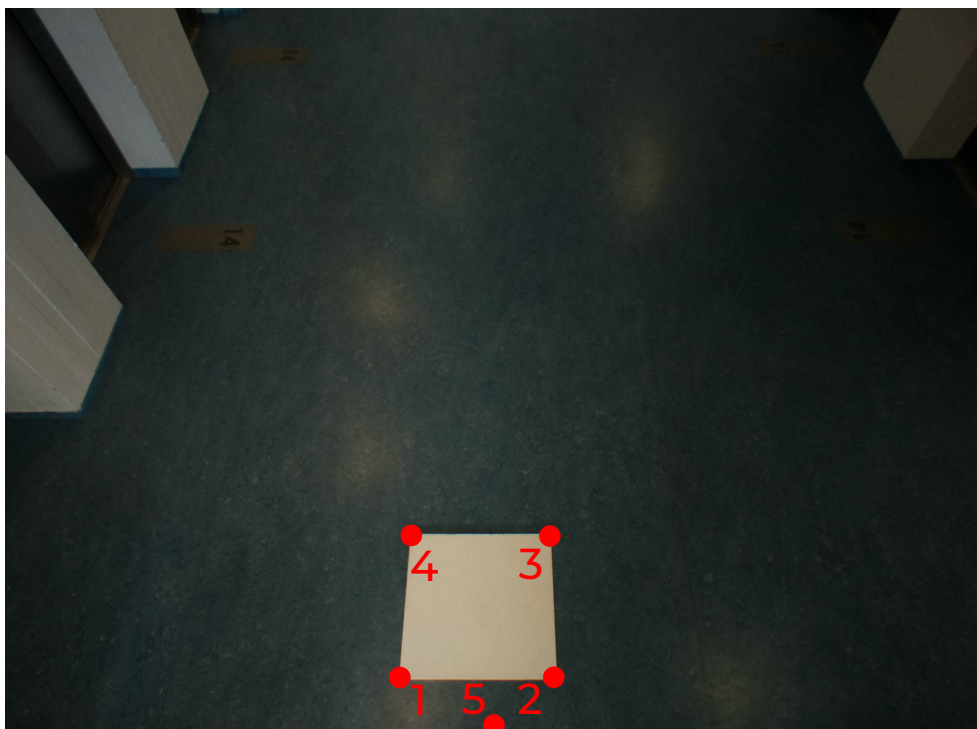
Následující měření bylo zaměřeno na snímání v nenulové výšce. Lze jej využít pro snímání postav, snímání věcí na stole nebo pokladně, apod.

Sestava byla umístěna k stropu, jak je možné vidět na obrázku 5.14. Pro měření byl použit objektiv s ohniskovou vzdáleností 25 mm. Snímaná plocha a výběr kalibračních bodů jsou zobrazeny na obrázku 5.15. Jako kalibrační objekt byl použit bílý obdélník o rozměrech 593×570 mm. V tomto případě bylo možné využít i informační ukazatele podlaží umístěných na snímané ploše a jejich vzájemnou vzdálenost. Sestava byla upevněna tak, že povrch zrcadla byl ve výšce 2880 mm. Vyznačený bod 5 je 200 mm vzdálen od středu zrcadla. Kontrolu kalibrace je možné vidět na obrázku 5.16.

Výška snímání byla nastavena na 1500 mm. Vybíraným cílem na přehledové kameře byla spojnice chodidel postavy. Na obrázku 5.17 je vzdálenost postavy od kamery zhruba 4 m a na obrázku 5.18 zhruba 1 m. Zajímavý poznatek

5. VÝSLEDKY

měření je možné vidět na obrázku 5.17, kterým je možnost získání detailu v určité výšce, i za předpokladu, že celý objekt není možné vidět na přehledové kameře.



Obrázek 5.15: Výběr kalibračních bodů a vyznačení pozic jednotlivých magnetek



Obrázek 5.16: Kontrola zadání bodů kalibrace



Obrázek 5.17: Měření 1: Vlevo snímek z přehledové kamery s vyznačením bodu zacílení, kdy není vidět horní část postavy. Vpravo zaměřená horní část postavy.



Obrázek 5.18: Měření 2: Vlevo snímek z přehledové kamery s postavou a vyznačením bodu zacílení. Vpravo snímek z detailní kamery s větším rozlišením obličeje.

Diskuze

V kapitole jsou diskutovány hardwarové a softwarové možnosti rozšíření vytvořeného prototypu.

Výběr objektu pro zacílení je demonstrován pomocí nakliknutí v obrázku z přehledové kamery. Výběr objektů by šlo vylepšit automatizací hledání objektů.

Zacílení zrcadla na objekt je realizováno pomocí nastavení úhlu zrcadla. Může se stát, že objekt není pokaždé přesně uprostřed. Zacílení objektu na střed lze vylepšit následným softwarovým vycentrováním hledaného objektu.

Firmware spoléhá na správnou kalibraci místnosti. Pokud je provedena nesprávně, může se stát, že budou spočteny větší úhly a dráty od motoru nebo akcelerometru se utrhnou. Bylo by vhodné vytvořit algoritmus, který by zrcadlo zastavil tak, aby se této situaci předešlo.

Algoritmus pro výpočet úhlů počítá s tím, že sestava je umístěna ve vodovážné poloze. Pokud je sestava upevněna nakřivo v jakékoliv ose, náklon zrcátka je stále měřen vůči gravitačnímu vektoru, ale mezi zrcátkem a objektivem kamery vzniknou jiné úhly. Bylo by možné vytvořit automatickou kalibraci, která by zjistila aditivní konstanty náklonu celé sestavy.

První referenční přímka, od které se počítá horizontální vzdálenost a podle které se tvoří i druhá na ni kolmá přímka, se vytváří v polovině přehledového snímku. Pokud není sestava vodovážně v této ose, není konstruovaná přímka kolmo k sestavě a vypočtené vzdálenosti jsou nepřesné. Řešením by mohlo být použití jednoosého nebo dvouosého gimbalu pro vodovážné upevnění s možností následné aretace.

V kalibraci je zadávána výška povrchu zrcadla ručně. Ruční způsob může být nepřesný a zanáší chybu do výpočtu úhlů. Řešením by mohlo být využití např. ultrazvukového měřiče vzdálenosti.

Kalibrační objekt má tvar obdélníku. Obecně je možné použít jakýkoliv tvar (alespoň o čtyřech bodech), kdy známe souřadnice bodů jak v snímku, tak v reálném světě.

Přípravek se skládá z tří plastových výtisků – držák na řídicí desky, držák

na kamery a dvousosý systém zrcátka. Výtisky jsou upevněny na hliníkových profilech rozměru 40 mm. Při instalaci na hliníkové profily je snadné výtisky vyosít a zacílení se stává nepřesné. Šlo by to vyřešit spojením přípravku na jeden držák, kdy vzdálenost objektivu od zrcadla bude záviset na délce konkrétního objektivu tak, aby zrcadlo do objektivu nenaráželo.

Zrcadlo je možné naklonit v dvou osách. Způsob je vhodný pro středně náročné aplikace na rychlost, jelikož jeden motor otáčí váhu druhého motoru. Při požadavku na vysokou rychlost by bylo nutné zrcadla rozdělit na každou osu separátně. Čím větší rychlost by byla požadována, tím menší zrcadla by bylo použít. Tím se však zmenší zorné pole pohledu kamery.

Firmware přípravku je psaný v jazyce Python. Rychlost firmwaru nemusí být dostačující pro aplikace náročné na rychlost. V takovém případě jej lze přepsat do jazyka C.

Minipočítač Raspberry Pi je napájen originálním zdrojem 5 V/3 A. Spolu s připojenými kamerami (i přes odpojené periferie jako klávesnice, myš, monitor, atd.) je na limitu spotřeby a často se objevuje varovný signál nedostatečného proudu. Bylo by vhodné alespoň jednu kameru napájet separátně, nebo vyměnit za zdroj, který umožňuje větší proud.

Kamerové systémy i zrcadlo jsou zvoleny pro snímání ve viditelném spektru. Je možné mít v závislosti na požadavcích úlohy jak přehledový systém, tak detailní systém (vč. zrcadla v závislosti na materiálu odrazové vrstvy) v jiném spektru. Tedy například snímat prostor termokamerou a detailní snímek pořídít ve viditelném spektru nebo opačně.

Pro využití v konkrétní průmyslové aplikaci je potřeba udělat analýzu snímaného prostoru v závislosti na pozici, kde bude možné systém ukotvit. Podle požadavků na snímání a kotvící prostor je potřeba zvolit:

- **Přehledový kamerový systém** – U přehledového systému je důležité zvolit snímací čip a objektiv tak, aby ve výsledné výšce, kde bude kamera ukotvena, byla kamera schopná snímat požadovanou velikost plochy.
- **Detailní kamerový systém** – U detailního systému je důležitý požadovaný detail snímku, který závisí na velikosti snímacího čipu, zorném poli a vzdálenosti snímaného objektu. Dle žádaného snímání v konkrétní části elektromagnetického spektra je potřebné zvolit příslušnou kameru, objektiv a zrcadlo. Dále volba objektivu závisí i na rozmezí výšky, v jaké mají být cílené objekty detekovány (hloubka ostrosti).
- **Vertikální náklon kamerových systémů** – Natočení kamer tak, aby snímaly požadovanou plochu.
- **Pozice otočné soustavy zrcadla** – Umístění otočného systému tak, aby osa objektivu směřovala na střed odrazové vrstvy zrcadla.

Ačkoliv byl v posledním měření (sekce 5.3) použit objektiv s ohniskovou vzdáleností 25 mm, vzdálený snímek již není úplně ostrý. Z definice hloubky os-

trosti by mohlo být řešením snímání z větší vzdálenosti jak upevněním systému ve větší výšce, zvětšením vzdálenosti mezi detailní kamerou a zrcadlem nebo snímáním ve větší vzdálenosti obecně (hloubka ostrosti je větší s přibývajícím vzdáleností ostřeného objektu). Druhým řešením může být použití tekuté čočky⁸.

⁸Jedná se o čočku která je mechanicky či elektricky řízena. Lze pomocí ní v rámci určité vzdálenosti objekt doostřit. [88]

Závěr

V rámci práce byla provedena rešerše v oblasti směřování kamer a dostupných řešení. Následně byl navržen systém pro snímání místnosti a na základě charakteristik jednotlivých řešení rešerše bylo navrženo schéma hardwarového přípravku – jeho komponenty a zapojení. Podle návrhu přípravku byl realizován prototyp a jeho firmware pro zacílení pohledu kamery na požadovaný objekt. Vytvořený prototyp byl otestován v laboratoři na reálných datech pomocí třech experimentů a poskytuje uspokojivé výsledky. Hardwarový přípravek poslouží jako základ pro následnou tvorbu průmyslového prototypu.

Literatura

- [1] *Workswell Safetis Outdoor - Early Fire Detection Thermal Camera*. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://my.workswell.eu/download/wso-pt/datasheet/en>
- [2] 2 AXIS Motorized Camera Pan-Tilt module, Motion Control, Bluetooth Android, Ready To Use Kit. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://overmotion.com/en/motion-control/3-2-axis-motorized-camera-pan-tilt-module-motion-control-bluetooth-android-ready-to-use-kit.html>
- [3] Mi Home Security Camera 360° 1080P. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.xiaomi.cz/produkty/mi-home-security-camera-360-1080p-2/>
- [4] Iida, K.; Oku, H.: Saccade Mirror 3: High-speed gaze controller with ultra wide gaze control range using triple rotational mirrors. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, s. 624–629, doi:10.1109/ICRA.2016.7487186, [cit. 2021-04-11].
- [5] 2-Axis Goniometer Stage - Custom Engineering - Catalog - Opto-Mechanical Products - Standa. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://www.standa.lt/products/catalog/custom_engineering?item=592
- [6] Motorized Goniometers (Gimbal Mounts) for Large Square Optics - Custom Engineering - Catalog - Opto-Mechanical Products - Standa. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://www.standa.lt/products/catalog/custom_engineering?item=570&prod=motorized-goniometer-gimbal-large-square-optics
- [7] Hu, S.; Matsumoto, Y.; Takaki, T.; aj.: Monocular Stereo Measurement Using High-Speed Catadioptric Tracking. *Sensors*, ročník 17, č. 8, 2017, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s17081839, [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1839>

- [8] Cameras | Basler. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/>
- [9] Monochrome VS color sensors - Opto Engineering. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/monochrome-vs-color-sensors>
- [10] The Anatomy of a Lens | Edmund Optics. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/the-anatomy-of-a-lens/>
- [11] JiPaul: English: The focus F and the focal length f (positive) of a positive lens. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Focal-length-a.png>
- [12] What is Aperture? [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://photographyproject.uk/camera-basics/what-is-aperture/>
- [13] Personnel, U. S. B. o. N.: *Photographer's Mate 3 & 2*. Rate training manual, U.S. Government Printing Office, [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=3-sRsGu4-NwC>
- [14] Where to buy first surface mirrors, aluminum, silver, gold, beryllium, protected, UV-enhanced, mid-infrared, ultrafast, low chromatic dispersion, manufacturers and suppliers - RP Photonics Buyer's Guide. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/bg/buy_first_surface_mirrors.html
- [15] Ricce: English: Difference between normal mirror (left) and one for optical uses. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Specchi.jpg>
- [16] Metallic Mirror Coatings | Edmund Optics. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/metallic-mirror-coatings/>
- [17] Venkatanarayanan, A.; Spain, E.: 13.03 - Review of Recent Developments in Sensing Materials. In *Comprehensive Materials Processing*, editace S. Hashmi; G. F. Batalha; C. J. V. Tyne; B. Yilbas, Elsevier, ISBN 978-0-08-096533-8, s. 47–101, doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01303-0, [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080965321013030>
- [18] Lemkin, M.; Boser, B. E.: A three-axis micromachined accelerometer with a CMOS position-sense interface and digital offset-trim electronics. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, ročník 34, č. 4, 1999: s. 456–468, doi: 10.1109/4.753678, [cit. 2021-04-10].

-
- [19] *How to drive a unipolar stepper motor with the TLE8110ED*. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-How_to_drive_a_unipolar_stepper_motor_with_TLE8110ED-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46261ff5777016209fd50284300
- [20] Stepper Motor Theory. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/learningzone/technicaldocuments/stepper-motor-theory>
- [21] Buy a Raspberry Pi High Quality Camera – Raspberry Pi. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-high-quality-camera/>
- [22] Basler ace acA2500-60um - Area Scan Camera. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca2500-60um/>
- [23] 1”6MP Plus SC Series - Kowa Lenses. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://lenses.kowa-usa.com/57-6MP-Plus-SC-Series>
- [24] GPIO - Raspberry Pi Documentation. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>
- [25] FV0420 | MaxxVision. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.maxxvision.com/produkte/objektive/entozentrisch/festbrennweiten/734/fv0420>
- [26] Step Motor (28BYJ-48) | 3D CAD Model Library | GrabCAD. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/step-motor-28byj-48-2>
- [27] ULN2003 Stepper Motor Driver | Makerfabs Electronics. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.makerfabs.com/uln2003-stepper-motor-driver.html>
- [28] 28BYJ-48 Stepper Motor Pinout Wiring, Specifications, Uses Guide & Datasheet. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://components101.com/motors/28byj-48-stepper-motor>
- [29] Image Sensor Format - SPOT Imaging. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.spotimaging.com/resources/glossary/image-sensor-format/>
- [30] Cameras | Edmund Optics. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/>

- [31] FLIR High-Performance Pan-Tilts | FLIR Systems. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.flir.com/oem/pan-tilt-systems/>
- [32] Park, J.; Hwang, W.; Bahn, W.; aj.: Pan/Tilt Camera Control for Vision Tracking System Based on the Robot Motion and Vision Information. *IFAC Proceedings Volumes*, ročník 44, č. 1, 2011: s. 3165–3170, ISSN 1474-6670, doi:<https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01781>, [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701644098X>
- [33] Dynamic Vision System: Micro Visual Feedback. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://ishikawa-vision.org/mvf/index-e.html>
- [34] Okumura, K.; Oku, H.; Ishikawa, M.: High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, s. 6186–6191, doi:10.1109/ICRA.2011.5980080, [cit. 2021-04-11].
- [35] Povrchové úpravy kovů | Bomex. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.bomex.cz>
- [36] Resolution | Edmund Optics. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/resolution/>
- [37] Sensor types : CCD and CMOS - Opto Engineering. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/sensor-types-ccd-and-cmos>
- [38] The Physics of Light and Color - Human Vision and Color Perception | Olympus LS. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/humanvisionintro/>
- [39] Extended wavelength response. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/cameras-extended-wavelength-response/>
- [40] Camera mounts - Opto Engineering. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/camera-mounts>
- [41] Back focal length adjustment - Opto Engineering. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/back-focal-length-adjustment>
- [42] Raspberry Pi High Quality Camera Getting started. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: https://static.raspberrypi.org/files/product-guides/Raspberry_Pi_High_Quality_Camera_Getting_Started.pdf

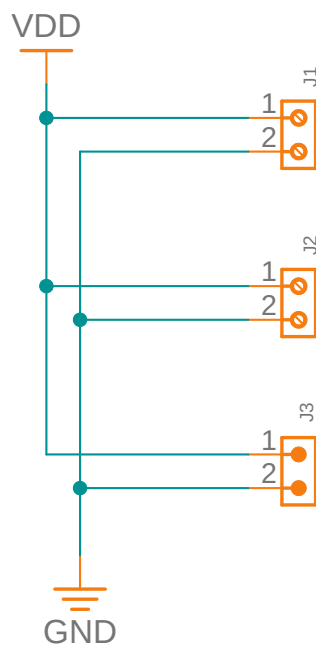
-
- [43] Kamps, H. J.: Everything you need to know about camera lenses. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://medium.com/photography-secrets/lenses-e033d2f77548>
- [44] Lens approximations and equations - Opto Engineering. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/lens-approximations-and-equations>
- [45] Understanding Focal Length and Field of View | Edmund Optics. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-focal-length-and-field-of-view/>
- [46] Jacobson, D.: Photographic Lenses FAQ. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.faqs.org/faqs/rec-photo/lenses/faq/>
- [47] Telecentric lenses - Opto Engineering. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/telecentric-lenses>
- [48] 360° optics - Opto Engineering. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.opto-e.com/basics/360-optics>
- [49] Basic Properties of Mirrors - Introduction to Mirrors | Olympus LS. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/mirrorsintro/>
- [50] Guide to Silver Coating Mirrors vs. Aluminum Mirrors. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.sharrettsplating.com/blog/silver-aluminum-mirror-coating/>
- [51] Volchko, J.: Visible Light Spectrum: From a Lighting Manufacturer's Perspective. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.lumitex.com/blog/visible-light-spectrum>
- [52] Burke, M. W.: Optics I: Imaging. In *Image Acquisition*, editace M. W. Burke, Springer Netherlands, ISBN 978-94-009-0069-1, s. 284–413, doi: 10.1007/978-94-009-0069-1_3, [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-94-009-0069-1_3
- [53] What is MEMS Technology? [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>
- [54] Murphy, C.: Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application—Part 1 | Analog Devices. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-most-suitable-mems-accelerometer-for-your-application-part-1.html>

- [55] AN5551 - *Precise and accurate tilt sensing in industrial applications*. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00729932-precise-and-accurate-tilt-sensing-in-industrial-applications-stmicroelectronics.pdf
- [56] Suh, S.; Kang, S.; Chung, D.; aj.: *Theory and Design of CNC Systems*. Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer London, ISBN 978-1-84800-336-1, [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=c_-3TxZ1npMC
- [57] The Benefits of Adding Encoders to Step Motor Systems. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/The-Benefits-of-Adding-Encoders-to-Step-Motor-Systems/21>
- [58] Condit, R.; W. Jones, D. D.: *AN907 - Stepping Motors Fundamentals*. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00907a.pdf>
- [59] Types of Steppers | All About Stepper Motors | Adafruit Learning System. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/types-of-steppers?view=all>
- [60] Analytická geometrie - Geometrie v rovině - Parametrické vyjádření přímky. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~portal/analyticka_geometrie/rovina.php
- [61] OpenCV: Basic concepts of the homography explained with code. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/3.4/d9/dab/tutorial_homography.html
- [62] Raspberry Pi 4 Model B specifications – Raspberry Pi. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- [63] Camera Module - Raspberry Pi Documentation. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/README.md>
- [64] (FV Series) 1/2"-2/3" Mega Pixel Low Distortion Fixed Focal Lens | myutron. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.myutron.com/en/lens/fa/fv/>
- [65] Kiatronics: *28BYJ-48 datasheet*. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/1006817/Kiatronics/28BYJ-48/1>

-
- [66] In-Depth: Control 28BYJ-48 Stepper Motor with ULN2003 Driver & Arduino. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/>
- [67] Schoeffler, M.: Tutorial: How to drive the 28BYJ-48 stepper motor with a ULN2003A driver board and an Arduino Uno. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://mschoeffler.com/2017/09/23/tutorial-how-to-drive-the-28byj-48-stepper-motor-with-a-uln2003a-driver-board-and-an-arduino-uno/>
- [68] CheapStepper - Arduino Reference. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/cheapstepper/>
- [69] What is IMU? Inertial Measurement Unit Working | Arrow.com. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/imu-principles-and-applications>
- [70] SPI vs I2C Protocols - Pros and Cons. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/spi-vs-i2c-protocols-pros-and-cons>
- [71] *AN5392 - ISM330DHCX: Machine Learning Core.* [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00651838-ism330dhcx-machine-learning-core-stmicroelectronics.pdf
- [72] *ISM330DHCX - iNEMO inertial module with embedded Machine Learning Core: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope with digital output for industrial applications.* [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ism330dhcx.pdf>
- [73] *AN5398 - ISM330DHCX: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope with digital output for industrial applications.* [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00653793-ism330dhcx-alwayson-3d-accelerometer-and-3d-gyroscope-with-digital-output-for-industrial-applications-stmicroelectronics.pdf
- [74] *IIS3DHHC - High-resolution, high-stability 3-axis digital accelerometer.* [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/iis3dhhc.pdf>
- [75] STEVAL-MKI207V1 - ISM330DHCX adapter board for a standard DIL24 socket - STMicroelectronics. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-mki207v1.html>

- [76] Villa, B.: How To: Cut Glass. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.bobvila.com/articles/how-to-cut-glass/>
- [77] *raspi-config - Raspberry Pi Documentation*. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/raspi-config.md>
- [78] Thoms, V.: spidev: Python bindings for Linux SPI access through spidev. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://github.com/doceme/py-spidev>
- [79] *AN4508 - Parameters and calibration of a low-g 3-axis accelerometer*. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00119044-parameters-and-calibration-of-a-lowg-3axis-accelerometer-stmicroelectronics.pdf
- [80] Calibrating 3-Axis Accelerometers. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://www.gcdataconcepts.com/calibration.html>
- [81] *Accelerometer terminology guide*. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/quick-reference-guide/SENSORTERMSPG.pdf>
- [82] *AN4509 - Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer*. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00119046-tilt-measurement-using-a-lowg-3axis-accelerometer-stmicroelectronics.pdf
- [83] Weisstein, E. W.: Radian. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/Radian.html>
- [84] *raspberrypi-gpio-python / Wiki / BasicUsage*. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://sourceforge.net/p/raspberrypi-gpio-python/wiki/BasicUsage/>
- [85] picamera — Picamera 1.13 Documentation. [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/index.html>
- [86] *How to Build pylon Applications on Raspberry Pi*. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://www.baslerweb.com/fp-1597837316/media/downloads/documents/application_notes/AW00162902000_How_to_Build_pylon_Applications_on_Raspberry_Pi.pdf
- [87] Balatsko, M.: pypylon-opencv-viewer: Impro function application while saving and getting image. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://github.com/mbalatsko/pypylon-opencv-viewer>
- [88] Liquid Lens Features, Applications, and Technology | Edmund Optics. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/liquid-lenses-in-imaging/>

Schéma napájecí rozdvojky pro krokové motory



Obrázek A.1: Schéma zapojení napájecí rozdvojky pro krokové motory

Zdrojový kód kalibrace snímané místnosti

```
1 def calibrate_room(self):
2     """Get calibration parameters."""
3
4     while True:
5         self.__logger.info(
6             "Waiting for user to select 5 points in the image:")
7         calibration_pts, calibration_img = self.image_interaction.show_image(
8             self.camera_ctrl.general_camera_grab_one,
9             callback=self.image_interaction.callback_get_five_points,
10            window_name="Please, choose calibration points:",
11            return_image=True)
12
13        if len(calibration_pts) == 5:
14            break
15        else:
16            self.__logger.warn("Less or more than 5 points were received,"
17                               "5 points are needed.")
18
19        calibration_pts = np.array(calibration_pts)
20
21        reference_rectangle_width = int(input(
22            "Specify reference rectangle width in mm:"))
23        reference_rectangle_height = int(input(
24            "Specify reference rectangle height in mm:"))
25        self.__mirror_height = int(input(
26            "Set height of mirror surface center in mm:"))
27
```

B. ZDROJOVÝ KÓD KALIBRACE SNÍMANÉ MÍSTNOSTI

```
28     C_origin_distance = int(input(
29         "Set distance from C_origin in vertical axis in mm:")
30
31     # Find homography
32     world_pts = np.array(
33         [
34             (0, reference_rectangle_height),
35             (reference_rectangle_width, reference_rectangle_height),
36             (reference_rectangle_width, 0),
37             (0,0)
38         ])
39     self.__H_matrix, mask = cv2.findHomography(
40         calibration_pts[:-1], world_pts)
41
42     # Construct H_axis_reference
43     H_axis_reference_px = np.array(
44         [
45             (calibration_img.shape[1]//2, 0),
46             (calibration_img.shape[1]//2, calibration_img.shape[0])
47         ],
48         dtype=np.float32)
49     self.__H_axis_reference = cv2.perspectiveTransform(
50         np.array([H_axis_reference_px]), self.H_matrix)[0]
51
52     #Construct real C_origin
53     C_origin_in_dist_px = np.array(
54         [calibration_img.shape[1]//2, calibration_pts[-1][1]],
55         dtype=np.float32)
56     C_origin = self.__point_on_line_in_dist(
57         self.__H_axis_reference[0],
58         self.__H_axis_reference[1],
59         cv2.perspectiveTransform(
60             np.array([[C_origin_in_dist_px]]), self.H_matrix)[0][0],
61         -C_origin_distance)
62
63     V_axis_reference_point2 = self.__point_on_norm_line_in_dist(
64         self.__H_axis_reference[0],
65         self.__H_axis_reference[1],
66         C_origin,
67         self.__point_to_point_dist(
68             self.__H_axis_reference[0], self.__H_axis_reference[1]))
69     self.__V_axis_reference = np.array(
70         [C_origin, (V_axis_reference_point2)])
71
```

```
72     img_without_perspective = cv2.warpPerspective(  
73         calibration_img,  
74         self.__H_matrix,  
75         (reference_rectangle_width, reference_rectangle_height))  
76     self.image_interaction.show_image(  
77         img_without_perspective, window_name="Calibrated room")  
78  
79     self.__calibration_done = True
```

Zdrojový kód zaměření cíle

```
1 def focus_target(self, x: int, y: int, object_height: int) -> None:
2     """Focus target in pixel coordinates [x, y] in height of object height.
3     Parameters
4     -----
5     x : int
6         X pixel coordinate of target.
7     y : int
8         Y pixel coordinate of target.
9     object_height : int
10        Height of target.
11    """
12
13    if not self.__calibration_done:
14        self.__logger.error("Calibration has not been done yet!")
15        break
16
17    # Target in mm
18    target_warped = cv2.perspectiveTransform(
19        np.array([[x,y]], dtype=np.single), self.__H_matrix)
20
21    # Get distance in horizontal and vertical direction
22    H_distance, H_vect = self.__line_to_point_dist(
23        self.__H_axis_reference[0],
24        self.__H_axis_reference[1],
25        target_warped[0][0])
26    V_distance, V_vect = self.__line_to_point_dist(
27        self.__V_axis_reference[1],
28        self.__V_axis_reference[0],
29        target_warped[0][0])
```

C. ZDROJOVÝ KÓD ZAMĚŘENÍ CÍLE

```
30
31     H_distance = H_distance * np.sign(H_vect)
32     V_distance = V_distance * np.sign(V_vect)
33
34
35     # Vertical and horizontal angle needed to target object
36     V_a = np.arctan((V_distance) / (self.__mirror_height - object_height)
37                    ) * 180.0 / np.pi
38     H_a = np.arctan((H_distance) / (self.__mirror_height - object_height)
39                    ) * 180.0 / np.pi
40
41     # Calculate mirror tilt
42     V_mirror = (V_a - 30) / 2 + self.__calib_coef_V
43     H_mirror = (H_a / 2) + self.__calib_coef_H
44
45     while True:
46         # Compute difference from current tilt
47         V_current, H_current = self.acc.get_current_tilt()
48         V_diff = V_mirror - V_current
49         H_diff = H_mirror - H_current
50
51         # Check tilt
52         if abs(V_diff) <= 0.3 and abs(H_diff) <= 0.3:
53             break
54
55         # Tilt mirror by difference calculated
56         self.move_both_steppers(H_diff, V_diff)
57         time.sleep(0.5)
58
59
60     # Rest both stepper motors
61     self.rest_both_steppers()
```


Seznam použitých zkratek

ADC	Analog to Digital Converter
BCM	Broadcom
COC	Circle Of Confusion
CS	Chip Select
DIL24	Dual in-line 24 pin
FIFO	First In First Out
FPS	Frames Per Second
FS	Full-scale
GPIO	General Purpose Input Output
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HP	High Performance
HQ	High Quality
IMU	Inertial Measurement Unit
I²C	Inter-Integrated Circuit
IR	Infrared
LSB	Least Significant Bit
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MLC	Machine Learning Core
MSB	Most Significant Bit

D. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

- ODR** Output Data Rate
- OIS** Optical Image Stabilizer
- OS** Operating System
- PCB** Printed Circuit Board
- PLA** Polylactic acid
- POE** Power Over Ethernet
- PWM** Pulse Width Modulation
- RAM** Random Access Memory
- RMS** Root Mean Square
- RW** Read Write
- SOC** System On Chip
- SPI** Serial Peripheral Interface
- TPI** Threads Per Inch
- USB** Universal Serial Bus
- VNC** Virtual Network Computing

Obsah přiloženého paměťového média

readme.md.....	stručný popis obsahu
images	nasnímané snímky
src	
├─ impl	zdrojové kódy a Jupyter notebook s demonstrací aplikace
│ └─ package.....	zdrojové kódy jednotlivých tříd
├─ pcb_src	zdrojové soubory plošných spojů
├─ STL.....	3D modely tištěných částí přípravku ve formátu STL
├─ thesis	zdrojová forma práce ve formátu L ^A T _E X
├─ utilities.....	Jupyter notebooky s pomocnými výpočty
│ └─ calibration_data.....	data využitá ke kalibraci akcelerometru
└─ text	text práce
└─ DP-2021-Zuzana-Jirankova.pdf.....	text práce ve formátu PDF