

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY



Aplikace Time of Flight senzoru

Bakalářská práce

Jakub Strnad

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

Praha, květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Strnad** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **507792**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Aplikace Time of Flight senzoru

Název bakalářské práce anglicky:

ToF Sensor Applications

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a implementace aplikací s využitím multizónového Time of Flight (ToF) senzoru VL53L8CX od firmy STMicroelectronics.

Během zpracování se řiďte následujícími pokyny:

- 1) prostudujte dostupnou literaturu, která se věnuje aplikacím ToF senzoru, zaměřte se zejména na metody fúze s jinými zdroji dat;
- 2) po dohodě s vedoucím vybranou aplikaci implementujte;
- 3) navrhnete metodu kalibrace pro různá prostředí;
- 4) aplikaci otestujte v reálném provozu a diskutujte případné nedostatky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] HANSARD, Miles, et al. Time-of-flight cameras: principles, methods and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
[2] ZINS, Matthieu. Color Fusion and Super-resolution for Time-of-flight Cameras. 2017.
[3] Low-power high-performance 8x8 multizone Time-of-Flight sensor (ToF), STMicroelectronics [online] Dostupné z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l8cx.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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.

Dne 23. května 2024 v Praze

.....
Jakub Strnad

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za věcné připomínky, cenné rady a vstřícnost při konzultacích během zpracovávání této bakalářské práce.

Prohlášení	i
Poděkování	ii
Abstrakt	v
Abstract	v
Seznam používaných zkratk	vii
Úvod	1
1 Teoretický rozbor	3
1.1 Princip fungování ToF senzorů	3
1.2 Výhody optických ToF senzorů	4
1.3 Multizónové ToF senzory firmy STMicroelectronics	4
1.3.1 Stručný popis konstrukce	5
1.3.2 Stručný popis funkce	5
1.4 Charakteristické vlastnosti senzoru VL53L7CX	7
1.4.1 Přesnost senzoru a materiálová omezení uváděná výrobcem	8
1.4.2 Přeslech při použití krycího sklíčka	8
1.5 Model kamery a kalibrace	11
1.5.1 Intrinzické parametry	12
1.5.2 Extrinzické parametry	13
1.5.3 Zkreslení kamery	14
1.5.4 Projektivní zobrazení a matice homografie	15
1.5.5 Kalibrace kamery	16
2 Použití senzoru VL53L7CX v reálných podmínkách	17
2.1 Obecný postup měření senzorem a kalibrace přeslechu	17
2.2 Omezení použití senzoru	19
2.2.1 Materiálová omezení určená měřením	19

2.2.2	Vliv frekvence opakování měření na míru chybovosti	21
2.3	Ověření kalibrace přeslechu v praxi	22
3	Návrh a realizace	24
3.1	Čtení a reprezentace dat ToF senzoru	24
3.2	Určení intrinzických parametrů kamery	26
3.3	Diagram zapojení s jedním ToF senzorem	27
3.4	Fúze dat kamery a ToF senzoru	27
3.4.1	Implementace a struktura programu	28
3.5	Fúze transformací perspektivy	28
3.6	Fúze projekcí bodů	30
3.7	Zapojení se třemi senzory	33
3.8	Testovací stojánek a grafické rozhraní	34
4	Výsledky a možné aplikace	36
4.1	Současná využití ToF senzorů	36
4.1.1	Aplikace v oblasti IoT	36
4.1.2	Ostatní aplikace	36
4.2	Výsledky praktické části	37
4.2.1	Fúze transformací perspektivy	37
4.2.2	Fúze projekcí bodů	39
5	Závěr	41
	Seznam obrázků	42
	Seznam tabulek	44
	Bibliografie	46

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá aplikacemi MEMS multizónového Time of Flight senzoru VL53L7CX výrobce STMicroelectronics s důrazem na fúzi dat senzoru s obrazovými daty RGB kamery. Použitý senzor umožňuje paralelní měření vzdálenosti v rozlišení 4x4 zóny s frekvencí až 64 Hz nebo 8x8 zón s frekvencí až 15 Hz a je založen na VCSEL o vlnové délce 940 nm a CMOS SPAD detektoru. Práce popisuje specifické vlastnosti senzoru VL53L7CX, je diskutována kalibrace parazitního *přeslechu* (crosstalk) a jako hlavní faktory ovlivňující přesnost měření jsou identifikovány odrazivost materiálů, frekvence opakování měření, použité rozlišení a okolní osvětlení. Pro realizaci fúze dat v praktické části práce jsou zvoleny dvě metody, a to fúze transformací perspektivy a fúze projekcí mračna bodů. Práce identifikuje široké možnosti využití samotného ToF senzoru VL53L7CX v méně náročných aplikacích, jako je detekce přítomnosti osob, jednoduché ovládání gesty, nebo využití v automatizaci výroby a v oblasti IoT. Na základě testování fúze dat jsou navrženy možné pokročilé aplikace mapování prostředí pro využití v oblasti AR, VR a SLAM.

Klíčová slova: Time of Flight, ToF senzor, VL53L7CX, STMicroelectronics, bezdotykové měření vzdálenosti, kalibrace, fúze dat, hloubková mapa, RGB kamera, SPAD, VCSEL

Abstract

This bachelor thesis explores possible applications of the VL53L7CX MEMS multi-zone Time of Flight sensor from STMicroelectronics with emphasis on the fusion of sensor data with image data obtained by an RGB camera. The sensor used allows parallel distance measurement at a resolution of 4x4 zones at up to 64 Hz or 8x8 zones at up to 15 Hz and is based on a 940 nm VCSEL and a CMOS SPAD detector. The paper describes the specific characteristics of the VL53L7CX sensor, discusses coverglass crosstalk calibration and identifies material reflectivity, measurement frequency, resolution used and ambient illumination as the main factors affecting measurement accuracy. Two methods of data fusion are selected for implementation in the practical part of this paper, namely fusion by perspective transformation and point cloud projection. The work identifies a wide range of applications for the VL53L7CX ToF sensor itself in less demanding applications such as user presence detection, simple gesture control, or use in manufacturing automation and IoT. Based on the evaluation of data fusion, possible advanced environment mapping applications are proposed for use in AR, VR and SLAM.

Keywords: Time of Flight, VL53L7CX, STMicroelectronics, non-contact distance measurement, calibration, data fusion, depth map, RGB camera, SPAD, VCSEL

Seznam používaných zkratk

- I²C** Inter-Integrated-Circuit. 7, 17, 24, 27, 33
- AFC** Anti-Fingerprint Coating. 10
- AR** Augmented Reality. v, 42
- ARC** Antireflective Coating. 10, 22
- AVDD** Analog Voltage Drain to Drain. 7
- CAD** Computer-Aided Design. 34
- CMOS** Complementary Metal-Oxide-Semiconductor. v, 1, 4, 41
- COM** Communication port. 25, 35
- DOE** Diffractive Optical Elements. 1, 4, 5, 7
- FIFO** First In First Out. 30
- FoI** Field of Illumination. 7
- FoV** Field of View. 9
- GPIO** General-Purpose Input/Output. 24
- GUI** Graphical User Interface. 34, 35, 39
- HD** High Definition. 24, 27
- IoT** Internet of Things. iv, v, 1, 36
- IOVDD** Input/Output Voltage Drain to Drain. 7

IR Infrared. 1, 3–6, 20–22

kcps/SPAD kilo count per SPAD. 10

LCD Liquid Crystal Display. 20

LGA Land Grid Array. 7

LIDAR Light Detection and Ranging. 37, 40

MEMS Micro-ElectroMechanical Systems. v, 1, 41

NumPy Numerical Python. 28

OpenCV Open Computer Vision Library. 14–16, 26–28, 32, 42

PC Personal Computer. 24, 27, 33

PnP Perspective-n-Point Problem. 14

RANSAC Random Sample Consensus. 15

RGB Red, Green and Blue. v, 11, 27, 31–35, 37, 39, 42

Rx Receiver. 9

SLAM Simultaneous Localization and Mapping. v, 7, 34, 36, 37, 40, 42

SPAD Single Photon Avalanche Diode. v, 1, 4–6, 9, 10, 41

STM STMicroelectronics. v, 1, 17, 24, 37, 41, 42

ToF Time of Flight. iii–v, 1–5, 7, 11, 24, 26–42, 44

Tx Transmitter. 9

ULD Ultra Lite Driver. 22

USB Universal Serial Bus. 24, 27, 33, 35

VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser. v, 1, 4–7, 9, 10, 18, 19, 41

VR Virtual Reality. v, 42

V posledních letech došlo s rozvojem multizónových Time of Flight (ToF) senzorů k významnému pokroku v oblasti bezdotykového měření vzdálenosti. Multizónové ToF senzory umožňují doposud nevídaně rychlé, přesné a jednoduché měření hloubkové mapy prostředí, či povrchu předmětů pomocí IR záření. Tyto senzory byly doposud většinou drahé, ale přesto nacházely široké uplatnění v mnoha různých oborech, jako je internet věcí (IoT), automatizace výroby, robotika, automobilový průmysl, bezpečnostní systémy, zdravotnictví i spotřební elektronika.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vlastnosti a aplikace nedávno uveřejněného a komerčně dostupného multizónového MEMS ToF senzoru VL53L7CX z řady ToF senzorů od společnosti STMicroelectronics (STM). Senzor VL53L7CX je založen na principu CMOS SPAD detektoru a vyhodnocovacího mikrokontroleru integrovaných na jeden čip s přidruženým VCSEL a difrakčním optickou čočkou DOE, umístěných v jednom kompaktním pouzdře.[1] Senzor umožňuje měření s rozlišením až 64 hloubkových zón, a to s přesností v řádu jednotek mm.[2] Výhody tohoto senzoru zahrnují vysokou rychlost měření, nízkou spotřebu energie a schopnost pracovat za různých světelných podmínek a to v kombinaci s malými rozměry a nízkou cenou senzoru. Tím přirozeně vyvstává otázka možných aplikací tohoto cenově dostupného senzoru v různých oblastech.

V této bakalářské práci se proto zabývám návrhem a možností implementací aplikací s využitím multizónového ToF senzoru VL53L7CX od firmy STMicroelectronics. Práce se zaměřuje zejména na možnosti fúze dat ToF senzoru s obrazovými daty kamery, využitelnost senzoru VL53L7CX v praktických aplikacích, ale i omezení použitelnosti senzoru. Pro přehlednost je práce rozdělena do čtyřech kapitol, v nichž jsou postupně popsány teoretický úvod, zhodnocení aplikací senzoru v reálných podmínkách, provedení realizace zapojení pro fúzi dat a na nakonec zhodnocení obdržených výsledků.

Teoretická část je věnována základním principům fungování ToF senzorů a specifickým vlastnostem a parametřům senzoru VL53L7CX. Jsou zkoumány výhody i omezení použití senzoru a velká pozornost je věnována obzvláště praktickému použití senzoru s nasazeným krycím sklíčkem, popisu parazitního jevu *přeslechu* (crosstalk) a postupu kalibrace senzoru pro toto použití. Důležitou částí je též stanovení metod fúze hloubkových dat s daty obrazovými. Druhá kapitola se věnuje použití senzoru VL53L7CX v reálných podmínkách a popisu kroků potřebných k úspěšnému provedení měření a kalibrace senzoru. Jsou také identifikována základní materiálová omezení senzoru.

V praktické části práce jsou aplikovány teoretické poznatky při realizaci zapojení pro vyhodnocení možných aplikací senzoru. Konkrétně jsou provedeny dvě metody fúze dat popsané v teoretickém úvodu. V závěru práce kapitola o výsledcích práce shrnuje současné aplikace ToF senzorů a jejich významné využití v oblasti IoT. Vzápětí jsou také uvedeny hlavní závěry vyplývající z praktické části a na základě poznatků jsou navrženy možné aplikace samotného ToF senzoru i pokročilé aplikace fúze dat.

1.1 Princip fungování ToF senzorů

V současné době jsou na trhu dostupné dva hlavní druhy cenově dostupných zařízení pro bezdotykové měření vzdálenosti, lišící se od sebe druhem vlnění, které používají pro měření. Jedná se o ultrazvukové ToF senzory a aktivní optické (elektrooptické) ToF senzory.

Konkrétní realizace používaných senzorů mohou být značně odlišné, ale obecně platí, že *ultrazvukové senzory* používají technologicky starší a jednodušší způsob měření a typicky vychází z reprodukce ultrazvuku a jeho následného přijímání po odrazu od měřeného objektu. Oproti tomu *elektrooptické senzory* využívají vyzařování a následnou detekci odraženého světelného paprsku, a to typicky v rozmezí infračerveného (IR) elektromagnetického záření. Obě metody určují měřenou vzdálenost ze známé rychlosti šíření daného vlnění v mediu, ve kterém je měření prováděno, a ze změřeného časového intervalu mezi vysláním a přijetím pulzů.

V obou případech, pokud je použito přímého měření „doby letu“ t_f (doby šíření záření od emitoru k měřenému objektu)¹, senzor funguje na jednoduchém principu změření doby t_0 , tedy intervalu mezi vysláním a opětovným přijetím signálu měřicím zařízením a následném určení délky dráhy šíření vlnění. Tyto senzory jsou proto souhrnně označovány jako senzory „doby letu“, tedy ToF senzory, z anglického Time of Flight. Bez výrazné újmy na obecnosti uvažujme, že jsou měřený i měřící objekt stacionární, respektive se vzájemně nepohybují. Za těchto okolností lze odvodit, že signál během časového intervalu t_0 urazí dvojnásobek měřené vzdálenosti d , tedy platí, že

$$d_0 = 2d, \quad (1.1)$$

kde d_0 reprezentuje vzdálenost, kterou vlnění urazí za čas t_0 a d je hledaná vzdálenost. Protože rychlost signálu považujeme v průběhu měření za konstantní, analogicky platí, že

$$t_0 = 2t_f, \quad (1.2)$$

kde t_f je doba šíření záření od emitoru k měřenému objektu. Ze známé rychlosti signálu v daném mediu (vzduchu) $c \approx 299792458$ m/s pro světlo, resp. $c_s \approx 343$ m/s pro ultrazvuk lze jednoduše určit měřenou vzdálenost d ze vztahu

$$d = c \cdot t_f. \quad (1.3)$$

¹Některé senzory též pracují na principu měření fázového posunu přijatého vlnění.

1.2 Výhody optických ToF senzorů

Základní myšlenka výpočtu „doby letu“ t_f signálu je v obou případech identická, ale obě technologie mají v praxi zásadně odlišné vlastnosti a aplikace. Hlavní rozdíly vychází přirozeně z fyzikální podstaty využívaného druhu vlnění.

Předností *ultrazvukových senzorů* je, že jsou obecně levnější a současně velmi robustní, relativně jednoduché a spolehlivé. Jejich důležitou vlastností je například schopnost detekovat průhledné a sypké materiály. Používají se typicky v průmyslu pro měření v náročných podmínkách, jako jsou prostředí obsahující kouř, páru nebo prach. Proto jsou také používány jako parkovací senzory u automobilů, lodní sonar, případně senzory hladiny nebo senzory stavu naplnění materiálu v zásobnících. Naopak jejich nevýhodou je potřeba větší odrazné plochy měřeného předmětu pro spolehlivé měření a současně menší přesnost měření, nebo nutnost zohlednit směrovou charakteristiku ultrazvukového měniče a případné ovlivnění měření okolními předměty.

Oproti tomu *optické senzory* nejčastěji využívají infračervené (IR) diody nebo lasery, nemají žádné z nevýhod zmíněných u ultrazvukových senzorů a obecně umožňují výrazně přesnější měření, v závislosti na druhu senzoru v rozsahu několika centimetrů až do několika kilometrů. (V této práci se ale věnujeme optickým ToF senzorům s krátkým dosahem.) Zároveň vyžadují výrazně menší odrazovou plochu měřeného předmětu a fungují spolehlivě i při šikmém dopadu paprsku. Naopak jejich nevýhodou oproti ultrazvukovým senzorům je relativní náročnost na čistotu prostředí. Bývaly dříve typicky dražší, než ultrazvukové, ale v poslední době jsou na trhu k dispozici i velmi cenově dostupné verze. Dále se pro jejich výhody budeme zabývat právě optickými ToF senzory, a to konkrétně multizónovými optickými ToF senzory.

1.3 Multizónové ToF senzory firmy STMicroelectronics

Předmětem zkoumání této práce je sofistikovanější verze optického senzoru, a to více-zónový optický senzor vzdálenosti od výrobce STMicroelectronics. Více-zónové senzory na rozdíl od jednobodových senzorů vzdálenosti vytváří hloubkovou mapu snímané scény, tedy matici hloubkových měření, jejíž rozměry jsou určeny použitým obrazovým senzorem.

Všechny vícezónové optické hloubkové senzory výrobce STMicroelectronics dostupné na trhu v současné době využívají k měření infračerveného záření o vlnové délce 940 nm. Zdrojem infračerveného záření je pole laserových diod VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) s integrovanými čočkami DOE (Diffractive Optical Elements), které ozařují snímaný objekt. Ovladač VCSEL je integrovaný na čipu senzoru.[2]

Intenzita odraženého měřicího signálu je velmi malá a proto je za účelem detekce záření na čipu senzoru integrován vysoce citlivý obrazový senzor, založený na principu SPAD (Single Photon Avalanche Diode) detektoru. Obrazový senzor umožňuje více-zónové paralelní snímání[1], a to v závislosti na druhu modelu v různém počtu zón. Senzory umožňují mimo jiné v závislosti na druhu modelu snímání jen v režimu 4x4 zóny, nebo i v režimu 8x8 zón, tedy snímání údajů o vzdálenosti paralelně až v 64 zónách a vytváří tak miniaturní hloubkovou mapu zorného pole.

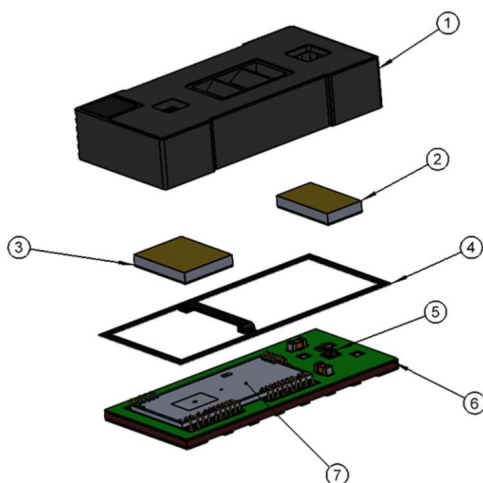
Konkrétním obrazovým senzorem používaným ve vícezónových senzorech společnosti STMicroelectronics je vlastní senzor výrobce založený na 40 nm CMOS SPAD technologii[3], umožňující paralelní výstup 16 signálových kanálů a čtení úplných dat zaznamenané intenzity příchozího záření v podobě histogramů.[4]

Součástí ToF senzorů výrobce STMicroelectronics je integrovaný 32 bitový 250 MHz mikrokontrolér určený pro efektivní vyhodnocování dat obrazového senzoru a zpracování histogramů.[1] Více-zónové ToF senzory řady VL53 od firmy STMicroelectronics jsou specifické inovativní kombinací použitých technologií a kompletní integrací procesu zaznamenání a vyhodnocování na jednom křemíkovém čipu. Jedná se o asi první široce dostupné senzory svého druhu.

1.3.1 Stručný popis konstrukce

Konstrukce různých modelů vykazuje mírné odlišnosti, nicméně základní stavba senzoru je vždy obdobná. Konkrétně senzor Time of Flight VL53L5² výrobce STMicroelectronics, viz obrázek 1.1, obsahuje následující základní funkční prvky[1]:

1. Plastové víčko
2. Vysílací čočka - difrakční čočka (DOE) a filtr nežádoucích vlnových délek
3. Přijímací čočka - difrakční čočka (DOE) a IR filtr pro lepší odolnost vůči okolnímu záření
4. Epoxidové lepidlo
5. Zdroj záření - VCSEL emitör na frekvencích blízkých IR spektru
6. Čtyřvrstvý substrát
7. Křemíkový čip vyrobený v 40 nm technologii



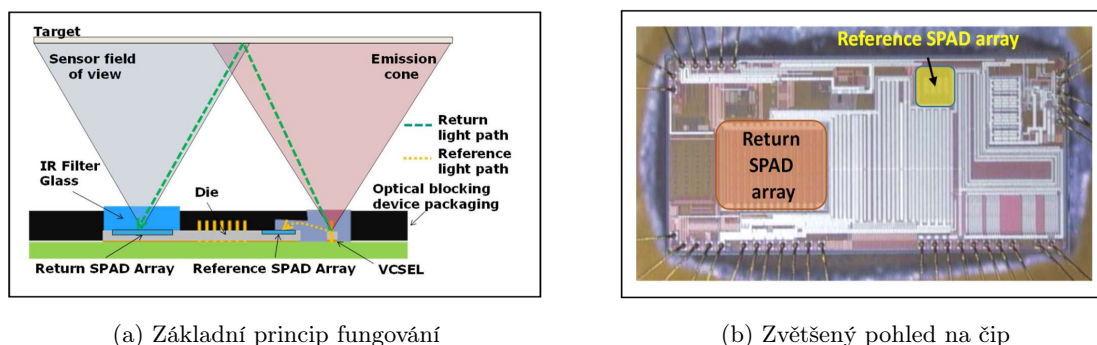
Obrázek 1.1: Shrnutí návrhu senzoru VL53L5 [1]

1.3.2 Stručný popis funkce

Základní princip činnosti tohoto *přímého* Time of Flight senzoru³ je stejný jako v případě jednoduchých bodových senzorů zmíněných v Kap. 1.1. Senzor využívá zdroj VCSEL k ozáření scény takzvaným emisním kuželem. Potřebného tvaru emisního kuželu je dosaženo s pomocí dříve zmíněné difrakční čočky (DOE). Záření emisního kuželu se následně odráží od exponovaných předmětů zpět k senzoru a přes filtr (pásmová propust' pro záření blízké infra červenému spektru) do snímacího pole SPAD buněk. Měřením času potřebného pro opětovné přijetí signálu lze jednoduše určit vzdálenost k předmětu. Princip funkce je znázorněn na obrázku 1.2a.

²Senzor VL53L7CX s širokým zorným polem, který je předmětem této práce vychází ze senzoru VL53L5[4]

³„Direct ToF“ = Vzdálenost je vypočtena na základě změření doby letu mezi vysláním a přijetím signálu, ne na základě fázového posunu přijímaného signálu. „Direct ToF“ senzory jsou obecně přesnější.



(a) Základní princip fungování

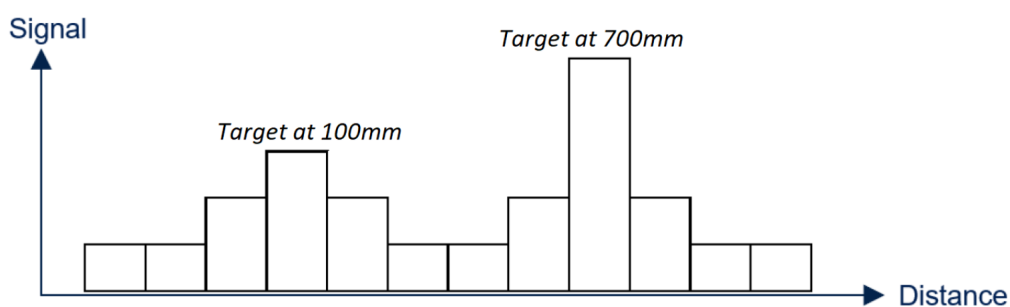
(b) Zvětšený pohled na čip

Obrázek 1.2: Funkce senzoru [1]

Senzor obsahuje dvě pole SPAD buněk (Single Photon Avalanche Diode). Kromě měřicího senzoru („Return SPAD array“), který slouží k měření IR záření odraženého od překážky, sensor obsahuje referenční SPAD snímač („Reference SPAD array“) pro přímé měření záření vysílaného VCSEL emitorem. Tato konfigurace umožňuje automatickou kalibraci a zároveň průběžné kompenzování potenciálních časových zpoždění signálu VCSEL emitoru. Princip je schematicky znázorněn na obrázku 1.2a, konkrétní podoba a umístění snímacích SPAD polí je vyobrazen na obrázku 1.2b.

V případě, že se v jedné zóně senzoru nachází více překážek v odlišných vzdálenostech, měří sensor vzdálenosti k jednotlivým předmětům podle intenzity detekovaného signálu. Výstupní data lze reprezentovat formou histogramu intenzity detekovaného signálu v závislosti na čase potřebném pro detekci signálu, potažmo na vzdálenosti překážky.[5] Ilustrativní příklad dvou detekovaných překážek je znázorněn na obrázku 1.3. V tomto případě se jedná o dvě překážky; první předmět s menší reflektivitou je detekován na vzdálenosti $d = 100$ mm, druhý předmět s větší reflektivitou je detekován na vzdálenosti $d = 700$ mm.

Počet detekovaných překážek slouží jako základní ukazatel platnosti měření. V případě, kdy v dané zóně není detekována žádná překážka, například pokud je intenzita ambientního infračerveného záření prostředí vyšší, než měřicí signál odražený od překážky, je výsledek měření považován za neplatný. Závislost počtu neplatných měření na frekvenci a druhu povrchu bude později zkoumána pro zhodnocení efektivity měření při odlišných podmínkách.



Obrázek 1.3: Příklad histogramu při detekci dvou cílů na odlišných vzdálenostech [5]

1.4 Charakteristické vlastnosti senzoru VL53L7CX

V této bakalářské práci jsou zkoumány aplikace konkrétního senzoru, a to modelu VL537CX výrobce STMicroelectronics. Proto jsou níže uvedeny konkrétní charakteristické vlastnosti toho modelu. Zkoumaný senzor vychází z modelu VL53L5 a je specificky určený pro aplikace vyžadující široké zorné pole. Vhodně upravená čočka DOE umístěná na laserovém zářiči rozšiřuje čtvercové zorné pole senzoru na rozměr $60^\circ \times 60^\circ$, resp. na 90° zorné pole diagonálně.[4]

Vlastnost	Popis
Kryt	Optical LGA16
Rozměry	6,4 x 3,0 x 1,6 mm
Rozsah měření	2 až 350 cm na zónu
Provozní napětí	IOVDD: 1,8 V nebo 3,3 V; AVDD: 2,8 V nebo 3,3 V
Provozní teplota	-30 až 85
Rychlost vzorkování	Až 60 Hz
Infračervený zářič	940 nm
I ² C rozhraní	I ² C: serial bus, adresa 0x52
Režimy měření	Průběžný nebo autonomní

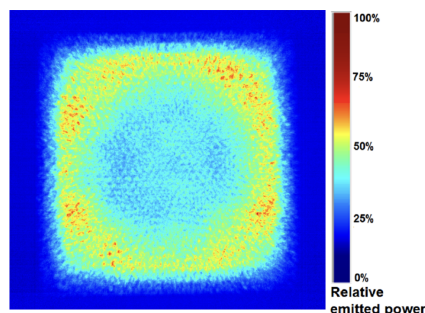
Tabulka 1.1: Vlastnosti senzoru [1]

Napájecí proud senzoru je při aktivním měření přibližně 100 mA, špičkový proud může dosáhnout 150 mA.[6] Senzor může pracovat buď v režimu 4x4 zóny s frekvencí snímání maximálně 60 Hz, nebo v režimu 8x8 zón s frekvencí snímání maximálně 15 Hz. Senzor umožňuje měření hloubky v rozsahu 2 až do 350 cm v každé zóně.[4] Výrobce uvádí, že senzor měří v každé zóně absolutní vzdálenost bez ohledu na barvu nebo odrazivost povrchu měřeného předmětu.[4] Nezávislé zhodnocení vlivu měřeného materiálu bude jením z předmětů zkoumání praktické části této práce.

Pracovní vlnová délka záření VCSEL emitoru je stejně jako v případě všech ostatních ToF senzorů výrobce $\lambda = 940\text{nm}$, tedy záření lidským okem zcela neviditelné. Další důležité vlastnosti senzoru VL53L7CX jsou uvedeny v tabulce 1.1.

Pole ozařování senzoru FoI (z anglického Field of Illumination) přirozeně jeví známky průchodu optickou čočkou DOE a intenzita ozařování není rovnoměrná ve všech bodech pole. Relativní vysílaný výkon P_r závisí na úhlu FoI a při požadované hodnotě $P_r = 75\%$ je pole ozařování senzoru $73,8^\circ \times 73,8^\circ$.

Senzor je dle tvrzení výrobce vhodný pro aplikace vyžadující široké zorné pole, jako je oblast robotiky, jmenovitě SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), nebo aplikace pro ovládání chytrých multimediálních zařízení (ovládání gesty), případně jako nízko energetická detekce přítomnosti uživatele v aplikacích pro chytrou domácnost.



Obrázek 1.4: Pole ozařování [1]

1.4.1 Přesnost senzoru a materiálová omezení uváděná výrobcem

Senzor umožňuje měření od minimální vzdálenosti $d = 20$ mm. Pod touto minimální vzdáleností se vysílací a snímací kužel nepřekrývají dostatečně.[4] Od této hranice výrobce udává přesnost senzoru v závislosti na měřené vzdálenosti jako absolutní chybu E v mm v rozsahu měřených hodnot $d = 2$ mm až $d = 200$ mm a jako relativní chybu ϵ v % v rozsahu měřených hodnot $d = 200$ mm až $d = 4$ m. Přesnost měření pro tato rozmezí vzdáleností jsou uvedena v tabulce 1.5. Konkrétní závislost zvětšování chyby s rostoucí měřenou vzdáleností výrobce v dostupných zdrojích neuvádí.

Kromě měřené vzdálenosti mají na přesnost různě zásadní vliv ještě odrazivost (barva a textura) materiálu a okolní osvětlení.⁴ Menší množství záření odraženého od málo odrazivých materiálů tedy přirozeně zhoršuje výsledky měření. Podle dat výrobce však typicky nezhoršuje přesnost měření víc než o 50% ku přesnosti v případě bílé barvy.[4]

Oproti tomu vliv okolního osvětlení je zásadní a měření za denního světla s hodnotou intenzity osvětlení $E = 5$ klux zhoršuje přesnost měření relativně k měření ve tmě (při $E = 0$ lux) i víc než o 100 %. Měření bylo dle tvrzení výrobce provedeno za podmínek definovaných v [4]. Výrobce v katalogovém listu nehodnotí proveditelnost měření u materiálů s extrémně malou ($R < 17\%$) nebo extrémně velkou ($R > 88\%$) odrazivostí. Lze tedy předpokládat, že tyto materiály (velmi lesklé povrchy, velmi tmavé povrchy, potažmo průhledné povrchy) nelze senzorem spolehlivě měřit. Jedním z cílů této práce bude nezávisle zhodnotit údaje uváděné výrobcem a mimo jiné stanovit konkrétní materiálová omezení zkoumaného senzoru.

Mode	Distance	Target reflectance	Dark (0 klux)	Ambient light (5 klux)
4x4 (30 Hz)	20-200 mm	White target (88%)	±9 mm	±7 mm
		Lite gray target (54%)	±9 mm	±7 mm
		Gray target (17%)	±10 mm	±11 mm
	200-4000 mm	White target (88%)	±3%	±7%
		Lite gray target (54%)	±4%	±9%
		Gray target (17%)	±4%	±10%
8x8 (15 Hz)	20-200 mm	White target (88%)	±11 mm	±12 mm
		Lite gray target (54%)	±12 mm	±14 mm
		Gray target (17%)	±12 mm	±20 mm
	200-4000 mm	White target (88%)	±5%	±9%
		Lite gray target (54%)	±6%	±12%
		Gray target (17%)	±6%	±14%

Obrázek 1.5: Přesnost měření pro různé barvy povrchu [4]

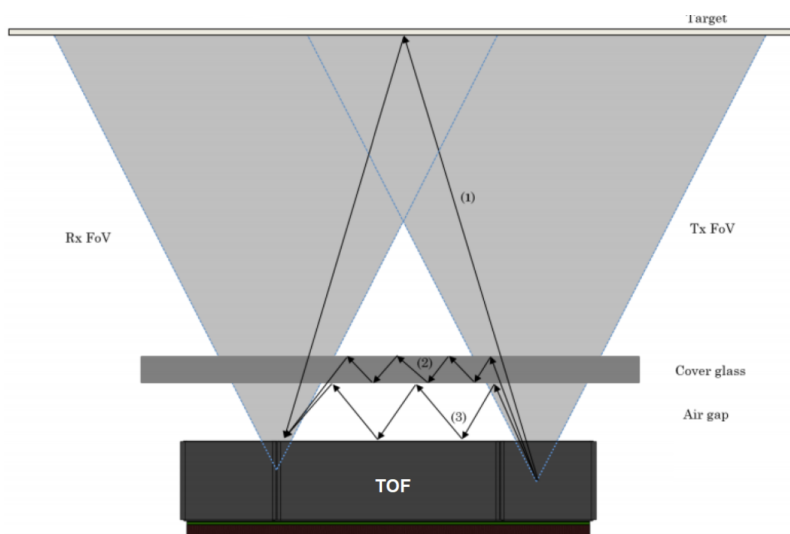
1.4.2 Přeslech při použití krycího sklíčka

Pro ochranu senzoru před mechanickým poškozením nebo pro dodatečné filtrování přijímaného záření, potažmo i pro estetické účely je možné před senzor umístit krycí sklíčko, které slouží jako clona. Krycí sklíčko může být buď jednodílné a tedy překrývat zářič i přijímač senzoru současně, případně může být rozdělené na dvě oddělené clony. V závislosti na umístění krycího sklíčka vznikne mezi senzorem a sklíčkem různě velká *vzduchová mezera*, jejíž rozměr je typicky udáván v mm.

⁴Výrobce ale ve stejném katalogovém listu také uvádí, že senzor měří v každé zóně absolutní vzdálenost bez ohledu na barvu nebo odrazivost povrchu měřeného předmětu.[4]

V důsledku překrytí senzoru sklíčkem dochází k parazitnímu jevu, zvanému *přeslech* (angl. „crosstalk“).[7] Přeslech je definován jako záření vycházející z emitoru, které není odraženo od měřeného předmětu, a tedy nenese žádnou užitečnou informaci a je detekováno přijímacím polem SPAD buněk. Toto záření se šíří po nepřímé, a tedy nežádoucí cestě od zářiče do přijímače a pro efektivní a přesné měření je přirozeně třeba vliv přeslechu minimalizovat.

Optická cesta, kterou se přeslechový signál šíří je výrazně kratší, než optická cesta měřicího signálu a doba přijetí přeslechového pulzu se tedy v extrémním případě intenzivního přeslechu blíží $t_{\text{xtalk}} \approx 0$ s, a tedy vzdálenost měřená senzorem s nasazeným krycím sklíčkem před kalibrační překážkou. Pokud je vliv přeslechu méně intenzivní, tedy použité krycí sklíčko má vhodné parametry, dochází pouze ke zkreslení měřených vzdáleností. Větší intenzita přijímaného signálu v tomto případě způsobí změření menší vzdálenosti, než na které se předměty skutečně nachází.[7]



Obrázek 1.6: Přeslech při vložení krycího sklíčka [7]

Obrázek 1.6 ukazuje senzor s vyznačeným kuželem ozařování scény polem VCSEL diod (Rx FoV) a kužel zorného pole senzoru snímané polem SPAD detektorů (Tx FoV). Záření VCSEL diod se typicky šíří cestami (1, 2, 3) schematicky znázorněnými na obrázku. Jedná se o následující svazky:

1. Měřicí signál odražený od objektu
2. Přeslechový signál šířící se uvnitř krycího sklíčka
3. Přeslechový signál šířící se vzduchovou mezerou

Pro minimalizaci přeslechového signálu šířícího se směry 2 a 3 je vhodné navrhnout krycí sklíčko podle následujících zásad. Co se týče *mechanických parametrů*, míra přeslechu je významně ovlivněna jak parametry samotného krycího sklíčka, tak i jeho umístěním. Mezi hlavní parametry ovlivňující přeslech patří použitý materiál sklíčka, tloušťka použitého materiálu, povrchová úprava sklíčka a velikost vzduchové mezery.

Přeslech je nepřímo úměrný velikosti vzduchové mezery. Výrobce doporučuje maximální přípustnou úroveň přeslechu pro senzor VL53L7CX 100kcps/SPAD⁵ a experimentálně určená maximální velikost vzduchové mezery bez použití dodatečného těsnění je $d_{\text{airgap}} < 0,7$ mm. Pokud není možné požadavek na délku vzduchové mezery dodržet, je doporučeno použít těsnění, aby nedocházelo k šíření záření z okolí mezi krycím sklíčkem a senzorem, tedy paprsku č. 3 na obrázku 1.6. Vhodným materiálem pro použité těsnění je například neoprén.[8] Umístění těsnění je schematicky znázorněno na obrázku 1.7. (viz „gasket“)

Tloušťka skla je naopak přímo úměrná míře přeslechu a je proto vhodné volit krycí sklíčko s nejmenší možnou tloušťkou.[7] Souhrně však platí, že nejvyšší doporučená tloušťka vzduchové mezery a krycího sklíčka $d_{\text{airgap}} + d_{\text{glass}} < 1,5$ mm.

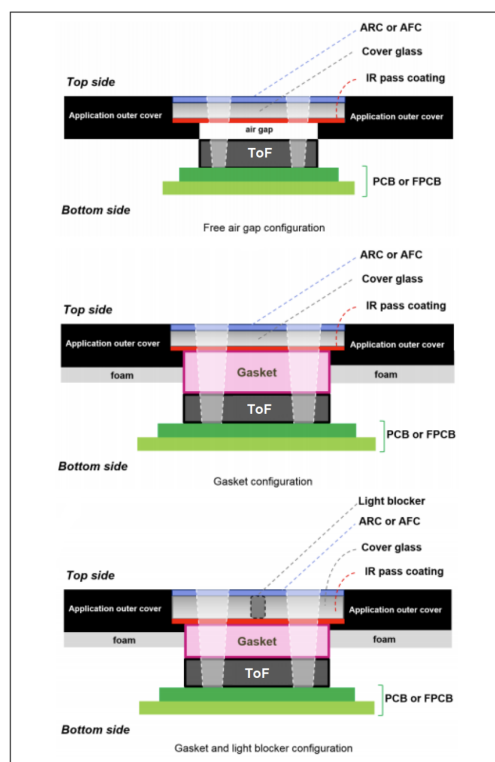
Pro úplnou minimalizaci přeslechového signálu šířícího se uvnitř krycího sklíčka (paprsek č. 2 na obrázku 1.6) je vhodné použít sklo s blokátorem světla, oddělujícím vysílací a snímací oblast, jak je znázorněno na obrázku 1.7. Případně je vhodné použít dvou zcela oddělených oválných skel, umístěných do optických středů zářiče a přijímače. Rozměry oválných skel pak musí být dostatečné, aby neomezovaly emitorový a snímací kužel. Dalším důležitým parametrem umístění sklíčka je jeho sklon. Krycí sklo je oproti rovině senzoru nemělo být skloněno o více než 10° .

Co se týče *optických parametrů*, mezi vhodné materiály pro krycí clonu doporučené výrobcem patří sklo, safírové sklo, polymethylmetakrylát a polykarbonát. Zvolený materiál by neměl obsahovat defekty v krystalické struktuře nebo v horní části povrchové vrstvy, nečistoty nebo dislokace uvnitř struktury, ani jiné šmouhy nebo povrchové artefakty z důvodu minimalizace rozptylu světla.

Právě z tohoto důvodu by krycí sklo by mělo být z horní strany opatřeno povrchovou úpravou zvyšující odolnost proti otiskům prstů, AFC, a také antireflexní povrchovou úpravou, ARC. (z anglického Anti-Fingerprint Coating, Antireflective Coating)

Sklíčko by pak mělo být ze spodní strany pokryto vrstvou, jež slouží jako pásmová propust v oblasti infračerveného záření vyzářovaného modulem VCSEL a přijímaného polem SPAD buněk, resp. záření s vlnovou délkou $\lambda = 940$ nm a mělo by pro tyto vlnové délky dosahovat optické propustnosti vyšší než 87 %. Případná nižší optická propustnost clony snižuje maximální možnou měřitelnou vzdálenost.

Maximální doporučená hodnota zákalu (transmittance haze) v oblasti viditelného spektra je $H_{\text{visible}} < 2\%$. V oblasti infračerveného záření pak $H_{\text{IR}} < 1\%$



Obrázek 1.7: Minimalizace přeslechu [7]

⁵kilo count per SPAD, počet fotonů detekovaných jednou buňkou pole SPAD (Single Photon Avalanche Diode)

1.5 Model kamery a kalibrace

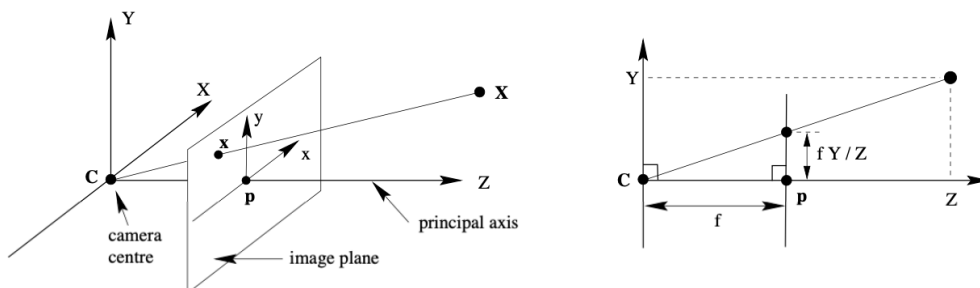
Jedním z cílů práce je zkoumání metod fúze hloubkových dat ToF senzoru s obrazovými daty RGB kamery a zásadním krokem při exaktní práci s kamerou, například v oblasti 3D počítačového vidění je právě matematický popis modelu kamery a proces kalibrace kamery. Kalibrace kamery spočívá primárně v určení (odhadu) *intrinzičických* a *extrinzičických* parametrů a odhadu zkreslení kamery. Znalost těchto parametrů nám pak umožňuje odstranit nežádoucí zkreslení obrazu a umožňuje získání údajů o poloze nebo vzájemné vzdálenosti předmětů na snímku. Hlavní myšlenkou kalibrace kamery je tedy nalezení vztahu mezi 3D body v prostoru a 2D body v rovině snímku.

Popis modelu kamery se stejně jako například problematika počítačové grafiky opírá primárně o operace rotace, škálování, ale také *translace*. Nepracujeme tedy obecně s lineárními, ale afinními zobrazováními. Abychom pro danou problematiku mohli použít elegantní maticový popis, který zároveň snižuje výpočetní náročnost (typické použití právě v počítačové grafice), je vhodné použít takzvané homogenní souřadnice, které rozšiřují akční rádius maticových transformací.

Následující výpočty právě kvůli požadavku elegantně popsat translaci ve vektorovém prostoru \mathbb{R}^3 částečně provádíme v projektivním prostoru \mathbb{P}^3 , který obdržíme projektivizací \mathbb{R}^4 . Kromě tří standardních souřadnic x, y, z prostoru \mathbb{R}^3 pracujeme ještě se čtvrtou souřadnicí, obvykle značenou w , a používáme homogenní souřadnice $(x : y : z : w)$. [9][10]

Zjednodušeně řečeno, v pohledu projektivní geometrie pracujeme s projektivními body, reprezentovanými atomickými přímkami, které udávají „směr“ projekce. Vektory tedy chápeme jako třídy ekvivalence. Jinými slovy, všechny vektory, které se na sebe dají převést skalárním vynásobením, považujeme za „nerozlišitelné“. ($\mathbf{u} \sim \mathbf{v} \iff \exists a \in \mathbb{R}, a \neq 0$, tak, že $\mathbf{u} = a\mathbf{v}$). Proto také nezáleží na normě vektoru a vektory bývají normovány k čtvrté souřadnici w . [11]

Nejjednodušším a nejčastěji používaným matematickým modelem pro popis kamery je model takzvané „dírkové komory“ (angl. „pinhole camera model“)[12], tedy model vycházející z funkčního principu camery obscury. Tento model uvažuje centrální projekci bodů prostoru na obrazovou rovinu (2D snímek snímáný kamerou). Souřadnice v prostoru (X, Y, Z) popisujeme vzhledem k souřadné soustavě kamery s počátkem ve středu promítání, tedy v optickém středu kamery C . Uvažujeme virtuální rovinu $Z = f$, kterou nazveme obrazovou rovinou a která se nachází v ohniskové vzdálenosti kamery f . Aby obraz nebyl převrácený, umísťujeme obrazovou rovinu mezi optický střed a zobrazované body prostoru.



Obrázek 1.8: Dírkový model kamery [12]

1.5.1 Intrinzické parametry

Vycházíme-li z výše zmíněného modelu dírkové komory, pak se obecný bod v prostoru $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^\top$ zobrazí na bod \mathbf{x} na obrazové rovině jako průsečík obrazové roviny $Z = f$ a přímky $C\mathbf{X}$, jak je znázorněno na obrázku 1.8. (Neboli z pohledu projektivní geometrie je atomická přímka se směrovým vektorem \mathbf{X} projektivním bodem.) Lehce nahlédneme, že souřadnice bodu \mathbf{x} jsou $(fX/Z, fY/Z, f)^\top$. Pokud vynecháme poslední zřejmou souřadnici, získáme pro $\mathbf{X} \mapsto \mathbf{x}$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX/Z \\ fY/Z \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

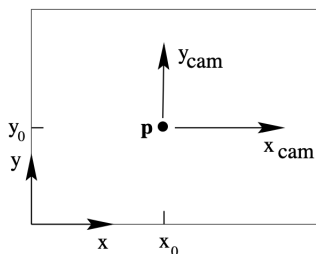
tedy zobrazení $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$, neboli z prostorových souřadnic do souřadnic obrazové roviny. Pokud body v prostoru i body v obrazové rovině zapíšeme v homogenních souřadnicích, pak zobrazení (1.4) lze napsat jako

$$\underbrace{\begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

kde bod v prostoru \mathbf{X} je popsán homogenním čtyř-složkovým vektorem a bod v obrazové rovině \mathbf{x} je popsán homogenním tří-složkovým vektorem. Homogenní matici 3×4 nezmene *maticí projekce kamery* A . Rovnici (1.5) můžeme stručně zapsat jako

$$\mathbf{x} = A\mathbf{X}, \quad (1.6)$$

kde A je maticí kamery pro centrální projekci za předpokladu použití dírkového modelu kamery.



Obrázek 1.9: Posun souřadné soustavy obrazové roviny [12]

Výpočtem (1.6) získáváme bod \mathbf{x} v metrických jednotkách a v souřadné soustavě obrazové roviny (x, y) , s počátkem ve středu obrazu. Ve skutečnosti jsou však body snímku typicky popsány počtem pixelů od jednoho z rohů snímku a je tedy žádoucí popsat zobrazení

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX/Z + p_x \\ fY/Z + p_y \end{pmatrix}, \quad (1.7)$$

kde bod $\mathbf{p} = (p_x, p_y)^\top$ je střed obrazu. Pokud přejdeme zpět do homogenních souřadnic, tuto

translaci můžeme elegantně zapsat jako

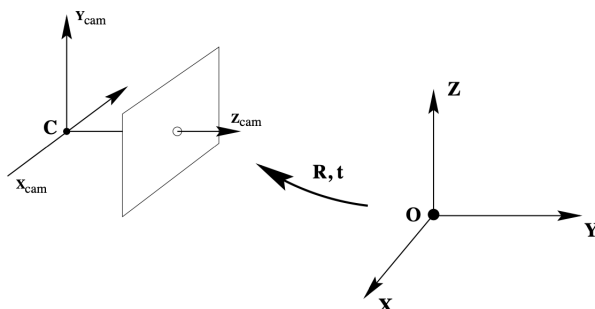
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1.8)$$

Z rovnice (1.8) vyplývá takzvaná *kalibrační matice kamery* (angl. „camera matrix“)[12] \mathbf{K} , která popisuje *intrinzičné parametry*, tedy optické vlastnosti samotné kamery. Intrinzičnými parametry jsou jmenovitě ohnisková vzdálenost kamery f a souřadnice středu obrazu v souřadné soustavě snímku $\mathbf{p} = (p_x, p_y)^\top$. Jak je patrné z (1.8), *matice kamery* \mathbf{K} udává zobrazení bodu v prostoru (jehož souřadnice jsou vyjádřeny vzhledem k souřadné soustavě kamery) na konkrétní bod na snímku kamery. *Matice kamery* tedy můžeme zapsat jako

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.9)$$

1.5.2 Extrinzičné parametry

V předešlé sekci jsme ale problematiku zjednodušili tím, že k popisu bodů v prostoru $\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\text{cam}} = (X, Y, Z, 1)^\top$ jsme použili souřadnice vzhledem k souřadné soustavě kamery s počátkem ve středu promítání, tedy v optickém středu kamery \mathbf{C} . Popisovaná kamera se ale v obecném případě nemusí nacházet v počátku referenční souřadné soustavy a nemusí nutně být svou optickou osou orientována ve směru souřadné osy Z , jak tomu bylo v předchozí sekci.



Obrázek 1.10: Vztah souřadné soustavy kamery a světové souřadné soustavy [12]

Vnější referenční soustavu nazvěme v tomto případě *světovou souřadnou soustavou* (angl. „world coordinate frame“). Jak je graficky znázorněno na obrázku 1.10, tyto dvě soustavy jsou vzájemně posunuty o translaci danou vektorem \mathbf{t} a rotaci danou maticí rotace \mathbf{R} .

Nechť nehomogenní vektor $\tilde{\mathbf{X}}_{\mathbf{w}}$ reprezentuje bod v prostoru vzhledem ke světové souřadné soustavě a $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{cam}}$ reprezentuje ten samý bod v souřadné soustavě kamery, pak mezi nimi platí vztah

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{cam}} = \mathbf{R} (\tilde{\mathbf{X}}_{\mathbf{w}} - \tilde{\mathbf{C}}), \quad (1.10)$$

kde $\tilde{\mathbf{C}}$ reprezentuje polohový vektor počátku souřadné soustavy kamery ve světové souřadné soustavě a \mathbf{R} je matice rotace rozměru 3×3 , reprezentující potočení souřadné soustavy kamery oproti světové souřadné soustavě. Použití homogenních souřadnic nám i v tomto případě

umožňuje elegantně přepsat vztah (1.10) včetně translace jako

$$\mathbf{X}_{\text{cam}} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\tilde{\mathbf{C}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\tilde{\mathbf{C}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}_{\text{w}}. \quad (1.11)$$

Pro přirozenější zápis pak můžeme označit $\mathbf{t} = -\mathbf{R}\tilde{\mathbf{C}}$ a místo explicitního vyjádření středu kamery ve světové souřadné soustavě psát

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.12)$$

Maticе rotace \mathbf{R} a vektor translace \mathbf{t} popisují vnější, neboli *extrinzičké* parametry kamery[12] a společně s *intrinzičnými* parametry f, p_x, p_y matice \mathbf{K} popsanými v sekci 1.5.1 umožňují úplný popis transformace bodů ve 3D prostoru popsaných vzhledem ke *světové souřadné soustavě* na pixelové souřadnice snímku zachyceného kamerou. Kompletní vztah projekce lze vyjádřit jako

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\mathbf{K}(\mathbf{R} | \mathbf{t})}_{\mathbf{P}} \begin{pmatrix} X_{\text{w}} \\ Y_{\text{w}} \\ Z_{\text{w}} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1.13)$$

kde $\mathbf{x} = (x, y, 1)^\top$ je bod v souřadnicích snímku a $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{w}} = (X_{\text{w}}, Y_{\text{w}}, Z_{\text{w}}, 1)^\top$ je bod v prostoru popsaný vzhledem ke světové souřadné soustavě. Výslednou matici \mathbf{P} nazýváme *maticí projekce kamery*. [12]

Extrinzičké parametry lze určit na základě korespondencí známých bodů v 3D scéně a jejich známých 2D projekcí na snímku. Jedná se o matematický problém známý jako Perspective-n-Point Problem (PnP), který je v praxi řešen pomocí jednoho ze známých algoritmů. Například funkce `solvePnP()`⁶ knihovny OpenCV zahrnuje různé implementace řešení tohoto problému. [13]

1.5.3 Zkreslení kamery

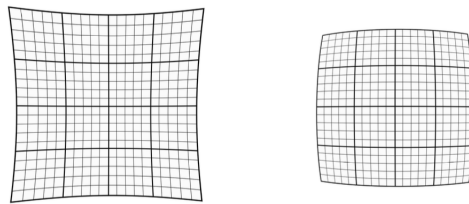
Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly 1.5, doposud popis vlastností kamery vychází ze základního lineárního dírkového modelu kamery, který předpokládá centrální projekci bodů prostoru na obrazovou rovinu. V tomto modelu jsou bod prostoru, bod na snímku a optický střed kamery kolineární. To však neplatí pro skutečné kamery s čočkou. Největší nepřesností, kterou čočka kamery do ideálního modelu vnáší je právě radiální zkreslení, tedy nelineární projekce znázorněná na obrázku 1.11. Míra zkreslení závisí na ohniskové vzdálenosti a kvalitě čočky. Obecně může dojít k jednomu ze dvou zkreslení, a to k projekci vypouklého, nebo vydutého obrazu.

Jak je popsáno v [15], radiální zkreslení je modelováno jako posun bodů obrazu směrem od středu, případně do středu snímku o hodnotu přímo úměrnou jejich radiální vzdálenosti. Radiální zkreslení je v základní formě vyjádřeno faktorem k jako

$$k = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4, \quad (1.14)$$

kde r je vzdálenost od středu snímku, ($r^2 = x^2 + y^2$) a konstanty k_1, k_2 jsou *parametry radiálního zkreslení*. Existuje mnoho způsobů jak určit parametry čočky k_1, k_2 . Základním způsobem je

⁶Více viz dokumentace knihovny **OpenCV** [↗](#)



Obrázek 1.11: Radiální zkreslení obrazu kamery [14]

odhad těchto parametrů s použitím snímku scény s mnoha rovnými čarami, resp. kalibračního obrazce. *Parametry radiálního zkreslení* jsou pak upravovány dokud nedojde k narovnání všech čar zachycených na snímku. Na této myšlence jsou založeny například metody popsané pramenech [16] a [17].

1.5.4 Projektivní zobrazení a matice homografie

Matice homografie je klíčovým nástrojem v oblastech jako jsou počítačové vidění a grafika, neboť umožňuje provádět složité transformace, jako jsou rotace, translace, změna měřítka a perspektivní zkreslení, pouze pomocí jednoduchého maticového násobení. Zvláště užitečná je při aplikacích, jako jsou rozpoznávání objektů, skládání nasnímaných obrazových dat do „panorama snímků“, nebo aplikace v oblasti virtuální a rozšířené reality, kde je často potřeba promítnout obraz z jedné roviny do jiné, aby odpovídal nové perspektivě.

Matice homografie popisuje projektivní zobrazení mezi dvěma rovinami v prostoru. Zjednodušeně řečeno, mějme bod $\mathbf{x}_1 = (x, y)$ v jedné rovině a bod $\mathbf{x}_2 = (u, v)$ v druhé rovině, pak zobrazení mezi nimi je dáno jako

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}}_{\mathbf{H}} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1.15)$$

kde \mathbf{H} je *matice homografie* rozměru 3x3. Pro praktické použití změny perspektivy je nutné nejprve získat matici homografie, což lze provést právě určením korespondencí mezi body na dvou různých snímcích nebo mezi snímkem a referenční rovinou. Tato korespondence se obvykle získává detekcí a párováním klíčových bodů mezi zobrazeními. Jakmile jsou body identifikovány a spárovány, může být matice homografie spočítána řešením soustavy lineárních rovnic. Dále je možné minimalizovat chybu mezi skutečnou polohou bodů a polohou bodů transformovaných podle předpokládané matice homografie. Tento proces je často prováděn pomocí algoritmů jako je Random Sample Consensus (RANSAC)⁷.

Matici homografie lze v praxi efektivně určit například pomocí funkce knihovny OpenCV, `getPerspectiveTransform()`⁸. Tato funkce očekává dvě pole bodů (většinou čtyři páry bodů pro jednoduchost), které představují vrcholy referenčního předmětu v jednom obraze a odpovídající vrcholy v druhém obraze. Výsledná matice homografie pak umožňuje jakékoli další body z prvního obrazu promítnout do druhého obrazu s vysokou přesností.

⁷Iterační metoda odhadu parametrů matematického modelu ze souboru pozorovaných dat, který obsahuje odlehle hodnoty.[18]

⁸Více viz dokumentace knihovny [OpenCV](#) ↗

1.5.5 Kalibrace kamery

V praxi lze proces kalibrace kamery přibližně rozdělit do tří skupin podle náročnosti provedení a přesnosti obdržných výsledků. Nejpřesnější a nejnáročnější je klasický fotogrametrický kalibrační proces, který vyžaduje použití 3D referenčního kalibračního předmětu. Ten typicky tvoří dvě, nebo tři ortogonální plochy se šachovnicovým vzorem. Tato metoda poskytuje velmi přesné výsledky[11], ale vyžaduje drahé kalibrační vybavení, laboratorní podmínky a propracovaný postup.

Za opačný extrém lze považovat velmi flexibilní metody sebe-kalibrace (angl. „self-calibration“), které umožňují rychlou kalibraci zkuslení kamery i mimo laboratorní podmínky. Existuje mnoho přístupů, které obecně vychází z předpokladu, že *intrinzičné* a *extrinzičné* parametry kamery je možné stanovit i z pouhé znalosti translačního pohybu kamery ve stacionární scéně, tedy například z několika snímků scény.[19] Výsledky obdržené touto metodou kalibrace ale nejsou zcela uspokojivé a metoda má výrazná omezení.[20]

Kompromisem mezi jednoduchostí provedení kalibrace (nároky na kalibrační vybavení a časová náročnost kalibrace) a dosaženou přesností je kalibrace kamery s použitím planárního obrazce. Například [20] popisuje kalibraci zkuslení s použitím několika (dvou nebo více) snímků planárního obrazce v různých polohách vůči kameře. Při kalibraci je mezi snímky možné pohybovat buď kamerou, nebo obrazcem a není přitom třeba znát dráhu pohybu kamery. Tato metoda kalibrace je také implementována ve funkci `calibrateCamera()`⁹ knihovny pro zpracování obrazu OpenCV. Ze stejné práce také vychází „Camera Calibration Toolbox for Matlab“.[21]

⁹Více viz dokumentace knihovny **OpenCV** [↗](#).

Použití senzoru VL53L7CX v reálných podmínkách

Na následujících řádcích budou popsány jednotlivé dílčí kroky, potřebné k úspěšnému provedení měření se senzorem VL53L7CX, včetně případné kalibrace přeslechu. Budou také zmíněny a stručně popsány hlavní nastavitelné parametry senzoru. Jsou stanoveny základní materiálová omezení použití senzoru a vliv frekvence opakování měření na chybovost výsledků. V závěru této kapitoly jsou zhodnoceny možnosti použití neideálních krycích sklíček a možnosti provedení kalibrace v neideálních podmínkách.

2.1 Obecný postup měření senzorem a kalibrace přeslechu

Prvním krokem při použití senzoru VL53L7CX je provedení *inicializace* senzoru, tedy samotné přivedení napájecího napětí k senzoru a inicializace I²C rozhraní pro komunikaci senzoru s deskou STM Nucleo. Následuje volání inicializační funkce, která do modulu překopíruje firmware přes rozhraní I²C a spustí zaváděcí rutinu.[5] Po provedení *inicializace* je v případě použití krycího sklíčka nutné provést *kalibraci* přeslechu senzoru (Crosstalk calibration) pro kompenzaci nežádoucího přeslechu, detailněji popsaného v části 1.4.2.

Kalibrace přeslechu

Cílem kalibrace senzoru je minimalizace, nebo úplné odstranění parazitního jevu přeslechu. Samotný proces kalibrace spočívá v provedení referenčního měření senzorem při známých parametrech. Jak bylo popsáno v části 1.4.2, přeslech při měření senzorem s nasazeným krycím sklíčkem způsobí vysokou intenzitu přijímaného měřicího signálu s minimálním časovým zpožděním a tedy vyvolává zkreslení měřené vzdálenosti. V závislosti na míře přeslechu dochází buď ke zkreslení měřených hodnot na větších vzdálenostech (změření menší vzdálenosti vzdálených předmětů), případně pokud je přeslech intenzivní (například při nedodržení doporučených parametrů pro krycí sklíčko), detekuje senzor trvale přítomnost neexistující překážky na vzdálenosti blízké 0 mm.

Samotný proces kalibrace je založen na umístění senzoru s nasazeným krycím sklíčkem do známé vzdálenosti od rovinné plochy se známou reflektivitou. Za takto definovaných podmínek je provedeno jedno, nebo více referenčních měření. Kalibrace senzoru je prováděna s využitím funkce `vl53l7cx_calibrate_xtalk()`¹, která je součástí rozšíření základních ovladačů senzoru,

¹Více viz dokumentace [ULD](#) ↗

„vl53l7cx_plugin_xtalk“, poskytovaného výrobcem. Parametry kalibrace (reflektivita povrchu a vzdálenost senzoru od plochy) jsou vstupními hodnotami funkce poskytované výrobcem pro provedení kalibrace. Pro přesnou kalibraci je tedy nutné znát odrazivost kalibračního povrchu umístěného ve fixní vzdálenosti d , nicméně hodnotu odrazivosti povrchu je možné určit pomocí samotného senzoru před nasazením krycího sklíčka (jedná se jednu z výstupních hodnot senzoru). Při kalibraci musí také být vzdálenost senzoru od kalibračního povrchu $d > 600$ mm.

Výrobce doporučuje provádět kalibraci s kalibračním povrchem s odrazivostí 3 % (tedy s černým povrchem) umístěným ve vzdálenosti $d = 600$ mm od senzoru. Kalibrační plocha musí obsáhnout celé zorné pole senzoru. Vzhledem k zornému poli senzoru ($60^\circ \times 60^\circ$) je tedy pro provedení kalibrace při optimální kalibrační vzdálenosti vyžadována čtvercová plocha s černým povrchem s reflektivitou $R = 3\%$ o úhlopříčce $u = 2d = 120$ cm, resp. délce strany $a = 85$ cm.

Při kalibraci je možné volit počet zaznamenaných vzorků, ze kterých budou kalibrační data určena. Vyšší počet vzorků zpřesňuje kalibraci, ale prodlužuje čas nutný pro provedení kalibrace. Délka trvání kalibrace při zaznamenání jednoho vzorku je $t_s \approx 1$ s, při 16 vzorcích $t_s \approx 8.5$ s.[5]

Setting	Min	Proposed by ST	Max
Distance [mm]	600	600	3000
Number of samples	1	4	16
Reflectance [%]	1	3	99

Obrázek 2.1: Možnosti kalibrace přeslechu [5]

Následujícím krokem po provedení *inicializace* a *kalibrace* je volitelná změna nastavení parametrů senzoru, tedy mimo jiné nastavení *rozlišení*, *frekvence měření*, *režimu měření*, *doby integrace* a *napájecího režimu*.

Rozlišení

Senzor může pracovat v režimu vyššího, či nižšího rozlišení, 4x4, resp. 8x8 zón. Zvolená možnost ale ovlivní maximální frekvenci měření, jak je uvedeno níže.

Frekvence měření

V závislosti na rozlišení lze nastavit požadovanou frekvenci měření senzoru. V případě provozu v režimu 4x4 zóny je možné zvolit frekvenci v rozmezí 1 - 60 Hz. V případě použití rozlišení 8x8 zón je nejvyšší možná frekvence měření snížena na $f = 15$ Hz. Nastavení frekvence měření je proto nutné provést až po nastavení rozlišení.

Režim měření

Uživatel má možnost zvolit mezi měřením vzdálenosti s vysokým výkonem (režim *Continuous*) nebo měřením s nízkou spotřebou energie (režim *Autonomous*). V obou režimech modul nepřetržitě snímá snímky s frekvencí měření definovanou uživatelem.

V režimu *Continuous* je VCSEL zapnutý po celou dobu měření, takže tento režim dosahuje větší maximální měřitelné vzdálenosti a nabízí lepší odolnost proti šumu prostředí. Tento režim je proto vhodný pro situace vyžadující krátkodobá a přesná měření.

V režimu *Autonomous* je naopak VCSEL zapnutý jen po „dobu integrace“ (angl. *Integration time*) definovanou uživatelem a je tedy výrazně snížena spotřeba energie. Výhody jsou zřetelnější při snížené frekvenci rozsahu.[5] Tento režim je vhodný pro aplikace s nízkou spotřebou energie.

Doba integrace

V případě použití režimu *Autonomous* umožňuje uživateli nastavit dobu, po kterou je aktivní VCSEL při měření senzoru. V případě měření v režimu 4x4 obsahuje měřicí interval jednu dobu integrace, v případě režimu 8x8 obsahuje čtyři postupné doby integrace, jak je patrné z diagramu na obrázku 2.2.

Figure 8. Integration time for 4x4 autonomous

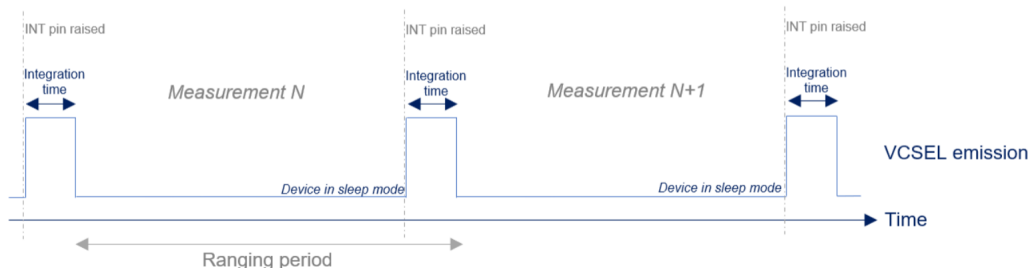
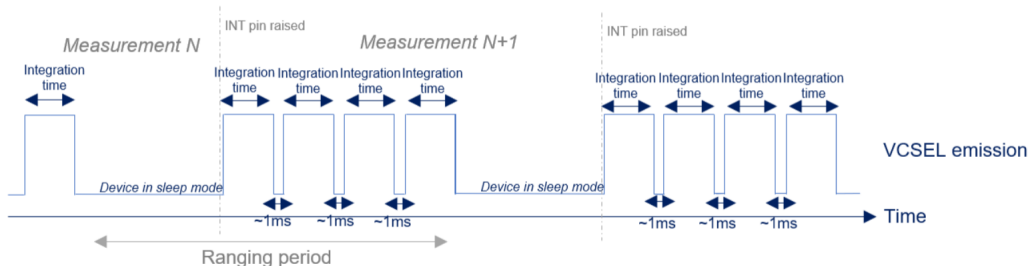


Figure 9. Integration time for 8x8 autonomous



Obrázek 2.2: Doba integrace [5]

Napájecí režim

Senzor umožňuje provoz v režimu *Wake-up*, kdy jej lze aktivně používat, nebo provoz v režimu *Sleep* pro snížení spotřeby energie. V režimu *Sleep* zařízení nelze používat, ale uchovává si firm-ware a konfiguraci.

2.2 Omezení použití senzoru

Cílem této části práce je otestovat omezení aplikace senzoru VL53L7CX v reálných podmínkách. Jmenovitě bude zhodnocena proveditelnost měření v případě neoptimálních povrchových vlastností měřeného předmětu a dále bude zkoumán vliv rozlišení senzoru a vliv frekvence měření na přesnost měření senzorem.

2.2.1 Materiálová omezení určená měřením

Ačkoliv výrobce senzoru neudává specifikace pro měření vzdálenosti předmětů s povrchem s extrémně velkou ($R > 88\%$), případně extrémně malou ($R < 17\%$) reflektivitou a nezmiňuje ani

vliv konkrétního typu povrchu. Ze závěrů uvedených v [22] vyplývá, že ToF senzorem pracujícím na bázi IR záření vzhledem k funkčnímu principu senzoru obecně není možné spolehlivě měřit vzdálenost předmětů s nelambertovským povrchem, případně předmětů s příliš malou či velkou reflektivitou.

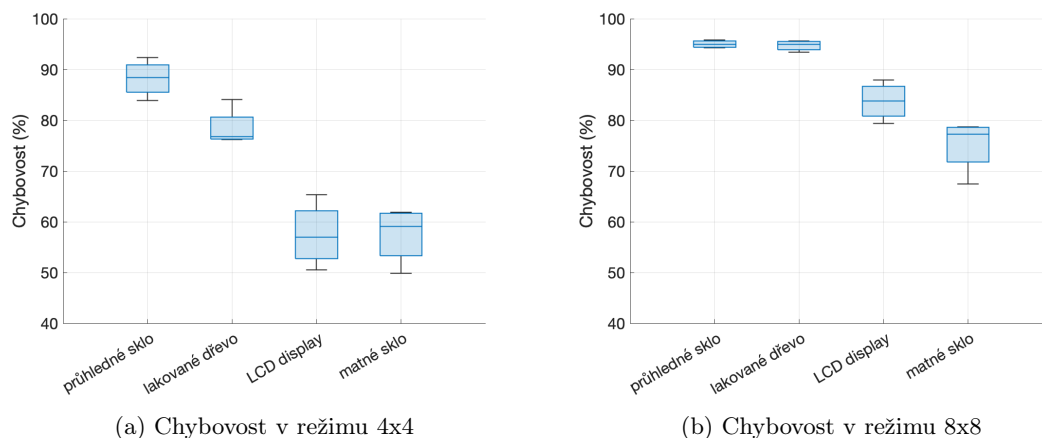
V případě materiálů s příliš malou reflektivitou dochází k pohlcení většiny dopadajícího IR záření a množství odraženého záření není dostatečné pro spolehlivé provedení měření. Naopak v případě lesklých, zrcadlicích materiálů s velkou reflektivitou (například velmi lesklé kovy, povrch zrcadla) dojde k zrcadlovému odrazu přílišného množství dopadajícího záření.

Nejprve byla měřena míra chybovosti dat senzoru při měření vzdálenosti různých povrchů s nízkou reflektivitou, a to jmenovitě průhledného skla, matného skla, LCD displeje a černého lakovaného dřeva. Změřené hodnoty² reflektivity jednotlivých měřených materiálů určené senzorem VL53L7CX jsou uvedeny v tabulce 2.1.

materiál	reflektivita (%)
průhledné sklo	0
černé lakované dřevo	4
LCD displej	13
matné sklo	16

Tabulka 2.1: Hodnoty reflektivity některých testovaných materiálů

Chybovost je v tomto případě hodnocena jako počet zón ve kterých nebyla detekována překážka ve smyslu kapitoly 1.3.2 ku celkovému počtu zón v daném režimu (16 zón v režimu 4x4, 64 zón v režimu 8x8). Hodnota chybovosti je určena jako aritmetický průměr ze 20 po sobě jdoucích měření při výchozím nastavení senzoru, tedy $f = 5$ Hz a výkonový režim kontinuálního snímání³. Měření bylo prováděno proti rovnému plochému povrchu daného materiálu ze vzdálenosti 0,5 m, z důvodu neutrálních podmínek nasvícené denním světlem. Graf 2.3 znázorňuje data získaná ze čtyřech měření (každé měření je průměr 20 snímků) a chybovost je vyjádřena v %.



Obrázek 2.3: Chybovost pro různé materiály

²Hodnota reflektivity je stanovena jako aritmetický průměr hodnot reflektivity změřených v jednotlivých zónách senzoru. Výsledek je zaokrouhlen na celé číslo.

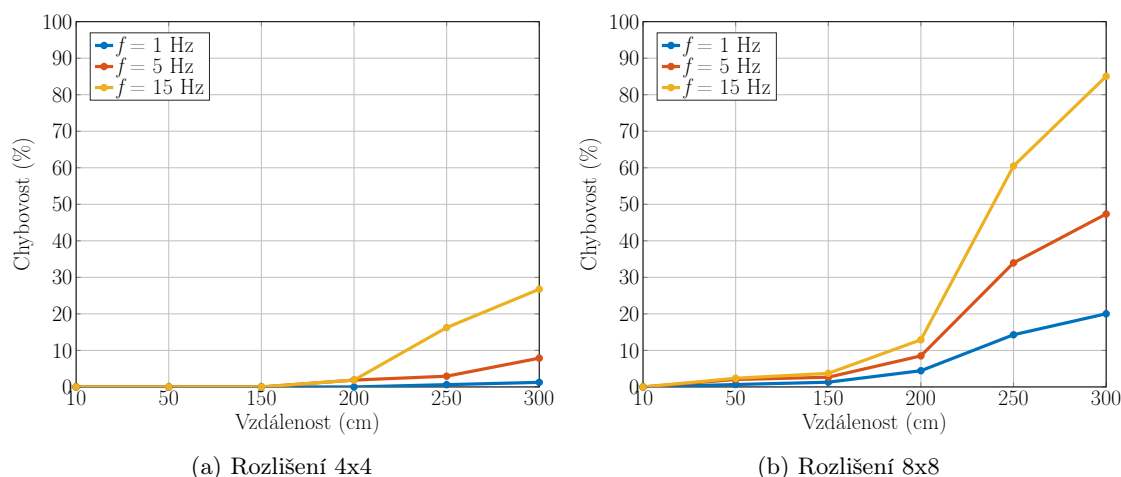
³Režimu *Continuous*, viz kapitolu 2.1

Provedená měření jsou v souladu s předpoklady uvedenými v úvodu této sekce, a závěry uvedenými v [22] neboť v případě všech testovaných materiálů s nízkou reflektivitou byla chybovost (procento neplatných měření) větší než 50 % a v případě průhledného skla byla dle očekávání chybovost v režimu 4x4 průměrně 88,3%, v režimu 8x8 pak 95%. Podobně vysokou chybovost vykazoval i například povrch černého lakovaného dřeva, a to průměrně 78,5 % v režimu 4x4 a 95 % v režimu 8x8. Při měření vzdálenosti povrchů s nízkou hodnotou reflektivity totiž dochází ke změření platných hodnot pouze v kruhové oblasti poblíž středu matice hodnot. Protože testované povrchy nejsou lambertovské, předpokládaným vysvětlením pro tento jev je různá odražená intenzita záření IR emitoru. Je pravděpodobné, že oblast, kde dojde ke změření platných hodnot je oblast, kde dochází k odlesku záření. Ze změřených dat je též patrné, že zvýšení rozlišení způsobuje nezanedbatelné zvýšení chybovosti měření.

Chybovost byla také testována v případě nelambertovských, zrcadlicích povrchů (chromovaný povrch, povrch zrcadla, nerezový povrch). V tomto případě způsobuje zrcadlový odraz záření nepřesné změření vzdálenosti k objektu odrážejícího se v daném povrchu (senzor samotný). Vzdálenost vysoce zrcadlicího povrchu ToF senzorem proto zpravidla není možné měřit.

2.2.2 Vliv frekvence opakování měření na míru chybovosti

Dalším testovaným faktorem je vliv měřené vzdálenosti a frekvence měření na míru chybovosti senzoru. Stejně jako v případě zvýšení rozlišení lze i v případě zvýšení frekvence měření očekávat zvýšení chybovosti. Chybovost je jako v předchozím případě stanovena jako průměrný počet neplatných měření ve 20 po sobě jdoucích měřeních.



Obrázek 2.4: Chybovost v závislosti na vzdálenosti pro různé frekvence

Měřeným povrchem je rovná plocha natřená bílá barvou s hodnotou reflektivity $R = 88\%$, nasvícená denním světlem. Měření je provedeno pro frekvence snímání $f = 1$ Hz, $f = 5$ Hz a $f = 15$ Hz a to v obou režimech rozlišení. Chybovost je vyjádřena v %. Obdržená data jsou znázorněna v grafech na obrázku 2.4.

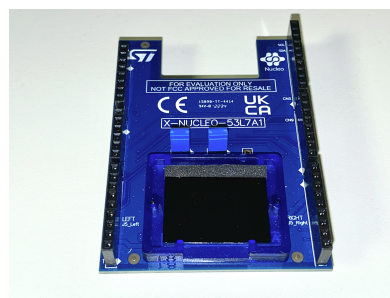
Výsledky měření jsou v souladu s původním předpokladem a ze získaných dat primárně vyplývá, že chybovost roste s měřenou vzdáleností a že senzor obecně dosahuje v režimu měření 8x8 větší chybovosti, než v režimu 4x4. Při frekvenci měření $f = 15$ Hz je pro zachování chybovosti menší než 30 % v režimu 4x4 (tedy pro obdržení alespoň 70 % platných měření v matici) vhodné senzorem měřit vzdálenosti menší, než 300 cm, v režimu 8x8 pak vzdálenost menší, než 220 cm.

2.3 Ověření kalibrace přeslechu v praxi

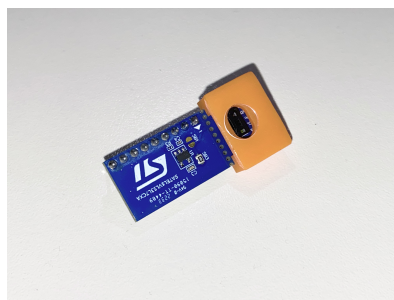
V této části jsou zkoumány metody provedení kalibrace senzoru v případě praktických aplikací senzoru v reálných podmínkách. Primárně je zkoumán vliv použití neideálního sklíčka a vliv provedení kalibrace za neideálních podmínek. Pro naprostou většinu praktických aplikací ToF senzoru s konkrétním krycím sklíčkem stačí provést kalibraci přeslechu v ideálních podmínkách jednou, poté kalibrační data uložit a při příští inicializaci senzoru kalibrační data znovu načíst. Stanovená kalibrační data přeslechu jsou po provedení kalibrace uložena v paměti mikrokontroleru senzoru a mohou být zpětně čtena pomocí funkce `vl53l7cx_get_caldata_xtalk()`⁴, obsažené v rozšíření „vl53l7cx_plugin_xtalk“ základních ovladačů senzoru Ultra Lite Driver (ULD). Tento postup by v praxi měl pokrýt většinu potenciálně problematických situací.

Přesto však může nastat situace, kdy je senzor nutné kalibrovat v konkrétních provozních podmínkách, a kdy není z nějakého důvodu možné dodržet požadované parametry referenční plochy (primárně požadavek na reflektivitu $R < 3\%$). Příkladem takové situace by mohla být aplikace senzoru v průmyslu, kdy lze očekávat, že krycí sklíčko senzoru bude v průběhu používání částečně znečištěno, pokryto filmem, či zaneseno nečistotami a bude proto třeba kalibraci provádět v daných podmínkách opakovaně.

Stejně tak lze předpokládat, že pro konkrétní aplikaci nebude z technických důvodů možné přesně dodržet doporučené požadavky na parametry krycího sklíčka, detailněji popsané v části 1.4.2 této práce. Za účelem posouzení závažnosti zmíněných nedostatků je experimentálně testována proveditelnost měření senzorem při nedodržení doporučených parametrů kalibrace. Měření je provedeno s použitím ideálního krycího sklíčka dodávaného výrobcem i s použitím zmíněného neideálního krycího sklíčka a výsledky jsou porovnány. Níže jsou popsány obdržené výsledky. Ideální umělohmotné krycí sklíčko dodávané výrobcem je znázorněno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Ideální sklíčko



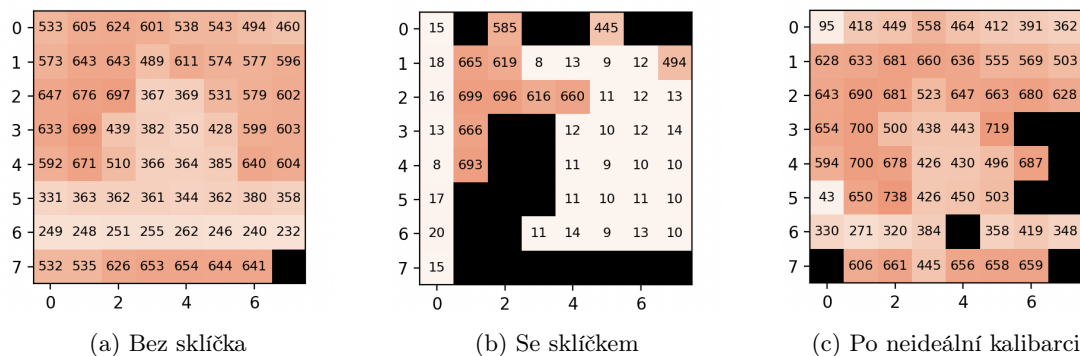
Obrázek 2.6: Neideální sklíčko

Jedno z testovaných neideálních krycích sklíček je znázorněno na obrázku 2.6. Jedná se v tomto případě o safírové krycí sklíčko kruhového tvaru o průměru $r = 7,8$ mm s tloušťkou $d_{\text{glass}} = 0,5$ mm a délkou vzduchové mezery $d_{\text{airgap}} = 0,5$ mm. Krycí sklíčko v tomto případě přesně nespĺňuje následující doporučené parametry; ačkoliv safírové sklo je jedním z doporučených materiálů, sklíčko není pokryto antireflexní vrstvou (ARC) ani vrstvou propuštějící pouze IR záření. Největším nedostatkem pak je absence těsnění okolo senzoru. Tyto nedostatky modelují použití neideálního, ale odolného krycího sklíčka například pro průmyslové aplikace senzoru.

Po nasazení krycího sklíčka s výrazně neideálními parametry typicky silný přeslechový signál způsobuje na značné části dat zdánlivé měření neexistující překážky na minimální vzdálenosti $d < 20$ mm a změřené hodnoty jsou zcela nevyovídající. Bez provedení kalibrace jsou data chaotická a nerepresentují měřenou scénu. Níže na obrázku 2.7a je pro ilustrativní srovnání uveden příklad scény měřené senzorem před nasazením krycího sklíčka a na obrázku 2.7b je uveden příklad měření chaotických dat nekalibrovaným senzorem po nasazení sklíčka zmíněného v předchozím odstavci. Pokud je

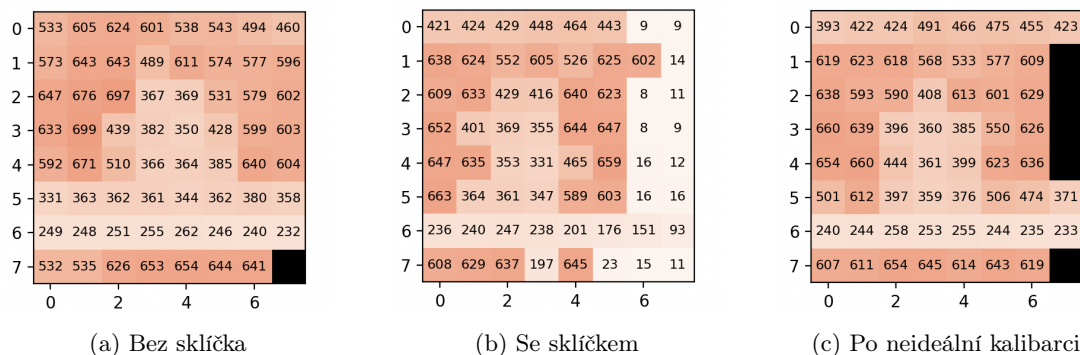
⁴Více viz dokumentace [ULD](#)

následně provedena kalibrace s použitím neideálního povrchu, i přes kombinaci špatných podmínek je v měřených datech většinou patrný alespoň hrubý obrys skutečné scény. Příklad výsledku takové kalibrace za použití bílého povrchu, $R = 90\%$, a doporučené vzdálenosti $d = 60$ cm s výše zmíněným sklíčkem vede u této scény na výsledek znázorněný na obrázku 2.7c. Při provedení kalibrace za ideálních podmínek pak byl výsledek vždy lepší.



Obrázek 2.7: Demonstrace neideální kalibrace přeslechu s neideálním sklíčkem

Pro srovnání vlivu neideálních parametrů krycího sklíčka byly zmíněné výsledky měření srovnány s měřením za použití ideálního plastového sklíčka dodávaného výrobcem. Toto sklíčko má stejnou tloušťkou $d_{\text{glass}} = 0,5$ mm a bylo umístěno do vzdálenosti $d_{\text{airgap}} = 0,5$ mm. Kalibrace přeslechu byla provedena za stejných podmínek. V tomto případě byla měřená data po nasazení sklíčka vždy alespoň částečně správná. Příklad jednoho z měření je znázorněn na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Demonstrace neideální kalibrace přeslechu s vhodným sklíčkem

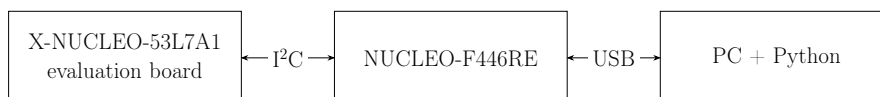
Ze srovnání výsledků pokusů provedených s různými krycími sklíčky vyplývá, že nedodržení doporučených parametrů krycího sklíčka vede ke dramatickému zhoršení kvality měření senzorem a ve většině případů měření bez provedení kalibrace zcela znemožňuje. Avšak po provedení kalibrace (i v neideálních podmínkách) lze stále obdržet alespoň hrubý obrys scény a to i v případě použití neideálního sklíčka. Pokud tedy prioritou dané aplikace senzoru není obdržet exaktní měření vzdálenosti (lze tolerovat zkreslení v jednotkách cm a neúplné měření), výše zmíněný postup může být akceptovatelný.

V této kapitole je popsána implementace kalibrace kamery a metod fúze dat zmíněných v teoretickém úvodu práce. Dále jsou popsána konkrétní zapojení pro ověření funkčnosti a možnosti využití metod fúze dat Time of Flight senzoru s jinými zdroji. Konkrétně je zkoumána fúze hloubkových měření ToF senzoru s obrazovými daty videokamery.

Z důvodu širokého zorného pole použitého senzoru VL53L7CX (efektivní čtvercové zorné pole senzoru $60^\circ \times 60^\circ$, resp. 90° diagonálně) byla pro testování vybrána širokoúhlá kamera se zorným úhlem 90° . Konkrétním použitým zařízením je Full HD kamera značky Ausdom, model AF640.

3.1 Čtení a reprezentace dat ToF senzoru

Pro práci se senzorem je použito zapojení znázorněného na obrázku 3.1. ToF senzor je umístěn na testovací desce X-NUCLEO-53L7A1, připojené přes rozhraní General-Purpose Input/Output (GPIO) k vývojové desce STM Nucleo. Piny GPIO slouží k řízení funkčnosti senzoru a k přenosu měřených i konfiguračních dat mezi senzorem a vývojovou deskou. Přesné přiřazení pinů je provedeno podle dokumentace k testovací desce X-NUCLEO-53L7A1 a mikrokontroleru. Pro práci s ToF senzorem jsou využívány oficiální funkce a knihovny poskytované výrobcem.



Obrázek 3.1: Čtení dat senzoru

Pro praktickou realizaci této práce byla zvolena vývojová deska STM32 Nucleo-64 (model NUCLEO-F446RE), která disponuje dostatečným výkonem a perifériemi pro potřeby tohoto projektu. Vývojová deska Nucleo je naprogramována po připojení k počítači prostřednictvím oficiálního vývojového prostředí STM32CubeIDE, poskytovaného výrobcem STMicroelectronics. Základ kódu v programovacím jazyce C používaný pro ovládání ToF senzoru vychází z ukázkového kódu poskytovaného výrobcem jako součást rozšiřujícího softwarového balíčku „X-CUBE-TOF1“¹ pro STM32CubeIDE. V použitém zapojení slouží vývojová deska Nucleo k předzpracování dat ToF senzoru do vhodného formátu a jejich přenosu přes USB rozhraní do počítače.

¹Více viz dokumentace [X-CUBE-TOF1](#)

Samotné vyhodnocení a zobrazení dat pak probíhá po přenosu přes virtuální COM port na počítači, kde je zpracování dat implementováno v programovacím jazyce Python.



Obrázek 3.2: Scéna ve viditelném spektru

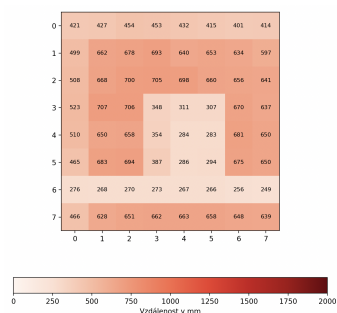
Do počítače je se zvolenou snímací frekvencí senzoru přenášeno v závislosti na nastavení senzoru 16, respektive 64 údajů o vzdálenosti. Tato hloubková data je pro další práci člověka se senzorem, vyhodnocování a zpracování potřeba graficky interpretovat. Proto vyvstává otázka jak data přehledně znázornit.

V úvahu připadají dvě základní metody grafické interpretace popsané níže. Pro přehledné srovnání na konkrétní scéně ve viditelném spektru vezmeme v úvahu scénu vlevo na obr. 3.2. Níže na této stránce jsou popsány a vyobrazeny dva základní použité způsoby zobrazení hloubkových dat stejné scény, zaznamenaných senzorem umístěným ve stejné pozici jako kamera při fotografování snímku na obr. 3.2.

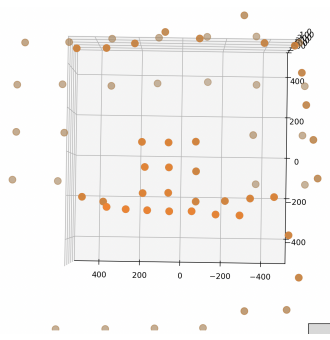
První použitou možností zobrazení dat o vzdálenosti změřené v každé měřicí zóně senzoru je zobrazení v podobě 2D barevné mapy. Příklad takového zobrazení je uveden vpravo na obrázku 3.3.

V tomto konkrétním případě senzor snímá v režimu 8x8 zón. V každém čtverci mřížky je uvedena změřená vzdálenost v dané zóně v mm. Číselná hodnota je v každé zóně převedena na barvu pozadí zóny podle zvolené barevné škály uvedené pod 2D mapou. Zde jsou pro rozsah škály zvoleny hodnoty 0 mm a 2000 mm, vzhledem k experimentálně určenému rozsahu hodnot, které je senzorem při rozlišení 8x8 možné spolehlivě měřit, viz část 2.2.2.

Výhodou této metody je její jednoduché a jasně čitelné zobrazení na displeji nebo papíře. Nevýhodou však je, že nezohledňuje rozšiřující se hranol zorného pole senzoru a samo o sobě tak nenese informaci o faktickém rozměru jednotlivých zón měření. Čtvercová plocha nejbližší zóny je ve skutečnosti několikanásobně menší, než plocha zóny nejvzdálenější. Obě zóny ale mají na 2D mapě stejnou velikost. Bez obrazové informace je tedy výpovědní hodnota neúplná.



Obrázek 3.3: Barevná mapa, vzdálenost v mm



Obrázek 3.4: Point cloud

Tento problém je částečně možné řešit dalším způsobem reprezentace a zobrazení dat. Máme k dispozici známý zorný úhel senzoru (zorné pole $60^\circ \times 60^\circ$) a změřené hodnoty vzdálenosti v každé zóně. Tyto hodnoty vždy udávají kolmou vzdálenost od roviny rovnoběžné se základnou senzoru v dané zóně.

Otázkou je jak reprezentovat jednotlivé zóny změřené vzdálenosti, neboť údaj o vzdálenosti vyjadřuje průměrnou vzdálenost předmětů v dané zóně. Pokud pro jednoduchost zvolíme reprezentaci každé plochy bodem o dané vzdálenosti umístěným ve středu této plochy, lze ze znalosti zorného pole senzoru a změřené vzdálenosti v každé zóně s pomocí jednoduché trigonometrie určit prostorové souřadnice středu detekované plochy pro každou zónu senzoru. Druhou použitou možností zobrazení dat je proto po přepočtení údaje o měřené vzdálenosti mračno bodů (point cloud). Příklad scény reprezentovaný mračnem bodů je uveden

vlevo na obrázku 3.4. Zřejmou nevýhodou této reprezentace je nemožnost zcela vypovídajícího zobrazení v rovině. Výhodou je naopak úplnější zachycení informace o prostorovém rozložení snímané scény.

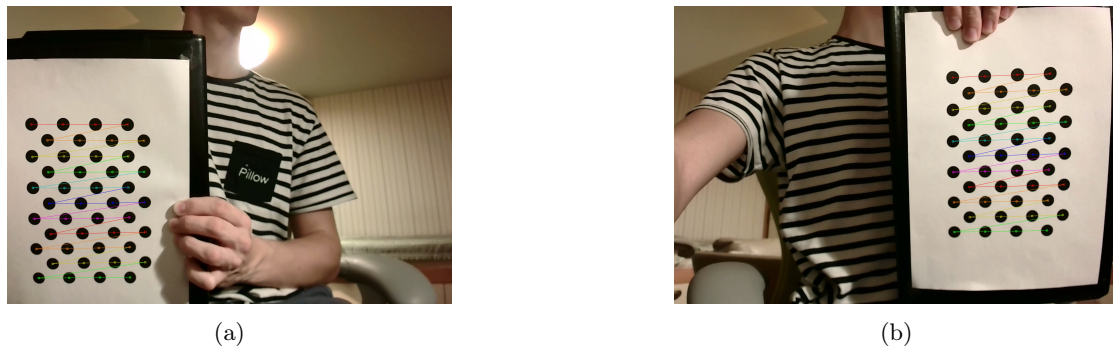
Z těchto dvou odlišných způsobů reprezentace dat vyplývají dvě metody fúze s obrazovými daty. Obě metody poskytují odlišné výsledky vhodné pro různé aplikace a jsou detailněji popsány v následujících sekcích práce.

3.2 Určení intrinzických parametrů kamery

Jak bylo zmíněno v sekci 1.5, před samotnou fúzí dat či jakoukoliv exaktní prací s kamerou je třeba kameru kalibrovat. Prvním krokem v procesu kalibrace je určení *kalibrační matice kamery* (camera matrix) \mathbf{K} , reprezentující intrinzické parametry kamery a stanovení (odhad) zkreslení čočky kamery oproti lineárnímu modelu.

Širokoúhlá kamera, která bude později použita jako zdroj obrazových dat je proto připojena k počítači, kde je s využitím knihovny OpenCV v programovacím jazyce Python nejprve určena kalibrační matice kamery \mathbf{K} a parametry radiálního zkreslení obrazu. Vzhledem k požadavku na možnost opakovaného provedení kalibrace pro účely testování je pro stanovení intrinzických parametrů použito metody kalibrace z několika snímků planárního kalibračního obrazce, zmíněné v sekci 1.5 teoretického úvodu, která nabízí vhodný kompromis mezi náročností provedení a přesností kalibrace. Konkrétní použitá metoda vychází z práce a poznatků uvedených v [20].

Za účelem provedení kalibrace je zaznamenáno 10 snímků kalibračního obrazce v různých orientacích a vzdálenostech od kamery. Konkrétním použitým kalibračním obrazcem je nesymetrická mříž černých kruhů vytištěná na bílý papír formátu A4, upevněná na pevnou desku.

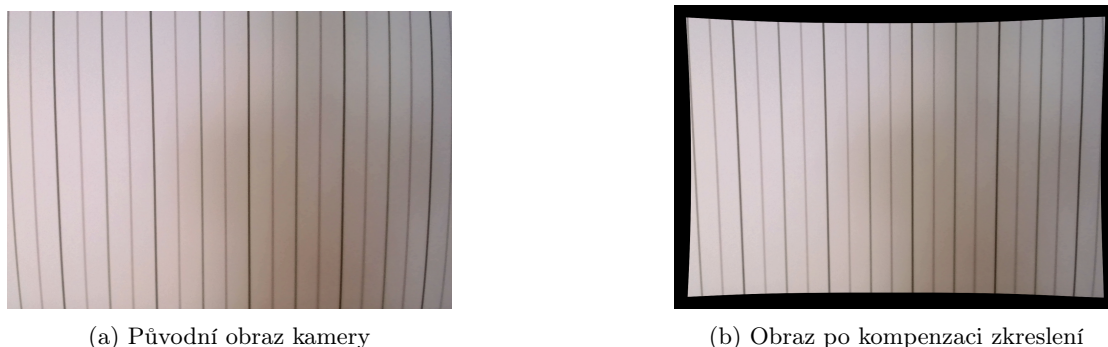


Obrázek 3.5: Kalibrační obrazec s detekovanými středy kruhů

Pro účel kalibrace je nejprve stanoven popis modelu kalibračního obrazce. Ten spočívá v identifikaci relativních poloh kruhů na obrazech. S využitím funkce knihovny OpenCV jsou poté na jednotlivých snímcích nalezeny souřadnice středů kruhů, které se však vlivem nedokonalého obrazu kamery nenachází ve stejných relativních polohách jako na skutečném obrazech. Identifikované středy kruhů jsou znázorněny na obrázku 3.5. Ze známého modelu kalibračního obrazce a (deformovaných) poloh bodů na snímku je stanovena² *kalibrační matice kamery* a *parametry radiálního zkreslení*.

Znalost těchto parametrů nám umožňuje kompenzovat zkreslení kamery a čočky. Na obrázku 3.6 je srovnání původního obrazu kamery před kalibrací (vlevo) a skutečného obrazu po provedení kompenzace zkreslení. (vpravo) I z vizuálního srovnání snímků je například patrné původní vyduuté (konvexní) zkreslení obrazu kamery způsobené čočkou, popsané v sekci 1.5.3. Díky kalibraci kamery a znalosti jejích parametrů nyní můžeme přistoupit k dalším krokům jako je fúze obrazových dat s hloubkovými daty ToF senzoru.

²Více viz [20] a [21]



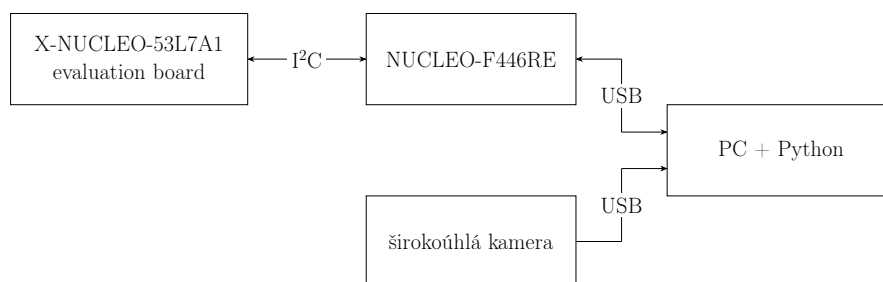
(a) Původní obraz kamery

(b) Obraz po kompenzaci zkreslení

Obrázek 3.6: Kalibrace kamery s použitím intrinzických parametrů

3.3 Diagram zapojení s jedním ToF senzorem

V této sekci bude popsána první testovaná aplikace, a to fúze dat jednoho ToF senzoru VL53L7CX s obrazem širokoúhlé RGB kamery. Pro realizaci a testování aplikace s jedním senzorem je použito zapojení popsaného v sekci 3.1. Navíc jsou přes USB rozhraní do počítače přenášena obrazová data širokoúhlé kamery a zpracování a fúze dat je implementováno v programovacím jazyce Python s využitím knihovny pro manipulaci s obrazem OpenCV.



Obrázek 3.7: Schéma zapojení jednoho senzoru

3.4 Fúze dat kamery a ToF senzoru

Tato část práce se věnuje samotné fúzi dvou odlišných zdrojů dat, a to obrazových dat širokoúhlé RGB kamery a hloubkových měření ToF senzoru. Obrazová data jsou reprezentována obvyklou maticí hodnot intenzit v každém ze tří barevných kanálů, R, G, B, v rozlišení použité Full HD kamery Ausdom AF640 (1080x1920 pixelů). Oproti tomu hloubková měření ToF senzoru jsou v závislosti na nastavení rozlišení senzoru VL53L7CX reprezentována maticí 8x8, nebo 4x4 celočíselných hodnot kolmé vzdálenosti od roviny senzoru v mm, kde každá hodnota reprezentuje změřenou vzdálenost v odpovídající zóně. Tato práce zkoumá dva odlišné způsoby fúze zmíněných dat.

Prvním řešením, popsaným níže v části 3.5, je výpočet homografie a následná transformace perspektivy mezi senzory. Druhým řešením, popsaným v části 3.6 je reprezentace dat ToF senzoru formou mračna bodů (point cloud) a následná projekce těchto bodů do roviny obrazu.

3.4.1 Implementace a struktura programu

Ve všech případech popsanych v následujících sekcích je pro potřeby vizualizace fúze dat v jazyce Python použito stejné základní struktury programu. Program se vždy skládá ze tří samostatných procesů³, z nichž každý je zodpovědný za specifickou část celkového zpracování. Tento modulární přístup umožňuje efektivní rozdělení zátěže a optimalizaci výkonu systému. První proces je odpovědný za načítání dat z ToF senzoru prostřednictvím sériového portu, druhý proces zpracovává tato data do vhodného formátu pro další fúzi, a třetí proces pak kombinuje zpracovaná hloubková data s obrazovými daty z kamery. Tímto způsobem je možné nezávisle provést každou část procesu bez vzájemného ovlivnění výkonu ostatních částí.

Výběr architektury založené na více procesech byl motivován především potřebou asynchronně zpracovávat relativně velké množství dat v reálném čase a snahou o minimalizaci latence, která je klíčová pro aplikace vyžadující rychlou odezvu. Každý proces běží nezávisle, což znamená, že zpracování jednoho procesu není blokováno operacemi v jiném procesu. To vede k výraznému zlepšení rychlosti a efektivity zpracování. Izolace procesů také zvyšuje odolnost systému proti chybám, protože selhání jednoho procesu nemusí nutně vést k selhání celého systému, což je v dané aplikaci vhodné.

3.5 Fúze transformací perspektivy

Jak bylo nastíněno v předchozí části, jednou z možností fúze hloubkových měření ToF senzoru s obrazovými daty kamery je využití transformace perspektivy. Nabízí se totiž možnost pohlížet na matici hloubkových měření senzoru čistě jako na 2D barevnou mapu, jak je popsáno v sekci 3.1. V tomto případě tedy vyřešíme problém odlišnosti typů dat tím, že pro potřeby fúze převedeme hloubková data na data obrazová a pracujeme už jen s transformací perspektivy. V následujících odstavcích bude popsán postup načtení a konverze dat.

Jak je zmíněno výše, nejprve je využit proces, v němž funkce `read_serial()` načítá data z ToF senzoru prostřednictvím sériového portu. Tato data jsou následně zpracována v procesu určeném pro předzpracování dat pomocí funkce `process_data()`, kde jsou konvertována do pole NumPy a transformována do BGR formátu pro lepší kompatibilitu s knihovnou OpenCV.

Předzpracování dat v tomto případě obnáší pouze převedení matice hloubkových měření 4x4, případně 8x8 celočíselných hodnot pomocí zvolené barevné mapy na 3-dimenzionální pole (NumPy array). Každé ze tří 2D polí nyní reprezentuje intenzitu v jednom z barevných kanálů B, G, R.⁴ Tím obdržíme miniaturní 2D barevnou mapu s rozlišením 4x4, případně 8x8 pixelů, reprezentující vzdálenost jako barvu na zvolené barevné škále.

Ve třetím procesu určeném pro zobrazení dat pomocí funkce `display_data()` díky znalosti intrinzičických parametrů nejprve kompenzujeme zkreslení kamery. Intrinzičické parametry byly podle postupu popsaneho v části 3.2 určeny již dříve. Obraz kamery je po kompenzaci zkreslení nutně oříznut do čtvercového formátu, aby odpovídal čtvercovému zornému poli senzoru. Použitý čtvercový formát určíme tak, aby nové rozlišení bylo celočíselným násobkem 4 nebo 8, v závislosti na zvoleném rozlišení senzoru a bylo tedy možné odpovídajícím způsobem zvětšit rozlišení 2D mapy vzdálenostních dat. Tu je třeba zvětšit o faktor $k_{\text{scale}} = 4n$, resp. $k_{\text{scale}} = 8n$, $n \in \mathbb{N}$ a

$$k_{\text{scale}} = \frac{R_{\text{cam}}}{R_{\text{sensor}}}, \quad (3.1)$$

kde k_{scale} je škálovací faktor, R_{cam} je rozlišení čtvercového obrazu kamery a R_{sensor} je rozlišení senzoru.

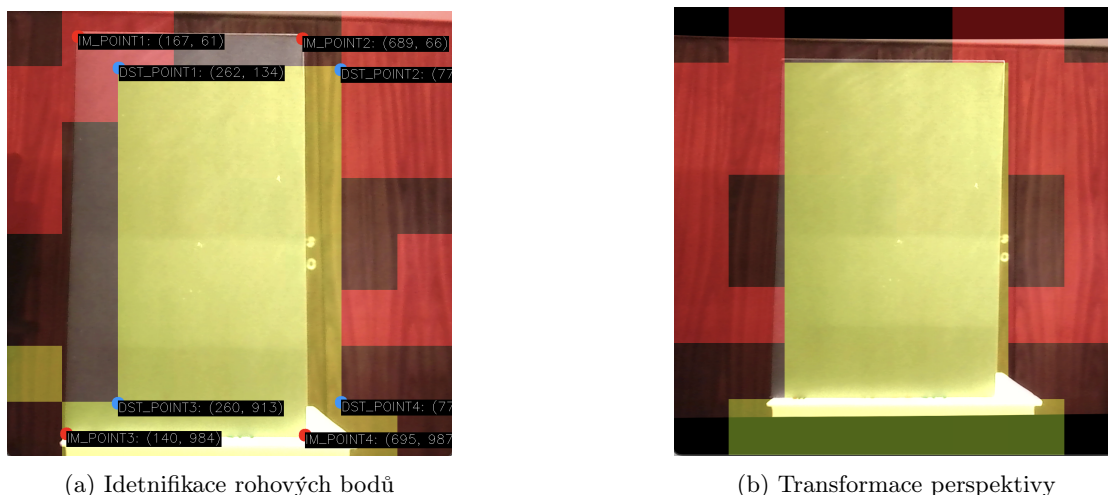
³Pro rozdělení do více procesů je využito knihovny `multiprocessing` ↗

⁴Pořadí kanálů B, G, R je nativně používáno knihovnou pro zpracování obrazu OpenCV.

Nyní tedy máme k dispozici čtvercový obraz kamery a miniaturní čtvercovou 2D mapu vzdálenostních dat. Dalším důležitým krokem je právě zvětšení počtu pixelů barevné mapy získané z dat senzoru, aby svým rozměrem odpovídala obrazu kamery. Toho docílíme pomocí Kroneckerova součinu každého ze tří 2D polí miniaturní barevné mapy s jednotkovou maticí o rozměrech rovných škálovacímu faktoru k_{scale} . Definice Kroneckerova součinu matic \mathbf{A} a \mathbf{B} je:

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{pmatrix} a_{11}\mathbf{B} & \cdots & a_{1n}\mathbf{B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}\mathbf{B} & \cdots & a_{mn}\mathbf{B} \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

kde v našem případě $\mathbf{B} = \text{np.ones}(k_{\text{scale}})$, jinými slovy každý prvek 2D pole intenzity a_{ij} nahradíme maticí $a_{ij} \cdot \text{np.ones}(k_{\text{scale}})$. Nyní máme k dispozici dva čtvercové obrazové signály o stejném rozlišení, které oba zachycují stejnou scénu, ale z jiného úhlu. Oba signály reprezentují jiná data o této scéně, ale znázorněná stejným způsobem (barvou). V tuto chvíli přímým sečtením signálů získáme grafické znázornění translace a rotace mezi senzorem a kamerou, protože data jsou vzájemně posunuta, jak je patrné z obrázku 3.8a.



Obrázek 3.8: Určení matice homografie

Pro korekci perspektivy zobrazíme 2D souřadnice obrazových bodů snímku kamery maticí homografie a tím změním perspektivu obrazových dat kamery tak, aby odpovídala perspektivě hloubkové matice (2D barevné mapě) ToF senzoru. Jak je uvedeno v části 1.5.4, maticí homografie v praxi určíme pomocí funkce `getPerspectiveTransform()`⁵. Jako referenční předmět lze použít jakýkoliv předmět, jehož čtyři rohy jsou jednoznačně a jednoduše identifikovatelné jak ve viditelném spektru, tak v hloubkové mapě ToF senzoru. V tomto konkrétním příkladě využíváme malé kartonové krabice umístěné ve vzdálenosti 50 cm od senzoru, uprostřed zorného pole senzoru. Příklad výběru korespondujících 4 bodů v datech obou signálů je znázorněn výše na obrázku 3.8a.

Díky znalosti matice homografie je nyní možné provést transformaci perspektivy mezi senzory. Transformace perspektivy je implementována pomocí funkce `warpPerspective()`⁶, která transformuje obrazová data kamery na geometrii a perspektivu hloubkových dat. Samotná fúze

⁵Více viz dokumentace knihovny [OpenCV](#)

⁶Více viz dokumentace knihovny [OpenCV](#)

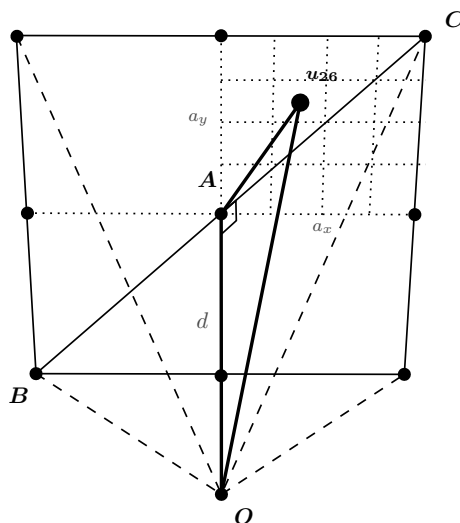
dat je pak realizována pomocí funkce `addWeighted()`⁷, jež provádí lineární kombinaci (součet) obrazových signálů se stanovenými hodnotami koeficientů průhlednosti α_i .

Výsledek transformace perspektivy je ilustrován na obrázku 3.8b s pomocí kalibračního předmětu umístěného v původní poloze. Je patrné, že chyba mezi skutečnou polohou bodů (data ToF senzoru) a polohou bodů transformovaných podle nalezené matice homografie (obrazová data po transformaci perspektivy) byla úspěšně minimalizována a kombinace signálů umožňuje vizuálně srozumitelnou reprezentaci informací o vzdálenostech objektů v dané scéně.

3.6 Fúze projekcí bodů

Druhou možností fúze hloubkových dat vícezónového ToF senzoru s obrazovými daty kamery je metoda, kdy na rozdíl od předchozí sekce vycházíme z reprezentace hloubkových dat jako mračna bodů (point cloud), jak je popsáno v sekci 3.1. Fúzi dat provedeme pomocí grafického zobrazení projekce jednotlivých bodů do roviny obrazu s využitím *extrinzičických* parametrů, které reprezentují vzájemnou polohu kamery a ToF senzoru.

Stejně jako v předchozím případě, data jsou načtena v odděleném procesu pomocí funkce `read_serial()` a jsou předána dalším procesům formou sdílené FIFO fronty. Operace provedené v procesu pro předzpracování dat pomocí funkce `process_data()` jsou už ale odlišné, protože data o vzdálenosti je třeba převést na body v prostoru. Za počátek souřadné soustavy, ve které budeme určovat souřadnice bodů volíme střed senzoru a kartézské osy orientujeme způsobem přirozeným pro kameru, tedy kladný směr osy Z směřuje kolmo na senzor ve směru měření, osy X a Y jsou orientovány ve směru délky a šířky těla senzoru. Při dalším výpočtu vycházíme ze známých parametrů zorného pole senzoru, které jsou uvedeny v teoretickém úvodu.



Obrázek 3.9: Přepočítání dat senzoru na mračno bodů

Na obrázku 3.9 je znázorněno zorné pole senzoru umístěného ve středu souřadné soustavy O tak, jak je popsáno výše a pro stanovení prostorových souřadnic vzhledem ke středu senzoru je třeba určit polohu bodů $u_{11} \dots u_{nm}$. Snímací pole senzoru má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholem

⁷Více viz dokumentace knihovny [OpenCV](#)

v bodě O a výškou d . Diagonální zorný úhel senzoru (na obrázku úhel BOC) je 90° . [4] Trojúhelník OAC vyznačený na obrázku 3.9 je tedy rovnoramenný a měřená vzdálenost d je rovna polovině diagonální vzdálenosti BC v podstavě hranolu.

Ze znalosti délky úhlopříčky čtvercové podstavy $BC = 2d$ lze jednoduše odvodit souřadné složky X a Y zvoleného bodu. Například polohu bodu u_{26} , který se při rozlišení 8×8 nachází ve $\frac{3}{8}$ úsečky a_x a $\frac{5}{8}$ úsečky a_y , jak je naznačeno na nákrese na obrázku 3.9, určíme jako

$$u_{26,x}(d) = \frac{3}{8} \cdot \sqrt{\frac{d^2}{2}} \quad (3.3)$$

$$u_{26,y}(d) = \frac{5}{8} \cdot \sqrt{\frac{d^2}{2}} \quad (3.4)$$

$$u_{26,z}(d) = d, \quad (3.5)$$

kde d je kolmá vzdálenost změřená senzorem v zóně, v jejímž středu se bod u_{26} nachází. Složka v ose Z je díky volbě souřadné soustavy rovna kolmé vzdálenosti d . Analogicky vypočteme polohu všech ostatních bodů v závislosti na jejich kolmé vzdálenosti d . Nyní jsou prostorová data reprezentována mračnem bodů, se souřadnicemi vyjádřenými vzhledem ke středu senzoru. Použitá implementace přepočtu hloubkových dat na mračno bodů je uvedena ve výpisu 3.1.

Výpis 3.1: Výpočet mračna bodů

```
colIDX = [-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7]
rowIDX = [7, 5, 3, 1, -1, -3, -5, -7]

for row in range(0, matrix.shape[0]):
    for col in range(0, matrix.shape[1]):
        idx = 8 * row + col
        if matrix[row, col] != np.nan:
            # Calculate X coordinate
            pts[0, idx] = colIDX[col]/8 * np.sqrt(
                (matrix[row, col]**2)/2 )

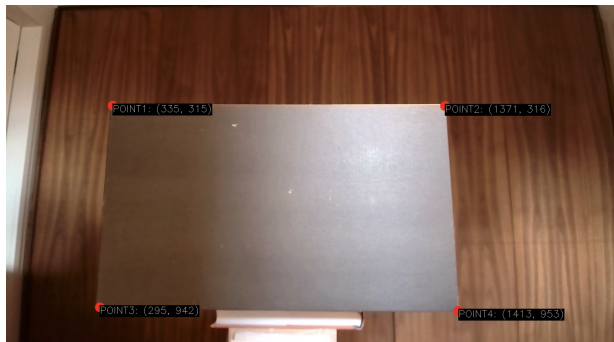
            # Calculate Y coordinate
            pts[1, idx] = rowIDX[row]/8 * np.sqrt(
                (matrix[row, col]**2)/2 )

            # Distance = Z coordinate
            pts[2, idx] = matrix[row, col]

processed_data_queue.put(pts)
```

Ve třetím procesu určeném pro zobrazení dat pomocí funkce `display_data()` díky znalosti *intrinzičích* parametrů stejně jako v případě fúze transformací perspektivy nejprve kompenzujeme zkreslení kamery. *Intrinzičné* parametry byly podle postupu popsaného v části 3.2 určeny již dříve. Pro výpočet projekce bodů je dále nutné určit *extrinzičné* parametry soustavy. Jak bylo popsáno v části 1.5.2 teoretického úvodu, *extrinzičné* parametry určují vnější umístění daného senzoru ve světové souřadné soustavě. Přesněji řečeno, *extrinzičými* parametry jsou matice rotace a vektor translace popisující vzájemné posunutí souřadné soustavy senzoru a světové souřadné soustavy. V obecném případě by tedy bylo třeba určit *extrinzičné* parametry obou senzorů; RGB kamery iToF senzoru.

To je však v tomto případě zbytečné, neboť můžeme problém výrazně zjednodušit tím, že světovou souřadnou soustavu ztotožníme se soustavou ToF senzoru. Pro zmíněné zjednodušení označíme dříve spočtené souřadnice prvků oblaku bodů (určené vzhledem k soustavě senzoru) za souřadnice ve světové souřadné soustavě. Zbývá tedy určit *extrinzičné* parametry RGB senzoru. Protože jsme ztotožnili světovou soustavu se soustavou ToF senzoru, budou hledané *extrinzičné* parametry (rotace a translace) popisovat vzájemnou rotaci a translaci dvou použitých senzorů.



Obrázek 3.10: Rohové body v obrazu kamery

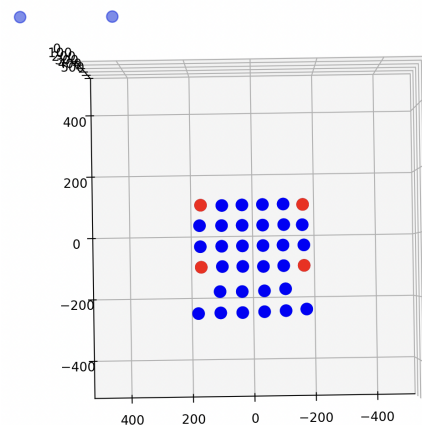
body oblasti s malou vzdáleností. Pro tyto účely je znovu použita malá kartonová krabice, umístěná ve vzdálenosti 45 cm do středu zorného pole ToF senzoru i RGB kamery. Kartonová krabice je v tomto případě pootočená kolem osy Y tak, aby referenční body použité pro výpočet reprezentovaly různé hodnoty hloubky, tedy aby souřadnice Z vybraných bodů nebyla stejná.

Vzhledem k velmi malému rozlišení ToF senzoru každý bod reprezentuje plochu o relativně velké rozloze. Je tedy vhodné optimální polohu referenčního předmětu určit experimentálně, a to například posouváním referenčního předmětu v zorném poli senzoru do zlomové polohy, kdy jsou hrany předmětu právě zaznamenány senzorem.

Výběr bodů odpovídajících vrcholům přední stěny referenčního předmětu pro výpočet *extrinzičných* parametrů je znázorněn na obrázcích výše. Na obrázku 3.10 jsou 4 vrcholy označeny ve viditelném spektru snímaném RGB kamerou. Na obrázku 3.11 jsou jim odpovídající 4 prostorové body označené v datech mračka bodů měřeného ToF senzorem.

Při znalosti matice *extrinzičných* parametrů je možné provést projekci jednotlivých bodů v prostoru do roviny obrazu, jak je posáno v části 1.5.2. V knihovně OpenCV, s pomocí které je fúze dat implementována, je projekce realizována pomocí funkce `project_points()`⁹.

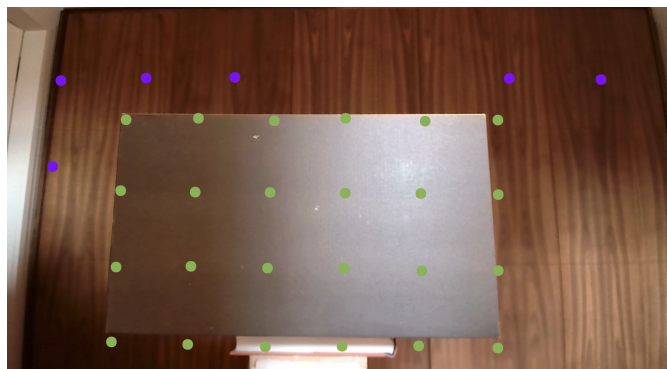
Extrinzičné parametry určíme pomocí funkce `solve_PnP()`⁸, jejíž vstupními argumenty jsou seznamy korespondujících bodů ve trojrozměrném prostoru a 2D bodů v obrazové rovině, jak bylo uvedeno v části 1.5.2 teoretického úvodu. Pro účely kalibrace je vhodné použít referenční kalibrační předmět, kterým může být jakýkoli předmět, na kterém je možné spolehlivě a jednoznačně identifikovat referenční body. Vhodnými referenčními body jsou například vrcholy kvádrů nebo krychle, protože jsou jednoduše identifikovatelné ve viditelném spektru, i v hloubkových datech, jako hraniční



Obrázek 3.11: Rohové body v ToF datech

⁸Více viz dokumentace knihovny [OpenCV](#)

⁹Argumenty funkce jsou vektor translace a vektor rotace, viz Rodriguesův rotační vzorec[23] a dokumentaci knihovny [OpenCV](#)

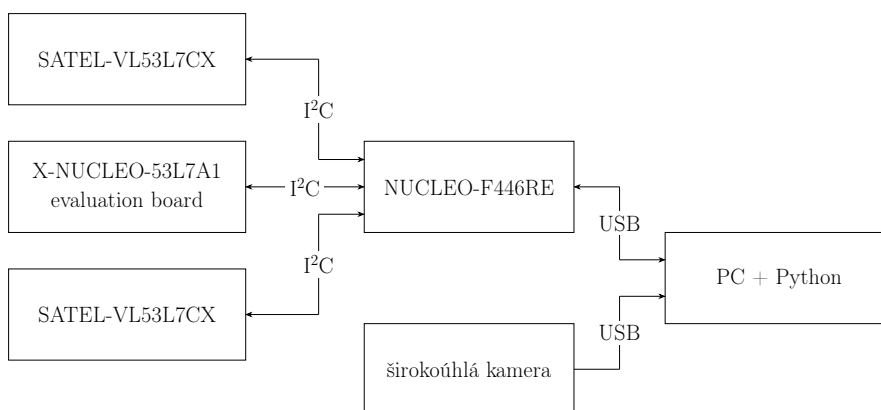


Obrázek 3.12: Fúze projekcí bodů

Informace o vzdálenosti měřených bodů je obdobně jako v části 3.5 reprezentována barvou bodů, pomocí přepočtení hodnoty vzdálenosti podle barevné škály. To umožňuje přesnou a vizuálně srozumitelnou reprezentaci informací o prostorovém rozložení a vzdálenostech objektů v dané scéně. Výsledek projekce bodů do obrazu širokoúhlé RGB kamery je znázorněn na obrázku 3.12.

3.7 Zapojení se třemi senzory

Postup fúze dat projekcí bodů lze analogicky rozšířit pro zapojení s více senzory. Konkrétním testovaným zapojením je zapojení se třemi senzory, které je obdobné zapojení s jedním senzorem popsaného v sekci 3.3 s tím rozdílem, že jsou k testovací desce X-NUCLEO-53L7A1 připojeny dva postranní senzory SATEL-VL53L7CX, jak je znázorněno na schématu 3.13.



Obrázek 3.13: Schéma zapojení se třemi senzory

Zapojení se třemi senzory je primárně využito k posouzení možnosti kombinace dat více ToF senzorů za účelem získání hustšího mračka bodů. Jak již bylo zmíněno, samotný algoritmus určení *matic projekce* \mathbf{P} jednotlivých senzorů je identický s postupem popsaným v předchozí sekci. Stejně jako v předchozím případě pro zjednodušení výpočtu považujeme prostorové souřadnice určené každým ze senzorů za souřadnice vůči světové souřadné soustavě a určujeme tedy pouze

extrinzičné parametry (matici rotace a vektor translace) mezi daným ToF senzorem a RGB kamerou. Ty je možné stejně jako v předchozím případě určit na základě čtyřech korespondencí obrazových a prostorových bodů pro každý ze tří senzorů.



Obrázek 3.14: Demonstrace zapojení se třemi senzory

Díky znalosti matice projekce každého senzoru vůči soustavě kamery je možné provést projekci dat jednotlivých senzorů do roviny obrazu. Jelikož jsou v konkrétním testovaném zapojení senzory umístěny vedle sebe (posunutě pouze o vektor translace v ose X) a jejich zorné kužely se částečně překrývají, výsledné mračno bodů je v hlavní části třikrát hustší. Demonstrativní příklad měření v zapojení se třemi senzory je znázorněn na obrázku 3.14.

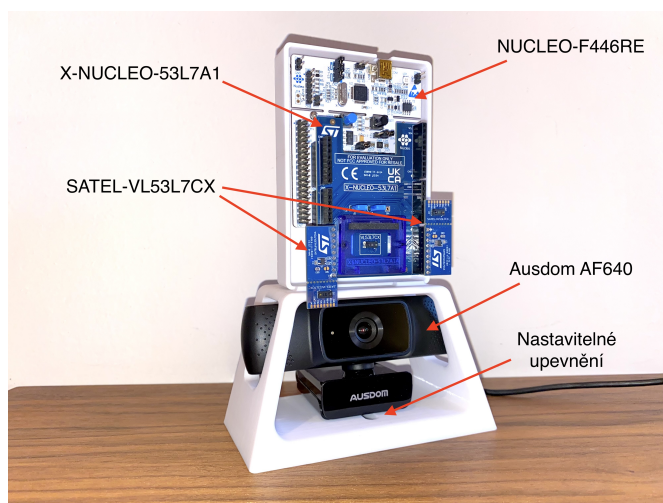
Výsledky pokusů vedou k závěru, že i přes malé rozlišení senzoru VL53L7CX je při snímání scény třemi senzory možné dosáhnout velmi uspokojivých výsledků, které se zdají být dostačující i pro náročnější aplikace v oblasti počítačového vidění, jako je 3D mapování a SLAM, případně přesnější ovládání gesty.

3.8 Testovací stojánek a grafické rozhraní

Pro testování funkce senzoru byl za pomoci CAD softwaru Shapr3D navržen stojánek pro uchycení použitých komponent tak, aby bylo možné spolehlivě určit *extrinzičné* parametry soustavy.

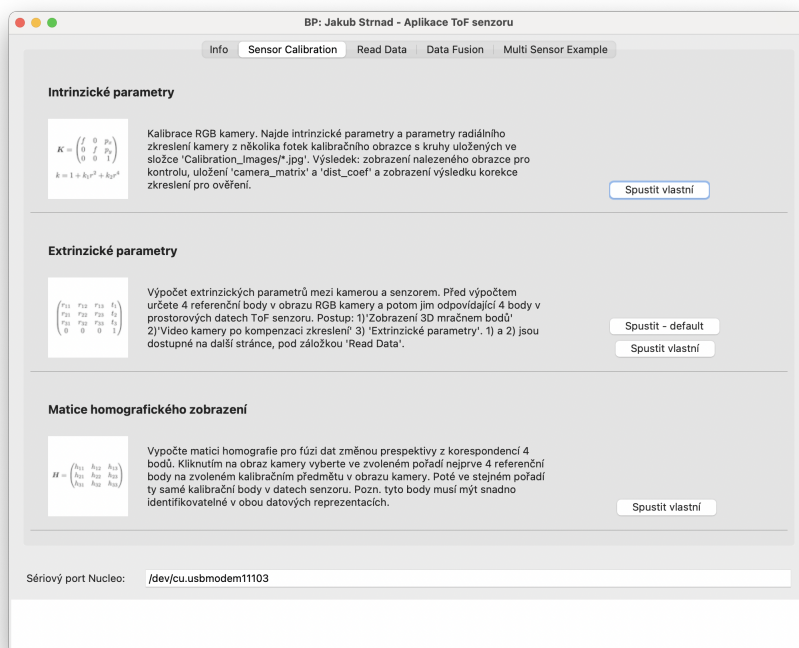
Horní část stojánku slouží pro uchycení vývojové desky STM Nucleo, testovací desky X-NUCLEO-53L7A se senzorem VL53L7CX a v případě zapojení s více senzory umožňuje připojení satelitních senzorů SATEL-VL53L7CX. Spodní část stojánku slouží pro uchycení širokoúhlé RGB kamery Ausdom AF640 a zahrnuje podlouhlý otvor v podstavě stojánku pro nastavitelné upevnění kamery v požadované poloze.

V rámci bakalářské práce bylo též naprogramováno zastřešující grafické rozhraní (GUI). Do něj jsou pro přehlednost sjednoceny výše zmíněné implementované algoritmy.



Obrázek 3.15: Testovací stojánek

GUI také stručně popisuje funkcionalitu jednotlivých skriptů v jazyce Python a umožňuje uživateli provést celý proces kalibrace soustavy. Konkrétně je možné provést kalibraci kamery a určení *intrinzičických parametrů*, dále je možné určit *matici homografie* pro fúzi dat transformací perspektivy i *extrinzičické parametry* pro fúzi dat projekcí do obrazové roviny. GUI také umožňuje přímé zobrazení dat ToF senzoru formou 2D barevné mapy, či 3D mračna bodů pro účely testování a evaluace možných aplikací senzoru. V neposlední řadě také umožňuje zobrazení samotných výstupů fúze dat v případě zapojení s jedním i se třemi senzory.



Obrázek 3.16: Grafické prostředí pro spuštění skriptů

Hlavním zamýšleným využitím GUI je spolu s testovacím stojánkem možnost jednoduchého zobrazení dat ToF senzoru VL53L7CX i jejich spojení s obrazovými daty pro zapojení s jedním i se třemi senzory pro účely demonstrace funkcionality a umožnění budoucího testování možných aplikací navrhovaných v následující kapitole i vývoj a testování jiných možných využití. Pro použití GUI je třeba provést zapojení vývojové desky Nucleo a RGB kamery přes USB rozhraní do počítače a do odpovídajícího textového pole v okně programu zadat cestu k virtuálnímu COM portu, ze kterého mají být čtena data ToF senzoru.

Výsledky a možné aplikace

V této kapitole jsou nejprve uvedeny příklady současných aplikací ToF senzorů, je popsáno jejich významné využití v oblasti IoT a následně jsou stručně shrnuty hlavní závěry praktické části práce a uvedeny navrhované budoucí aplikace vyplývající z provedeného testování.

4.1 Současná využití ToF senzorů

4.1.1 Aplikace v oblasti IoT

Vícezónové Time of Flight senzory nachází uplatnění v mnoha oblastech a odvětvích. Jednou z velmi významných oblastí, kde typicky nachází uplatnění právě málo-bodové ToF senzory je oblast automatizace domácnosti i automatizace výroby a obecně oblast sběru užitečných a dříve obtížně získatelných dat pro aplikace v IoT. Pro uvedení alespoň několika příkladů, mezi jednodušší aplikace můžeme zařadit jednoduché, ale praktické použití senzoru například pro monitorování úrovně hladiny či materiálu v zásobnících.[24] Další velmi významnou aplikací je například uplatnění ToF senzorů v automatizaci domácnosti, například při uplatnění v robotických vysavačích. V tomto případě slouží jednak k detekci a vyhýbání se překážkám, nebo k detekci přítomnosti podlahy a typu podlahy, mimo jiné pro prevenci pádu vysavače. V pokročilejších modelech slouží i pro aplikace blízké SLAM, jako je mapování místností a následně určení polohy vysavače pro navigaci prostorem. [24][25] ToF senzory také slouží (nejen v mobilních zařízeních) k detekci přítomnosti uživatele a například následně upravení jasu obrazovky, případně úpravu hlasitosti, a podobně.[24][26] Ze složitějších aplikací je také dobré zmínit například ovládní multimediálních i jiných zařízení pomocí gest, kde je důležitou výhodou oproti ostatním druhům senzorů právě možnost okamžitého a přesného měření.[24][27] Důležitá je také role ToF senzorů v automatizaci výroby, kde slouží k detekci přítomnosti výrobku, krabice, materiálu, případně jiného určení polohy a orientace předmětů a strojů ve výrobě.[24] V neposlední řadě je se také nabízí uplatnění v přesnější detekci překážek nejen v samořídících autech.[24]

4.1.2 Ostatní aplikace

Stejně tak ale ToF nalézají své nezastupitelné místo v oblastech mimo IoT, kde jako pár hlavních příkladů můžeme uvést aplikace ve spotřební chytré elektronice, jako je automatické nastavení zaostření kamery chytrých telefonů („autofocus“)[26], nebo při použití mnoha-zónových ToF senzorů identifikace uživatele za pomoci biometrického snímku obličeje.[26] Velmi důležitou oblastí

využití je také oblast virtuální a rozšířené reality, kde ToF senzory umožňují mapování okolního prostředí. Stejně zásadní roli hrají ToF senzory také v oblasti robotiky a jmenovitě SLAM pro navigaci v mnoha různých kontextech a využitích - od automatizace výroby přes chytré vysavače až po lokalizaci dronů. Výhodou je mimo jiné i okamžité provedení měření (například na rozdíl od klasických LIDAR sensorů). Mnoha-bodové senzory mohou sloužit k plnohodnotné navigaci, málo-bodové pak například jako zdroj rychle dostupných dat o poloze, co by doplněk jiného způsobu lokalizace. Konkrétně například [28] [29] úspěšně testují využití senzoru VL53L5CX společnosti STM (režim 8x8 zón při frekvenci 15 Hz) pro automatickou lokalizaci a předcházení kolizím („obstacle avoidance“) v miniaturních dronech, kde je malý výpočetní výkon i spotřeba výhodou, protože senzor zvyšuje hmotnost i spotřebu dronu jen o jednotky procent.

4.2 Výsledky praktické části

V praktické části práce byly s použitím postupů a závěrů popsaných v teoretickém úvodu implementovány dva odlišné způsoby fúze dat ToF senzoru VL53L7CX, a to fúze dat transformací perspektivy a přepočítání dat ToF senzoru na mračno bodů a následná fúze projekcí do obrazové roviny. V obou případech je pro vizuální srozumitelnost měřená hloubka vyjádřena barvou.

4.2.1 Fúze transformací perspektivy

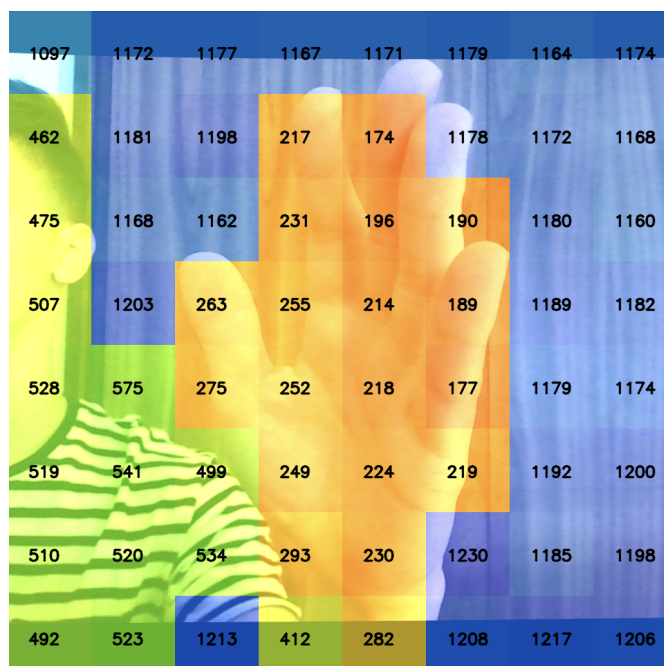
První implementovanou metodou fúze je fúze transformací perspektivy. Jak již bylo zmíněno, nevýhodou pouhého vyjádření dat ToF senzoru hloubkovou mapou, potažmo barevnou mapou je rozšiřující se zorné pole senzoru, které způsobuje různé velikosti detekovaných zón, spolu s malým rozlišením 8x8 zón, v případě senzoru VL53L7CX. Zmíněný problém byl řešen fúzí hloubkových dat s obrazem scény pro jasné znázornění rozložení scény a učení hloubky jednotlivých oblastí. Kvůli odlišné poloze senzorů bylo před sečtením jejich dat nutné provést transformaci perspektivy mezi daty ToF senzoru a RGB kamery.

Byla provedena kalibrace RGB kamery a na základě bodových korespondencí určena vhodná matice homografie. Díky tomu bylo možné provést transformaci perspektivy obrazu RGB kamery na perspektivu ToF senzoru. Transformace obrazu v případě senzorů umístěných na testovacím stojánku je znázorněna níže na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Změna perspektivy maticí komografie

Z obrázku výše je jednak patrná radiální deformace způsobená kompenzací radiálního zkreslení a názorně je též patrná zmíněná změna perspektivy, daná maticí homografie a způsobená náklonem osy Z kamery oproti ose Z ToF senzoru. Obraz byl před sečtením s daty senzoru oříznut, aby odpovídal čtvercovému zornému poli senzoru. Zde je třeba poznamenat, že vertikální zorný úhel použité širokoúhlé kamery nebyl dostatečný, a proto po transformaci perspektivy obsahují obrazová data v oblastech chybějících dat na horním a spodním okraji obrazu černé pruhy. To je také jedním z návrhů na možné budoucí vylepšení. Demonstrativní příklad fúze dat je znázorněn na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Demonstrace funkce - fúze transformací perspektivy

Mimo tento nedostatek lze po provedeném testování konstatovat, že provedená fúze dat poskytuje uspokojivé výsledky. Hloubková data senzoru odpovídají obrazovým datům tak, jak bylo od fúze očekáváno, a to umožňuje vyvození dvou typů závěrů. Díky informaci o korespondenci obrazu a hloubkových dat je možné posoudit vhodnost a využitelnost samotného ToF senzoru pro různé aplikace. Kromě toho se nabízí i posoudit možná využití pro společný výstup senzorů v podobě kombinovaných dat.

Co se týče využití fúze transformací perspektivy k evaluaci využitelnosti samotného ToF senzoru, z provedených pokusů vyplývá, že i přes nízké rozlišení je měření senzorem VL53L7CX v režimu 8x8 zón dostatečné i pro některé náročnější aplikace zmíněné výše, například rozpoznávání jednoduchých gest jednou rukou, jako jsou horizontální, vertikální a příčný pohyb ruky, případně krouživý pohyb ruky na jednu či druhou stranu. Rozpoznávání gest je při rozlišení senzoru nejlépe proveditelné ve vzdálenosti menší, než jeden metr. Tato gesta jsou například zcela dostačující pro ovládání jednoduchého multimediálního systému, jako jsou ifotainment systémy v moderních automobilech. Další možná aplikace je rozpoznávání přítomnosti osoby a to pro dosažení spolehlivých výsledků na experimentálně určené vzdálenosti menší, než 2 m. Stejně tak bylo zjištěno, že senzor je vhodný i pro ostatní aplikace zmíněné výše v části 4.1.1, jako jsou jednodušší aplikace detekce polohy výrobků nebo přepravních krabic ve výrobě, nebo jednoduché

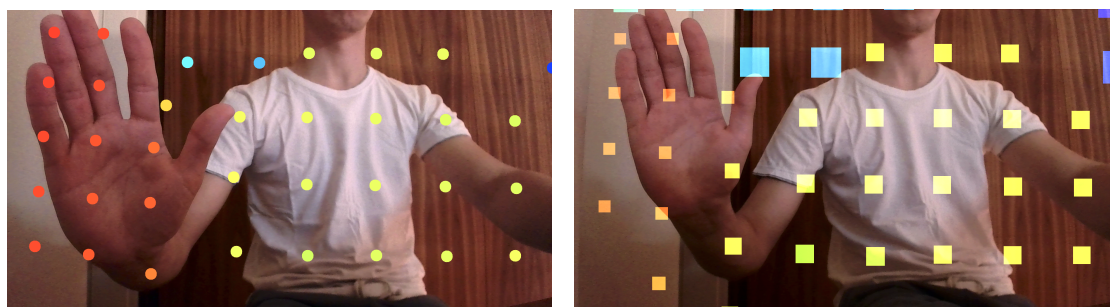
aplikace jako monitorování úrovně hladiny či materiálu v zásobníku, nebo detekce přítomnosti plochy na očekávané vzdálenosti (detekce podlahy).

Z provedeného testování ale navíc vyplývá, že využití sloučených dat ToF senzoru a obrazu RGB kamery umožňuje i některé sofistikovanější aplikace. Znalost RGB obrazu s vysokým rozlišením v kombinaci s přesným měřením hloubky (v režimu 8x8 v 64 zónách) scény umožňuje implementovat aplikace jako je například sofistikovanější ovládání gesty.

U všech výše zmíněných aplikací je však třeba vzít v úvahu zejména materiálová omezení senzoru. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím proveditelnost měření je povrch měřeného materiálu. Povrch měřeného materiálu by měl být co nejpodobnější ideálnímu lambertovskému povrchu a nesmí se jednat o průhledný nebo zrcadlící materiál. V takovém případě nelze měření spolehlivě provést. Bližší informace jsou uvedeny v sekci 2.2. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím měření je volba vhodného krycího sklíčka. Ačkoliv krycí sklíčko musí být pro ochranu senzoru při aplikaci senzoru v reálných podmínkách instalováno, jeho parametry musí odpovídat požadavkům vysvětleným v části 1.4.2, aby nedocházelo k příliš silnému *přeslechu* měřicího signálu. Zásadními parametry krycího sklíčka jsou použitý materiál a dále tloušťka skla a délka vzduchové mezery, které by měly být minimalizovány. Při volbě krycího sklíčka je třeba vzít v úvahu zamýšlenou aplikaci senzoru a v některých specifických aplikacích může být překročení doporučených parametrů akceptovatelné, viz sekci 2.3. Pro měření senzorem s instalovaným krycím sklíčkem je třeba provést kalibraci *přeslechu*, jak je popsáno v části 2.1.

4.2.2 Fúze projekcí bodů

Druhou implementovanou metodou fúze je fúze projekcí bodů. Pro účely této implementace byla data ToF senzoru převedena podle postupu popsaného v 3.6 převedena na mračno bodů. Je třeba zmínit, že v tomto případě existuje více představitelných způsobů reprezentace zón o změřené vzdálenosti. V této práci byla zvolena reprezentace zóny jedním bodem nacházejícím se ve středu plochy na změřené vzdálenosti. (na obrázku 4.3a) Tento přístup je zjevně správný na menších vzdálenostech, ale vzhledem k rozšiřujícímu se charakteru zón se zvětšující se měřenou vzdáleností výrazně klesá hustota sestaveného mračna bodů. Alternativním přístupem může být namísto reprezentace zón pomocí bodů reprezentace barevnými čtverci o zvětšující se délce hrany, znázorňující zvětšující se plochu zóny. (na obrázku 4.3b) Pro demonstrativní účely je tento přístup také implementován a zpřístupněn v zastřešujícím GUI.



(a) Reprezentace body

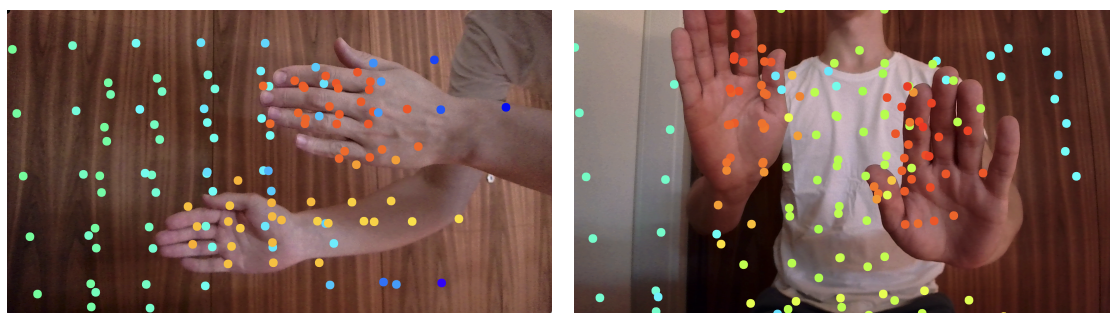
(b) Reprezentace čtverci

Obrázek 4.3: Demonstrace funkce - fúze projekcí bodů

Dle mého názoru je ale reprezentace pomocí centrálních bodů nejvhodnější možnou volbou, protože zmenšující se hustota bodů reprezentuje charakter zorného pole senzoru a nízká hustota bodů vyplývá z nízkého rozlišení senzoru. Dále byla provedena kalibrace RGB kamery a na

základě bodových korespondencí mezi body v hloubkových a obrazových datech byly určeny *extrinzičné* parametry soustavy a *matice projekce kamery*. Díky tomu bylo možné provést projekci prostorových bodů do roviny obrazu. Provedená fúze dat poskytuje uspokojivé výsledky a testování potvrdilo, že hloubková data senzoru odpovídají obrazovým datům tak, jak bylo od fúze očekáváno. Jako v předchozím případě nabízí fúze dat ToF senzoru s obrazovými daty elegantní řešení malého rozlišení senzoru a umožňuje sofistikovanější aplikace, než jaké by byly dosažitelné se senzorem samotným.

Při testování fúze dat projekcí bodů byly zkoumány zejména možnosti těchto pokročilejších využití senzoru. Navíc je v sekci 3.7 popsán postup kombinace dat více ToF senzorů VL53L7CX pomocí určení *extrinzičných* parametrů každého z nich. Tím lze obdržet hustší mračno bodů pro přesnější měření. Na základě výsledků testování je předpokládánou implementovatelnou aplikací například ovládání pomocí gest dvou (a více) rukou, kdy by z obrazových dat byl určen počet zdvižených rukou, jejich vzájemná poloha i ukazované gesto a například ze směru toku obrazu byl určen směr pohybu. Z dat ToF senzoru by oběma rukám bylo přiřazeno mračno bodů jako informace o jejich vzdálenosti od soustavy senzorů, popřípadě informace o změně polohy a vzdálenosti. Informace z obrazových dat by navíc umožnila přehledně oddělit části mračna bodů náležící jednotlivým rukám.



Obrázek 4.4: Demonstrace funkce - gesta více rukami

Další navrhovanou aplikací fúze dat je monokulární odhad hloubky scény s použitím referenčních dat ToF senzoru pro korekci odhadu. Tento způsob určení hloubkové mapy by mohl být cenově méně náročnou alternativou k nákladným, mnoha-bodovým ToF kamerám, případně i klasickým paprskovým LIDAR senzorům. Případnou obměnou je navrhované rozšíření zapojení o další kameru pro stereoskopický odhad hloubky scény s použitím referenčního ToF senzoru pro maximální přesnost odhadu. Takto robustní systém by pravděpodobně bylo možné použít v kombinaci s gyroskopem i pro náročné aplikace v oblasti robotiky, SLAM, 3D skenování, případně v oblasti virtuální a rozšířené reality. Například brýle pro virtuální realitu společnosti Apple, Apple Vision Pro, nově uveřejněné v únoru roku 2024 využívají dle dostupných informací kombinace stereoskopického obrazu několika kamer a dat Time of Flight senzoru umístěného uprostřed brýlí.[30][31] I v tomto případě je samozřejmě třeba brát v úvahu materiálová a jiná omezení senzoru, shrnutá na konci předchozí sekce.

V této bakalářské práci jsem se zabýval návrhem a implementací aplikací s využitím multizónového ToF senzoru VL53L7CX od firmy STMicroelectronics. Zkoumány byly hlavně možnosti fúze dat ToF senzoru s obrazovými daty kamery, omezení použitelnosti a využitelnost senzoru v praktických aplikacích. Pro účely testování je navrženo a realizováno grafické prostředí slučující dílčí testované aplikace a je vyroben stojánek pro vyhodnocování, s pomocí kterých jsou testovány a navrženy budoucí aplikace. Práce je rozdělena do čtyřech kapitol, v nichž jsou postupně popsány teoretický úvod, zhodnocení aplikací senzoru v reálných podmínkách, provedena realizace zapojení pro fúzi dat a na nakonec zhodnoceny obdržené výsledky.

V rámci teoretické části práce byla uvedena motivace práce, kdy jsou nově komerčně dostupné multizónové MEMS ToF senzory identifikovány jako revoluční neboť umožňují doposud nevídaně rychlé a snadné měření hloubkové mapy snímané scény a to s přesností v řádu jednotek mm. Na základě rozsáhlé rešerše byl popsán princip konstrukce a funkce většiny modelů multizónových senzorů výrobce STMicroelectronics. Dále byl jako zástupce této skupiny senzorů zkoumán senzor VL53L7CX společnosti STM, který umožňuje paralelní měření vzdálenosti v matici 4x4 zóny s frekvencí až 64 Hz nebo 8x8 zón s frekvencí až 15 Hz a je založen na VCSEL o vlnové délce 940 nm a CMOS SPAD detektoru.[2] Byly také stručně uvedeny charakteristické vlastnosti senzoru s důrazem na vysvětlení parazitního jevu *přeslechu* měřicího signálu při použití krycího sklíčka. V závěru teoretické části byly identifikovány a popsány dvě metody fúze dat ToF senzoru s obrazovými daty kamery, a to metoda fúze projekcí bodů a fúze transformací perspektivy a byly stručně popsány a odvozeny důležité kroky kalibrace kamery i samotného provedení fúze dat.

V kapitole věnované použití senzoru VL53L7CX v reálných podmínkách byly popsány jednotlivé kroky potřebné k úspěšnému provedení měření se senzorem VL53L7CX a detailněji byl popsán konkrétní postup kalibrace *přeslechu* pro měření s použitím krycího sklíčka. Stručně byly také popsány hlavní nastavitelné parametry senzoru a byl vysvětlen jejich význam při měření senzorem. Jako základní materiálová omezení použití senzoru v reálných podmínkách byla zjištěna nemožnost měření materiálů s příliš nízkou reflektivitou nebo vysoce zrcadlicích materiálů. Měření materiálů s reflektivitou menší, než 20 %, včetně velmi tmavých, nebo průhledných materiálů je identifikováno jako vysoce problematické kvůli nedostatečnému odrazu měřicího signálu. Lesklé a zrcadlicí materiály též není kvůli perfektnímu odrazu možné měřit. Dále bylo popsáno zvýšení počtu zón s neplatným výsledkem měření se zvýšením frekvence opakování měření. Oba jevy jsou zhoršeny při měření s vyšším rozlišením 8x8 zón. Ke konci kapitoly byla zohledněna možnost použití neideálních krycích sklíček a možnost provedení kalibrace v neideálních podmínkách. Tyto nepříznivé okolnosti byly označeny za akceptovatelné v případech nenáročných aplikací

senzoru nevyžadujících přesné určení vzdáleností.

V praktické části byly aplikovány poznatky zmíněné v teoretickém úvodu při implementaci kalibrace *intrinzičích* parametrů a radiálního zkreslení kamery s pomocí planárního obrazce s uspokojivým výsledkem, čímž bylo umožněno následné provedení fúze dat. Pro realizaci byly zvoleny zapojení s jedním a se třemi senzory VL53L7CX. Zpracování, fúze a zobrazení dat bylo implementováno na osobním počítači v programovacím jazyce Python. Byly implementovány dvě metody fúze dat zvolené v teoretickém úvodu práce s využitím knihovny pro manipulaci obrazu OpenCV, za pomoci kterých byla testována funkcionality senzoru a možnosti využití fúze hloubkových dat ToF senzoru s obrazovými daty. Pro možnost jednoduchého zobrazení dat ToF senzoru VL53L7CX i jejich fúzi s obrazovými daty pro účely demonstrace funkcionality a umožnění budoucího testování možných aplikací bylo naprogramováno jednoduché uživatelské rozhraní a pomocí 3D tisku vytvořen stojánek pro soustavu senzorů.

V kapitole popisující výsledky práce byly uvedeny příklady současných aplikací ToF senzorů a jejich významné využití v oblasti IoT a následně shrnuty hlavní závěry praktické části. Bylo stanoveno, že provedená fúze dat poskytuje uspokojivé výsledky, protože testování potvrdilo, že hloubková data senzoru odpovídají obrazovým datům tak, jak bylo od fúze očekáváno. Na základě provedené evaluace funkčnosti bylo zjištěno, že i přes nízké rozlišení je měření senzorem VL53L7CX v režimu 8x8 zón dostatečné i pro některé náročnější aplikace, jako je rozpoznávání jednoduchých gest jednou rukou na vzdálenostech menších, než jeden metr, detekce přítomnosti osoby na vzdálenosti menší, než 2 m, nebo jednodušší aplikace detekce polohy výrobků nebo přepravních krabic ve výrobě. Stejně tak je senzor VL53L7CX využitelný pro jednoduché aplikace jako monitorování úrovně hladiny či materiálu v zásobníku a další aplikace. Rozlišení samotného senzoru VL53L7CX sice není dostatečné pro pokročilé aplikace, ale je stanoveno, že fúze s obrazovými daty tento nedostatek minimalizuje. Na základě tohoto závěru byly navrženy možné budoucí pokročilé aplikace sloučených dat ToF senzoru a obrazu RGB kamery. Na základě provedených pokusů byl diskutován předpoklad možné korekce odhadu monoskopického či stereoskopického odhadu hloubkové mapy pomocí referenčních dat ToF senzoru VL53L7CX jako robustního a cenově dostupného řešení využitelného například pro SLAM, 3D skenování, nebo sofistikovanější ovládání gesty více rukou současně v nově se rozvíjícím segmentu AR a VR. Toto řešení bylo přirovnáno k řešení použitému v případě VR brýlí Apple Vision Pro.

Na závěr je třeba zmínit, že výrobce zkoumaného senzoru VL53L7CX, STM nedávno představil plánovanou výrobu mnoha-zónového ToF senzoru o stejném funkčním principu s rozlišením 2268 zón.[32] Plánovaným budoucím rozšířením této práce je kromě použití ToF dat pro zpřesnění odhadu hloubkové mapy i aplikace principů popsaných v této práci pro fúzi obrazových dat s daty tohoto mnoha-bodového senzoru.

Seznam obrázků

1.1	Shrnutí návrhu senzoru VL53L5	5
1.2	Funkce senzoru	6
1.3	Příklad histogramu při detekci dvou cílů na odlišných vzdálenostech	6
1.4	Pole ozařování	7
1.5	Přesnost měření pro různé barvy povrchu	8
1.6	Přeslech při vložení krycího sklíčka	9
1.7	Minimalizace přeslechu	10
1.8	Dirkový model kamery	11
1.9	Posun souřadné soustavy obrazové roviny	12
1.10	Vztah souřadné soustavy kamery a světové souřadné soustavy	13
1.11	Radiální zkreslení obrazu kamery	15
2.1	Možnosti kalibrace přeslechu	18
2.2	Doba integrace	19
2.3	Chybovost pro různé materiály	20
2.4	Chybovost v závislosti na vzdálenosti pro různé frekvence	21
2.5	Ideální sklíčko	22
2.6	Neideální sklíčko	22
2.7	Demonstrace neideální kalibrace přeslechu s neideálním sklíčkem	23
2.8	Demonstrace neideální kalibrace přeslechu s vhodným sklíčkem	23
3.1	Čtení dat senzoru	24
3.2	Scéna ve viditelném spektru	25
3.3	Barevná mapa, vzdálenost v mm	25
3.4	Point cloud	25
3.5	Kalibrační obrazec s detekovanými středy kruhů	26
3.6	Kalibrace kamery s použitím intrinzických parametrů	27
3.7	Schéma zapojení jednoho senzoru	27
3.8	Určení matice homografie	29
3.9	Přepočítání dat senzoru na mračno bodů	30
3.10	Rohové body v obrazu kamery	32




3.11	Rohové body v ToF datech	32
3.12	Fúze projekcí bodů	33
3.13	Schéma zapojení se třemi senzory	33
3.14	Demonstrace zapojení se třemi senzory	34
3.15	Testovací stojánek	34
3.16	Grafické prostředí pro spouštění skriptů	35
4.1	Změna perspektivy maticí komografie	37
4.2	Demonstrace funkce - fúze transformací perspektivy	38
4.3	Demonstrace funkce - fúze projekcí bodů	39
4.4	Demonstrace funkce - gesta více rukami	40



Seznam tabulek

1.1	Vlastnosti senzoru	7
2.1	Hodnoty reflektivity některých testovaných materiálů	20

Bibliografie

1. MARTIN, Fabrice; MELLOTT, Pascal; CALEY, Adam; RAE, Bruce; CAMPBELL, Colin; HALL, Duncan; PELLEGRINI, Sara. An all-in-one 64-zone SPAD-based Direct-Time-of-Flight Ranging Sensor with Embedded Illumination. In: *2021 IEEE Sensors*. 2021, s. 1–4. Dostupné z DOI: [10.1109/SENSOR47087.2021.9639840](https://doi.org/10.1109/SENSOR47087.2021.9639840) ↗.
2. *VL53L7CX - Time-of-Flight 8x8 multizone ranging sensor with 90 degrees FoV (ToF) - STMicroelectronics* [online]. [cit. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l7cx.html>.
3. PELLEGRINI, S.; RAE, B.; PINGAULT, A.; GOLANSKI, D.; JOUAN, S.; LAPEYRE, C.; MAMDY, B. Industrialised SPAD in 40 nm technology. In: *2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2017, s. 16.5.1–16.5.4. Dostupné z DOI: [10.1109/IEDM.2017.8268404](https://doi.org/10.1109/IEDM.2017.8268404) ↗.
4. ST MICROELECTRONICS. *DS13865 - Time-of-Flight 8x8 multizone ranging sensor with 90 degrees FoV*. 2024. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l7cx.pdf>.
5. ST MICROELECTRONICS. *UM3038 - A guide to using the VL53L7CX Time-of-Flight multizone ranging sensor with 90° FoV*. 2024. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um3038-a-guide-to-using-the-vl53l7cx-timeofflight-multizone-ranging-sensor-with-90-fov-stmicroelectronics.pdf.
6. *Pololu - VL53L7CX Time-of-Flight 8x8-Zone Wide FOV Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator, 350cm Max* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/3418>.
7. ST MICROELECTRONICS. *AN5962 - Guidelines for the cover glass of the VL53L7 Time-of-Flight multizone sensor family*. 2023. Dostupné také z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5962-guidelines-for-the-cover-glass-of-the-vl53l7-timeofflight-multizone-sensor-family-stmicroelectronics.pdf.
8. YODER JR, Paul R. *Opto-mechanical systems design*. CRC press, 2005.
9. SEKANINA, Milan; BOČEK, Leo; KOČANDRLE, Milan; ŠEDIVÝ, Jaroslav. *Geometrie II* [online]. 1. vyd. Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1988 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://www.karlin.mff.cuni.cz/~halas/Geometrie/G2.pdf>.

10. ŘEHÁČEK, Jan. *Matykání: Projektivní prostor, to nevymyslíš* [MATFYZ] [online]. 2021-12-16. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/matykani-projektivni-prostor-to-nevymyslil>.
11. FAUGERAS, Olivier. *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. MIT press. 1993.
12. HARTLEY, Richard; ZISSERMAN, Andrew. *Multiple view geometry in computer vision*. Second edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. ISBN 978-0-511-18711-7. OCLC: 171123855.
13. *OpenCV: Perspective-n-Point (PnP) pose computation* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.9.0/d5/d1f/calib3d_solvePnP.html.
14. ZINS, Matthieu. *Color Fusion and Super-resolution for Time-of-flight Cameras*. 2017.
15. SZELISKI, Richard. Image Alignment and Stitching: A Tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* [online]. 2007, vol. 2, no. 1, s. 1–104 [cit. 2024-02-01]. ISSN 1572-2740, ISSN 1572-2759. Dostupné z DOI: [10.1561/0600000009](https://doi.org/10.1561/0600000009) .
16. KANG, Sing Bing. Radial Distortion Snakes. In: 2001. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7188179>.
17. DEVERNAY, Frédéric; FAUGERAS, Olivier. Straight lines have to be straight. *Machine Vision and Applications* [online]. 2001, vol. 13, no. 1, s. 14–24 [cit. 2024-02-01]. ISSN 0932-8092. Dostupné z DOI: [10.1007/PL00013269](https://doi.org/10.1007/PL00013269) .
18. HLAVÁČ, Václav. *RANSAC = RANdom SAmple Consensus* [online]. [B.r.]. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/15ImageAnalysis/44RANSAC.pdf>.
19. MAYBANK, Stephen J.; FAUGERAS, Olivier D. A theory of self-calibration of a moving camera. *International Journal of Computer Vision*. 1992, roč. 8, s. 123–151. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:20984115>.
20. ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2000, roč. 22, č. 11, s. 1330–1334 [cit. 2024-04-15]. ISSN 1939-3539. Dostupné z DOI: [10.1109/34.888718](https://doi.org/10.1109/34.888718) . Conference Name: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
21. *Camera Calibration Toolbox for Matlab* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <http://robots.stanford.edu/cs223b04/JeanYvesCalib/>.
22. HANSARD, Miles; LEE, Seungkyu; CHOI, Ouk; HORAUD, Radu. *Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications*. 2012.
23. TOMASI, Carlo. Vector Representation of Rotations. 2024. Dostupné také z: <https://courses.cs.duke.edu/cps274/fall13/notes/rodrigues.pdf>.
24. *STMicroelectronics Unveils Next-Gen Multizone Time-of-Flight (ToF) Sensor Elevating Human-Presence Sensing and Gesture Recognition - Embedded Hardware Design* [online]. 2023-12-19. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://embeddedhardwaredesign.com/stmicroelectronics-unveils-next-gen-multizone-time-of-flight-tof-sensor-elevating-human-presence-sensing-and-gesture-recognition/>. Section: Tech Updates.
25. DOMI. *Understanding the Role of ToF Sensors in Robot vacuums* [DOMI] [online]. 2023-02-22. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.tof-sensor.com/understanding-the-role-of-tof-sensors-in-robot-vacuums/>.

26. *VCSELs for state of the art 3D sensing in consumer devices* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/optical-sensing/consumer-3d-sensing/?gad_source=1&cHash=53ab695b5ec953ae882ea0fdd4a19d3b.
27. DOMI. *Understanding the Role of ToF Sensors in Robot vacuums* [DOMI] [online]. 2023-02-22. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.tof-sensor.com/understanding-the-role-of-tof-sensors-in-robot-vacuums/>.
28. NICULESCU, Vlad; MÜLLER, Hanna; OSTOVAR, Iman; POLONELLI, Tommaso; MAGNO, Michele; BENINI, Luca. Towards a Multi-Pixel Time-of-Flight Indoor Navigation System for Nano-Drone Applications. In: *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2022, s. 1–6. Dostupné z DOI: **10.1109/I2MTC48687.2022.9806701** .
29. MÜLLER, Hanna; ZIMMERMAN, Nicky; POLONELLI, Tommaso; MAGNO, Michele; BEHLEY, Jens; STACHNISS, Cyrill; BENINI, Luca. *Fully On-board Low-Power Localization with Multizone Time-of-Flight Sensors on Nano-UAVs* [online]. arXiv, 2022 [cit. 2024-03-19]. No. arXiv:2212.00710. Dostupné z arXiv: **2212.00710**[eess] .
30. *Apple Vision Pro* [Apple] [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>.
31. SHETH, Sarang. *Every Single Sensor inside the Apple Vision Pro and What It's Individually Designed To Do - Yanko Design* [online]. 2023-06-07. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.yankodesign.com/2023/06/07/every-single-sensor-in-the-apple-vision-pro-and-what-its-individually-designed-to-do/>.
32. *VL53L9CA - 3D dToF all-in-one LiDAR module with on-chip processing - STMicroelectronics* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l9ca.html>.
33. *multiprocessing — Process-based parallelism* [Python documentation] [online]. [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>.