

# Laserové ToF senzory v automatizaci budov

Filip Klapetek

---

Bakalářská práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Filip Klapetek  
Osobní číslo: A22756  
Studijní program: B1032A020001 Bezpečnostní technologie, systémy a management  
Forma studia: Kombinovaná  
Téma práce: Laserové ToF sensory v automatizaci budov  
Téma práce anglicky: Applications of Laser ToF Sensors in Building Automation

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Seznamte se nabídkou rodiny ToF senzorů FlightSense™.
3. Proveďte průzkum trhu alternativních ToF senzorů s podobnou funkcionalitou.
4. Uveďte možné aplikace využití ToF senzorů v oblasti automatizace budov, popřípadě detekce osob.
5. Vytvořte vlastní návrh možného využití ToF senzorů pro automatizaci budov.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PARKER, Philip. The 2021-2026 World Outlook for Time of Flight (TOF) Sensors. 2020. Paperback. ICON Group International, Inc.
2. RAPHAEL, Benny. Construction and Building Automation: From Concepts to Implementation. Routledge, 2022. ISBN 978-0367761103.
3. Code of Practice for Building Automation and Control Systems (IET Standards). 1. INSTITUTION OF ENGINEERING & T, 2020. ISBN 978-1785615634.
4. ČSN EN ISO 16484-1. Automatizační a řídicí systémy budov (BACS) – Část 1: Projektová specifikace a realizace. Switzerland: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2011.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Fraj**

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **5. června 2023**



**doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.**  
děkan

**Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 16. prosince 2022

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 2.6. 2023

Filip Klapetek

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá laserovými Time of Flight senzory z rodiny FlightSense a jejich využitím v automatizaci budov. V teoretické části jsou popsány základní pojmy problematiky jako automatizace, automatizace budov a senzory. Poté následuje vysvětlení technologie ToF, laseru a představení rodiny senzorů FlightSense od společnosti STMicroelectronics, kde jsou popsány jednotlivé vlastnosti senzorů FlightSense, které se nachází na trhu. Dále jsou analyzovány možné alternativy ToF senzorů, které existují a využívají se v automatizaci budov, a jaké jsou jejich výhody či nevýhody oproti ToF senzorům. Praktická část práce zahrnuje popis možných využití ToF senzorů v automatizaci budov. V praktické části byla řešena detekce objektu a snímání jednoduchých gest, ale také kalibrace senzoru. Praktická realizace byla prováděna pomocí FlightSense senzoru typu VL53L3CX ve vývojovém prostředí CubeIDE. Na závěr jsou zhodnoceny vytvořené praktické realizace a jsou vypsány jednotlivé poznatky a problémy, které byly během vytváření praktické realizace zjištěny.

**Klíčová slova:** Automatizace, Automatizace budov, Sensory, Laser, Time of Flight, FlightSense, VL53L3CX, CubeIDE.

## **ABSTRACT**

The thesis deals with laser Time of Flight sensors from the FlightSense family and their use in building automation. In the theoretical part, the basic concepts of automation, building automation and sensors are described. This is followed by an explanation of the ToF technology, the laser and an introduction to the FlightSense sensor family from STMicroelectronics, where the different features of the FlightSense sensors that are on the market are described. Furthermore, possible alternatives to ToF sensors that exist and are used in building automation are analysed and what are their advantages or disadvantages compared to ToF sensors. The practical part of the thesis includes a description of possible applications of ToF sensors in building automation. The practical part deals with object detection and sensing of simple gestures as well as sensor calibration. The practical implementation was carried out using a FlightSense sensor type VL53L3CX in the CubeIDE development environment. Finally, the developed practical implementation is evaluated, and the individual findings and problems that were identified during the development of the practical implementation are listed.

Keywords: Building Automation, Sensors, Laser, Time of Flight, FlightSense, VL53L3CX, CubeIDE.

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlovi Drábkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Ing. Janu Frajovi za podnětné konzultace a rady ohledně technických částí práce. Zároveň děkuji panu Pavlovi Kováčovi za trpělivost a odbornou pomoc při realizaci praktické části bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 AUTOMATIZACE</b> .....	<b>13</b>
1.1 ŘÍZENÍ.....	13
1.1.1 Rozdělení řízení .....	13
1.2 DRUHY AUTOMATIZACE .....	14
1.3 VYUŽITÍ AUTOMATIZACE .....	14
1.4 CÍLE AUTOMATIZACE .....	15
<b>2 AUTOMATIZACE BUDOV</b> .....	<b>16</b>
2.1 VÝZNAM .....	16
2.1.1 Automatizace budov v soukromé bytové výstavbě.....	16
2.1.2 Automatizace budov v účelových stavbách .....	17
2.2 TECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ BUDOV.....	17
2.3 STANDARDIZOVANÉ SBĚRNICE .....	18
<b>3 SENZORY</b> .....	<b>20</b>
3.1 INTELIGENTNÍ SENZORY .....	20
3.2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ .....	21
3.3 VLASTNOSTI SENZORŮ .....	22
3.3.1 Statické vlastnosti.....	22
3.3.2 Dynamické vlastnosti .....	23
<b>4 TIME OF FLIGHT</b> .....	<b>24</b>
4.1 PRINCIP ToF.....	24
4.2 LASER .....	25
4.2.1 Obecný princip .....	25
<b>5 FLIGHTSENSE</b> .....	<b>27</b>
5.1 LASER CLASS .....	27
5.2 PORTFOLIO FLIGHTSENSE .....	28
5.2.1 Model VL6180X a VL6180V1 .....	28
5.2.2 Model VD55H1 .....	29
5.2.3 Model VL53L0X.....	29
5.2.4 Model VL53L1CB a VL53L1CX .....	29
5.2.5 Model VL53L3CX .....	30
5.2.6 Model VL53L4CD a VL53L4CX.....	31
5.2.7 Model VL53L5CP a VL53L5CX.....	31
5.2.8 Model VL53L7CX .....	31
5.2.9 Model VL53L8CX.....	32
5.3 LOW-POWER MÓD .....	32
5.4 KOMPATIBILITA SENZORŮ .....	33
5.5 SHRUTÍ HLAVNÍCH VLASTNOSTÍ FLIGHTSENSE SENZORŮ .....	33
<b>6 ALTERNATIVNÍ SENZORY</b> .....	<b>34</b>



6.1	INDUKČNÍ SENZORY .....	34
6.2	KAPACITNÍ SENZORY .....	35
6.3	MAGNETICKÉ SENZORY .....	36
6.4	ULTRAZVUKOVÉ SENZORY .....	37
6.5	RADAROVÉ SENZORY .....	38
6.6	OPTICKÉ SENZORY .....	40
6.7	SHRnutí.....	42
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>CÍLE A PŘÍNOS PRAKTICKÉ PRÁCE .....</b>	<b>44</b>
7.1	CÍLE .....	44
7.2	PŘÍNOS .....	44
<b>8</b>	<b>VYUŽITÍ SENZORŮ FLIGHTSENSE .....</b>	<b>45</b>
8.1	SNÍMÁNÍ OBJEKTŮ .....	45
8.1.1	Oblasti využití .....	46
8.2	DETEKCE OSOB.....	47
8.2.1	Oblasti využití .....	47
8.2.2	ToF vs PIR .....	48
8.3	SNÍMÁNÍ HLADINY.....	48
8.3.1	Princip a požadavky .....	48
8.3.2	Oblasti využití .....	50
8.4	ROZPOZNÁNÍ GEST .....	50
8.4.1	Princip .....	50
8.4.2	Oblasti využití .....	51
8.4.3	Rozpoznávání gest kamerou .....	52
8.5	ROZPOZNÁNÍ OBLIČEJE.....	52
<b>9</b>	<b>VLASTNÍ NÁVRH.....</b>	<b>53</b>
9.1	POUŽITÉ TECHNOLOGIE A ZAŘÍZENÍ.....	53
9.1.1	Vývojová deska Nucelo-G071RB.....	54
9.1.2	Vývojová deska NUCLEO-F401RE .....	55
9.1.3	X-Nucleo-53L3A2 .....	55
9.1.4	STM32 CubeIDE .....	56
9.1.4.1	HAL, LL .....	56
9.1.5	X-CUBE-TOF1 .....	57
9.1.6	Graphical User Interface (GUI) VL53L3CX .....	57
9.1.7	Tera Term.....	57
9.2	PŘÍPRAVA.....	58
9.3	DETEKCE OBJEKTU SE SVĚTELNOU SIGNALIZACÍ .....	61
9.4	KALIBRACE SENZORU .....	63
9.4.1	Zapnutí kalibrace pomocí tlačítka.....	67
9.4.2	Kalibrace pomocí GUI .....	69
9.5	DETEKCE JEDNODUCHÝCH GEST.....	70
9.5.1	Princip .....	71
9.5.2	Realizace detekce gest.....	72
9.5.2.1	Zapojení a rozsvícení LED diod .....	74

9.5.3	Možnosti vylepšení do budoucna.....	75
<b>10</b>	<b>HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRAKTICKÉ REALIZACE.....</b>	<b>76</b>
10.1	DETEKCE OBJEKTU .....	77
10.2	DETEKCE GEST .....	77
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>79</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>81</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>87</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>89</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>92</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>93</b>

## ÚVOD

Provoz budov představuje velmi významnou položku z celkové spotřeby energie na světě. Otázka snížení energetické náročnosti budov je řešena celou řadou let a je zanesena v různých směrnících na nadnárodní úrovni. V průběhu posledních 20 let docházelo postupně ke zlepšení tepelně izolačních parametrů obálky budov, integrace různých technologických systémů, optimalizace jejich řídicí logiky a vzdělávání samotných provozovatelů. Všeobecně známou snahou těchto kroků je zajištění adekvátního vnitřního mikroklimatu v budovách za vstupu co nejmenšího množství energie. Nově vystavované budovy či stavby po kompletní rekonstrukci již splňují kritéria pasivních či nZEB standardů, což znamená, že využívají poměrně efektivní systémy pro úpravu vnitřního prostředí. Nicméně prostor pro zlepšení je stále vidět v oblasti manuálního řízení technologických systémů či jiných spotřebičů v budově. Vedle tlačítkových zařízení nebo možností ovládní hlasem se do kurzu dostávají alternativy v podobě gest, či jiných signálů od lidí nebo zvířat. Tyto nové způsoby si berou za cíl zjednodušit proces ovládní, upravovat například množství přiváděného čerstvého vzduchu podle počtu osob, případně automaticky vyhodnocovat kritické situace ve snímaném prostoru, například pád osoby apod.

Tohoto trendu si všímají i světoví lídři zabývající se vývojem a výrobou jednotlivých prvků do automatizace budov. Jedno z nich je i společnost Schneider Electric, která v oblasti automatizace budov působí, a která byla i iniciátorem tématu této bakalářské práce. Hlavním tématem této práce jsou senzory Time of Flight (dále jen ToF) a jejich možnosti využití v automatizaci budov.

V práci jsou popsány základní pojmy a principy týkající se laserového měření a technologie Time of Flight. Dále jsou popsány technické specifikace jednotlivých senzorů z rodiny FlightSense, které se v době zpracování bakalářské práce nacházejí na trhu. Teoretická část je v závěru věnována popisu principu a srovnání vlastností alternativních senzorů, které by mohly být používány v automatizaci budov.

Praktická část je nejprve věnována zmapování možných využití ToF senzorů FlightSense v oblasti automatizace budov. Poté je řešeno naprogramování ToF senzoru na detekci vzdálenosti objektu a detekci jednoduchých gest. V průběhu práce se senzorem byly objeveny různé výzvy a poznatky, kde hlavním tématem je komplikace v podobě „crosstalku“ a „offsetu“.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 AUTOMATIZACE

Pojem automatizace se zabývá řízením systémů a procesů za účelem omezení potřeby zapojení lidského prvku. Pomocí automatizace by měl být navržen takový systém, který je schopen operovat s technologickými zařízeními bez nutnosti zásahu člověka. Napomáhá celkovému zrychlení cyklických činností a taky přispívá k jejímu celkovému zefektivnění. [1]

### 1.1 Řízení

Řízení je základem pro automatizaci, což lze chápat jako proces, kdy za pomoci vstupních řídicích signálů je ovlivňován řízený proces, což vede k dosažení požadovaného cíle. Vědní disciplína zabývající se obecnými principy řízení a přenosu informace se nazývá Kybernetika. Tuto disciplínu lze rozdělit na teoretickou kybernetiku a aplikovanou kybernetiku. Z hlediska automatizace se lze zaměřit na část teoretickou, kde automatizaci popisují další jednotlivá rozdělení, jedná se převážně o teorii řízení, teorii informace či teorii systémů. [2]

Teorie řízení zahrnuje zkoumání obecných vlastností a zákonitostí řízení. Teorie informace se zabývá tím, co se s informací získané řízením děje. Jedná se o její zpracování, využití a přenos. Vzhledem k tomu že všechny kybernetické děje probíhají uvnitř systému, využívá se znalostí teorie systémů. Pro automatizaci je nejvíce důležitá teorie řízení, která v této souvislosti může být také pojmenovaná jako teorie automatického řízení. [2]

#### 1.1.1 Rozdělení řízení

Řízení lze rozdělit na řízení ruční (kdy je potřeba přímého kontaktu člověka s řídicím systémem) a automatické (např. autopilot). [2]

V automatizaci je řízení rozděleno také na přímé a nepřímé. Přičemž u přímého řízení probíhá řízení bez přívodu energie. Naopak u nepřímého řízení, která v automatizaci převažuje, je potřeba přívodu energie. [2]

Dalším důležitým dělením v automatizaci je dělení podle zpětné kontroly řízení. Podle zpětné vazby lze řízení rozdělit na:

- ovládání je druh řízení, při kterém nedochází ke zpětné kontrole (není zde zpětná vazba),
- regulace je založena na udržování nebo pozměňování veličiny na požadovanou hodnotu, při tomto druhu řízení je zpětná vazba nutností,
- vyšší formu řízení. [3]

Mezi vyšší formu řízení se řadí optimální řízení, adaptivní řízení a umělá inteligence.

Optimální řízení je velice účinné a velmi rychlé. Jehož cílem je najít co nejefektivnější způsob řízení s ohledem na minimalizování využití energie. V adaptivním řízení je systém schopen, kromě optimálního řízení, také přizpůsobit se na změny v systému. Systém s umělou inteligencí dokáže vytvářet modely na základě zpracovávaných objektů, dokáže rozpoznat vztahy mezi objekty a predikovat jejich budoucí stavy. Tento systém je na základě získaných dat, které během procesu řízení dostává, schopen zdokonalovat svou činnost. [3]

## 1.2 Druhy automatizace

Samotnou automatizaci lze rozdělit do dvou obsáhlých skupin, tyto skupinou se dělí podle typu procesů, které jsou prováděny.

- První skupinou je automatizace výrobních procesů, kde se nachází veškerá odvětví, ve kterých je výsledkem výroby určitý produkt (např. procesy ve strojírenství, potravinářství, v důlním, stavebním nebo automobilovém průmyslu).
- Druhá skupina se týká automatizace nevýrobních procesů. Tato skupina se může dále členit na služby veřejné (kam patří obrana a bezpečnost státu, zdravotnictví, školství, peněžní ústavy) a soukromé (jako telekomunikační služby nebo prostředky masových medií). [4][5]

Automatizaci lze dále rozdělit podle způsobu zapojení člověka do samotného procesu. Buď zde člověk figuruje v rámci samotného plánování a navrhování a poté je samotný proces zcela zautomatizován, jedná se o automatizaci komplexní. Pokud je proces jen z části zautomatizován a existují úseky, ve kterých je potřeba zásahu člověka, mluví se o automatizaci částečné. [4][5]

Posledním širším rozdělením automatizace je rozdělení podle možnosti záměny účelu samotného automatizovaného systému. Pokud je systém dělaný na určitý proces a nelze ho změnit nebo popř. jen velmi nákladně, jedná se o nepružnou (také tvrdou) automatizaci. Pokud je samotná změna programu na jiný účel snadná, tedy s minimálními náklady, jde o automatizaci pružnou. [4][5]

## 1.3 Využití automatizace

Využití automatizace je široké a ve většině odvětví najde své uplatnění. Tento fakt však neznamená, že kvůli automatizace přišlo nebo přijde mnoho lidí o svou práci, jak by se na

první pohled mohlo zdát. Automatizace jako taková nahradí a předstihne v mnoha ohledech člověka, avšak bez lidí by vůbec nemohla vzniknout a fungovat. Vznik automatizace přispěl k vytvoření mnoha nových oborů, odvětví, a tudíž i pracovních pozic. [6]

Mezi hlavní odvětví, kde se automatizace využívá patří:

- Výrobní automatizace – zde patří např. potravinářský, farmaceutický, potravinářský, automobilový průmysl atd. Automatizované systémy zde nahrazují manuální a repetitivní práci člověka.
- Automatizace transportace – zahrnuje automobilový, letecký a vlakový průmysl.
- V oblasti zabezpečení – může se jednat o zabezpečení státu z hlediska okolních hrozeb nebo řešení vnitřních hrozeb, také zabezpečení v kyberprostoru.
- Veřejné služby – služby infrastruktury státu, řešení odpadní vody, elektrické energie telekomunikační služby.
- Automatizace budov – Residenční i neresidenční. Řeší především zabezpečení, vliv na životní prostředí, energetickou spotřebu a komfort. Tomuto tématu se níže věnuje kapitola 2.
- A další. [7]

#### 1.4 Cíle automatizace

Mezi hlavní cíle automatizace patří zjednodušení složitých procesů, zefektivnění a zrychlení repetitivních úkonů. Z průmyslu je zřejmé, že se dnes automatizace využívá převážně ve stereotypních pracovních oblastech. Velkou motivací firem je především škálovatelnost systému, méně lidských selhání, zkvalitnění a zrychlení výroby, což obecně vede ke zvýšení zisku. Dalším aspektem je samotná bezpečnost práce, kdy výrobní zařízení či montážní linky mohou pracovat neustále, přesně, a to i v extrémních podmínkách. [8]

Lze tedy říci, že hlavní benefity využití automatizace ve výrobním sektoru jsou:

- Zvýšení produktivity a bezpečnosti,
- Zlepšení kvality,
- Snížení nákladů,
- Větší flexibilita a škálovatelnost,
- Možnost sledování stavu a analýza dat. [9]

## 2 AUTOMATIZACE BUDOV

S vývojem moderních technologií a jejich postupným využíváním na poli automatizace došlo ke vzniku nového významného oboru, kterým je automatizace budov. V oblasti automatizace budov se lze také setkat s termínem „systémové techniky budov“. Podle definice: „*Automatizace budov je digitální měřicí, kontrolní, regulační a řídicí technika pro technické vybavení budov.*“ [10] Dle této definice lze říci, že automatizace budov je pojem nadřazený a obecnější, přičemž v sobě obsahuje i termín systémové techniky budov. Systémové techniky budov provádějí určitou část automatizace budov, a to především elektroinstalací. A popisují propojení jednotlivých zařízení v budově. [10]

### 2.1 Význam

Automatizované budovy neboli inteligentní budovy začaly nabývat na významu se zvyšováním různých nároků uživatelů, jedná se především o samotné pohodlí, bezpečnost nebo celkovou hospodárnost budovy. Ke vzniku automatizovaných budov přispěl rapidní vývoj digitálních technologií. Hlavní účel automatizace budov se mění podle samotného typu objektu. Z hlediska automatizace budov lze objekty rozdělit do dvou skupin, a to na automatizaci budov v soukromé bytové výstavbě a automatizaci budov v účelových stavbách. [10]

#### 2.1.1 Automatizace budov v soukromé bytové výstavbě

První skupinou jsou budovy v soukromé bytové výstavbě. Zde se již řada automatizovaných funkcí stala samozřejmostí v běžných bytových objektech. Funkce jako regulace spotřeby energie, se kterými se lze setkat v podobě systémů pro regulaci teploty s časovači nebo s jinými funkcemi např. nočním režimem pro snížení spotřeby. [10]

Další široce využívanou automatizační funkcí je řízení osvětlení. Jedná se o samočinné osvětlení, které sepne při vstupu osoby do společných chodeb v soukromém objektu, a to jen v případě, je-li dostatečně šero. Mezi stále více rozšiřovanou funkcí v oblasti automatizace budov patří zabezpečení, které může být realizováno jednotlivými detektory nebo požárními hlásiči, které v případě detekování neobvykle situace spustí alarm. [10]

Lze tedy říci, že v případě automatizace budov v soukromé bytové výstavbě patří mezi hlavní funkce hospodárnost a úspora energií, pohodlí a bezpečnost. [10]



### 2.1.2 Automatizace budov v účelových stavbách

Ve skupině budov s názvem účelové stavby se nacházejí budovy s určitým funkčním zaměřením (např. kancelářské prostory, obchodní centra, nemocnice, průmyslové budovy atd.) a jedná se tedy o podnikatelsky provozované objekty. Tyto typy budov jsou vybaveny technologiemi pro výrobu tepla a energie, jejich následnou úpravu a distribuci do vnitřních prostor a míst spotřeby. S těmito systémy, které jsou schopny regulovat teplotu v jednotlivých místnostech automaticky, se optimalizuje spotřeba energií a také se zlepšují mikroklimatické podmínky ve vnitřním prostředí. [10]

Důležitým aspektem, jež se musí řešit v účelových stavbách, je flexibilita samotného objektu. Schopnost přizpůsobení objektu na možnou změnu (např. kde jsou dnes kanceláře, tam může být v budoucnu konferenční místnost). Tudíž se klade důraz na způsob propojení jednotlivých komponent, aby jejich případná změna mohla být provedena přeprogramováním inteligentních komponent. Podle toho je v účelových budovách kladen důraz především na efektivitu provozu a úsporu energií, komfortu a celkovou flexibilitu systému. [10]

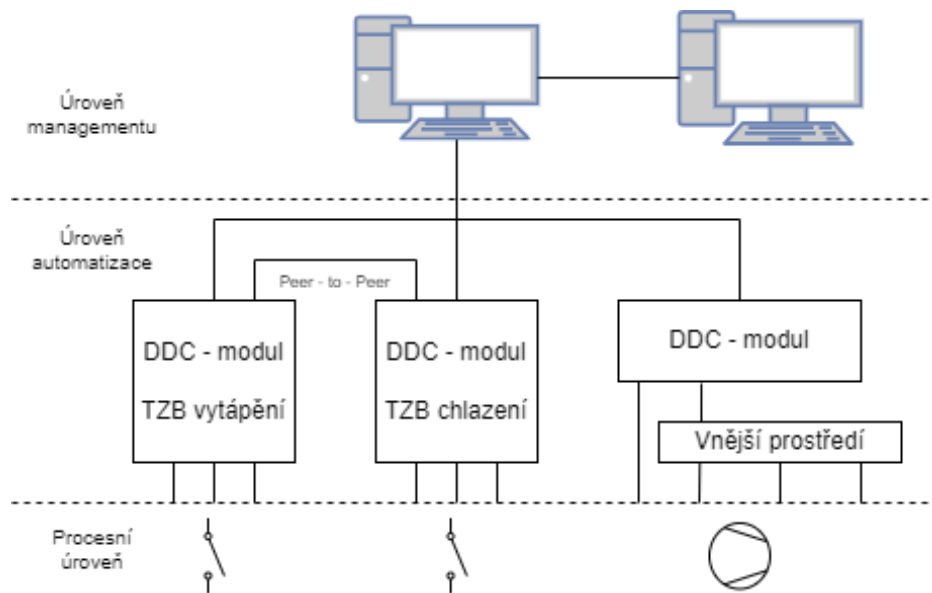
## 2.2 Technická zařízení budov

Mezi základní automatizační prvky patří snímače, akční členy, regulátory, zdroje, ovládající a monitorovací prvky. Většina těchto zařízení pracují decentralizovaně, tudíž inteligence samotného systému je distribuována do jednotlivých zařízení. Aby tato zařízení mohla správně fungovat, musí být propojena pomocí provozní sběrnice a sítě. [10]

Technická vybavení obsahují veškerá zařízení, která jsou potřeba k provozu budov. Mezi technická zařízení budov se řadí taková zařízení, která účelně upravují vnitřní prostředí z hlediska teploty, přísunu čerstvého vzduchu, vody, osvětlení a el. energie. Dále se jedná o zařízení určená pro kanalizaci a odpadní vodu nebo výtahy. Pro automatické ovládání musí být tato zařízení vybavena regulačními a řídicími moduly. Dodavatelé těchto zařízení dodávají společně se s ním také příslušnou monitorovací a řídicí jednotku tzv. DDC modul (Direct Digital Control). [10][11]

Pro sjednocení technických zařízení s informačními je nutno přesné definování rozhraní mezi jednotlivými technickými zařízeními budov. Díky automatizaci budov lze integrovat jednotlivá zařízení budov do jednoho celku (viz Obr. 1), které je poté možno centrálně ovládat z jednoho řídicího počítače. Jedná se o úroveň managementu. Na úrovni automatizace jsou jednotlivé DDC moduly, kde zároveň mezi jednotlivými moduly probíhá komunikace

typu Peer-to-Peer. Samotné moduly jsou připojeny k řídicímu počítači a ovládají jednotlivé elektronické prvky jako jsou spínače, senzory, čidla, akční členy nebo ovladače, tyto prvky se nacházejí na úrovni procesní. [10][11]



Obrázek 1 úrovně zařízení automatizace budov, upraveno z [10]

### 2.3 Standardizované sběrnice

K zjednodušení integrace všech technických zařízení v rámci jedné budovy napomáhají standardizované komunikační propojení mezi zařízeními. Přenos informací mezi jednotlivými zařízeními je řešeno pomocí sběrnic. Hlavním úkolem bylo propojení jednotlivých DDC modulů mezi sebou na automatizační úrovni. Poté zbývalo vyřešit jejich propojení s procesní úrovní a úrovní managementu (viz Obr. 1). [10][12]

Při navýšení poptávky automatizovaných budov se naskytl problém, který byl v propojení více zařízení různých výrobců, protože zařízení jednotlivých výrobců disponovala vlastní sběrnici, které komunikovaly rozdílnými komunikačními protokoly. Kvůli postupnému zvyšování složitosti systémů se časem zrodil návrh otevřených systémů s jednotným komunikačním protokolem. [10]

Jen málo nabízených sběrnic na trhu techniky pro automatizaci se stalo standardizovanými. Jednotlivé standardizované sběrnice se liší pro každou úroveň v automatizaci budov (viz Obrázek 1). Pro každou úroveň automatizace budov je jiný typ sběrnice, především kvůli rozdílným požadavkům na vlastnosti jednotlivých sběrnic. [10]

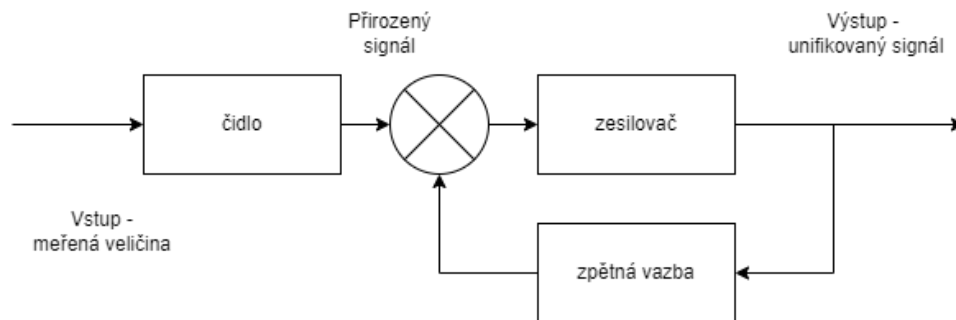
Pro úroveň procesní se využívá technologie univerzálního automatizačního systému LONWORKS. Kde použité zařízení a přístroje disponují vlastní distribuovanou inteligencí, pro tuto techniku se využívá zkratka LON. Dalšími sběrnici pro procesní úroveň jsou EIB a EHS, které jsou integrovány v Asociaci KNX. KNX/EIB je evropská instalační sběrnice využívaná k propojení zařízení jako jsou snímače, akční členy, regulační a řídicí zařízení atd. Sběrnice M-bus je určena pro sběr dat z měřičů odběru různých medií (např. užitkové vody, plynu nebo tepla), funguje na principu master-slave. Kde „master“ vysílá požadavky a přijímá data od účastníků „slave“. [10][13]

Na automatizační úrovni je využívána sběrnice BACnet (Building Automation and Control Network), která představuje protokol, kde si mohou jednotlivá zařízení mezi sebou vzájemně vyměňovat informace. Základním úkolem této sběrnice je formulace popisu základních funkcí všech dostupných zařízení. Přenos zpráv pomocí protokolu BACnet je prováděn prostřednictvím ethernetu. Tento v současnosti je nejvyužívanějším protokolem. Je označován jako BACnet/IP, tuto technologii využívá také protokol KNX.net/IP. Přenos zpráv může být proveden pomocí sběrnice RS-485, kde komunikace může probíhat např. typem master-slave. Dalšími sběrnici jsou např. FIP a Profibus. [10][13]

Na úrovni managementu se využívá taktéž protokol BACnet anebo protokol Modbus, který umožňuje přenášet data po různých sběrnících a sítích. Komunikace probíhá typem master-slave. [10][13]

### 3 SENZORY

Senzory patří mezi základní prvky automatizace, jsou schopny analyzovat a předávat systému informace ohledně stavu a činnosti všech zapojených technických zařízení. Základním prvkem senzoru je čidlo, které snímá kontrolovanou veličinu a převádí tuto veličinu na signál. Ten se přes zesilovač dostane na výstup jako unifikovaný signál, který může být dále zpracován vyhodnocovací elektronikou (viz Obr. 2). [14][15]



Obrázek 2 schéma senzoru, upraveno z [14]

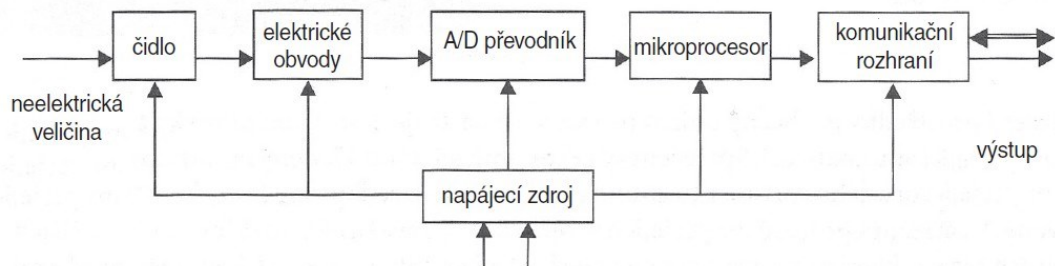
Základní senzory, jinak označované také jako snímače, převodníky či detektory, jsou zařízení, která převádí snímanou vstupní veličinu na požadovanou výstupní veličinu. Senzor snímá měřenou veličinu pomocí čidla. Snímaná veličina může být fyzikálního, chemického či biologického charakteru. Po nasnímání ji podle definovaného principu převede na výstupní veličinu, která je ve většině případů ve formě elektrického signálu. [15][16]

#### 3.1 Inteligentní senzory

Novějším typem senzorů jsou tzv. inteligentní senzory (viz Obr. 3). Tento typ senzorů v dnešní době převažuje nad klasickými senzory. Jsou charakteristické tím, že v jednom kompaktním integrovaném zařízení obsahují veškerou elektroniku pro zpracování měřené veličiny. V některých typech senzorů je možné, že se samotné čidlo nenachází ve stejném těle jako zbytek senzoru. Tyto části mohou být propojeny např. optickým vláknem. Senzory obsahují:

- Čidlo – „převod fyzikální, chemické, biologické veličiny na elektrickou, zesílení a filtrace signálu, linearizace statické charakteristiky, normování signálu, přepínání více vstupních veličin s adresací v řadě a ve smyčce, ochrana proti nežádoucím působení parazitních veličin apod.“ [16]
- A/D převodník – zajišťuje převod analogového signálu na digitální (číslicový signál).

- Mikroprocesor – je schopen běžných aritmetických operací, vyhodnocuje naměřená data, zaznamenává mezivýsledky, komunikuje se vzdáleným rozhraním.
- Komunikační rozhraní – unifikovaný signál je na výstupu přenášen pomocí vybraného komunikačního rozhraní. [16]



Obrázek 3 schéma inteligentního senzoru [17]

### 3.2 Rozdělení senzorů

Způsobů, jak rozdělit senzory je mnoho. Jedno rozdělení, které již bylo zmíněno, je dělení na klasické a inteligentní senzory. Dále jsou senzory přímé, kde je snímaná veličina i na výstupu senzoru a nepřímé senzory, kde je výstupní signál úměrný snímané veličině. Rozdělit je také možné podle typu výstupního signálu, v tomto rozdělení jsou 3 skupiny:

- Binární – mají binární výstup, jedná se tedy o 2 stavové senzory. Např. je kontakt sepnut/rozpojen, úroveň napětí je 0 V nebo 10 V.
- Číslkové (digitální) – na výstupu je číslkový kód snímané veličiny.
- Analogové – na výstupu není digitalizovaný signál a je tudíž spojitý. [18]

Senzory lze dělit podle principu měřených veličin:

Snímače kinematických veličin (tj. poloha, rychlost ...):

- *„Odporové – potenciometry – předmět, jehož polohu měříme, je spojen s běžcem potenciometru. Podle polohy předmětu běžce se mění elektrický odpor. Dále je dělíme na posuvné potenciometry – měří délkový přírůstek a otočné potenciometry – měří úhlový přírůstek;*
- *Kapacitní – změna polohy se u kapacitních snímačů projeví změnou kapacity vlivem změny vzdálenosti elektrod  $d$ , změnou plochy elektrod  $S$  nebo změnou permitivity dielektrika např. měření tloušťky laku;*
- *Indukčnostní – změna polohy se projeví změnou vlastní indukčnosti  $L$ ;*

- *Optické – nejčastěji binární senzory, které sledují přítomnost objektu, který při dosažení určité vzdálenosti přeruší příjem světelného paprsku. Dále se používají laserové senzory, které měří čas odrazu paprsku a podle toho vyhodnotí vzdálenost;*
- *Ultrazvukové – měří se doba, mezi vysláním ultrazvukového signálu a přijetí signálu odraženého od zaměřovaného objektu;*
- *Magnetické – měření otáček pomocí pulsů, tachodynamy, tachalternátory“. [18]*

Dalšími skupinami jsou snímače pro měření síly a tlaku, snímače průtoku, snímače teploty a snímače optických veličin. [18]

V poslední řadě lze senzory také rozdělit podle principu jejich činnosti. Senzory aktivní jsou zdrojem elektrické energie (ve formě např. indukční, termoelektrické, piezoelektrické...), tyto senzory potřebují ke svému fungování externí zdroj energie. [18]

Senzory pasivní mění své vlastnosti (kapacitu, indukčnost, elektrický odpor...) podle charakteru měřené veličiny. Tudíž generují elektrický proud v souvislosti s externími vlivy. [18]

### 3.3 Vlastnosti senzorů

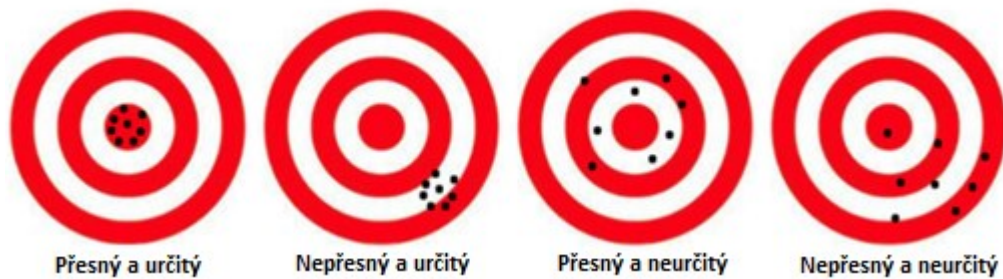
Důležitým hlediskem, které se zohledňuje při výběru senzorů, jsou jejich technické vlastnosti, tedy parametry senzorů. Tyto vlastnosti lze rozdělit do dvou skupin, a to na statické a dynamické parametry. [19]

#### 3.3.1 Statické vlastnosti

Statické vlastnosti vyjadřují chování senzorů v ustáleném časovém stavu. Mezi tyto vlastnosti patří citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah, přesnost a určitost, reprodukovatelnost, rozlišitelnost, aditivní a multiplikační chyby, linearita a hystereze. Nejzásadnější statickou vlastností je statická přenosová charakteristika, která představuje závislost mezi vstupní (nezávislou) veličinou a výstupní (závislou) veličinou v ustáleném stavu. Statické vlastnosti se vyjadřují algebraickými rovnicemi.

- Citlivost představuje schopnost odpovědět na změnu sledovaného parametru.
- Práh citlivosti je dán snímanou fyzikální veličinou, jedná se o nejmenší možnou hodnotu, kterou je senzor schopen detekovat.
- Dynamický rozsah senzoru je interval, ve kterém je senzor schopen snímat. Tento interval je dán prahem citlivosti (dolní mez) a maximální hodnotou měřené veličiny.
- Přesnost je rozdíl mezi skutečnou hodnotou veličiny a její naměřenou hodnotou. [22]

- Určitost představuje malý rozdíl mezi naměřenými hodnotami. Rozdíl mezi přesností a určitostí je zobrazen na Obrázku 4. [20]



Obrázek 4 rozdíl mezi přesností a určitostí [21]

- „Reprodukovatelnost senzoru je dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobém časovém sledu měření neměnné vstupní veličiny a neměnných rušivých vlivů okolí.“ [19]
- Rozlišitelnost senzoru je nejmenší zaznamenanatelná změna veličiny.
- „Aditivní chyba se projevuje posunem jmenovité lineární charakteristiky.“ [19]
- „Multiplikativní chyba je ekvivalentní změna citlivosti senzoru. Je závislá na hodnotě měřené veličiny.“ [19]
- Hystereze označuje největší odchylku mezi naměřenými hodnotami při konkrétním měřeném rozsahu. [19][22]

### 3.3.2 Dynamické vlastnosti

„Měřená hodnota fyzikální nebo jiné veličiny se neustále mění s časem. Sensory zařazené v regulačních smyčkách nebo indikující mezní stavy procesu musí být navrženy tak, aby výstupní signál sledoval s minimálním zkreslením vstupní signál. Dynamické vlastnosti senzorů se popisují lineárními rovnicemi s konstantními koeficienty.“ [19]

Pokud není rovnice lineární, je nutné sledovat dynamické chování jen na lineárních úsecích. Do dynamických vlastností lze zahrnout časovou konstantu, šíření frekvenčního pásma, parametry časové odezvy, rychlost číslicového přenosu a parametry šumu. [22]

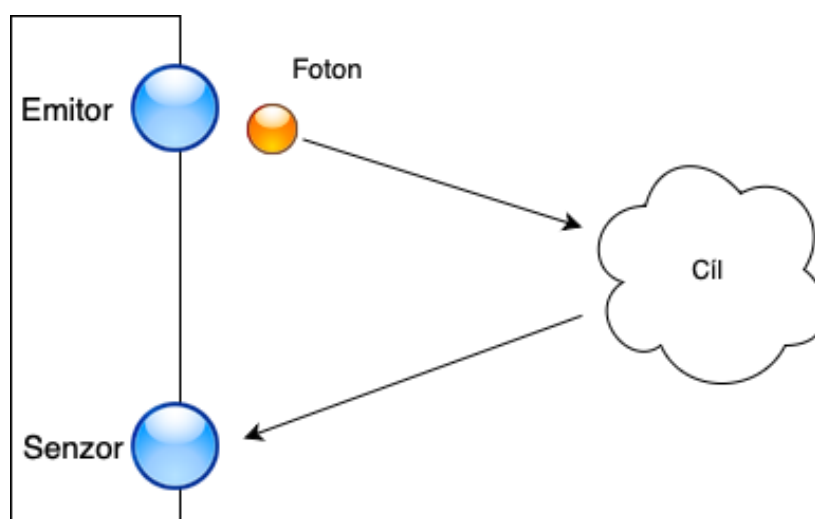
Dynamické vlastnosti se popisují např. frekvenční charakteristikou, která v závislosti na frekvenci vyjadřuje rozdíl amplitudy a fáze výstupního signálu vůči signálu vstupnímu. Časové parametry, jako časovou konstantu a jiné, lze určit z přechodové charakteristiky. Přechodová charakteristika je závislost mezi vstupní veličinou a čase při skokové změně vstupní veličiny. [23]

## 4 TIME OF FLIGHT

Technologie Time of Flight, česky jako "čas letu", se využívá v optických senzorech, především v optoelektronických a fotoelektronických typech. Tato technologie je však také využívána v ultrazvukových senzorech. Využití optických senzorů je především v automatizaci. „Při montážních technologiích jsou využívány v jednoduchých binárních aplikacích, bezpečnostních aplikacích, inspekčních úlohách během výroby, ale i v náročných měřicích a kontrolních úlohách na konci výrobního procesu.“ [15] Na rozdíl od jednoduchých binárních senzorů, které jsou schopny např. detekovat přítomnost objektu nebo jiný typ úlohy, kde na výstupu může být pouze binární výstup 1 nebo 0, senzory využívající technologii ToF snímají především kinematické veličiny (jako polohu objektů, hlídání hladin nebo kontrola plnění). [15]

### 4.1 Princip ToF

ToF senzory mají aktivní část senzoru, tedy emitör, který v tomto případě zastupuje laserová dioda VCSEL (vertical cavity surface emitting laser). Laser vysílá elektromagnetické záření, tedy úzký svazek fotonů do okolí. Tyto fotony dopadají a odrážejí se od měřeného objektu. Odrážené fotony se vracejí zpět na druhou část senzoru (pasivní část), která je reprezentována samotným čidlem (viz Obr. 5) označovaným jako SPAD (Single Photon Avalanche Diode). SPAD je fotodioda schopná zaznamenávat i jednotlivé fotony se zpožděním v řádech piko sekund. Na základě tohoto principu je senzor schopen velice přesně změřit vzdálenost objektu od senzoru v milimetrech. [24][25]



Obrázek 5 princip ToF technologie, upraveno z [25]



Výsledná vzdálenost je vypočítaná podle vzorce níže. Vzdálenost je rovna rychlosti světla, která je přesně 299 792 458 m/s [26], rychlost světla je vynásobena dobou, za jakou jeden foton urazil dráhu od emitoru k měřenému objektu a zpátky na senzor. Výsledek je na závěr vydělen dvěma. Senzory pracují ve velmi vysoké frekvenci. Čas uražené dráhy fotonu pro objekt vzdálený 1 cm je 67 ps. [25]

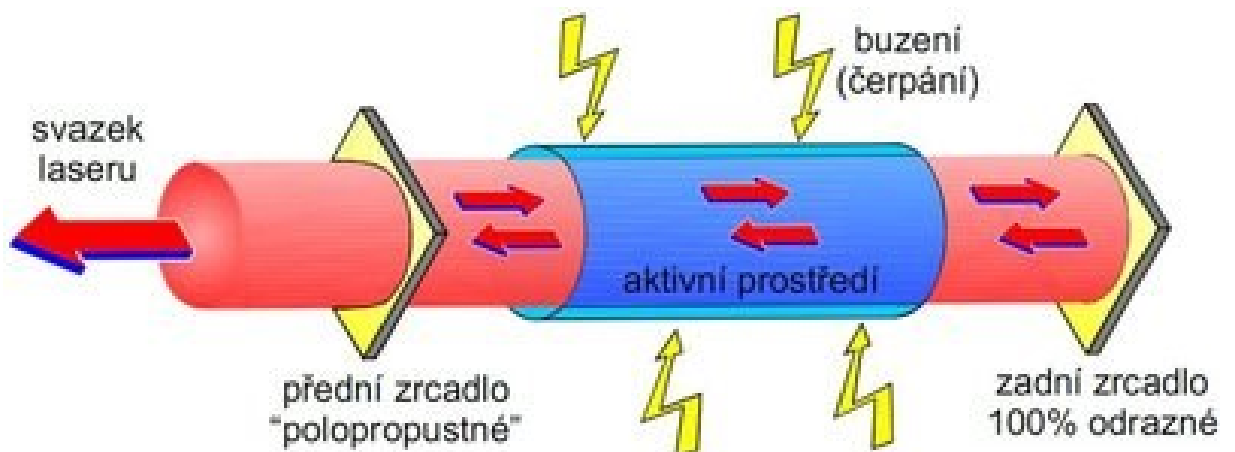
$$\text{vzdálenost} = \frac{\text{rychlost světla} * \text{čas}}{2}$$

## 4.2 Laser

Laser je obecně označován jako optický zesilovač. Základní vlastností laseru je emitování koherentního a monochromatického elektromagnetického záření neboli světla. Koherentní vlnění je takové vlnění, které má stejnou frekvenci, stejnou fázi a stejný směr kmitání. Monochromatické vlnění je takové vlnění, která má pouze jednu frekvenci, tudíž jednu vlnovou délku. Může se také skládat z velmi úzkého výběru kmitočtu. Obecně světlo, se kterým se lze denně setkat je složeno z různých vlnových délek z celého spektra elektromagnetického záření. [15]

### 4.2.1 Obecný princip

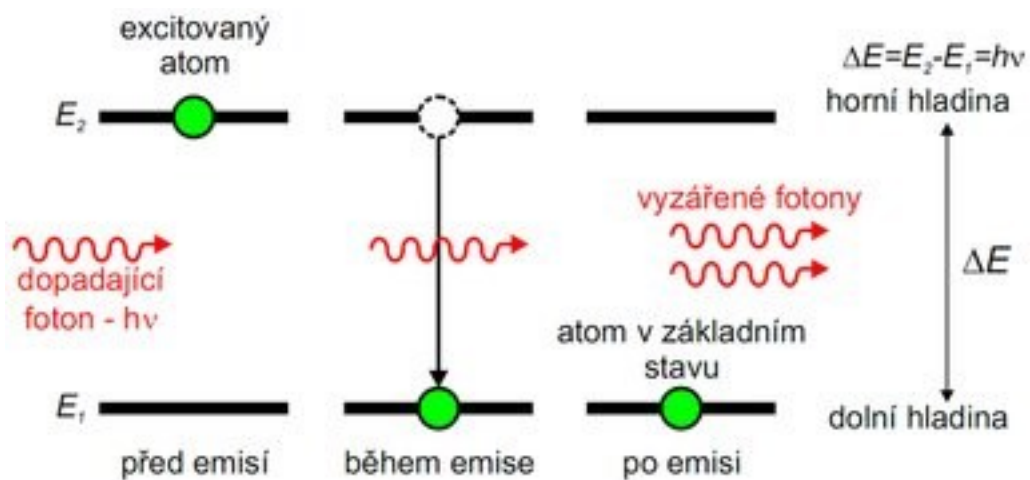
Základem pro funkci laseru je aktivní prostředí, které je buzeno (elektricky, opticky atd.). Buzení je proces, při kterém je do laseru dodávána energie, která je poté uvolňována ve formě laserového paprsku pomocí stimulované emise. K tomuto jevu napomáhá nejčastěji odrazná zrcadla, která slouží jako tzv. optický rezonátor, s tím že zadní zrcadlo je nepropustné a přední je polopropustné. (viz Obr. 6). [27]



Obrázek 6 princip laseru [27]

V aktivním prostředí se nachází element (nejčastěji atom), který může existovat ve dvou různých stavech. V základním stavu s nižší energií nebo ve excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tyto elementy vyzařují fotony, pokud přecházejí s energeticky vyššího stavu na energeticky nižší. Prostředí má vždy snahu být v tzv. termodynamické rovnováze, a má tedy aktivní snahu být v co nejnižším energetickém stavu. Proto se jednotlivé elementy v tomto prostředí náhodně vracejí zpět z vybuzeného stavu do základního stavu. Díky buzení, dodávání externí energie do aktivního prostředí, se tento stav rovnováhy naruší a většina elementů přejde do vyššího energetického stavu, přičemž aktivní prostředí přechází do excitovaného stavu. [15][27]

Stimulovanou emisí (viz Obr. 7) je možné transformovat dodanou energii aktivního prostředí do proudícího toku fotonů, který se stává požadovaný laserový paprskem. Foton dopadá na excitovaný atom (nachází se ve vyšším energetickém stavu), to stimuluje atom k přechodu na nižší energetický stav a během tohoto přechodu atom vyzáří další foton. Tento lavinový efektu se stále opakuje. [27]



Obrázek 7 princip procesu stimulované emise [27]

Jednotlivé fotony putují v optickém rezonátoru, tedy od zadního nepropustného zrcadla k druhému polopropustnému zrcadlu, které část fotonů odrazí nazpátek a část propouští. Fotony během této cesty generují stále více fotonů a jejich počet rapidně narůstá. [27]

## 5 FLIGHTSENSE

FlightSense je technologie od firmy STMicroelectronics. Firma ST pracuje na technologii FlightSense přibližně od roku 2015. Nasbírané zkušenosti s technologií ToF napomáhají skutečnosti, že produkty firmy FlightSense se momentálně nachází mezi nejlepšími senzory ToF a jsou světovou jedničkou mezi dodavateli těchto senzorů. [25]

Mezi hlavní výhody FlightSense senzorů patří schopnost určit skutečnou vzdálenost mezi objektem, a navíc je schopna zaznamenat a změřit vzdálenost objektu nezávisle na jeho velikosti, barvě nebo odrazivosti. Měření výsledné vzdálenosti probíhá za velmi krátký čas a samotný senzor je velice přesný. Veškeré funkční prvky jsou integrovány do jednoho „těla“, což napomáhá ke snazšímu ovládání. Senzory mají velice nízkou spotřebu energie a využívané elektromagnetické záření má vlnovou délku 940 nm, což znamená, že je pro lidské oko neviditelné. Většina těchto výhod vychází ze samotného principu technologie Time of Flight (viz Kapitola 4.1). [25]

Společnost ST má patentovaný histogramový algoritmus, který slouží k zachycení vzdálenosti vícero objektů a taktéž napomáhá ke zvýšení celkové přesnosti a rychlosti snímání senzorů. Díky patentovanému algoritmu jsou senzory schopny lépe pracovat v horších okolních podmínkách jako např. ve znečištěném průmyslovém prostředí. Díky algoritmu jsou odolnější vůči přeslechům vlivem vrstvy krycího skla a také mají lepší dosah za vlivu okolního osvětlení. Jsou plně imunní vůči zamazání krycího sklíčka nečistotami při snímání objektu nad 60 cm, a při snímání pod 60 cm lze vzniklé přeslechy vykompenzovat programově. [25]

Senzory FlightSense mají široké spektrum využití, které pokrývá vícero odvětví. Návrhy využití ToF senzorů, které se nacházejí v portfoliu FlightSense budou rozebrány v následujících kapitolách. [25]

### 5.1 Laser Class

Lasery jsou klasifikované podle možného poškození oka, protože oko je nejcitlivější na poškození od laserového paprsku. Třídy bezpečnosti se dělí do 4 skupin, od nejbezpečnější skupiny „Class 1“ po „Class 4“. Riziko poranění očí se zvyšuje s rostoucím výkonem samotného laseru a délkou vystavení oka laseru. [28]

Dle normy je definován limit přístupné emise (accessible emission limit – AEL), která je povolena v rámci každé třídy. Pokud laser překračuje AEL dané třídy, je zařazen do vyšší

třídy. Limity přístupné emise jsou vyvozeny z testování jednotlivých rozmezí vlnových délek a po určitou dobu trvání vyzařování. [29]

Všechny FlightSense senzory disponují certifikací Laser Class 1 podle standardu IEC 60825-1:2014, která se týká bezpečnosti výrobků s laserem, který vyzařuje záření v rozsahu vlnové délky od 180 nm až 1 mm. Tato certifikace garantuje, že všechny výrobky vykazují za splněných podmínek garantované chování. Mezi zmíněné podmínky patří následující body. „*Výstupní výkon laseru se nesmí zvyšovat žádným způsobem, včetně firmwaru a hardwaru. K výrobku nesmí být přidána zvětšovací čočka. Senzory ToF by měly být ve spotřebním výrobku namontovány pod sklem/plastem tak, aby k nim uživatel neměl fyzický přístup bez specializovaného nástroje.*“ [30][31]

## 5.2 Portfolio FlightSense

Firma ST má nyní v portfoliu FlightSense 13 senzorů. V nabídce se nacházejí senzory od nejstarší generace 1 až po nejnovější generaci 4. Každý senzor je unikátní a disponuje jinými vlastnostmi, což znamená, že také využití jednotlivých senzorů je odlišné. Dále budou popsány odlišující se technické vlastnosti jednotlivých senzorů. Všechny tyto senzory jsou volně dostupné k prodeji a jsou popsány chronologicky podle data jejich představení. [32]

### 5.2.1 Model VL6180X a VL6180V1

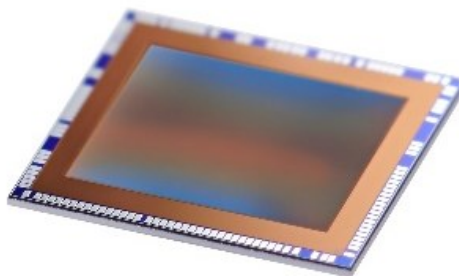
Jedná se o první generaci ToF senzorů FlightSense. Ve své době se jednalo o přelomovou technologii. Integruje zdroj světla a světelného senzoru do jednoho pouzdra. Modely (viz Obr. 8) mají stejné rozměry, 4,8 x 2,8 x 1,0 mm a zorné pole 25°. Napájecí proud je 1,7 mA. Pracovní teplota od -20 do 70 °C a napájecí napětí je od 2,6 – 3 V. Model VL6180X má pracovní vzdálenost do 20 cm, lineární měření na krátkou vzdálenost. Senzor má v sobě zabudovaný taktéž senzor okolního světla. Model VL6180V1 má pracovní vzdálenost až do 60 cm, lineární měření na krátkou vzdálenost. Z těchto modelů vychází všechny novější modely. [32]



Obrázek 8 model VL6180 [32]

### 5.2.2 Model VD55H1

Nejkompaktnější model VD55H1 (viz Obr. 9), jedná se o matici 672 x 804 nepřímých ToF senzorů (0,54 Mpixel). Matice s rozměry 4,5 x 4,9 mm a pracovní teplotou od -30 do 55 °C je díky moderní technologii naskládána na stohovaném plátku o rozměrech 40 nm. Vytváří kvalitní hloubkové mapy a díky své velikosti má velice nízkou spotřebu. [32]



Obrázek 9 model VD55H1 [32]

### 5.2.3 Model VL53L0X

Model VL53L0X (viz Obr. 10) má velmi malé rozměry, v době vydání tohoto modelu se jednalo o nejmenší model ToF senzorů na trhu s rozměry 4,4 x 2,4 x 1,0 mm. Je schopný měřit do vzdálenosti 2 metrů se zorným polem 25°. Fungovat v teplotních podmínkách od -20 do 70 °C s napájecím napětím 2,6 – 3,5 V. Disponuje přesností +/- 3 %. Zařízení může být užíváno na módu nízké spotřeby (Low-Power mód) s napájecím proudem 85 uA nebo módu vysoké rychlosti s obnovovací frekvencí až 30 Hz a napájecím proudem 19 mA. [32]



Obrázek 10 model VL53L0X [32]

### 5.2.4 Model VL53L1CB a VL53L1CX

Společnými vlastnostmi je velikost senzorů, 4,9 x 2,5 x 1,56 mm. Zorné pole je nastavitelné od 17 ° do 27 °. Pracovní teplota od -20 do 85 °C. Napájecí napětí je od 2,6 – 3,5 V. Mohou být užívány také na tzv. „Low power“ mód, kdy je napájecí proud 16 mA. [32]

Model VL53L1CB (viz Obr. 11) má pracovní dosah od 2,5 cm až 8 metrů, do 3 metrů má obnovovací frekvencí 60 Hz. Minimální garantovaná měřená vzdálenost je 4 cm. Je schopen detekce více objektů. Snímaný obraz je rozdělen na zóny (2x2, 3x3, 4x4). Obsahuje také laserem podporované automatické zaostřování. Díky více objektové detekci je senzor schopen získat informace ohledně hloubky objektu a vytvářet tzv. hloubkové mapy. [32]

Model VL53L1CX (viz Obrázek 11) má pracovní dosah do 4 m a s obnovovací frekvencí 50 Hz. Lze nastavit tzv. treshold (pokud objekt překoná určitou vzdálenost senzor to zaznamená). [32]



Obrázek 11 model VL53L1 [32]

### 5.2.5 Model VL53L3CX

Model VL53L3CX (viz Obr. 12) má rozměry senzoru 4,4 x 2,4 x 1,0 mm. Má dosah od 10 mm až 3-5 metrů se zorným polem 25° a obnovovací frekvencí 30 Hz. Má výborná linearitu na krátkou vzdálenost od 10 mm. Pracovní teplota senzoru je od -20 do 85 °C. Napájecí napětí je od 2,6 – 3,5 V. Disponuje velmi rychlou detekcí a detekcí více objektů díky histogramovému algoritmu. Napájecí proud je 16 mA. [32]



Obrázek 12 model VL53L3CX [32]

### 5.2.6 Model VL53L4CD a VL53L4CX

Rozměry senzorů jsou 4,4 x 2,4 x 1,0 mm, senzory jsou uloženy ve stejném pouzdře jako model VL53L3CX (viz Obrázek 12). Pracovní teplota se pohybuje od -30 do 85 °C. Napájecí napětí je od 2,6 – 3,5 V. [32]

Model VL53L4CD má velmi přesný pracovní rozsah od 1 mm do 1,3 m, s lineárním měřením na krátkou vzdálenost a s obnovovací frekvencí až 100 Hz a zorným polem 18 °. Napájecí proud je 22 mA, lze zapnout mód nízké spotřeby. [32]

Model VL53L4CX má pracovní rozsah od 10 mm do 6 m se zorným polem 18 °. Disponuje využitím histogramového algoritmu k detekci více objektů. Napájecí proud je 19 mA. [32]

### 5.2.7 Model VL53L5CP a VL53L5CX

Rozměry senzorů jsou 6,4 x 3,0 x 1,5 mm. Napájecí proud je 95 mA, avšak lze zapnout mód nízké spotřeby, kdy je napájecí proud 1,3 mA. [32]

Model VL53L5CP má pracovní rozsah od 2 cm až 4 m s obnovovací frekvencí 60 Hz při rozdělení obrazu na 4x4 zón a 15 Hz při rozdělení obrazu na 8x8 zón, se zorným polem 61°. Pracovní teplota se pohybuje od -30 do 70 °C. Napájecí napětí je od 3 – 3,6 V. Disponuje paralelním zpracováním obrazu, kdy lze rozdělit obraz na zóny (4x4, 8x8). Využívá histogramový algoritmus k minimalizaci přeslechu kvůli krycímu sklu. [32]

Model VL53L5CX (viz Obr. 13) má pracovní rozsah a možnost rozdělit obraz na zóny totožný jako Model VL53L5CP. Disponuje větším zorným polem 63°. Pracovní teplota se pohybuje od -30 do 85 °C. Napájecí napětí je od 1,8 – 3,3 V. [32]



Obrázek 13 model VL53L5CX [32]

### 5.2.8 Model VL53L7CX

Model VL53L7CX (viz Obr. 14) má velikost senzoru 6,4 x 3,0 x 1,6 mm. Pracovní rozsah až 350 cm s obnovovací frekvencí až 60 Hz (liši se podle počtu snímaných zón). Hlavní

vlastností tohoto senzoru je zorné pole o velikosti až 90°. Pracovní teplota se pohybuje od -30 do 85 °C. Napájecí napětí je od 1.8 – 3,3 V. Disponuje více objektovou detekcí a měření vzdálenosti v každé zóně (4x4, 8x8 zón). Zpracovává histogramy a pomocí algoritmické kompenzace minimalizuje nebo odstraňuje vliv přeslechů krycího skla. Za pomoci indikátoru pohybu pro jednotlivé zóny, snímá pohyb objektu v každé zóně. [32]



Obrázek 14 model VL53L7CX [32]

### 5.2.9 Model VL53L8CX

Nejnovější generace ToF senzorů, model VL53L8CX, má rozměry 6,4 x 3,0 x 1,75 mm. Pracovní rozsah se pohybuje od 2 cm až 400 cm a zorným polem 65°. Tento senzor má jinak totožné vlastnosti jako předchozí model. Výhodou senzoru je velmi nízká spotřeba a vysoká výkonost senzoru. Tento senzor v době psaní bakalářské práce ještě není na trhu. [32]

## 5.3 Low-Power mód

Některé výše zmíněné senzory mohou být provozovány v tzv. „Low-Power“ režimu, přičemž se sníží jejich spotřeba. Low power režim je využíván např. pro detekci uživatele, kdy se většinu času před zařízením nikdo nenachází. Pro správnou funkci režimu nízké spotřeby musí být samotné zařízení v tzv. „režimu spánku“ dokud senzor ToF nezaregistruje uživatele a poté zařízení „probudí“. [32]

Pro detekci objektu se využívá funkce „Threshold“. V této funkci není kladen takový důraz na rychlost a přesnost snímání, ale senzor analyzuje, zda se objekt nachází nebo nenachází v nastaveném rozmezí. Funkci Threshold lze nastavit ve čtyřech možných variantách. Senzor zaznamená objekt, pokud se:

- objekt nachází nad nastavenou vzdáleností,
- objekt nachází před nastavenou vzdáleností,
- objekt se nachází v rozmezí nastavených vzdáleností,



- objekt se nachází mimo rozsah nastavených vzdáleností. [32]

Senzor má sníženou obnovovací frekvenci snímání a nevysílá zařízení tradiční údaje jako vzdálenost, signál a číslo SPAD diody. Implementovaný autonomní mechanismus vyvolá přerušení do zařízení, když je v zorném poli detekován cíl. Pokud se senzor nachází v Low-Power režimu, má tedy snížené vlastnosti (obnovovací frekvenci, přesnost měření nebo dosah), ale po detekování cíle je schopen se navrátit do původního režimu provozu. [32]

#### 5.4 Kompatibilita senzorů

K jednotlivým senzorům FlightSense lze najít kompletní dokumentaci s příklady zdrojových kódů společně se softwarovým rozhraním API, které je kompatibilní s řadou procesorů a mikrokontrolerů. Vývoj softwaru a integrace zařízení je přístupnější díky plně kompatibilním vývojovým deskám X-NUCLEO a STM32 MCU, které jsou kompatibilní s vývojovým prostředím STM32CUBEIDE a grafickým uživatelským rozhraním STM32CUBEMX.

#### 5.5 Shrnutí hlavních vlastností FlightSense senzorů

FlightSense senzory mají velmi kompaktní rozměry, poskytují velmi rychlé a přesné měření vzdálenosti, jsou schopny kompenzace přeslechů kvůli krycího skla a znečištění díky histogramového algoritmu. Jsou schopny pracovat ve většině prostředí (znečištěném prostředí; pracovní teplota se pohybuje mezi -20 °C až 80 °C), mají relativně malou spotřebu a některé senzory jsou schopny pracovat dle potřeby v režimu nízké spotřeby. Rodina FlightSense má široký výběr senzorů, kde si lze vybrat správný typ dle potřeby. Kromě zmíněných vlastností, které jsou společné pro všechny senzory, je možnost si vybrat senzor, který rozděluje obraz do zón (až 64). Některé senzory dosahují větší pracovní vzdálenosti, některé jsou vhodnější pro snímání na velmi krátkou vzdálenost. Mezi jednotlivými senzory se také liší úhel snímané oblasti a obnovovací frekvence. Všechny senzory jsou kompatibilní se softwarovým rozhraním a k dispozici jsou jednotlivé knihovny pro usnadnění vývoje aplikací.

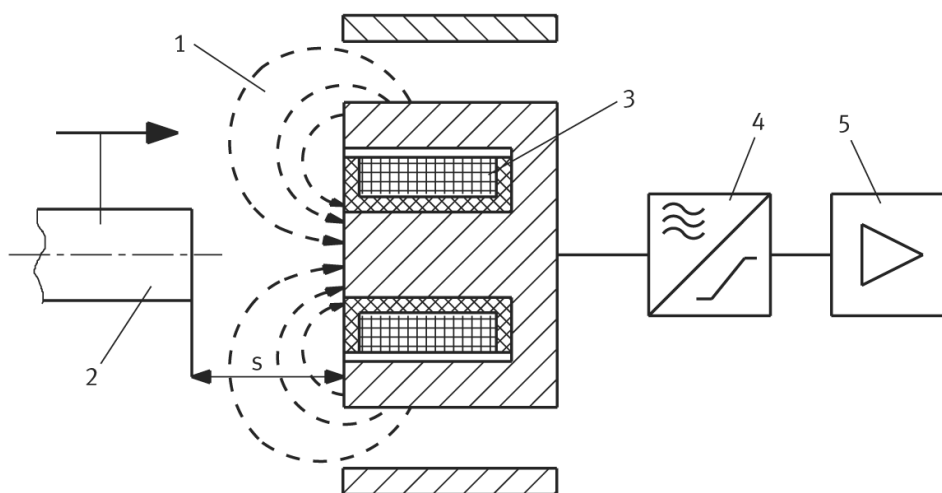
## 6 ALTERNATIVNÍ SENZORY

V kapitole 4 byla představena technologie Time of Flight, která využívá laser k získávání informací ohledně vzdálenosti snímaného objektu. V oblasti měření vzdálenosti se nachází i další typy senzorů s konkrétním využitím a aplikovatelnosti v automatizaci budov, které fungují na odlišných principech jako laserové ToF senzory. Přesněji jsou tyto alternativní senzory schopny také zaznamenat, zda se objekt přibližuje k senzoru nebo se od něj oddaluje, a popřípadě určit samotnou přesnou vzdálenost od senzoru, avšak za pomoci jiných fyzikálních veličin (např. kapacita, indukce, ultrazvukové nebo radiové vlny).

V této kapitole budou popsány jednotlivé alternativní senzory, především základní popis principů, na kterých senzory fungují a následně vypsány hlavní výhody a nevýhody jednotlivých senzorů.

### 6.1 Indukční senzory

Indukční senzory jsou vysoce využívané senzory v automatizaci průmyslu. Fungují na principu generování magnetického pole za pomoci cívky v pouzdře senzorů. Cívka je napájena střídavým proudem, který je generován oscilátorem (viz Obr. 15). Magnetické pole vystupuje do okolí, kde, pokud se nachází objekt z elektricky vodivého materiálu, dojde tak ke změně magnetického pole a sensor tuto změnu pole zaznamená. [15]



Obrázek 15 princip indukčního senzoru [33]

(1- Magnetické pole, 2 – clonka (vodivý materiál), 3 -cívka, 4 – oscilátor, 5 -zesilovač)

Indukční senzory (viz Obr. 16) detekují objekty bezkontaktně a jsou schopny operovat v nepříznivých podmínkách průmyslu, mají tedy vyšší odolnost vůči prachu a špíně. Navíc disponují vysokou rychlostí. [34]

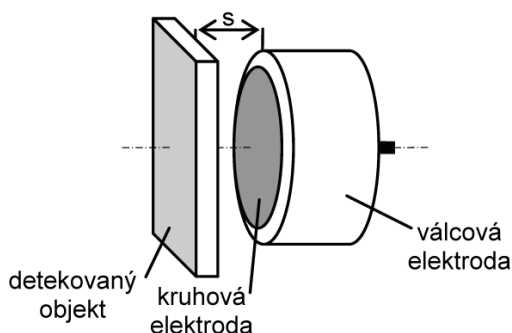


Obrázek 16 příklady provedení indukčních senzorů [35]

I když mají tyto senzory vysoké využití v automatizaci budov, pro oblast detekce osob nebo automatizace budov nejsou vhodné, protože kvůli svému principu fungování jsou schopny zaznamenávat pouze objekty kovové. Navíc mají velmi malou spínací vzdálenost, přibližně až 60 mm. [15]

## 6.2 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory pracují velmi podobně jako již zmiňované indukční senzory, avšak místo magnetického pole využívají elektrostatické pole. Princip kapacitních senzorů vychází z běžných deskových kondenzátorů, kdy je mezi dvěma plochami vytvořeno elektrostatické pole. První plochou je válcová elektroda a druhou je kruhová elektroda senzoru. V případě detekování se kapacita změní o určitou hodnotu (viz Obr. 17). [15]



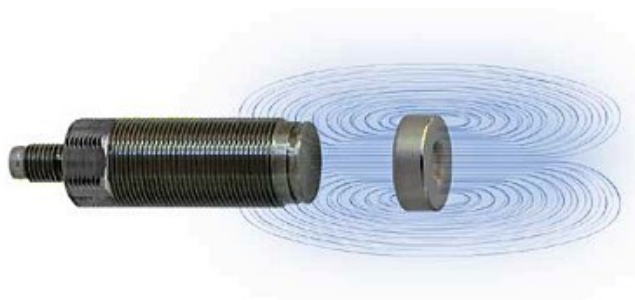
Obrázek 17 princip kapacitního senzoru [35]

Kapacitní senzory jsou schopny bezkontaktního zaznamenávání jak vodivých, tak nevodivých pevných či kapalných materiálů. Mezi pevné objekty patří např. plasty, sklo, papír, kůže nebo dřevo. Mezi kapalnými objekty je senzor schopen měřit např. olej, barvu, vodu. Kapacitní senzory jsou velmi přesné a díky vysoké citlivosti dokáže detekovat skrz

nekovové stěny, avšak typická spínací vzdálenost je pouze v jednotkách až desítkách mm, jsou tedy velmi dobrou volbou, co se týče detekce na kratší vzdálenosti. [15][34]

### 6.3 Magnetické senzory

Magnetické senzory detekují magnetické pole a měří změny tohoto pole (viz Obr. 18). Obvykle se využívá trvalý magnet umístěný na sledovaném předmětu, ale existuje také varianta, kdy je magnet součástí samotného senzoru. [34]



Obrázek 18 princip magnetického senzoru [36]

Existuje několik principů, na základě, kterých magnetické senzory pracují:

- senzory s Hallovou sondou – Hallova sonda je schopna měřit velikost magnetického pole. Výstupní napětí je přímo úměrné intenzitě magnetického pole, které sondou prochází,
- senzory s magnetorezistivní sondou – tento senzor je z polovodičové destičky, kde prochází elektrický proud a při působení magnetického pole vykazuje destička větší odpor.
- jazýčkové kontakty (viz Obr. 19) – jedná se magneticky ovládané spínače, což jsou dva feromagnetické břity, které jsou uzavřeny ve skleněných baňkách obsahující inertní plyn. Přítomnost magnetického pole způsobí, že se jazýčky vzájemně přitáhnou a vytvoří elektrický obvod.



Obrázek 19 jazýčkové relé [37]

- Senzor s proměnnou reluktancí – se skládá z permanentního magnetu a cívky. Je schopen detekce změny přítomnosti magnetických předmětů. [15][34]

Magnetické senzory dokáží detekovat skrz plast, dřeva a všechny nemagnetizovatelné kovy. Senzory mají malé rozměry a jsou schopny měřit až do 70 mm. Mají vysokou mechanickou stabilitu v případě nárazů nebo vibrací. Mají dlouhou životnost, jsou chráněné proti prachu, oxidaci a korozi. [34]

#### 6.4 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory (viz Obr. 20) využívají akustické vlny ve frekvenčním rozsahu nad hranicí lidské slyšitelnosti, tj. nad 20 KHz, a jako horní hranice je považován 1 GHz. Se změnou frekvenčního rozsahu se pojí i určité vlastnosti, které poté senzor vykazuje. Senzory generují zvukové pole pomocí piezokeramického měniče, jehož základem jsou piezoelektrické krystaly, které jsou schopny měnit své rozměry při přivedení napětí, a mění tedy elektrickou energii na mechanickou. Každý ultrazvukový senzor má směrovou vyzařovací charakteristiku, která by měla být co nejužší. Vyzařovací charakteristika závisí na geometrických rozměrech a tvaru vyzařovací plochy. [15]



Obrázek 20 příklad provedení ultrazvukových senzorů [38]

Ultrazvukové senzory mohou sloužit jako:

- Senzory pro měření vzdálenosti, kde se vysílané vlny ze senzoru odrážejí od snímaného objektu zpátky na snímač senzoru, poté se měří doba, po kterou vlna cestovalo od senzoru k objektu a nazpátek (viz Obr. 21). Jedná se tedy o stejný výpočet jako u

laserových senzorů ToF. Nahrazují je tedy především v takových prostředích, kde by laserové senzory nebyly dostatečně spolehlivé [39]. [15]



Obrázek 21 ultrazvukový senzor [39]

- Senzory jako „závora“ – tento typ využití se používá ve dvou provedeních.
  - První nese název reflexní závora. Zde se senzor skládá ze dvou částí – vysílače a přijímače v jednom pouzdře a reflektoru, který zajišťuje odraz vlny.
  - Druhým typem je tzv. jednocestná závora, kde jsou vysílač a přijímač naproti sobě (viz Obr. 22). Výhodou tohoto typu je, že vlna musí urazit jenom jednu cestu, čímž se zvyšuje možný dosah senzoru. [15]



Obrázek 22 ultrazvukový senzor jako reflexní závora [39]

Ultrazvukové senzory jsou velmi využívané díky svým vlastnostem. Najdou uplatnění jak v průmyslu (např. hlídač hladiny, snímač objektů), tak v autech jako senzory pro parkování či v oblasti zabezpečení pro snímání osob ve snímaném prostoru. Jsou schopny měřit vzdálenost až do 400 cm, jsou však kvůli schopnosti odrazu vlny limitovány velikostí snímaného objektu. Snímaný objekt taktéž nemůže být z materiálu, který by pohltil vlnu. [40]

## 6.5 Radarové senzory

Radarové senzory nejsou ovlivněny tmou a světlem, jsou schopny detekce na větší vzdálenosti obvykle pro měření vzdálenosti objektu a rychlosti objektu. Využívají elektromagnetické vlny nacházející se ve frekvenčním rozsahu od přibližně 1 000 MHz do 300 GHz [41]. Obecně mikrovlny dokáží projít skrz některé materiály jako např. sklo, keramika nebo plast, avšak od kovových materiálů se odrážejí. [42]

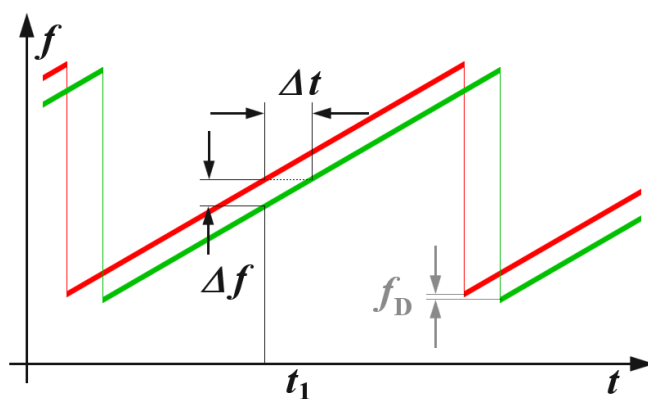
Mikrovlnné senzory můžeme rozdělit do 3 skupiny podle principu měření vzdálenosti objektu:

- Senzor využívající Dopplerova jevu – jedná se o mikrovlnné senzory (viz Obr. 23), které jsou schopny detekovat pohyb objektu za pomoci Dopplerova jevu, nikoli však přesnou vzdálenost objektu. Vysílá mikrovlny směrem k objektu a analyzuje změnu frekvence odražené vlny oproti vysílané vlně.



Obrázek 23 mikrovlnný senzor [43]

- FMCW senzor – frequency modulated continuous wave (frekvenční modulace spojitých vln). Jedná se o velmi přesné senzory, které vypočítávají vzdálenost objektu pomocí nepatrných rozdílů v čase přijaté a vysílané vlny viz (Obr. 24), jelikož tyto dvě vlny mají téměř obdobnou frekvenci. [44]



Obrázek 24 rozdíly vysílané a přijaté vlny [45]

- Senzor milimetrových vln – frekvenční pásmo milimetrových vln je v mezi od 30 do 300 GHz. Pro výpočet vzdálenosti objektu používají obdobného principu jako FMCW senzor [46]. [42]

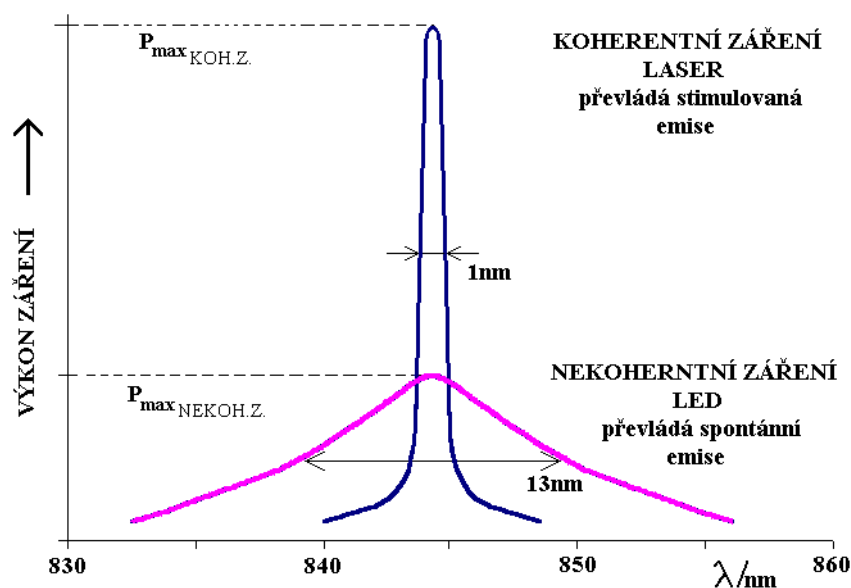
Senzory s technologií FMCW jsou velmi drahé a jsou využívány ve specifických případech. Pro automatizaci budov jsou více vyhovující mikrovlnné senzory, které využívají

Dopplerova jevu. Tyto senzory nejsou schopny změřit přesnou vzdálenost objektu, ale reagují pouze na pohyb snímaného objektu. Mikrovlnné senzory dokáží pracovat s různými frekvencemi, a díky tomu se mění některé vlastnosti senzoru. Mezi tyto vlastnosti patří schopnost penetrace materiálu (např. stěny). Tato vlastnost může být považována za výhodu či nevýhodu, záleží dle potřeby využití. Další vlastností je citlivost senzoru. [42][44]

## 6.6 Optické senzory

Optické senzory jsou vysoce využívané senzory. Do skupiny optických senzorů se samozřejmě řadí také Time of Flight senzory (viz Kapitola 4). Ve skupině optických senzorů se nacházejí i jiné senzory, které jsou schopny měřit vzdálenost jinými principy, než jaký využívají ToF senzory. [15]

První vysílače v těchto senzorech byly tvořeny pomocí žárovek, později se přešlo na využití LED a laserových diod. Princip laseru byl vysvětlen výše. V LED na rozdíl od laserových diod dochází při dodání potřebné energie ke spontánní emisi a vyzářené světlo je následně usměrněno optickým zařízením, čímž vzniká nekoherentní záření. V laserových diodách je emise díky rezonátoru stimulována, a tak vzniká koherentní záření. Rozdíl mezi těmito jevy je v šířce pásma vyzařovaného záření (viz Obr. 25). Laserové diody mají mnohem menší rozsah vyzařovaných vlnových délek, což je pro následné vyhodnocení signálu žádanější. Nevýhodou laserové diody je závislost prahového proudu (proud nutný k dosažení stimulované emise) na teplotě. Výkon samotného záření je v laserových diodách mnohonásobně vyšší (viz Obrázek 25), to způsobuje následně větší dosah senzoru. [14][46]



Obrázek 25 šířka pásma záření LED a laserové diody [46]



Jako přijímací prvky se využívají tzv. fotodetektory. Jedná se o zařízení, které je schopno přeměnit energii absorbovaných fotonů do měřitelné formy. Fotodetektory se dělí na fotodiody a fototranzistory. [15]

Mezi další využívané principy optických senzorů pro měření vzdálenosti patří:

- Triangulační senzory – metoda je založena na vyslání laserových paprsků na objekt, kde je na povrchu vytvořen světelný bod, který je promítnutý na detektor senzoru. Pomocí zjištěného úhlu, pod kterým jsou zachyceny laserové paprsky na detektoru, je vypočítaná vzdálenost objektu (viz Obr. 26). Využívané hlavně pro měření v rozmezí od 5 mm do 1 m. [14]



Obrázek 26 triangulační metoda [47]

- Měření pomocí fázového posuvu – při tomto principu jsou vysílány vlny k měřenému objektu, kdy po odrazu od něj dopadnou zpět na detektor s fázovým posunem. Vyhodnocován je počet vyslaných vln do přijetí signálu, z kterého je následně vyčíslena vzdálenost. [14]

Optické senzory mají stále menší rozměry a jsou velmi využívány pro měření na větší vzdálenosti. Výhodou těchto senzorů je odolnost vůči rušivým elektromagnetickým polím a hluku. Mezi nevýhody se řadí např. větší náchylnost na silné znečištění infrazářením či vlhkostí. [15]

## 6.7 Shrnutí

V předchozích kapitolách byly představeny jednotlivé senzory pro měření vzdálenosti. V Tabulce 1 jsou shrnuty klíčové informace jednotlivých typů senzorů, které jsou důležité pro automatizaci budov nebo detekci osob.

Tabulka 1 klíčové vlastnosti jednotlivých senzorů

Typ Senzoru	Klíčové vlastnosti
Indukční senzory	Měří vzdálenost nebo přiblížení elektricky vodivého objektu. Velmi malá spínací vzdálenost. Rychlé a nevdí jim nepříznivé podmínky. [34][15]
Kapacitní senzory	Zaznamenává vodivé i nevodivé materiály. Velmi citlivé, schopny měření i přes určité materiály. Malá spínací vzdálenost. [15][48]
Magnetické senzory	Detekují zpravidla objekty s připevněným magnetem. Schopen detekce skrz různé typy materiálů. Relativně drahé. [34]
Radarové senzory	FMCW technologie je přesná, schopna detekce více objektů a schopna měřit i na větší vzdálenost (100 m), patří mezi dražší. Mikrovlnné senzory jsou velmi citlivé na pohyb v radiálním směru a jsou schopny penetrovat materiál (podle zvolené frekvence). Neumí však měřit vzdálenost nebo směr objektu. [48]
Ultrazvukové senzory	Snímání jakéhokoliv materiálu. Limit ve velikosti snímaného objektu. Větší spínací vzdálenost. Spolehlivé ve velkém a prašném prostředí. [15][40]
Optické senzory	LED vysílače nejsou ovlivňovány teplotou, mají však menší vyzářovací výkon a větší vlnovou délku vyzářeného záření. Velká pracovní vzdálenost. Odolné proti elektromagnetickým polím a hluku. Větší náchylnost na infrazářením a vlhkost. [14][15]

Jako vhodné alternativy senzorů ToF v automatizaci budov nebo v detekci osob dle Tabulky 1 jsou kapacitní senzory, radarové senzory (tedy mikrovlnné senzory), ultrazvukové senzory a jiné metody optických senzorů s ohledem na způsob využití či prostředí a místo, ve kterém by se senzor nacházel. Mezi méně vhodné alternativy se řadí indukční senzory, magnetické senzory, které by však také mohly být dobrou alternativou, avšak jen v určitých aplikacích (např. indukční senzory by mohly představovat dobrou alternativu ke snímání vodivých materiálů).

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 CÍLE A PŘÍNOS PRAKTICKÉ PRÁCE

### 7.1 Cíle

Pro praktickou část práce byly vytýčeny následující cíle:

- Zhodnocení FlightSense ToF senzorů a jejich možnosti využití v domovní automatizaci.
- Popsat jednotlivé technologie a zařízení využitě pro praktickou realizaci.
- Navrhnout a prakticky realizovat vlastní návrh řešení s využitím ToF senzorů FlightSense.
- Identifikovat možné problémy a nalézt vhodné řešení pro jejich eliminaci a zajištění požadované funkce.
- Prezentace výsledků a hodnocení.

### 7.2 Přínos

Přínos práce autor vidí, ať už ve formě myšlenek zaměřených na zlepšení interakce uživatelů v budově s technologickými systémy (například pomocí gest), tak i popisu možného řešení, problémů a samotných limitů ToF senzorů.

Vypracování práce je i velmi přínosné pro samotného autora, především z hlediska programování senzorů, tedy embedded programování v jazyce C, testování senzoru a vyzkoušení funkčnosti ToF senzorů v praxi.

Rodina FlightSense se velmi dynamicky rozvíjí. I během vypracování této práce výrobce uvolnil nový pokročilý sensor řady L8 a pracuje na dalších vylepšeních. Na druhou stranu, ne všechny vlastnosti senzorů a vydaná SW podpora je bez chyb, z tohoto důvodu může být práce přínosná, protože se jimi zabývá a mapuje je. V neposlední řadě práce pomáhá identifikovat případnou praktickou použitelnost a možnosti nasazení, stejně jako odhadnout nezbytné úsilí při „vychytávání“ nové technologie.

## 8 VYUŽITÍ SENZORŮ FLIGHTSENSE

Využití senzorů FlightSense pro automatizaci budov je rozsáhlé. Podle kapitoly 2, kde byly zjištěny hlavní cíle automatizace budov v soukromé bytové výstavbě a v automatizaci budov v účelových stavbách a na základě zjištěných vlastností senzorů FlightSense (podle kapitoly 4), lze navrhnout vhodná využití senzorů FlightSense.

### Možnosti využití FlightSense v soukromých bytových výstavbách:

- Detekce osob, na jejíž základě se realizuje patřičná akce (řízení osvětlení, VZT systému nebo stínících prvků, zabezpečení objektu).
- Detekce domácích zvířat (např. ovládání osvětlení, dávkovačů na krmení nebo vody).
- Detekce gest (např. spuštění scén nebo zařízení apod.).
- Detekce hladiny (např. dopouštění akvárií, kontrola hladiny vody ve studně).
- Pro zpětnou vazbu systémů, zařízení (robotický vysavač, oken, dveří, stínících prvků, zjištění počtu osob v místnosti).

### Možnosti využití FlightSense v účelových stavbách:

- Detekce vzdálenosti (při kontrole hladiny nádrží, plnosti skladů).
- Detekce osob a zjištění počtu osob, na jejímž základě se reguluje spotřeba objektu a zvyšuje pohodlí (řízení osvětlení, VZT systému, stínících prvků, pro přepnutí zařízení do režimu „sleep“).
- Detekce prezence osob před zařízením (snížení spotřeb zařízení, zvýšení soukromí).
- Vytvoření bezpečnějšího prostředí (zabezpečení objektu/místností, omezit vstup do nebezpečných prostor).
- Detekce gest (pro ovládání zařízení, systému v prostorech s vyšším znečištěním nebo ovládání z hygienických důvodů).
- Zpětná vazba systémů, zařízení (např. kontrola překážek pro autonomní roboty).

Na základě získaných informací lze provést statistiku provozu objektu, díky které lze provoz zoptimalizovat.

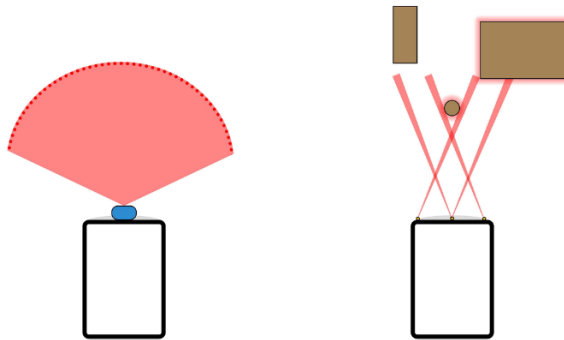
### 8.1 Snímání objektů

Snímání objektů se dá považovat jako hlavní využití ToF senzorů. Principiálně se jedná o základní využití ToF senzorů a snímání objektu tedy funguje tak, jak bylo popsáno v kapitole

1. Tedy jednotlivé fotony se odrážejí od objektu zpátky na senzor a na základě uběhlého času se vypočítá vzdálenost měřeného objektu od senzoru.

### 8.1.1 Oblasti využití

Snímání objektů má pro automatizaci velké využití. Pokud se podíváme na automatizovanou průmyslovou budovu, lze vidět jednotlivé stroje, které konají různé typy práce, jako je přenášení objektů z jednoho určitého místa na druhé místo, převážení objektů z bodu A do bodu B, přičemž během konání takových operací mohou stroje během jejich cesty narazit na možné překážky (viz Obr. 27). ToF senzory jsou schopny předávat přesné informace o vzdálenosti např. přenášeného objektu, nebo jsou schopny zaznamenat překážku, která se nachází před strojem. [49]



Obrázek 27 detekce objektu [50]

Využití nachází také při logistických pracích ve skladu, tedy při organizování, umísťování objektů a kontrolování plnosti jednotlivých regálů (viz Obr. 28). [49]



Obrázek 28 kontrola obsazenosti ve skladních prostorech [49]

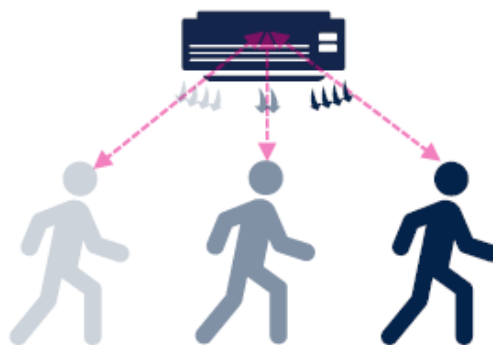
Pro domovní automatizaci může snímání objektu najít využití např. v robotických vysavačích, kde kontroluje vzdálenost překážky, detekuje rohy nebo schody. [50]

## 8.2 Detekce osob

Detekce osob má široké využití v oblasti automatizace budov, avšak pro tuto potřebu se již ve velké míře využívá senzor PIR (pasivní infračervený senzor). Přestože se PIR senzor zdá pro detekci osob jako ideální varianta, můžeToF senzor oproti senzoru PIR mít jisté výhody. ToF senzor může představovat levnější variantu pro jednodušší aplikace detekce pohybu osob. Sensory jsou technologicky odlišné a jejich rozdíly ve vlastnostech budou vysvětleny níže.

### 8.2.1 Oblasti využití

Snímání počtu osob v místnosti – senzory jsou schopny detekovat počet lidí v místnosti, takže se senzor nachází při vstupu nad dveřmi a rozpozná, zdali člověk vchází do místnosti nebo z místnosti vychází (viz Obr. 29). Díky informace ohledně počtu osob v místnosti se může zmenšit energetická spotřeba a zvýšit pohodlí pro osoby nacházející se místnosti, protože se dá pomocí automatizace budov následně regulovat např. teplota v místnosti nebo množství přiváděného čerstvého vzduchu. [49]



Obrázek 29 snímání počtu osob [49]

Automatizace vstupů – senzory jsou schopny detekovat člověka, který se nachází před dveřmi nebo bránou a na základě této detekce se může spustit automatické otevření např. dveří.

Řízení osvětlení, klimatizace nebo větrání – senzory jsou schopny detekovat pohyb člověka ve snímané oblasti a na základě toho lze poté řídit osvětlení v budově. Zaznamená-li senzor, že je místnost/budova prázdná, může senzor napomoci k následnému snížení spotřeby energie.

Bezpečnost a ochrana – senzory mohou být nainstalovány do prostor, kde se v určité chvíli nesmí nikdo volně procházet. Tedy, je-li objekt/místnost zastřežena a senzor během této

doby zaznamená pohyb ve snímané oblasti, tak může spustit následný poplach. Nebo mohou naopak člověka ochránit před úrazem, pokud vstupuje do prostor, kde by se neměl nacházet, a kde by to pro něj mohlo být nebezpečné (např. v oblasti kde operuje robotický manipulátor)

### 8.2.2 ToF vs PIR

PIR je běžně využíván v budovách ke snímání pohybu osob v místnosti. PIR detekuje pohyb na základě změn přijímaného infračerveného záření. Je proto schopen snímat pouze objekty, které mají větší teplotu než snímané okolí, kdežto ToF senzory snímají objekt nezávisle na jeho teplotě. PIR senzory jsou schopny zaznamenat pohyb pouze v tangenciálním směru pohybu, avšak ToF senzory zaznamenají změnu vzdálenosti nezávisle na směru pohybu. [51]

PIR senzory mají větší snímanou plochu než senzory ToF, neboť PIR senzory detekují přibližně kolem 10 m, mají však širší úhel záběru (10–20 m<sup>2</sup>). PIR senzory jsou díky svému pasivnímu principu snímání více energeticky úsporné oproti ToF sensorům, které ke snímání potřebují aktivně vysílat signál. [51]

Proto jsou PIR senzory v této oblasti více využívány. Své oblasti využití mají i ToF senzory, respektive závisí potřebách uživatele. Hlavně závisí na požadované vzdálenosti pro snímanou oblast a jestli je potřeba ve snímaném prostoru detekovat i objekty, které nemusí mít větší teplotu než okolí a v neposlední řadě závisí také na energetické spotřebě. [51]

Senzory by mohly být využity v duální podobě, kde by fungovaly společně a předávaly informace o snímaném okolí současně, přičemž by se logika vyhodnocování patřičných akcí dělala na základě obou sensorů. Tím by mohly být omezeny nedostatky jednotlivých sensorů a snížil by se počet falešných poplachů.

## 8.3 Snímání hladiny

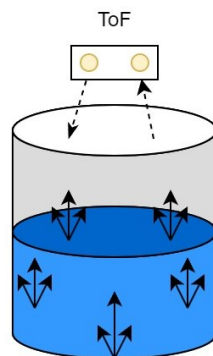
Velký význam v automatizaci budov se nachází ve snímání hladiny kapaliny. Tato technologie je v jistém ohledu podobná se snímáním v objektu, ale je zde více věcí, na které se musí dát pozor, jelikož má ToF senzor snímat hladinu kapaliny a nikoliv „pouze“ pevný objekt.

### 8.3.1 Princip a požadavky

Pokud předpokládáme, že se kapalina musí nacházet v nádobě, je potřeba brát v potaz, že při snímání hladiny fotony cestují vzduchem a poté samotnou kapalinou. Během této cesty

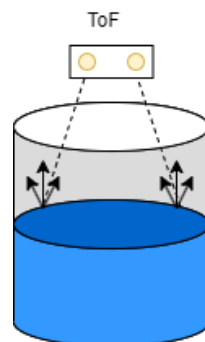


se mohou fotony odrážet od hladiny či být vodou absorbovány nebo vodou projdou a odrazí se od dna nebo stěn nádoby (viz Obr. 30). [52]



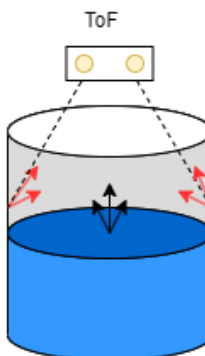
Obrázek 30 snímání hladiny převzato z [52]

Pro zajištění toho, aby se foton neodrážel od stěn nádoby, je nutné, aby byl ToF senzor umístěn do takové nádoby a na takové místo, aby Field of View (zorné pole, dále jen FoV) senzoru byl menší než průměr nádoby, a fotony na hranicích zorného pole se tedy nedostaly ke stěnám nádoby (viz Obr. 31) [52]



Obrázek 31 požadované FoV převzato z [52]

V opačném případě, když je FoV senzoru větší, než je průměr nádoby, by mohlo docházet k odrazům od stěn (viz Obr. 32). [52]



Obrázek 32 špatně zvolené FoV převzato z [52]

Dalším důležitým faktorem je odrazivost dna nádoby s kapalinou. Je doporučováno používat materiál, který méně odráží světlo (obecně jsou tedy lepší tmavší povrchy než světlejší). Čím bude mít dno nádoby menší odrazivost, tím bude senzor měřit přesněji a nebudou se objevovat chybné hodnoty. [52]

### 8.3.2 Oblasti využití

Mohou být využívány pro potřeby přesného monitorování nebo k řízení obsahu nádoby i pro kapaliny, které jsou neprůhledné.

Nádoby s vodou pro zásobování, hasičské systémy (např. zavlažování), kde mohou detekovat a zabránit přetečení takových nádob.

Nádoby s palivem na topení, pro generátory nebo záložní zdroje.

Nádoby s chemickými látkami pro průmyslové procesy nebo pro potravinářský, farmaceutický či chemický průmysl.

Senzory v těchto aplikacích mohou přispět k větší bezpečnosti a účinnosti v automatizaci budov díky své přesnosti.

## 8.4 Rozpoznání gest

Rozpoznávání gest je relativně nové téma, o kterém začíná být čím dál větší zájem. S růstem digitalizace nastávají otázky, jak lze ovládat některá zařízení jednodušeji a pohodlněji než pomocí manuálního, tedy ručního ovládání. Jedna varianta je ovládání pomocí hlasu, což se již v některých oblastech využívá. Další variantou může být ovládání pomocí jednotlivých gest, k tomu je zapotřebí mít technologii, která umí spolehlivě jednotlivá gesta rozpoznat.

### 8.4.1 Princip

Jakým způsobem je rozpoznávání gest vykonáváno závisí na využitém senzoru z rodiny FlightSense. Mohou to být senzory, které disponují snímáním ve více zónách, ale také senzory, které mají pouze jednu snímanou zónu. Na základě výběru senzoru jsou taktéž definovány možnosti, jaké gesta mohou být rozpoznávána. [49]

Pokud je využit senzor s jednou snímanou zónou, je ke snímání gest zapotřebí více senzorů, aby byly schopny rozeznat jednotlivé pohyby ruky. Pro takovou aplikaci je taktéž zredukován výběr možných detekovaných gest. Jedná se především o základní pohyby, které jsou definovány níže.

Snímání gest pomocí senzoru s více snímanými zónami (4x4 nebo 8x8) umožňuje snímaný objekt rozdělit do 64 zón, což poskytuje přesné informace o vzdálenosti objektu v jednotlivých zónách. Na základě těchto informací může senzor pomocí patřičného algoritmu vytvořit hloubkovou mapu snímaného prostoru a případně rozpoznat jednotlivá gesta. [49]

Gesta, která jsou FlightSense senzory schopny detekovat, lze rozdělit do několika skupin. Rozdělení je podle náročnosti jednotlivých gest. Mezi tyto skupiny patří základní pohyby, jednoduché symboly a tvary či postoj ruky. [49]

Mezi základní pohyby patří:

- rychlé poklepání,
- přiblížení a oddálení ruky,
- přejetí ruky doleva, doprava, nahoru a dolů,
- zatřepání ruky,
- řízení úrovně pomocí pomalého přiblížování a oddálení ruky. [49]

Do skupiny jednoduchých tvarů a symbolů patří:

- kruhový pohyb ruky,
- sledování pozice ruky,
- pozice ruky – nasměrování ruky do 4 směrů. [49]

Do poslední skupiny postoje ruky patří:

- rotace ruky,
- sevření ruky v pěst,
- počítání prstů,
- sledování ukazováčku,
- různé symboly jako – „high five“, palec nahoru atd. [49]

#### 8.4.2 Oblasti využití

Rozpoznání gest může mít v automatizaci budov široké využití. Nahrazeny mohou být všechna mechanická tlačítka, která zapínají a vypínají konkrétní zařízení nebo mají jednoduchou funkčnost, kterou lze nahradit základními gesty. Mezi konkrétní příklady využití patří:

- Smart Home – ovládání osvětlení, stínících prvků, termostatu atd.
- Ovládání zařízení v průmyslových budovách. [49]

Oblasti, kde využití rozpoznání gest může být využíváno, budou přibývat postupně s automatizací objektů. Mezi hlavní výhody ovládní gesty patří zejména odstranění mechanických částí, díky tomu je systém odolnější vůči poškození. K tomu taktéž napomáhá, že senzor může být umístěn za ochranným sklem.

#### 8.4.3 Rozpoznávání gest kamerou

Gesta mohou být detekována taktéž pomocí kamery. Tento způsob je náročnější na výpočetní výkon, protože každý snímek je rozpracován složitým výpočetním algoritmem. Zároveň díky tomu lze detekovat složitější gesta a dosahovat vyšší přesnosti, protože kamery mají vyšší rozlišení než nejnovější ToF senzory, které cílí k rozpoznávání gest. Díky vyššímu rozlišení (závisí na použité kameře) a výpočetnímu algoritmu, lze detekovat i komplexnější symboly a postoje ruky, které by pomocí ToF senzoru nebylo možné detekovat kvůli rozlišení ToF sensorů. Zároveň při použití kamery ji lze využít i k dalším účelům (např. detekce obličeje). [53]

ToF senzory mohou představovat levnější variantu pro rozpoznávání gesta, kdy nejnovější modely, které jsou schopny rozdělit snímanou zónu do 16 až 64 zón a s poměrně rychlou obnovovací frekvencí (až 60 Hz, podle počtu používaných zón) dokáží detekovat již složitější gesta (postoje ruky, jednoduché tvary a symboly, viz výše) než pouze základní pohyby. Díky tomu představují spolehlivou náhradu kamer pro aplikace, které nevyžadují komplexní zpracování obrazu, ale vystačí si pouze s „jednoduššími“ gesty. Taktéž mají ToF senzory menší spotřebu energie během zpracování gest.

### 8.5 Rozpoznání obličeje

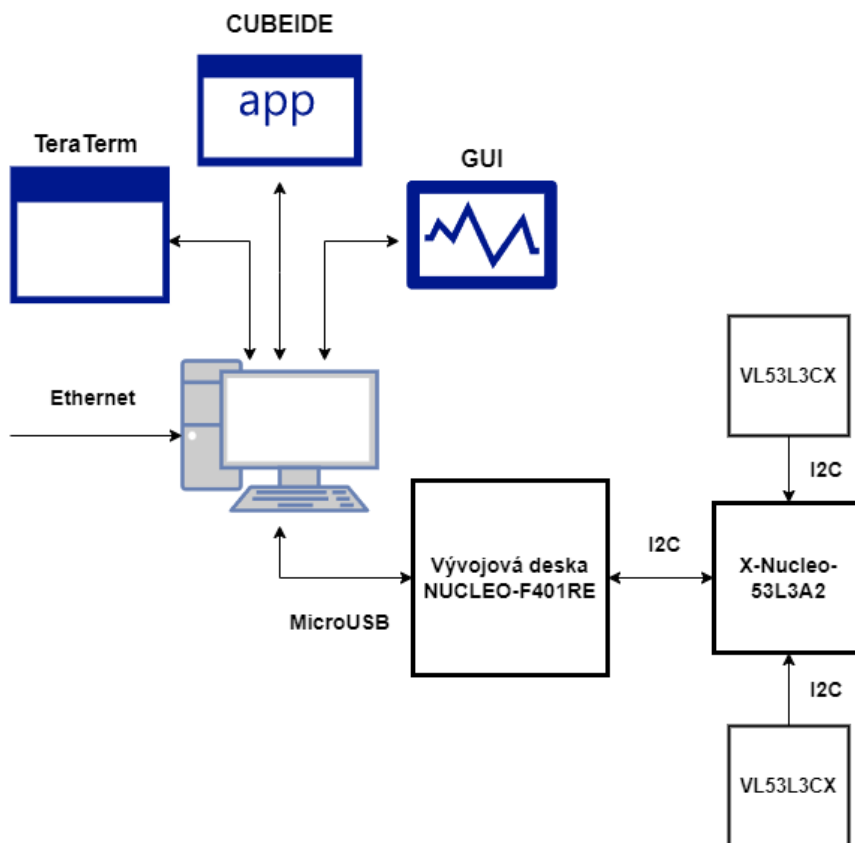
Výrobci sensorů FlightSense taktéž cílí na oblast rozpoznání obličeje. Pro tuto aplikaci mohou být využity pouze senzory, které jsou schopny snímat ve více zónách. I přesto, že nejvýkonnější senzory dokážou zaznamenat vzdálenost ve 64 zónách, nedosahují takové přesnosti jako specializované kamery určené pro tento účel. To znamená, že by nevyhovovaly požadované spolehlivosti pro tuto konkrétní aplikaci. I když nemůže spolehlivě rozpoznat obličej, je senzor schopen alespoň detekovat přítomnost osoby, čehož může být využito např. pro přepnutí ze „sleep“ nebo „standby“ režimu různých zařízení za účelem snížení spotřeby. [54][55][56]

## 9 VLASTNÍ NÁVRH

Tato kapitola je zaměřena na vlastní návrh využití, a tedy hlavně jeho praktickou realizaci. Budou zde popsána jednotlivá hardwarová zařízení a software, který byl během zpracování návrhu využit. Dále bude popsána příprava, která musela proběhnout před samotnou praktickou realizací a seznámení se s vývojovým prostředím, založením projektu, práce s knihovny atd. Poté bude popsán postup při zpracování jednotlivých praktických realizací, přičemž prvním tématem je „crosstalk“, který hraje velkou roli z hlediska využití senzoru v praxi. Další část se již týká možnosti využití senzoru v oblasti detekce objektu při vstupu do určité zóny a spuštění světelné signalizace. Další praktickou realizací bude detekce jednoduchých gest za pomoci tří ToF senzorů a jejich následné zpracování.

### 9.1 Použité technologie a zařízení

Jedná se o základní obecný popis všech technologií, tedy všech hardwarových zařízení a jednotlivého softwaru, které byly během realizace praktického návrhu využití ToF senzoru používány. Propojení všech použitých zařízení a technologií je zobrazeno na Obrázku 33 pomocí blokového diagramu.



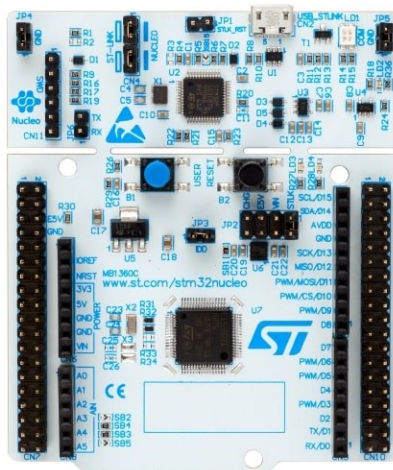
Obrázek 33 blokové schéma použitých technologií a zařízení

### 9.1.1 Vývojová deska Nucleo-G071RB

Deska STM32 Nucleo-G071RB (viz Obrázek 34) obsahuje mikrokontroler z řady STM32G071. Tyto mikrokontrolery jsou založeny na 32bitovém jádře Arm Cortex pracující na frekvenci až 64 MHz. Disponují vestavěnou pamětí (36 KB SRAM a až 128 KB programové Flash paměti). Mikrokontroler je schopen pracovat v teplotách od -40 do 125 °C s napájecím napětím od 1,7 V od 3,6 V, má nízkou spotřebu energie (v režimu STOP 3  $\mu$ A a méně než 100  $\mu$ A v běhu). Zařízení může pracovat v režimech nízké spotřeby (sleep, stop, standby, shutdown). [32]

Zařízení nabízí standardní komunikační rozhraní (tj. dvě I<sup>2</sup>C, dvě SPI / jedno I<sup>2</sup>S, jedno HDMI, CEC a čtyři USART), DMA, jeden 12bit A/D převodník s 19 kanály a jeden 12bit D/A převodník se dvěma kanály, dva komparátory, interní vyrovnávací paměť, řídicí časovač PWM, který pracuje až na dvojnásobku frekvence procesoru, pět 16bit časovačů a jeden 32bit časovač. Zařízení obsahuje také integrovaný radič USB Micro-B. [32]

Samotná vývojová deska STM32 Nucleo-G071RB (viz Obr. 34) obsahuje mimo mikrokontroler z řady STM32G071 také uživatelskou LED, resetovací a uživatelské tlačítko, 32,768 KHz krystalový oscilátor, obsahuje ST-LINK debugger/programmer pro komunikaci s mikrokontrolerem pomocí USB rozhraní. [32]



Obrázek 34 Nucleo-G071RB [32]

Existuje možnost rozšíření vývojové desky, neboť disponuje konektory kompatibilní s např. ARDUINO UNO V3 nebo dalšími STM32 Nucleo rozšiřujícími deskami. [32]

K desce STM32 Nucleo-64 jsou dodávány bezplatné softwarové knihovny a příklady dostupné ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE. Vývojová deska podporuje šifrování AES 128/256 bit. [32]

### 9.1.2 Vývojová deska NUCLEO-F401RE

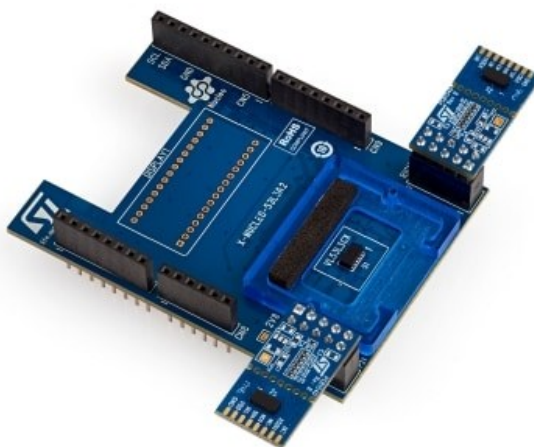
Deska STM32 Nucleo-F401RE obsahuje mikrokontroler z řady STM32F401RE. Tyto mikrokontrolery jsou založeny na 32bitovém jádře Arm Cortex pracující na frekvenci až 84 MHz. Disponují vestavěnou pamětí (96 KB SRAM a 512 KB programové Flash paměti). [32]

Kromě používaného mikrokontroleru má deska Nucleo-F401RE srovnatelné specifikace a možnosti jako Nucleo-G071RB. Hlavní rozdíl a využití této desky je její kompatibilita s GUI pro nastavení kompenzace senzoru.

### 9.1.3 X-Nucleo-53L3A2

Jedná se o rozšiřující desku X-Nucleo-53L3A2 (viz Obr. 35) pro vývojové desky STM32 Nucleo. Je kompatibilní s deskou Nucleo-G071RB a také s ARDUINO UNO V3. Poskytuje plnohodnotnou vyhodnocovací sadu a stává se tak dostupnějším pro sebevzdělávání, vyhodnocování a vyvíjení vlastních aplikací s využitím Tof senzoru z rodiny FlightSense s označením VL53L3CX. [32]

Rozšiřující deska obsahuje držák na krycí sklo, kde lze vložit krycí sklo a pod něj distanční podložky, které jsou dodány ve třech tloušťkách 0,25, 0,5 a 1 mm, které simulují vzduchovou mezeru, dodáno je také oválné sklíčko. Dále jsou k rozšiřující desce také dodány dvě přídatné desky se senzorem VL53L3CX, které se dají propojit s hlavní rozšiřující deskou pomocí 10 piny, a umožňují tak detekci více objektů. [32]



Obrázek 35 X-Nucleo-53L3A2 [32]

#### 9.1.4 STM32 CubeIDE

CubeIDE je multiplatformní nástroj softwarového ekosystému CubeIDE. Jedná se o vývojovou platformu v jazyce C/C++ s možností konfigurace periférií, generováním kódu a kompilace kódu. [32]

STM32 CubeIDE integruje možností více programů. Původně pro práci s SMT32 bylo zapotřebí mít zvlášť více programovacích rozhraní, jako je grafický software STM32CubeMX, který slouží ke konfiguraci a vizualizaci STM32Nucleo desek a vygenerování kódu. Díky softwaru STM32CubeProgramming, lze poté modifikovat vygenerovaný kód. Integrace, kterou zajišťuje CubeIDE, značně ušetřuje čas potřebný pro instalaci jednotlivých programů a konfiguraci zařízení STM32 Nucleo a taktéž usnadňuje celkový vývoj na platformě STM32. [32]

Nástroj CubeIDE umožňuje výběr prázdné jednotky STM32 nebo již před konfigurovaného mikrokontroleru nebo mikroprocesoru. Poté na základě výběru program vygeneruje inicializační kód ve vybraném programovacím jazyce. Během vývoje je možnost navrátit se k inicializaci a konfiguraci projektu, periférií nebo middlewaru a znovu generovat inicializační kód bez dopadu na samotný uživatelských kód. [32]

Software CudeIDE taktéž obsahuje analyzátory kompilace a zásobníku nebo standardní a pokročilé funkce pro debugging včetně zobrazení jádra procesoru, paměti a registrů. [32]

##### 9.1.4.1 HAL, LL

Vývoj probíhá v jazyce C/C++, v kódu se pracuje se samotným hardwarem pomocí HAL API nebo LL API.

HAL (hardwarová abstrakční vrstva) je vysoko úroňové a funkcionální API, s vysokou úrovní přenositelnosti, co se týče portfolia SMT32, a skrývá složitost produktu koncovému uživateli. Díky HAL lze interagovat s vyšší vrstvou (jako knihovny, zásobníky atd.). [57]

LL (nízká vrstva) je nízko úroňové API, programátor se dostává mnohem blíže k samotnému hardware, tedy na úrovni registrů. Má však menší možnosti přenositelnosti a vyžaduje hlubokou znalost specifikace produktu. LL může být použito samostatně, nebo v kombinaci s HAL. [57]



### 9.1.5 X-CUBE-TOF1

Jedná se o softwarový balíček pro vývojové prostředí STM32CUBE, obsahuje ovladače, které rozpoznají senzory a provádí měření pomocí jednoho nebo více senzorů. [32]

V balíčku se nacházejí pro konkrétní rozšiřující desku Nucleo-G071RB dvě knihovny „SingleRanging“ a „MultipleRanging“, které při spuštění umožňují výpis následujících hodnot:

- SingleRanging – snímá objekt pomocí jednoho senzoru, avšak za pomoci histogramu může snímat více objektů. Přičemž měří vzdálenost jednotlivých objektů, status (zda proběhlo měření v pořádku nebo ne) a měří kcps/spad (kilo-count of photons per second, počet přijatých fotonů za vteřinu) jak z okolí, tak z odrazu samotného vysílaného signálu.
- MultipleRanging – měří vzdálenost a status měření objektů status (zda proběhlo měření v pořádku či ne) snímaných na jednotlivých senzorech.

### 9.1.6 Graphical User Interface (GUI) VL53L3CX

Jedná se o grafické uživatelské rozhraní pro systémy Windows 7, Windows 8 a Windows 10. Toto konkrétní GUI je určeno pro ovládání rozšiřující desky X-Nucleo-53L3CX připojené k desce s jádrem STM32F401RE. Lze ovládat každý senzor připojený k desce zvlášť, a v případě desky X-Nucleo-53L3A2 lze tedy ovládat i jednotlivé přídavné senzory. V reálném čase zobrazuje vzdálenost v centimetrech, sílu signálu, postup kalibrace a záznam transakcí I2C sběrnice. [32]

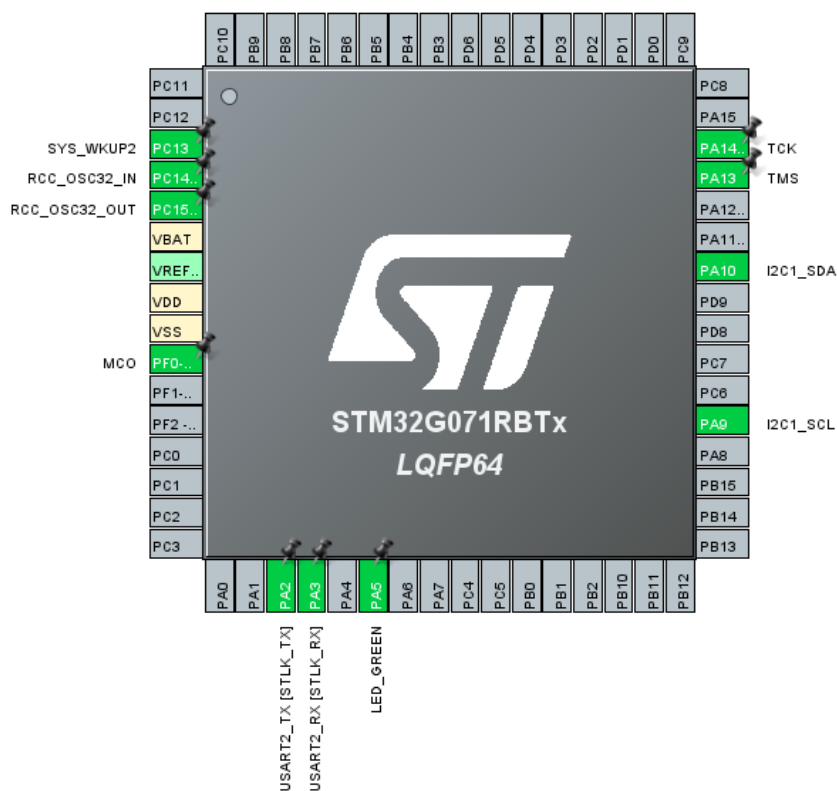
### 9.1.7 Tera Term

Tera term je emulátor terminálu pro operační systém Windows. Umožňuje komunikaci se zařízeními jako jsou např. mikrokontrolery a poskytuje možnost odesílání a přijímání dat v seriovém režimu. Tera term má velkou škálu funkcí pro správu komunikace. Lze nastavit různé parametry komunikace (např. baud rate, stop bits, paritu), podporuje připojení pomocí sériového portu nebo TCP/IP (telnet, SSH), funkce pro odesílání souborů. Dále si lze ukládat a načítat nastavení a další funkce. Tento emulátor je často využíván při vývoji, testování a správě embedded systémů, kde je zapotřebí komunikovat pomocí sériového rozhraní. Taký je široce používaný mezi uživateli pracující s mikrokontrolery a zařízeními pro IoT. [58]

## 9.2 Příprava

Příprava na vyvíjení vlastního návrhu probíhala nejprve seznámením se s aplikačním rozhraním CUBEIDE, nejprve bylo však nutností připojit správně vývojovou desku k počítači. Deska Nucleo má vestavěný micro-B konektor. Po připojení k PC je nutné zkontrolovat ve správci zařízení, zda je zařízení připojeno a zdali si počítač stáhl potřebné ovladače sám. Pokud ne, je zapotřebí stáhnout ovladače ze stránek výrobce.

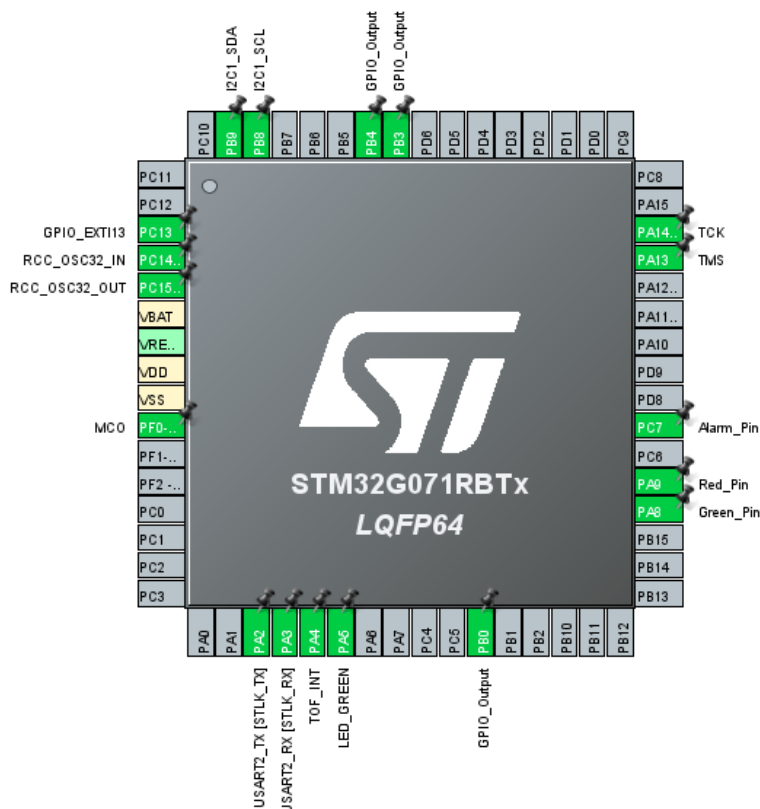
Při zakládání nového projektu je potřeba vybrat správnou desku a je také zapotřebí vybrat, zdali bude vygenerovaný kód v jazyce C nebo C++. Po vygenerování projekt obsahuje grafické rozhraní pro vybranou desku (viz Obr. 36) a jednotlivé soubory s kódy. V grafickém rozhraní je možnost konfigurace samotné desky, a lze ji nakonfigurovat podle fyzické potřeby.



Obrázek 36 defaultní rozložení pinů v CubeIDE

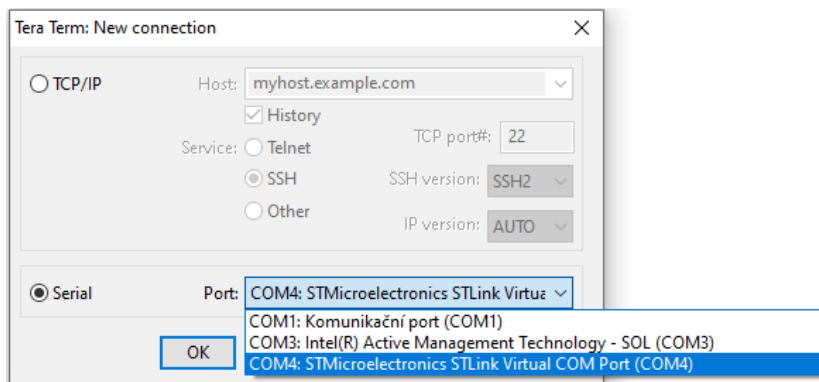
Po stažení softwarového balíčku pro desky z řady STM32G0, uvnitř lze nalézt mimo jiné knihovnu X-CUBE-TOF1 pro rozšiřující desku X-Nucleo-53L3A2. Dále obsahuje dvě aplikace jednu pro snímání pomocí jednoho senzoru a druhou pro snímání pomocí více senzorů. Dalším krokem po stažení knihovny TOF1 je nakonfigurování vlastností jednotlivých pinoutů. Důležité je nastavit konektivitu pomocí I2C sériové sběrnice, která k fungování

potřebuje 2 vodiče. Jeden, který tvoří hodinový signál SCL (synchronous clock) a druhý, který tvoří datový kanál SDA (synchronous data). Poté je nutné nastavit jednotlivé piny dle potřeby, jako jsou tlačítka na vývojové desce nucleo (jedno pro reset a druhé user tlačítko) nebo např. piny, kde jsou připojeny jiné periferie (např. LED diody) (viz Obr. 37).



Obrázek 37 rozložení pinů po konfiguraci

Pokud je zařízení správně připojeno, je možné kód zkompileovat a nahrát do desky Nucleo. Pro zobrazení výstupu je zapotřebí programu Tera Term. Při spuštění programu je zvolen typ připojení jako Sériový port a je vybrán správný port (viz Obr. 38). Po připojení je nutné zvolit správnou rychlost přenosu (baud rate) na 115 200 b/s.



Obrázek 38 nastavení portu v TeraTerm

Po správném nastavení terminálu a jeho resetování začne terminál vypisovat jednotlivá naměřená data (viz Obr. 39). V tomto případě, kdy je spuštěn program „snímání pomocí jednoho senzoru“, jsou vypisovány počty snímaných cílů. Dále je zobrazování, zda proběhlo snímání vzdálenosti cíle v pořádku „0“ nebo ne „!0“, jeho vzdálenost od senzoru, počet přijatých fotonů z okolí a počet přijatých fotonů z vysílaného signálu.

```

COM4 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
|----> Status = 0, Distance = 2119 mm , Ambient = 8.81 kcps/spad, Signal = 1.33 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2101 mm , Ambient = 8.73 kcps/spad, Signal = 1.51 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2122 mm , Ambient = 8.77 kcps/spad, Signal = 1.33 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2093 mm , Ambient = 8.70 kcps/spad, Signal = 1.59 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2121 mm , Ambient = 8.84 kcps/spad, Signal = 1.40 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2107 mm , Ambient = 8.66 kcps/spad, Signal = 1.66 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2120 mm , Ambient = 8.77 kcps/spad, Signal = 1.40 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2096 mm , Ambient = 8.62 kcps/spad, Signal = 1.77 kcps/spad
Targets = 1
|----> Status = 0, Distance = 2152 mm , Ambient = 8.77 kcps/spad, Signal = 1.22 kcps/spad

```

Obrázek 39 výpis při snímání jedním senzorem

Pro spuštění programu „snímání více senzory“ je zapotřebí připojit k desce další dva odnímatelné senzory. Po spuštění programu jsou vypsány do terminálu hodnoty naměřené z každého senzoru ve stejném okamžiku, jako je status pro kontrolu správnosti snímání objektu a jeho vzdálenost od senzoru (viz Obr. 40).

```

COM4 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
LEFT - Status = 0, Distance = 2131 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2163 mm
RIGHT - Status = 12, Distance = 0 mm

LEFT - Status = 0, Distance = 2174 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2168 mm
RIGHT - Status = 0, Distance = 2168 mm

LEFT - Status = 0, Distance = 2117 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2161 mm
RIGHT - Status = 12, Distance = 0 mm

LEFT - Status = 0, Distance = 2183 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2156 mm
RIGHT - Status = 0, Distance = 2156 mm

LEFT - Status = 0, Distance = 2127 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2154 mm
RIGHT - Status = 12, Distance = 0 mm

LEFT - Status = 0, Distance = 2183 mm
CENTER - Status = 0, Distance = 2168 mm
RIGHT - Status = 0, Distance = 2168 mm

```

Obrázek 40 výpis při snímání více senzory

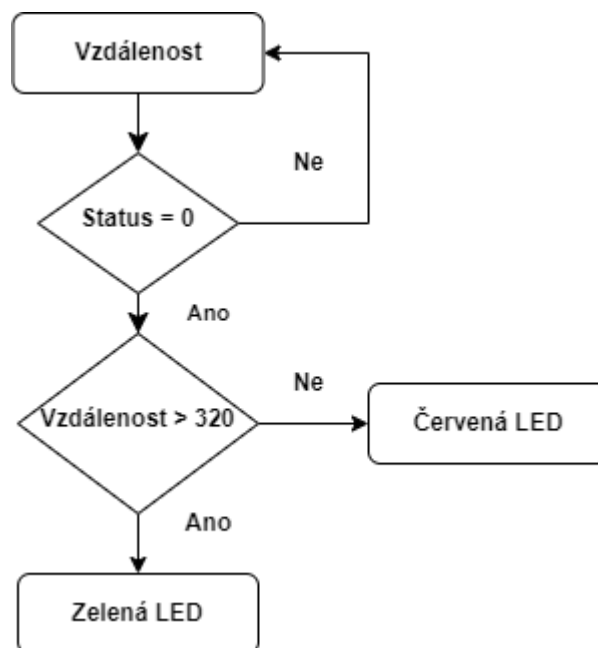
### 9.3 Detekce objektu se světelnou signalizací

Jedná se o první praktickou realizaci a jde o využití základního principu ToF senzoru v praxi, který taktéž otestuje funkčnost senzoru a vyzkoušení si programování senzoru.

V rámci přípravy byly vytyčeny požadované funkce zařízení a postup samotného řešení. Jedná se tedy o detekci objektu v určité oblasti. Pro tento příklad byla použita vzdálenost 320 mm, tedy pokud senzor naměří, že vzdálenost objektu od senzoru je větší než 320 mm – bude svítit zelená signalizace. Pokud bude vzdálenost menší než 320 mm – bude svítit červená signalizace.

Tato realizace může simulovat např. bezpečnostní opatření pro vstup do oblasti, kde operuje robotický manipulátor, nebo pokud senzor zaznamená nepovolený vstup do určité oblasti.

Na základě představy byl vytvořen vývojový diagram (viz Obr. 41), který popisuje, jak by měl výsledný program fungovat. Nejprve se kontroluje status, který označuje, zda proběhlo měření správně, a poté se kontroluje vzdálenost, na základě které se rozsvítí příslušná barva.



Obrázek 41 vývojový diagram pro detekci objektu

Pro realizování tohoto návrhu bylo zapotřebí dvou LED, dvou rezistorů 230 Ω, nepájivé pole a několik vodičů pro propojení. Po zapojení LED na rozšiřující desku bylo zapotřebí správně navrhnout jednotlivé piny v softwaru CubeIDE (viz Obr. 37). Kromě defaultních pinů, které vznikly na základě výběru konkrétní desky, byly rovněž přidány dva piny nastavené jako GPIO\_output (general purpose input output) a pojmenovány jako „Red\_Pin“ a „Green\_Pin“.

Funkce „print\_result“ slouží k vypísání vzdálenosti a statusu měření do konzole, a pokud je status roven 0, tak je zavolána funkce „led“ (viz Obr. 42).

```
static void print_result(RANGING_SENSOR_Result_t *Result)
{
    uint8_t i;

    for (i = 0; i < RANGING_SENSOR_MAX_NB_ZONES; i++)
    {
        printf("Status = %2ld, Distance = %5ld mm",
            (long)Result->ZoneResult[i].Status[0],
            (long)Result->ZoneResult[i].Distance[0]);

        HAL_GPIO_WritePin(Red_Pin_GPIO_Port, Red_Pin_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_GPIO_WritePin(Green_Pin_GPIO_Port, Green_Pin_Pin, GPIO_PIN_SET);

        if((long)Result->ZoneResult[i].Status[0] == 0){
            led((long)Result->ZoneResult[i].Distance[0]);
        }
    }
    printf ("\n");
}
```

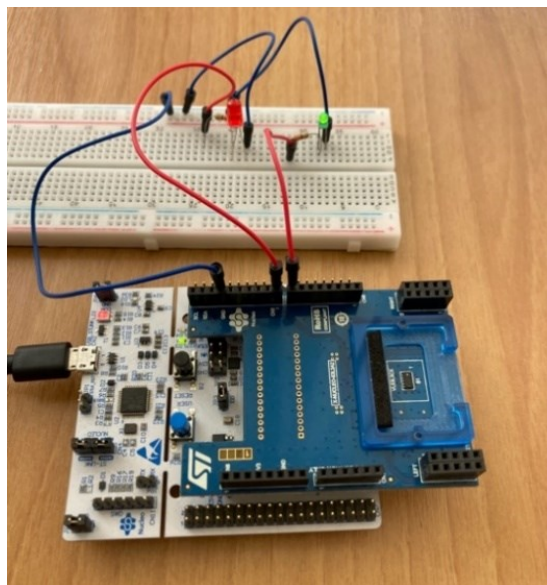
Obrázek 42 funkce print\_result

Funkce „led“ slouží k rozsvícení LED na základě naměřené vzdálenosti (viz Obr. 43).

```
static void led(uint32_t distance){
    if(distance<320 && distance!=0){
        HAL_GPIO_WritePin(Green_Pin_GPIO_Port, Green_Pin_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_GPIO_WritePin(Red_Pin_GPIO_Port, Red_Pin_Pin, GPIO_PIN_SET);
    }
    else if(distance>=320 || distance ==0){
        HAL_GPIO_WritePin(Red_Pin_GPIO_Port, Red_Pin_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_GPIO_WritePin(Green_Pin_GPIO_Port, Green_Pin_Pin, GPIO_PIN_SET);
    }
}
```

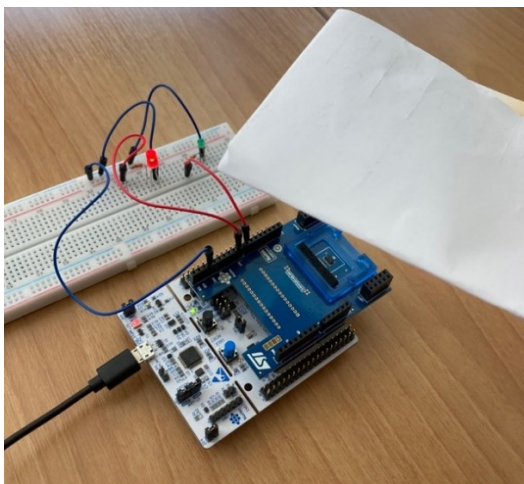
Obrázek 43 funkce led

Na Obrázku 44 je nejprve znázorněn stav, když objekt není detekován.



Obrázek 44 objekt není detekován

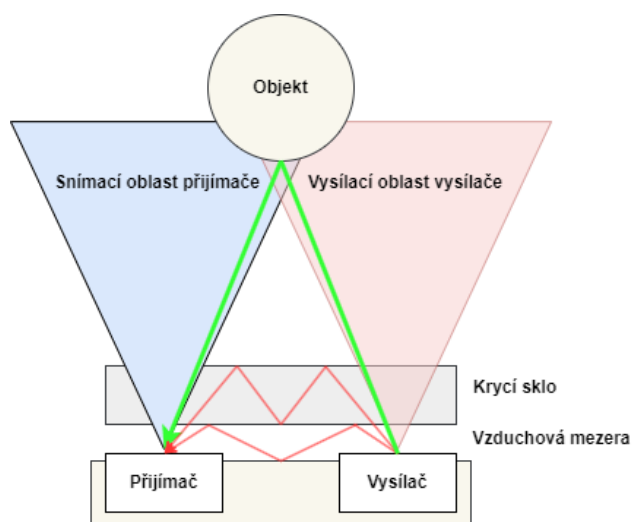
Na Obrázku 45 zobrazený stav detekování objektu.



Obrázek 45 detekce objektu

#### 9.4 Kalibrace senzoru

Důležitou částí práce byla kalibrace senzoru, jelikož každý senzor může mít z výroby odlišné vlastnosti, jak optické, tak konstrukční. Nejprve bylo zapotřebí nastavit hodnotu offset. Problém nastal v momentě aplikace krycího skla na senzor, který v důsledku vrstvy skla začal vypisovat nesprávné hodnoty, tzv přeslechy. Tyto hodnoty byly způsobeny odrazy jednotlivých fotonů od krycího skla (viz Obr. 46). Přeslechy se projeví ve formě snímání nepravdivých vzdáleností, kdy je senzorem vypisována hodnota vzdálenosti objektu, přestože se před ní žádný nenachází. Vyřešení tohoto problému je klíčové, neboť senzor při využívání v praxi musí být chráněn krycím sklem před okolním prostředím a taktéž může zabránit snímání nechtěného záření z okolí senzoru.



Obrázek 46 crosstalk převzato z [59]

Ideální krycí sklo má mít, podle výrobce, tyto vlastnosti:

- „Žádné strukturální vady v plastovém nebo skleněném materiálu.
- Žádné povrchové vady, které by mohly způsobit rozptyl světla nebo citlivost na otisky prstů.
- Propustnost  $>85\%$  v blízkém IR ( $940\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ ) a nízký rozptyl ( $<6\%$ ).
- Vnější povlaky, které nezhoršují odolnost vůči otiskům prstů
- Jednoduchý materiál. Použití dvojího materiálu může změnit výkon.
- Ideální konstrukce designu pro průmysl je
  - Malá vzduchová mezera ( $<0,5\text{ mm}$ )
  - Tenké sklo ( $<0,6\text{ mm}$ )
  - Nízký sklon skla  $<10^\circ$
  - Těsné tolerance.“ [59]

V případě, že nějaká aplikace neumožňuje použití malé vzduchové mezery mezi sklem nebo náhrady za sklo s velmi malou tloušťkou, je možné vzniklý crosstalk eliminovat pomocí těsnění, které zajistí oddělení přijímače a vysílače.

To zajistí, že potenciální crosstalk, což jsou fotony odražené od stěn krycího skla, nedorazí/nepronikají na přijímač. Pro optimální výkon musí být krycí sklo přiložené rovnoběžně se senzorem.

Senzor po aplikování krycího skla a vzduchové mezery vypadá následovně (viz Obr. 47).

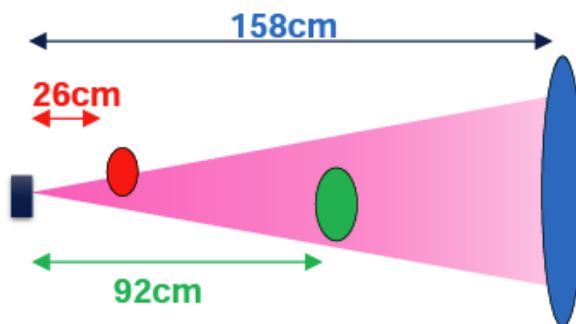


Obrázek 47 aplikace krycího skla

Kalibrace senzoru proti crosstalku a nastavení offsetu probíhá na začátku, tedy po zapnutí programu. Histogram umožňuje detekci více objektů, je založen na „časových oknech“, těchto oken je 24 a označují se „bin“. Jednotlivé biny udávají počet fotonů přijatých

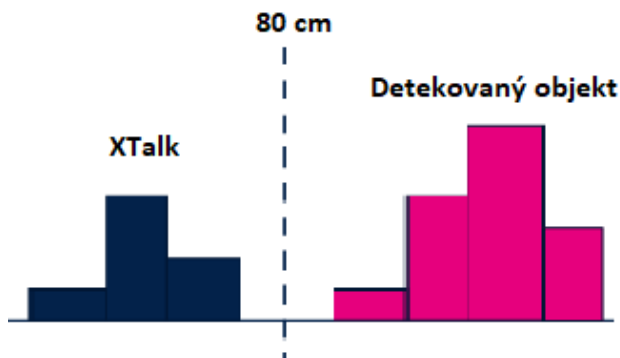


senzorem během určitého času. Aby byl schopen senzor zaznamenat více objektů, musí se od sebe vzdálit min 80 cm (80 cm je rovno přibližně třemi biny) (viz Obr. 48).



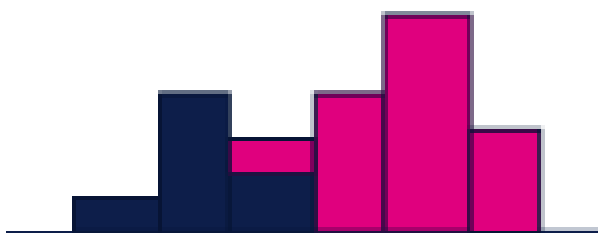
Obrázek 48 snímání více objektů [60]

Senzor detekuje tři objekty, které se od sebe nacházejí ve vzdálenosti větší než 80 cm. Histogram detekuje tři změny při snímání vzdálenosti. Díky tomu je senzor imunní vůči znečištění skla při měření objektu ve vzdálenosti větší než 80 cm, jelikož se detekce nepřekrývají a lze je snadno oddělit (viz Obr. 49). [61]



Obrázek 49 imunita vůči crosstalku [60]

Při měření pod 80 cm je nutno crosstalk kompenzovat, neboť časová okna snímaného objektu a vzniklého crosstalku se překrývají (viz Obr. 50), kde tmavá data patří crosstalku a červená snímanému objektu.



Obrázek 50 crosstalk kompenzace [60]

Kompenzace je prováděná pomocí funkce „XTalkCalibration“, která funguje tak, že se nejprve načtou snímaná data bez přítomnosti snímaného objektu před senzorem a ty poté odstraní z celkového snímaného histogramu. Celkově je tato funkce velice komplexní a nabízí mnoho parametrů, které lze nastavit, pokud je zapotřebí kalibraci vyladit pro konkrétní aplikaci. [60]

Poté je nutné vyřešit offset senzoru, který napomáhá ke zlepšení přesnosti senzoru a celkovému výkonu senzoru i při zhoršených podmínkách (změny teploty, tlaku a vlhkosti nebo úroveň osvětlení).

Funkce „OffsetCalibration“ řeší problém offsetu při měření vzdálenosti s krycím sklem.

V programu v proměnné „cal\_distance\_mm“ se určí vzdálenost měřeného objektu během kalibrace offsetu. Offset se řeší při spuštění programu způsobem, že je objekt umístěn do vzdálenosti nastavené v „cal\_distance\_mm“, následně senzor naměří 10 hodnot, které zprůměruje a výsledný Offset je vypočten pomocí vzorce níže. Offset hodnotu je dobré si uložit, aby mohla být využita při každém zapnutí senzoru a nemusí se proces kalibrace opakovat.

$$\text{Offset} = \text{TargetDistance}(\text{cal\_distance\_mm}) - \text{AverageRange}$$

Crosstalk se projevoval hlavně pokud senzor nesnímal žádný objekt. Lze vidět, že při měření před aplikováním funkce pro kompenzaci crosstalku senzor nenaměřil vzdálenost žádného objektu, a tak vypisoval chybné hodnoty. Senzor začne měřit správně až po umístění objektu před něj. (viz Obr. 51).

```
Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 0 mm

Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 27 mm

Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 3 mm

Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 99 mm

Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 104 mm

Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 142 mm
```

Obrázek 51 výpis bez kalibrace

Pokud se před senzorem nenacházel žádný objekt, vypisuje hodnotu „0“. Tento problém nastal před vykompenzováním crosstalku. (viz Obr. 52).

```
Targets = 0
Targets = 0
Targets = 1
|---> Status = 12, Distance = 112 mm
Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 125 mm
Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 129 mm
Targets = 1
|---> Status = 0, Distance = 133 mm
```

Obrázek 52 výpis s kalibrací

#### 9.4.1 Zapnutí kalibrace pomocí tlačítka

Bylo provedeno ošetření přerušování tlačítka na vývojové desce. Po přijetí přerušování se automaticky zapne kalibrace senzoru. Tato obsluha přerušování je zde z možnosti provedení kalibrace kdykoliv během snímání.

Aby bylo možné přerušování implementovat, bylo zapotřebí pozměnit původní kód v knihovně, který fungoval zavoláním v „main.c“ souboru funkci TOF\_Process z nižší úrovně (viz Obr. 53).

```
while (1)
{
    MX_TOF_Process();
}
```

Obrázek 53 cyklus while(1) v main.c

Na nižší úrovni ve funkci „TOF\_Process“ je volána funkce „MX\_53L3A2\_SimpleRanging\_process“, kde se kromě inicializace senzorů a nastavení vlastností nacházela vlastní nekonečná while(1) smyčka (tato smyčka pracuje v nekonečném cyklu), kde se provádělo měření, výpis měření a kterou nešlo přerušit vyvoláním interruptu na tlačítku (viz Obr. 54).

```
while (1)
{
    /* polling mode */
    status = VL53L3A2_RANGING_SENSOR_GetDistance(VL53L3A2_DEV_CENTER, &Result);

    if (status == BSP_ERROR_NONE)
    {
        print_result(&Result);
    }

    HAL_Delay(POLLING_PERIOD);
}
```

Obrázek 54 cyklus while(1) na nižší úrovni

Proto bylo zapotřebí celou funkci „MX\_53L3A2\_SimpleRanging\_process“ rozdělit na dvě funkce. Inicializační, která se provede jednou při spuštění programu, před samotným měřením a funkci „MX\_53L3A2\_MultiSensorGetRange“, kde probíhá měření. Nekonečná smyčka se však na nižší úrovni nenachází, ale je pouze v „main.c“. Díky tomu lze tuto smyčku pro potřeby přerušení podmínit pomocí tlačítka pro kalibraci.

Samotné přerušení bylo provedeno v souboru "main.c" ve funkci "HAL\_GPIO\_EXTI\_Callback". Tato funkce je vyvolána po přerušení na pinu GPIO\_Pin. Pokud se tento pin rovná pinu tlačítka, rozsvítí se LED diod na vývojové desce, která indikuje provádění kalibrace, a hodnota proměnné "CalFlag" se nastaví na jedničku. (viz Obr. 55).

```
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin)
{
    if (GPIO_Pin == B1_Pin)
    {
        HAL_GPIO_WritePin(LD2_GPIO_Port, LD2_Pin, GPIO_PIN_SET);
        CalFlag = 1;
    }
}
```

Obrázek 55 obsluha přerušení

Poté v hlavní smyčce, pokud je proměnná „CalFlag“ rovna jedné, se spustí požadovaná funkce pro provedení kalibrace a po jejím provedení se proměnná nastaví na nulu a zhasne se LED. Pokud je ve smyčce vyhodnocena proměnná „CalFlag“ rovnající se nule, tak probíhá měření pomocí funkce „MX\_TOF\_GetRange“ (viz Obr. 56).

```
while (1)
{
    if (CalFlag == 0)
    {
        MX_TOF_GetRange();
    }

    else
    {
        printf("*** VL53L3A2 calibration initiated ***\n");
        //MX_TOF_XtalkCal();
        MX_TOF_OffsetCal();

        CalFlag = 0;
        HAL_GPIO_WritePin(LD2_GPIO_Port, LD2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    }
}
```

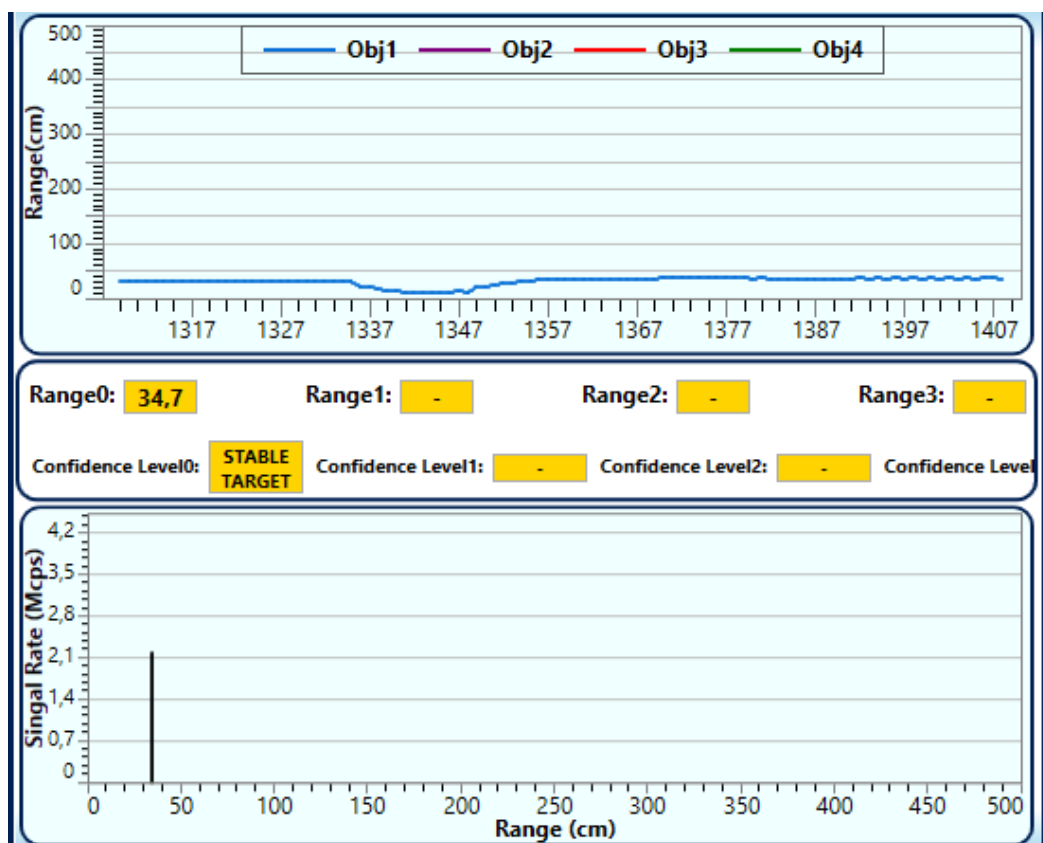
Obrázek 56 cyklus while(1) v main.c po změně

V současné chvíli je implementována pouze funkce pro kalibraci offsetu, které bylo vysvětleno výše. Je zde připraveno taktéž volání pro kalibraci crosstalku, které je však mnohem komplexnější a vyžaduje hlubší znalosti, proto zde není implementováno.

#### 9.4.2 Kalibrace pomocí GUI

Kalibraci senzoru lze také vyřešit za pomoci grafického uživatelského rozhraní, které je k dispozici u jednotlivých senzorů. Kvůli kompatibilitě bylo zapotřebí využít vývojovou desku Nucleo-F401RE, protože s deskou Nucelo-G071RB nebylo možné navázat komunikaci s GUI. Po vyměnění desky probíhalo spojení s GUI bez dalších problémů.

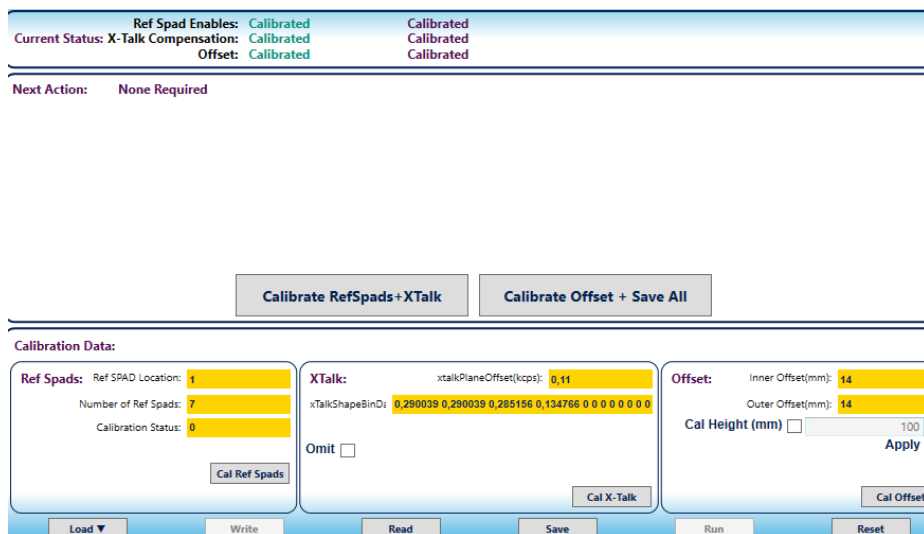
GUI umožní vykreslovat grafy snímaných veličin (vzdálenost, síla signálu) v reálném čase, taktéž obnovovací frekvenci, počet detekovaných objektů (viz Obr. 57) a také lze nastavit rychlost snímání, mód snímání atd.



Obrázek 57 GUI vykreslování měření

Díky GUI lze taktéž provést kalibraci senzoru – tedy kalibraci crosstalku a offset kalibraci. Jednotlivé kalibrace lze taktéž provést samostatně a pro kalibraci offsetu je možnost nastavit kalibrační výšku (viz Obr. 58). Po zkalibrování senzoru lze hodnoty kalibrace uložit do

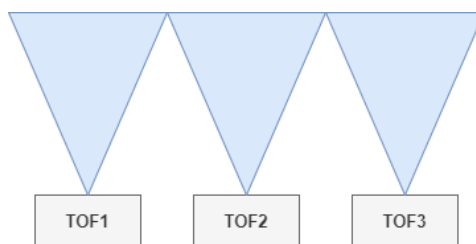
paměti senzoru, aby se nemusela kalibrace po každém spuštění provádět znova. Kalibrační data jdou také uložit do souboru nebo je lze načíst ze souboru.



Obrázek 58 GUI kalibrace

## 9.5 Detekce jednoduchých gest

Další praktickou realizací je detekce jednoduchých gest. K detekování gest je nejprve zapotřebí připojit dva přídatné senzory VL53L3CX k rozšiřující desce, díky kterým lze následně zpracovat jednoduchá gesta. Vzhledem k tomu, že při připojení přídatných senzorů přímo k desce nebyl dobrý kontakt, bylo zapotřebí na desku připájet dutinky s piny pro následné připojení přídatných senzorů. Po této aplikaci už přídatné senzory fungovaly správně a výsledná snímaná zóna složená ze tří senzorů je znázorněna na Obrázku 59.



Obrázek 59 FoV jednotlivých senzorů

Využití alespoň 2 senzorů je nutností kvůli používanému senzoru, který detekuje pouze v jedné zóně. Přidáním postranních senzorů lze detekovat jednoduchá gesta. Sensory jsou od sebe vzdáleny přibližně 4 cm, tudíž dohromady mají šířku více než 8 cm. Tato vzdálenost je nutná pro to, aby se jednotlivá FoV senzorů nepřekrývala anebo nevznikala mezi nimi mezera. To mohlo mít za následek chybné snímání gest (např. senzor snímá ruku, která se nachází pouze nad senzorem vedle).

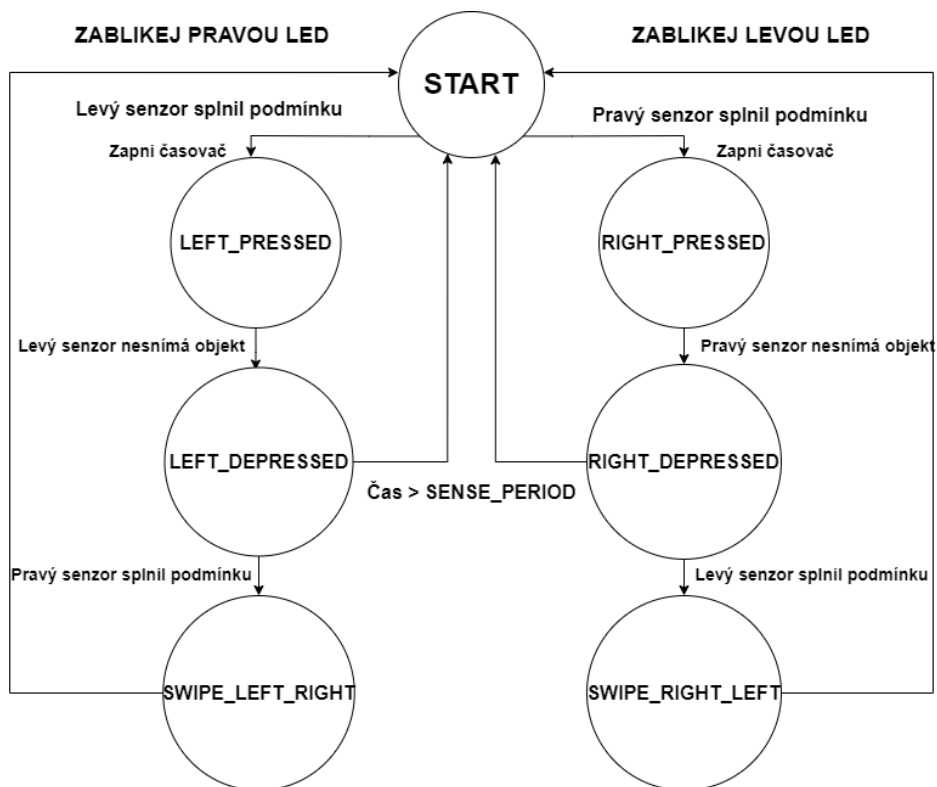
### 9.5.1 Princip

Bylo rozhodnuto, že gesta, která budou rozeznávána, bude přejetí ruky od levého senzoru k pravému, a naopak. Detekce gest je validní pouze tehdy, je-li objekt ve vzdálenosti menší než nastavené maximum a zároveň větší než nastavené minimum, a také když je signál odrazu vyšší než definovaný threshold. Tím lze eliminovat falešné odrazy, šумы atd. Šířku okna si lze přenastavit v kódu v jednotlivých „define“ (viz Obr. 60).

```
#define MAX_GESTURE_HEIGHT (300U)
#define MIN_GESTURE_HEIGHT (80U)
#define MIN_VALID_SIGNAL (8.0)
```

Obrázek 60 definování proměnných

Detekce gest je založena na vstupu objektu do zóny jednoho ze senzorů, opuštění zóny toho samého senzoru a očekávaném vstupu do zóny druhého senzoru. Pokud nebude detekován vstup do zóny druhého senzoru v rámci určitého časového období, bude se proces opakovat. Pokud bude v definovaném čase detekován vstup na jednom ze senzorů a poté detekován vstup do zóny druhého senzoru, bude identifikováno gesto, tedy podle směru detekce, a to buď gesto zleva doprava nebo zprava doleva. Tato identifikace třikrát rozbliká příslušnou LED a poté se celý proces opakuje. Bude využit konečný automat a na Obrázku 61 lze vidět jeho návrh.



Obrázek 61 konečný automat pro detekci gest

### 9.5.2 Realizace detekce gest

Ve funkci „MX\_53L3A2\_MultiSensorGetRange“, se nejprve kontroluje, zda měření na levém a pravém senzoru proběhlo v pořádku. Poté do pole „GestHeight“ uloží vzdálenost pro jednotlivé senzory a do pole „GestSignal“ uloží sílu přijatého signálu v kcps. Poté je volána funkce „blink\_led“, která obsahuje rozhodovací logiku pro rozpoznání gest (viz Obr. 62).

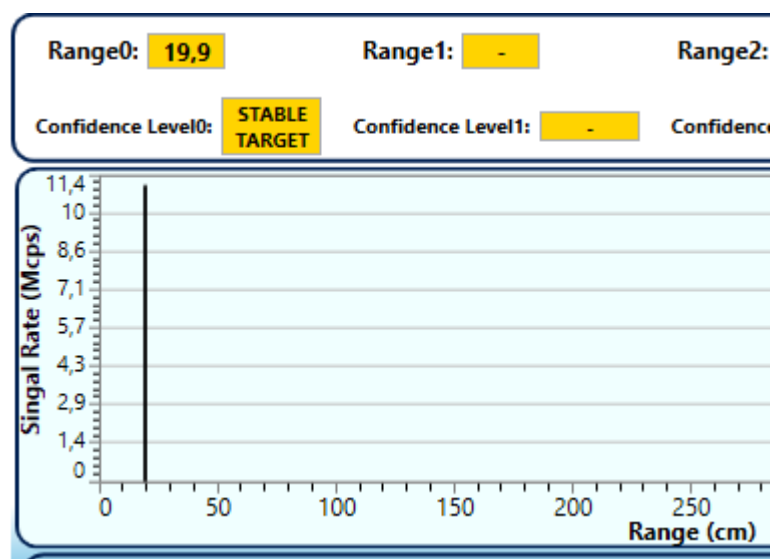
```
static void MX_53L3A2_MultiSensorGetRange(void)
{
    status = VL53L3A2_RANGING_SENSOR_GetDistance(0, &Result);
    if (status == BSP_ERROR_NONE)
    {
        GestSignal[0] = Result.ZoneResult[0].Signal[0];
        GestHeight[0] = Result.ZoneResult[0].Distance[0];
    }

    status = VL53L3A2_RANGING_SENSOR_GetDistance(2, &Result);
    if (status == BSP_ERROR_NONE)
    {
        GestSignal[2] = Result.ZoneResult[0].Signal[0];
        GestHeight[2] = Result.ZoneResult[0].Distance[0];
    }

    blink_led();
}
```

Obrázek 62 funkce MX\_53L3A2\_MultiSensorGetRange

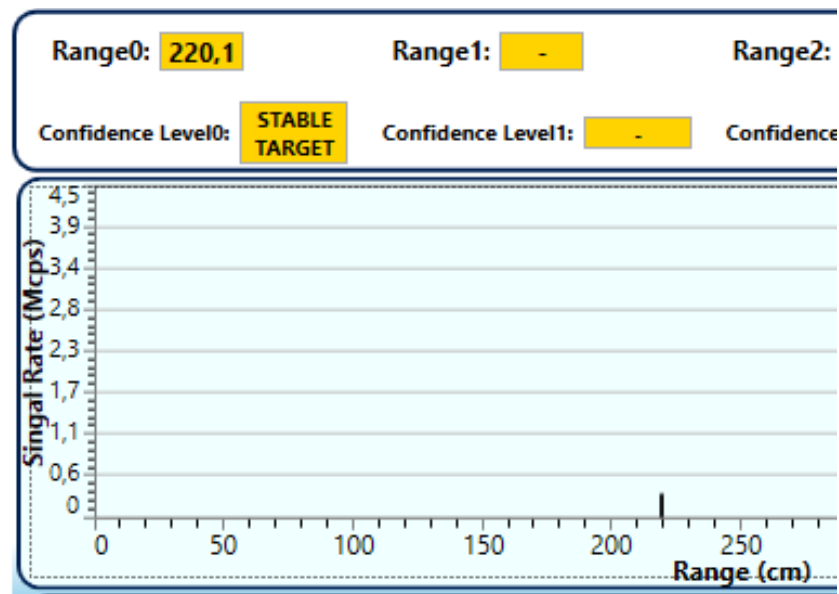
Síla signálu je snímána z důvodu redukce šumu a crosstalku přijatého z okolí. To lze redukovat právě pomocí zjištění síly přijatého signálu, jak lze vidět na Obrázku 63. Na obrázku je snímán objekt v požadované vzdálenosti (20 cm) má hodnotu síly signálu kolem 11 kcps.



Obrázek 63 síla signálu při snímání ruky



Na Obrázku 64 není detekován objekt, ale nechtěný signál, což lze poznat pomocí malé síly signálu kolem 0,4 kcps, zde konkrétně se vzdáleností 220 cm. Jedná se o náhodnou veličinu, která představuje zmíněný šum. Většinou je tento šum reprezentován malým signálem, proto ho lze identifikovat silou signálu.



Obrázek 64 síla signálu šumu

Pro rozpoznání gest byla použita technika konečného automatu, který se pokaždé nachází právě v jednom stavu z několika možných stavů. Pro tyto stavy je nutno si definovat proměnnou typu „enum“, která obsahuje názvy všech stavů (viz Obr. 65).

```
typedef enum
{
    START,
    LEFT_PRESSED,
    RIGHT_PRESSED,
    LEFT_DEPRESSED,
    RIGHT_DEPRESSED,
    SWIPE_LEFT_RIGHT,
    SWIPE_RIGHT_LEFT
}t_stav;
```

Obrázek 65 definování proměnné typu enum

Jednotlivé stavy jsou poté ve funkci „blink\_led“ měněny pomocí podmínky switch na základě proměnné „state“, která na začátku obsahuje stav START. Funkce „blink\_led“ obsahuje pouze podmínku „switch“ (viz Příloha P1).

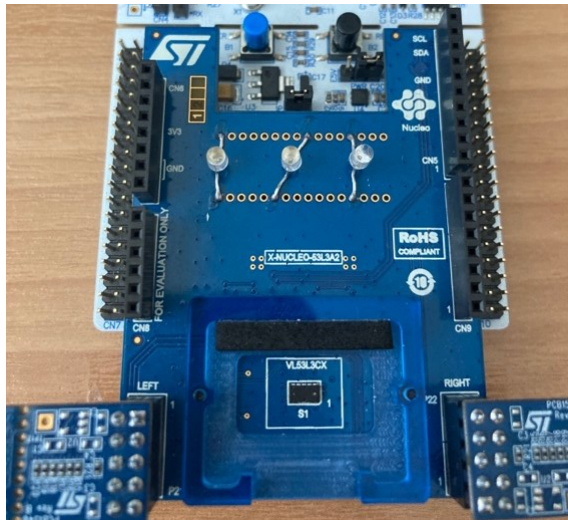
Jednotlivé stavy obsahují následující logiku rozhodování:

- **START** – Kontroluje, zda je detekovaná vzdálenost snímána na pravém nebo na levém senzoru, zda je snímání v požadovaném rozmezí a zda je síla signálu větší či menší, než je požadovaná hodnota. Pokud podmínku jeden ze senzorů splňuje, je zkontrolováno, zda síla tohoto signálu je větší než síla signálu na druhém senzoru plus pevně daná hystereze. Hodnota hystereze je zde přičítána, aby rozdíl mezi silami signálu byl „mnohem“ větší (tzn. pokud mají signály podobnou sílu bude vyhodnoceno, že ani jeden signál nemá větší sílu než druhý). Pokud se splní všechny podmínky, tak jeden ze senzorů detekoval validní objekt a je spuštěn časovač. Následně se změní stav na **LEFT\_PRESSED** nebo **RIGHT\_PRESSED** podle vyhodnocení. Pokud nebudou splněny podmínky, bude se celý proces ověřování opakovat.
- **LEFT\_PRESSED** – Pokud objekt opustí zónu levého senzoru přepne se stav na **LEFT\_DEPRESSED**, pokud ne – stav zůstává.
- **RIGHT\_PRESSED** – Pokud objekt opustí zónu pravého senzoru přepne se stav na **RIGHT\_DEPRESSED**, pokud ne – stav zůstává.
- **LEFT\_DEPRESSED** – Zde se kontroluje, zda hodnoty přijaté na pravém senzoru splňují podmínky totožné ve stavu **START**, pokud ano – stav se změní na **SWIPE\_LEFT\_RIGHT**. Podmínka se kontroluje do doby, než je časovač menší než **SENSE\_PERIOD**, potom je stav změněn na **START**.
- **RIGHT\_DEPRESSED** – Zde se kontroluje, zda hodnoty přijaté na levém senzoru splňují podmínky totožné ve stavu **START**, pokud ano – stav se změní na **SWIPE\_RIGHT\_LEFT**. Podmínka se kontroluje do doby, než je časovač menší než **SENSE\_PERIOD**, potom je stav změněn na **START**.
- **SWIPE\_LEFT\_RIGHT** – třikrát zabliká pravou LED a nastaví stav na **START**.
- **SWIPE\_RIGHT\_LEFT** – třikrát zabliká levou LED a nastaví stav na **START**.

#### **9.5.2.1 Zapojení a rozsvícení LED diod**

Pro rozsvícení LED diod bylo zapotřebí nejprve připájet na vývojovou desku tři LED diody (viz Obr. 66). LED diody byly napájeny na piny podle schématu I2C expandéru (viz Příloha P II), kde lze zjistit, na které piny umístit katodu LED diody, a na které piny umístit anodu. Každý z expandérů má 16 bitů, všechny bity jsou nastaveny jako výstupy. Levá LED je na pinu **GPIO\_0** s adresou **0x0001**, střední LED je na pinu **GPIO\_7** s adresou **0x0200** a pravá

LED je na pinu GPIO\_9 s adresou 0x0080. Na jednotlivé piny se posílá „0“ pro rozsvícení LED diody a „1“ pro její zhasnutí.



Obrázek 66 LED diody na vývojové desce

### 9.5.3 Možnosti vylepšení do budoucna

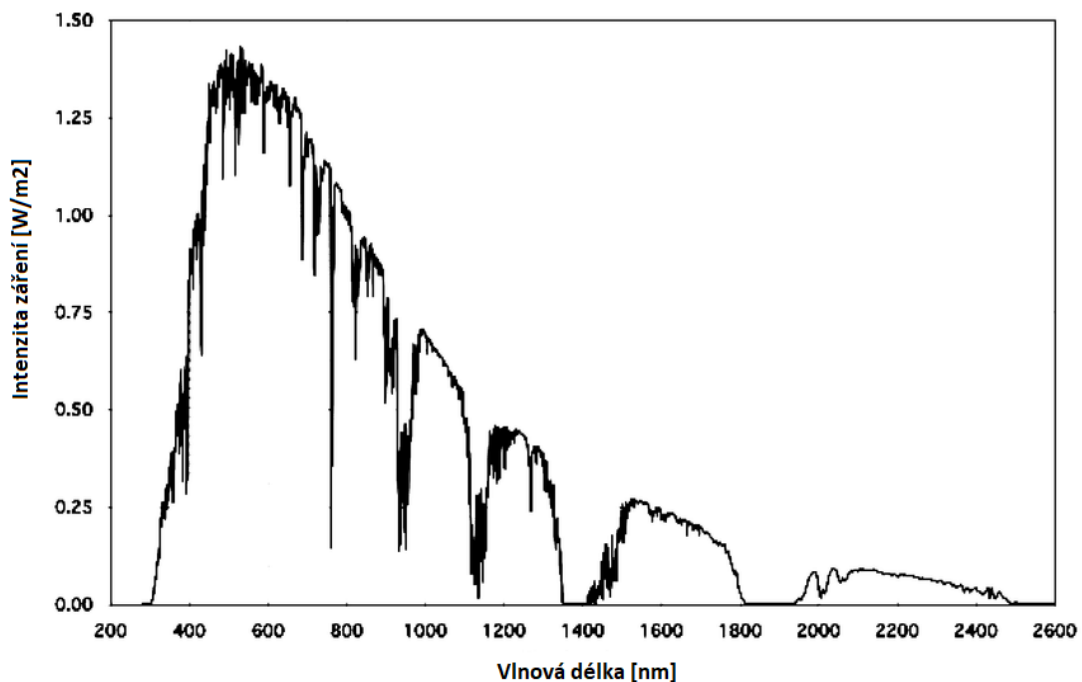
- Snímání by mohlo být zrychleno použitím jen nutných částí z knihovny a popř. na-programování v LL (tedy v nižší vrstvě kódu), kde by se přistupovalo přímo na jednotlivé registry. Díky tomu by se mohla zvýšit rychlost snímání a poté by mohla být zachycena i velmi rychle provedená gesta.
- Přidáním snímání i středního senzoru by se zvýšila přesnost detekce gest, kdy ruka provádějící gesto by musela přejet pokaždé zónu i středního senzoru.
- Při přidání středního senzoru by se mohly jednotlivé zóny překrývat. Pro zabránění vzniku crosstalku by mohla být vytvořena konstrukce např. pomocí 3D tisku, která by jednotlivé senzory od sebe „izolovala“, aby nezachytávaly signál z ostatních zón.
- Dále by mohlo být použito sklo, které by zakrývalo všechny senzory, a tím by se mohl zlepšit výkon snímání, jelikož by se omezilo přijímané záření z okolí senzorů.
- Nyní jsou nastaveny parametry (pro hysterezi, sílu signálu) „na pevně“. Tyto hodnoty se mohou lišit podle prostředí, ve kterém se senzor nachází. Pro optimální výkon by mohla být provedena kalibrace po přerušení tlačítkem. Tato kalibrace by provedla několik měření a poté by se statisticky rozhodlo, na jaké hodnoty nastavit tyto parametry pro optimální měření v daném prostředí.
- Mohla by být zprovozněna další jednoduchá gesta, jako např. přiblížení a oddálení ruky od senzoru, rychlé poklepnání nebo pomalé přibližování a oddálení ruky.

## 10 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRAKTICKÉ REALIZACE

Zde budou zhodnoceny výsledky, které vychází z provedených praktických realizací, tedy detekce objektu a snímání gest. Budou se tedy vztahovat přímo na senzor VL53L3CX, který byl využit při obou realizacích.

Ze zpracování praktických realizací vyšlo několik závěrů:

- I když senzory obsahují filtry proti okolnímu záření, které propouští jen oblast blízko 940 nm, tak je snímání ovlivněno, pokud je vystaveno přímému slunečnímu záření. Tato skutečnost je zde z důvodu, že sluneční záření obsahuje složky, které filtry senzoru propouští (viz Obr. 67). Sluneční záření s vlnovou délkou kolem 940 nm by se dalo softwarově potlačit detailnějším zpracováním přijatého signálu



Obrázek 67 ukázka spektra slunečního záření

- Senzor je nutné zkalibrovat před použitím. Kalibrací offsetu lze minimalizovat výrobní vady, které se mohou nacházet na senzoru, neboť každý vyrobený senzor může mít trochu odlišné vlastnosti (optické, mechanické). Při aplikování krycího skla je nutné taktéž senzor kalibrovat vůči crosstalku, který vzniká na rozhraní krycího skla.
- Kalibrace crosstalku je velmi rozsáhlé téma, knihovny od STM nabízejí hodně možností pro parametrizování jeho kalibrace, avšak toto téma vyžaduje hlubší znalosti a není na stránkách výrobce detailně rozpracováno.

- Kalibraci senzoru lze provést za pomoci GUI pro konkrétní senzor. Je nutno si uvědomit, že jednotlivé GUI podporují jen konkrétní typy vývojových desek, a s jinými typy tedy nekomunikují. Po zkalibrování lze vlastnosti kalibrace uložit do paměti senzoru.
- Kód v knihovnách od výrobce obsahuje základní funkce pro práci se senzorem. Obsahují taktéž poznámky, které přibližují, co daná funkce dělá. Programovat lze pomocí HAL nebo se lze dostat k nižším vrstvám a lze programovat i jednotlivé registry.

## 10.1 Detekce objektu

V této praktické realizaci bylo zapotřebí stáhnout správné knihovny k senzoru. Následně bylo nezbytné programově nastavit několik parametrů senzoru a vytvořit rozhodovací logiku. Díky knihovnám kód umožňuje výpis základních hodnot jako je vzdálenost, síla signálu přijímaného z okolí nebo odraz od snímaného objektu. S těmito hodnotami poté může programátor pracovat dle potřeby. V tomto případě byla využita vzdálenost k rozhodnutí, zda objekt překročil pomyslnou hranici, a na základě toho byla rozsvícena patřičná LED.

Senzor VL53L3CX je vhodný pro detekci objektů do určité vzdálenosti a za určitých podmínek. Senzor snímá objekty i s horší odrazivostí, avšak vlivem horší odrazivosti může být zmenšena maximální snímací vzdálenost. Výhodou senzoru je, že může detekovat objekty i za naprosté tmy a nezávisle na jejich velikosti (od velkých objektů až po velmi malé v řádech cm).

## 10.2 Detekce gest

Tato praktická realizace vyžadovala více programování a testování samotného senzoru. Po naprogramování rozhodovací logiky pro snímání gest, bylo zapotřebí udělat senzor odolnějším vůči nechtěným signálům. Senzor se v odlišných prostředích choval jinak. To může být způsobeno přijímaným slunečním zářením, velkou odrazivostí záření od okolních objektů, neboť vysílané záření okolních objektů se může pohybovat okolo 940 nm. Kvůli tomu je zapotřebí rozhodnout, zda bude senzor robustnější vůči takovýmto nechtěným signálům za cenu menší dynamiky (to může způsobit menší citlivost na snímání gest). Nebo naopak snížit požadavky na robustnost senzoru, kdy bude senzor citlivější, avšak může snímat i nechtěná záření. Tento problém by mohl být vyřešen pomocí automatické kalibrace na základě

statistického měření daného okolí, ve kterém se senzor nachází. Toto téma bylo zmíněno v kapitole 9.5.3 o možných vylepšeních senzoru.

Tento konkrétní typ senzoru VL53L3CX není pro aplikaci snímání gest ideální, neboť je nutné mít alespoň dva senzory, aby snímání gest bylo možné. Kvůli použití více senzorů se značně zvětšuje velikost celkového zařízení, neboť senzory nemohou být ve velké blízkosti u sebe, aby se jejich zorná pole nepřekrývala a zároveň se tak nesnižovala jejich funkčnost. Jelikož je v dnešní době vše minimalizováno do menších rozměrů, nejsou rozměry této soustavy senzorů ideální pro využití v praxi.

Senzory VL53L3CX jsou však spíše koncipované pro jednoduché snímání vzdálenosti objektů. Pro aplikaci snímání gest výrobce poskytují senzory, které umožňují snímání gest za pomoci jednoho senzoru, díky tomu, že snímaný obraz rozdělí do více zón. Tím by se zlepšil jak celkový výkon a přesnost při snímání gest, tak by se i zvětšily možnosti snímatelných gest.

Tato praktická realizace tedy spíše mapuje proces při nastavování senzoru tohoto typu, znázorňuje možnosti jeho programování, vlastnosti samotného senzoru a poukazuje na možné problémy, které mohou během této aplikace vzniknout.

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala poměrně významnou oblastí automatizace, a to jejího uplatnění v prostředí budov. V teoretické části byly popsány jednotlivé technologie a systémy inteligentních budov, jejichž cílem je optimalizovat provozní náklady, snížit energetickou spotřebu, zvýšit efektivitu, zlepšit bezpečnost a poskytnout lepší prostředí pro lidi, kteří v budově žijí nebo pracují. Byly zde řešeny jejich způsoby propojení a komunikace pomocí standardizovaných sběrnic. Mezi základní automatizační prvky patří mimo jiné senzory, byl vysvětlen princip senzoru a také modernější typ tzv. „inteligentní senzor“. Dále byly vypsány možnosti rozdělení senzorů a jejich statické a dynamické vlastnosti.

Nosné téma práce představovaly laserové Time of Flight senzory, které byly zkoumány z pohledu jejich možného využití k řízení vybraných systémů techniky prostředí a spotřebičů v budově. Jedná se o téma aktuální, které bylo podpořeno požadavkem praxe, konkrétně firmou Schneider Electric CZ, s.r.o. Doprovodný textový aparát se tedy zabýval popisem ToF senzorů, principem jejich fungování a zpracováním snímané informace. Práce se soustředila především na senzory z rodiny FlightSense, které byly použity i v praktické části.

Praktická část práce byla nejprve zaměřena na zmapování možných využití senzorů z rodiny FlightSense v automatizaci budov. Byly zjištěny základní aplikace využití senzorů, jako je snímání objektů, detekce osob, snímání hladiny, rozpoznání gest a rozpoznání obličeje. Rozpoznání obličeje bylo vyhodnoceno jako dosud nerealizovatelné se současnými verzemi senzorů. U zbylých možných aplikací byl popsán jejich princip funkčnosti a příklady jejich možných využití.

Poslední část práce se orientuje na vlastní návrh využití. Zde se vycházelo z předešlých zjištění o využití senzorů FlightSense v automatizaci budov. Nejprve byly popsány použité technologie a zařízení, které byly během zpracování praktických realizací využívány. Výběr praktických realizací je taktéž limitován vlastnostmi poskytnutého senzoru VL53L3CX.

Byly provedeny dvě praktické realizace. V této části je taktéž popsána potřebná příprava před samotnou realizací aplikací. Příprava představuje metodický postup, které vede ke správné funkčnosti zařízení na výrobcem definovaném měřicích rozsahu. První realizací je detekce objektu, která je založena na rozsvícení patřičné LED diody po překročení nastavené vzdálenosti mezi objektem a senzorem. Vzhledem k tomu, že použitý typ senzoru VL53L3CX je přímo určen pro detekci a měření vzdálenosti objektu, fungovala tato aplikace bez problému. Následně bylo zhotoveno snímání gest, které vyžadovalo kvůli limitům

senzorů připojení přídavných senzorů. Tato aplikace měla rozsvítit LED diodu na základě směru provedeného přejetí ruky přes senzory. Vzhledem k tomu, že byla tato praktická realizace komplexnějším problémem, byla navržena možná vylepšení do budoucnosti pro zlepšení celkového výkonu aplikace snímání gest. Během zpracování praktických realizací byl taktéž řešen problém kalibrace senzoru. Nejprve ze strany vzniklého crosstalku při aplikování krycího skla na senzor a poté řešení offsetu senzoru, který může vznikat vlivem výrobních vad.

Na závěr byly zhodnoceny výsledky, které vzešly ze zpracování praktických realizací. Nejprve byly vypsány jednotlivé faktory a problémy, se kterými je nutno počítat, protože mohou ovlivňovat výkon senzorů a celkovou práci se senzory FlightSense, konkrétně s typem VL53L3CX. Poté bylo rozhodnuto, zda je zvolená aplikace pro daný senzor použitelná a popř. za jakých podmínek nebo s jakým omezením je aplikace použitelná.

Výsledky této práce ukázaly směry pro možná vylepšení. Hlubší poznání histogramové logiky pro kalibraci crosstalku senzoru, by vedlo k lepšímu parametrizování hodnot kalibrace, které mají vliv na spolehlivost a výkon senzoru. Naprogramování rozhodovací logiky pomocí nižší vrstvy kódu pro zlepšení výkonu senzoru. Nastavení parametrů pomocí statistického snímání hodnot přijímaných z prostředí, ve kterém se senzor nachází, pro optimalizaci výkonu.

V práci byly splněny všechny dílčí cíle, které vycházeli ze zadání práce nebo si je vytyčil sám autor. Přínos práce vidí autor především v popisu možného řešení, problémů a samotných limitů ToF senzorů, ve zmapování procesu vytváření aplikace pro senzory FlightSense a nastínění možných výzev a problémů, které mohou nastat během uvedení senzorů do provozu.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZÁKLADY AUTOMATIZACE [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta strojího inženýrství, 2002 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [http://matlab.fei.tuke.sk/zar/subory/literatura/ZakladyAutomatizace\\_SVARC.pdf](http://matlab.fei.tuke.sk/zar/subory/literatura/ZakladyAutomatizace_SVARC.pdf)
- [2] Řízení, regulace, automatizace. *Tzbinfo* [online]. Ing. Vlček, 2008 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102\\_at1.pdf](https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_at1.pdf)
- [3] Osvěžte si základy automatizace! Znáte definici regulace? *FactoryAutomation* [online]. FANUC Czech, 2015 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/osvezte-si-zaklady-automatizace-znate-definici-regulace/>
- [4] MĚŘENÍ, REGULACE, MECHANIZACE, AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE. *Asociace pracovníků tlakových zařízení* [online]. ATZ, 2017 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <http://atz.cz/?p=576>
- [5] Základní pojmy z automatizace: 32 termínů, které musíte znát. *FactoryAutomation* [online]. FANUC Czech, 2015 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/zakladni-pojmy-z-automatizace-32-terminu-ktere-musite-znat/>
- [6] Automation. *Techopedia* [online]. Techopedia, 2021 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/32099/automation>
- [7] What is Automation? *International society of automation* [online]. International Society of Automation [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.isa.org/about-isa/what-is-automation>
- [8] Jaký dopad má nasazení automatizace? *Metodický portál RVP.cz* [online]. Národní pedagogický institut České republiky [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/c/z/21696/JAKY-DOPAD-MA-NASAZENI-AUTOMATIZACE.html>
- [9] DEFINITION IT automation. *TechTarget* [online]. TechTarget, 2022 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchitoperations/definition/IT-automation>
- [10] MERZ, Hermann, Thomas HANSEMANN a Christof HÜBNER. *Automatizované systémy budov: sdělovací systémy KNX/EIB, LON a BACnet*. Praha: Grada, 2008, 261 s. Stavitel. ISBN 9788024723679.
- [11] ČSN EN ISO 16484-1. Automatizační a řídicí systémy budov (BACS) – Část 1: Projektová specifikace a realizace. Switzerland: Ústav pro technickou normalizaci, meteorologii a zkušebnictví, 2011

- [12] Code of Practice for Building Automation and Control Systems (IET Standards). 1. INSTITUTION OF ENGINEERING & T, 2020. ISBN 978-1785615634
- [13] Systémy používané v "inteligentních" budovách – přehled komunikačních protokolů. *TechTarget* [online]. Topinfo, 2010 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/6879-systemy-pouzivane-v-inteligentnich-budovach-prehled-komunikacnich-protokolu>
- [14] SYSTÉM PRO KONTROLU ROZMĚRŮ TRANSPORTNÍHO NOSIČE [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=103704&fbclid=IwAR3RAtnGqYiGNEVQO4sN0U0VNBd-swkUSWJ0nQFO\\_wSJ3iMk2ERoOGhBPDQo](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103704&fbclid=IwAR3RAtnGqYiGNEVQO4sN0U0VNBd-swkUSWJ0nQFO_wSJ3iMk2ERoOGhBPDQo). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 199 s. ISBN 8073001144.
- [16] Senzor. *Programová podpora výukových modulů z měření a sensorové techniky* [online]. [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [http://352lab.vsb.cz/Podklady/01\\_Senzory/senzor\\_uvod.html](http://352lab.vsb.cz/Podklady/01_Senzory/senzor_uvod.html)
- [17] Senzory, snímače a čidla. *Elektro* [online]. redakce ELEKTRO, 2020 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/senzory-snimace-a-cidla--17405>
- [18] Základní rozdělení senzorů a snímačů. *352LAB* [online]. vsb [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/Podklady/skripta2021/ZakladniRozdeleniSnimacu.pdf>
- [19] Senzory. *Automatizace senzory* [online]. Michal Šerý, 2015 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [http://home.pf.jcu.cz/~ky-klop/SERYM/automatizace/pred/pdf/Automatizace\\_senzory.pdf](http://home.pf.jcu.cz/~ky-klop/SERYM/automatizace/pred/pdf/Automatizace_senzory.pdf)
- [20] Characteristics of Sensors. *Electrical 4 U* [online]. Electrical4U, 2020 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/characteristics-of-sensors/>
- [21] The Difference Between Precision and Accuracy. *DANIELMIESSLER* [online]. Daniel Miessler, 2019 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://danielmiessler.com/blog/difference-precision-accuracy/>
- [22] SENZORY. Characteristics of Sensors. *Amper* [online]. František Šťastný, 1997 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: [https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node16.html](https://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html)
- [23] Inteligentní senzory a jejich chyby [online]. 2014, Plzeň [cit. 2023-01-13]. Dostupné z:



- [35] Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení – obecný popis. *Automatizace.hw.cz* [online]. Česká republika, 2014 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>
- [36] Magnetické senzory přiblížení - 2. díl. *Automatizace.hw.cz* [online]. Česká republika, 2018 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni-2-dil.html>
- [37] LITT MDSR41218 Reedkontakt 1 Schließer, 200 V DC, 0,5 A. *Reichelt* [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.reichelt.de/ch/de/reedkontakt-1-schliesser-200-v-dc-0-5-a-litt-mdsr41218-p241012.html>
- [38] Ultrazvukové senzory. *TURCK* [online]. Česká republika [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://www.turck.cz/cs/productgroup/Senzory/Ultrazvukov%C3%A9%20senzory;jsessionid=0565C8E077E8F84B431D02399DE0CF1D?iwc\[\]=FX0-pws1-OP\\_EQUALS&iwc\[\]=FX0-pws1-AR-0000003a0003a1cc0001003e:\\$00000037000270650003008f](https://www.turck.cz/cs/productgroup/Senzory/Ultrazvukov%C3%A9%20senzory;jsessionid=0565C8E077E8F84B431D02399DE0CF1D?iwc[]=FX0-pws1-OP_EQUALS&iwc[]=FX0-pws1-AR-0000003a0003a1cc0001003e:$00000037000270650003008f)
- [39] Functionality and technology of ultrasonic sensors. *Baumer* [online]. USA: Baumer [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://www.baumer.com/us/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-ultrasonic-sensors/a/Know-how\\_Function\\_Ultrasonic-sensors](https://www.baumer.com/us/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-ultrasonic-sensors/a/Know-how_Function_Ultrasonic-sensors)
- [40] What is Ultrasonic Sensor: Working Principle & Applications. *Robocraze* [online]. Robocraze [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://robocraze.com/blogs/post/what-is-ultrasonic-sensor>
- [41] Microwaves. *Britannica* [online]. Britannica, 2023 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation/Microwaves>
- [42] *DETEKTORY POHYBU* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: [https://is.ambis.cz/th/i5s2w/BP\\_detektory\\_pohybu.pdf](https://is.ambis.cz/th/i5s2w/BP_detektory_pohybu.pdf). Bakalářská práce. Vysoká škola regionálního rozvoje a Bankovní institut – AMBIS.
- [43] Kobi. *Svietidlá* [online]. Slovensko: Svetidla-labanc.sk, 2018 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://dizajn-labanc.cz/senzor-lx701>
- [44] Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar). *Radartutorial.eu* [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>
- [45] The fundamentals of millimeter wave radar sensors. *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments, 2020 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z:

- [https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1676912055765&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1676912055765&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [46] Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. Česká republika [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [47] TLE1. *Metralight* [online]. Metralight.com [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.metralight.com/our-products/reflective-laser-sensors/tle1/?lang=cs>
- [48] SchneiderElectric, interní prezentace
- [49] Time-of-Flight sensors – PDF Documentation. *ST* [online]. STMicroelectronics [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors/documentation.html>
- [50] PIR Sensor Working Principle. Robu.in [online]. robu.in, 2020 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://robu.in/pir-sensor-working-principle/>
- [51] Making mobile robots smarter and safer. Terabee [online]. terabee [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/making-mobile-robots-smarter-and-safer/>
- [52] Water and liquid level monitoring using VL53L4CD Time-of-Flight high accuracy proximity sensor. *proximity-sensor-stmicroelectronics.pdf*. St.com [online]. STMicroelectronics, 2022 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5851-water-and-liquid-level-monitoring-using-vl53l4cd-timeofflight-high-accuracy-proximity-sensor-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5851-water-and-liquid-level-monitoring-using-vl53l4cd-timeofflight-high-accuracy-proximity-sensor-stmicroelectronics.pdf)
- [53] Gesture Recognition and Its Application in Machine Learning. *Howtoelectronics* [online]. 2023 [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://how2electronics.com/gesture-recognition-application-machine-learning/>
- [54] STMicroelectronics ToF Sensor Brings Energy-Saving Presence Detection to PCs. *FIND BIOMETRICS* [online]. FindBiometrics, 2019 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://findbiometrics.com/stmicroelectronics-tof-sensor-brings-energy-saving-presence-detection-pcs/>
- [55] Identification and recognition. *AXIS* [online]. Axis Communications AB [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.axis.com/learning/web-articles/identification-and-recognition/resolution>
- [56] ToF sensor can replace camera for facial-recognition login. *Embedded* [online]. Embedded by AspenCore, 2019 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/tof-sensor-can-replace-camera-for-facial-recognition-login/>

- [57] Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers. ST [online]. STMicroelectronics [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf)
- [58] Foreword [online]. TeraTerm Project Team, 2007 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://ttssh2.osdn.jp/manual/4/en/about/foreword.html>
- [59] Cover window guidelines for the VL53L1X long-distance ranging Time-of-Flight sensor. St.com [online]. STMicroelectronics, 2018 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5231-cover-window-guidelines-for-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5231-cover-window-guidelines-for-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf)
- [60] Proximity. ST [online]. STMicroelectronics, 2020 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [http://www.emcu.eu/000/Proximity\\_FlightSense\\_April%202020.pdf](http://www.emcu.eu/000/Proximity_FlightSense_April%202020.pdf)
- [61] Hand gesture recognition based on Time-of-Flight sensors [online]. Turín, 2021 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://webthesis.biblio.polito.it/19162/1/tesi.pdf>. Diplomová práce. Politecnico di Torino.
- [62] Sargent, Edward. (2008). Solution-Processed Infrared Optoelectronics: Photovoltaics, Sensors, and Sources. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of. 14. 1223–1229. 10.1109/JSTQE.2008.925766.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

TOF	Time of Flight
DDC	Direct digital control
A/D	Analogový/Digitální
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser
SPAD	Single photon avalanche dioda
AEL	Accessible emission limit
IEC	International electrotechnical commission
FMCW	Frequency modulated continuous wave
LED	Light emitting diode
VZT	Vzduchotechnika a klimatizace
PIR	Passive infrared
FOV	Field of view
USART	Universal synchronous/asynchronous receiver and transmitter
I2C	Inter-integrated circuit
SPI	Seriál peripheral interface
DMA	Direct memory access
SRAM	Static random access memory
GUI	Graphical user interface
PWM	Pulse width modulation
HAL	Hardware abstraction layer
LL	Low layer
Kcps	Kilo-count per second
TCP/IP	Transmission control protocol/internet protocol
SSH	Secure shell
IoT	Internet of Things

SCL	Synchronous clock
SDA	Synchronous data
GPIO	General-purpose input/output



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 úrovně zařízení automatizace budov, upraveno z [10].....	18
Obrázek 2 schéma senzoru, upraveno z [14] .....	20
Obrázek 3 schéma inteligentního senzoru [17].....	21
Obrázek 4 rozdíl mezi přesností a určitostí [21].....	23
Obrázek 5 princip ToF technologie, upraveno z [25].....	24
Obrázek 6 princip laseru [27] .....	25
Obrázek 7 princip procesu stimulované emise [27].....	26
Obrázek 8 model VL6180 [32].....	28
Obrázek 9 model VD55H1 [32].....	29
Obrázek 10 model VL53L0X [32].....	29
Obrázek 11 model VL53L1 [32] .....	30
Obrázek 12 model VL53L3CX [32].....	30
Obrázek 13 model VL53L5CX [32].....	31
Obrázek 14 model VL53L7CX [32].....	32
Obrázek 15 princip indukčního senzoru [33] .....	34
Obrázek 16 příklady provedení indukčních senzorů [35].....	35
Obrázek 17 princip kapacitního senzoru [35].....	35
Obrázek 18 princip magnetického senzoru [36] .....	36
Obrázek 19 jazýčkové relé [37].....	36
Obrázek 20 příklad provedení ultrazvukových senzorů [38].....	37
Obrázek 21 ultrazvukový senzor [39].....	38
Obrázek 22 ultrazvukový senzor jako reflexní závora [39].....	38
Obrázek 23 mikrovlnný senzor [43] .....	39
Obrázek 24 rozdíly vysílané a přijaté vlny [45] .....	39
Obrázek 25 šířka pásma záření LED a laserové diody [46] .....	40
Obrázek 26 triangulační metoda [47] .....	41
Obrázek 27 detekce objektu [50] .....	46
Obrázek 28 kontrola obsazenosti ve skladních prostorech [49] .....	46
Obrázek 29 snímání počtu osob [49] .....	47
Obrázek 30 snímání hladiny převzato z [52] .....	49
Obrázek 31 požadované FoV převzato z [52] .....	49
Obrázek 32 špatně zvolené FoV převzato z [52].....	49

Obrázek 33 blokové schéma použitých technologií a zařízení.....	53
Obrázek 34 Nucelo-G071RB [32] .....	54
Obrázek 35 X-Nucleo-53L3A2 [32].....	55
Obrázek 36 defaultní rozložení pinů v CubeIDE.....	58
Obrázek 37 rozložení pinů po konfiguraci .....	59
Obrázek 38 nastavení portu v TeraTerm .....	59
Obrázek 39 výpis při snímání jedním senzorem.....	60
Obrázek 40 výpis při snímání více senzory .....	60
Obrázek 41 vývojový diagram pro detekci objektu.....	61
Obrázek 42 funkce print_result.....	62
Obrázek 43 funkce led .....	62
Obrázek 44 objekt není detekován.....	62
Obrázek 45 detekce objektu.....	63
Obrázek 46 crosstalk převzato z [59] .....	63
Obrázek 47 aplikace krycího skla .....	64
Obrázek 48 snímání více objektů [60].....	65
Obrázek 49 imunita vůči crosstalku [60].....	65
Obrázek 50 crosstalk kompenzace [60] .....	65
Obrázek 51 výpis bez kalibrace .....	66
Obrázek 52 výpis s kalibrací.....	67
Obrázek 53 cyklus while(1) v main.c .....	67
Obrázek 54 cyklus while(1) na nižší úrovni .....	67
Obrázek 55 obsluha přerušení.....	68
Obrázek 56 cyklus while(1) v main.c po změně.....	68
Obrázek 57 GUI vykreslování měření .....	69
Obrázek 58 GUI kalibrace .....	70
Obrázek 59 FoV jednotlivých senzorů .....	70
Obrázek 60 definování proměnných.....	71
Obrázek 61 konečný automat pro detekci gest .....	71
Obrázek 62 funkce MX_53L3A2_MultiSensorGetRange .....	72
Obrázek 63 síla signálu při snímání ruky .....	72
Obrázek 64 síla signálu šumu .....	73
Obrázek 65 definování proměnné typu enum.....	73

---

Obrázek 66 LED diody na vývojové desce .....	75
Obrázek 67 ukázka spektra slunečního záření .....	76

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 klíčové vlastnosti jednotlivých senzorů.....	42
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: funkce blink\_led

Příloha P II: schéma I2C expandéru

## PŘÍLOHA P I: FUNKCE BLINK\_LED

```
static void blink_led(void)
{
    switch(state)
    {
        case START:
            if((GestHeight[0] < MAX_GESTURE_HEIGHT) && (GestHeight[0] > MIN_GESTURE_HEIGHT) && (GestSignal[0] > MIN_VALID_SIGNAL))
            {
                if (GestSignal[0] > GestSignal[2] + SIGNAL_HYSTERESIS)
                {
                    timer1=HAL_GetTick();
                    timer2=timer1;
                    state = LEFT_PRESSED;
                }
            }

            if((GestHeight[2] < MAX_GESTURE_HEIGHT) && (GestHeight[2] > MIN_GESTURE_HEIGHT) && (GestSignal[2] > MIN_VALID_SIGNAL))
            {
                if (GestSignal[2] > GestSignal[0] + SIGNAL_HYSTERESIS)
                {
                    timer1=HAL_GetTick();
                    timer2=timer1;
                    state = RIGHT_PRESSED;
                }
            }
            break;

        case LEFT_PRESSED:
            if (GestHeight[0] > MAX_GESTURE_HEIGHT) {state = LEFT_DEPRESSED;}
            break;

        case RIGHT_PRESSED:
            if (GestHeight[2] > MAX_GESTURE_HEIGHT) {state = RIGHT_DEPRESSED;}
            break;

        case LEFT_DEPRESSED:
            timer1=HAL_GetTick();
            if((GestHeight[2] < MAX_GESTURE_HEIGHT) && (GestHeight[2] > MIN_GESTURE_HEIGHT) && (GestSignal[2] > MIN_VALID_SIGNAL))
            {
                state = SWIPE_LEFT_RIGHT;
            }
            else if((timer1 - timer2) > SENSE_PERIOD) {state = START;}
            break;

        case RIGHT_DEPRESSED:
            timer1=HAL_GetTick();
            if((GestHeight[0] < MAX_GESTURE_HEIGHT) && (GestHeight[0] > MIN_GESTURE_HEIGHT) && (GestSignal[0] > MIN_VALID_SIGNAL))
            {
                state = SWIPE_RIGHT_LEFT;
            }
            else if((timer1 - timer2) > SENSE_PERIOD) {state = START;}
            break;

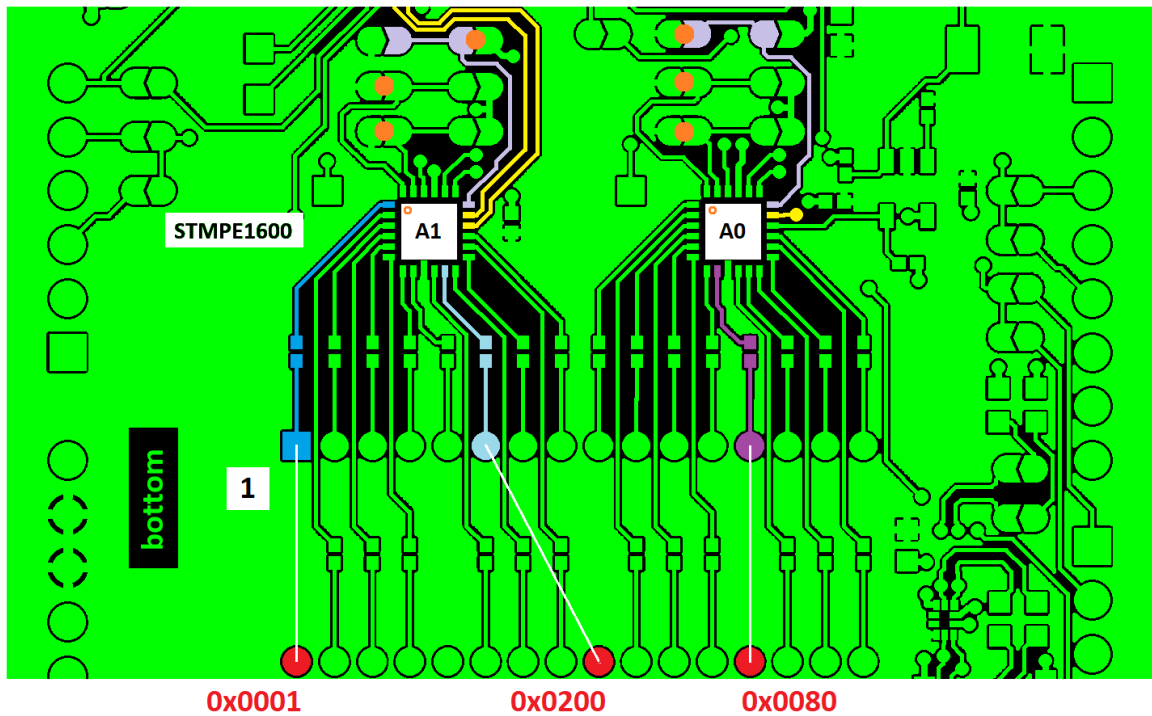
        case SWIPE_LEFT_RIGHT:
            VL53L3A2_ResetId(5, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(5, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(5, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(5, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(5, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(5, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);

            state = START;
            break;

        case SWIPE_RIGHT_LEFT:
            VL53L3A2_ResetId(3, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(3, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(3, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(3, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(3, 0);
            HAL_Delay(LED_DELAY);
            VL53L3A2_ResetId(3, 1);
            HAL_Delay(LED_DELAY);

            state = START;
            break;
    }
}
```

## PŘÍLOHA P II: SCHÉMA I2C EXPANDÉRU



■ cathode 3   
 ■ cathode 2   
 ■ cathode 1   
 ■ common anode

