



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

**Využití IR senzorů pro detekci osob v rámci domácí
automatizace**

Home automation occupancy detectors based on IR sensors

Diplomová práce

Master thesis

Studijní obor: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: Ing. Michal Dressler

Bc. Jan Lutz

Praha 2024



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lutz** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **482626**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití IR senzorů pro detekci osob v rámci domácí automatizace

Název diplomové práce anglicky:

Home automation occupancy detectors based on IR sensors

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce proveďte rešerši používaných systémů pro detekci přítomnosti a počtu osob v místnostech a obdobné aplikace v rámci domácí automatizace.

Porovnejte vlastnosti a úspěšnost detekce systémů využívající senzory IR zařízení využívající samostatné PIR snímače, thermopile matice a alespoň jeden senzor založený na jiném principu (například systémy s ToF kamerou). Proveďte experimentální měření a popište použité způsoby vyhodnocení signálu pro určení směru pohybu (vzájemná korelace, detekce hran).

Navrhněte a realizujte jednoduchý embedded modul senzoru přítomnosti s využitím detekce směru pohybu osob (například s využitím přímého zpracování signálu z PIR snímače) a implementujte zařízení do systému domácí automatizace pomocí bezdrátové komunikace (ZigBee, Home Assistant).

Seznam doporučené literatury:

- 1) J. Yun and M. -H. Song, 'Detecting Direction of Movement Using Pyroelectric Infrared Sensors,' in IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 5, pp. 1482-1489, May 2014, doi: 10.1109/JSEN.2013.2296601
- 2) H. Gami, 'Movement Direction and Distance Classification Using a Single PIR Sensor,' in IEEE Sensors Letters, vol. 2, no. 1, pp. 1-4, March 2018, Art no. 6000104, doi: 10.1109/LESENS.2017.2782179
- 3) Panasonic Industry, 'Grid-eye application note on social distancing. people detection and tracking with ceiling mounted sensors,' 2020.
- 4) STMicroelectronics, 'People counting SW code example for VL53L1X,' 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Dressler katedra měření FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce zimního semestru 2024/2025

Ing. Michal Dressler
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Využití IR senzorů pro detekci osob v rámci domácí automatizace“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Dresslera, s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu citované literatury.

V Praze dne 6. 1. 2024

Bc. Jan Lutz

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Dresslerovi za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům Lukáši Ryšavému a Martinu Žofkovi, že mi asistovali během experimentálního měření.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem senzoru přítomnosti s detekcí směru pohybu a následnou integrací do systému inteligentní budovy. Dále se věnuje testování navrženého senzoru s dalšími dvěma senzory fungujícími na odlišných principech.

Klíčová slova: Senzor přítomnosti, PIR senzor, detekce směru pohybu, ZigBee, automatizace budov, Time of Flight, thermopile

Abstract

This thesis focuses on the design of a presence sensor with motion direction detection and its subsequent integration into an intelligent building system. It also addresses the testing of the proposed sensor with two other sensors operating on different principles.

Key words: Presence sensor, PIR sensor, motion direction detection, ZigBee, building automation, Time of Flight, thermopile

Obsah

1. Úvod	9
2. Domácí automatizace	11
2.1 Komponenty domácí automatizace	11
2.2 Architektura domácí automatizace.....	12
2.3 Komunikační technologie	13
3. Senzory pro detekci osob	15
3.1 Dělení dle použitých technologií senzorů.....	19
3.1.1. Tepelné (Infračervené) senzory.....	19
3.1.2. Senzory využívající detekci vzdálenosti.....	24
3.1.3. Ostatní používané technologie.....	29
4. Metody zpracování signálu pro detekci směru pohybu	32
4.1 Metoda vzájemné korelace (cross-correlation)	32
4.2 Metoda detekce pomocí rozhodovací úrovně.....	32
4.3 Metody s využitím strojového učení	33
5. Návrh senzoru pro detekci směru pohybu s využitím PIR snímače	35
5.1 Výběr hardwarového řešení	35
5.2 Komunikace	39
6. Srovnání více technologií pro detekci směru pohybu	44
6.1 ToF senzor VL53L1X.....	44
6.2 Termální kamera MLX90640.....	45
6.3 Popis algoritmu pro detekci směru pohybu osob	45
6.3.1. MLX90640 a VL53L1X.....	46
6.3.2. Navržený senzor	50
6.4 Experimentální měření.....	52
6.4.1. Detekce směru pohybu více různých osob.....	53
6.4.2. Vliv oděvu na detekci směru pohybu	53
6.4.3. Vliv rychlosti chůze procházející osoby	58
6.4.4. Využití vzájemné korelace pro detekci směru pohybu.....	59
7. ZÁVĚR	62

8. Citovaná literatura.....	64
9. Seznam obrázků.....	69
10. Seznam příloh	72

1. Úvod

V posledních letech se exponenciálně zvyšuje využívání automatizace v budovách díky nárůstu nabídky inteligentních zařízení. Velmi rozšířená je například automatizace s využitím senzorů pohybu či přítomnosti, díky kterým je možné ovládat osvětlení nebo je využívat jako prvky zabezpečovacího systému. Standardem jsou dnes již také senzory snímající vnitřní teplotu nebo senzory intenzity osvětlení.

Systémy využívají tyto senzory, aby v daných místnostech vytvářely ideální podmínky pro pobyt osob, ale také aby snižovaly spotřebu energie. Snižováním spotřeby energie dosáhneme také snížení celkových nákladů na provoz dané budovy.

S přijetím Zelené dohody pro Evropu (A European Green Deal) se evropské státy zavázaly dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050. Prvním milníkem má být rok 2030. Do tohoto data by měly evropské státy snížit čisté emise skleníkových plynů o 55 % ve srovnání s úrovní, která byla v roce 1990. [1]

Jednou částí k dosažení tohoto cíle je snížení spotřeby energie. Z celkové světové spotřeby energie připadá přibližně 30 % na spotřebu energie budovami, což je významná část, a proto je důležité se na tento segment zaměřit. Pokud bychom uvažovali také proces výstavby, zvýšila by se tato hodnota o další 3,7 %. Na budovy připadá 27 % celkových emisí v sektoru energetiky. Z toho 19 % náleží do skupiny nepřímých emisí, které se produkují při výrobě elektrické energie a tepla pro budovy. [2]

V Evropské unii jsou tyto hodnoty dokonce 40 % celkové spotřeby energie a 36 % emisí skleníkových plynů [3].

Největší položkou spotřeby energie v budovách jsou systémy chlazení a vytápění, které zastávají 38 %. Další významnou částí je ohřev vody (13 %) následovaný spotřebou energie během vaření (8 %). Osvětlení zastává 5 % spotřeby energie. Tato hodnota s nahrazováním starých technologií za nové (LED) stále klesá. Poslední položkou jsou elektrické spotřebiče (36 %). Tyto hodnoty se v jednotlivých regionech liší v závislosti na podnebí a technologické vyspělosti. [4]

Budovy, které splňují současné normy, mají velmi nízké hodnoty průvzdušnosti, což znamená, že je velmi důležité, aby bylo zajištěné nucené větrání, protože k přirozenému větrání téměř nedochází. Hlavním ukazatelem kvality vnitřního prostředí je koncentrace

oxidu uhličitého (CO_2), která podle vyhlášky č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby nesmí překročit pro vnitřní vzduch hodnotu 1500 ppm. [5]

Koncentrace CO_2 je závislá na počtu osob či jejich tělesné aktivitě, což může způsobit, že může při vyšším počtu osob, než bylo uvažováno při návrhu větracího systému, docházet k příznakům způsobeným vysokou koncentrací CO_2 , ke kterým patří například únava, snižování soustředění nebo bolest hlavy. Na druhou stranu, pokud bude v místnosti méně lidí, než bylo uvažováno při návrhu, dochází ke zbytečným tepelným ztrátám. [5]

Tato práce se zabývá návrhem senzoru pro detekci počtu osob a porovnáním současných řešení tohoto problému. Informace o počtu osob v místnosti může pomoci s optimalizováním regulace vytápění nebo chlazení, čímž i dopomoci ke splnění zmíněných cílů. Podle studie provedené Agarwalem et al. (2010) [6] může dojít ke snížení spotřeby o 10 až 15 %, ale možná také o více v závislosti na dané instalaci a návyky osob v dané budově. V diplomové práci na téma 'Occupancy Sensor System' z KTH Information and Communication Technology ve Stockholmu (2007) [7] se zmiňují o snížení spotřeby až o 50 %.

Díky znalosti počtu osob můžeme také předpovídat přibližné množství koncentrace CO_2 a podle toho upravit výměnu vzduchu pomocí větracího systému, čímž předejít nežádoucím efektům. Další možné využití znalosti počtu osob může být v případě požáru nebo jiného nebezpečí, kdy je tato informace důležitá pro záchranné složky.

2. Domácí automatizace

S dnešním růstem vývoje technologií se posouvá také vývoj prvků pro domácí automatizace (myšleno také pro kanceláře a jiné budovy, proto obecněji – automatizace budov). Již dnes je možné vytvořit si doma inteligentní prostředí i v případě, že nejste odborníky na tuto problematiku. Na trhu lze nalézt mnoho senzorů, akčních členů nebo řídicích jednotek, které lze navzájem pohodlně propojit, aby vytvářely celý systém domácí automatizace a obyvatelům usnadňovaly život.

Hlavním úkolem těchto automatizací je šetřit lidem čas, peníze a vytvářet ideální podmínky vnitřního prostředí pro žití, s čímž také souvisí již zmíněná energetická účinnost, díky čemuž má naše žití menší dopad na životní prostředí.

Domácí automatizace může mít také vliv na naše zdraví. Můžeme například nastavit automatické zatažení žaluzií po západu slunce. Díky tomu můžeme zamezit vniknutí záření od umělého osvětlení do dané budovy a zabránit ovlivnění produkce melatoninu (hormon, který má zásadní vliv na fungování našeho těla), který je ovlivňován určitými vlnovými délkami světla stále obsaženými například v pouličním osvětlení. Dále můžeme nastavit automatickou změnu barvy osvětlení podle denní doby, čímž upravíme spektrum vlnových délek světla. [8]

Další významná automatizace, která má vliv na naše zdraví, je správně nastavené a automatizované větrání. Ve vzduchu se nachází mnoho nečistot a plísní, a proto je důležité vnitřní vzduch stále vyměňovat za vnější („čistý“) vzduch, abychom zabránili zdravotním potížím nebo tvorbě plísní na stěnách. [9]

2.1 Komponenty domácí automatizace

V dnešní době je nejdůležitějším pilířem nejúčinnější regulace sběr dat. Čím více dat získáte, tím lépe můžete porozumět problému a nastavit ideální regulaci. Pokud například chcete regulovat teplotu v místnosti, je důležité znát vnitřní teplotu, podle které můžete spínat systém vytápění. Další možnou cestou pro zvýšení účinnosti takového systému je sběr dat vnější teploty, díky kterému můžete provádět predikce vývoje vnitřní teploty, protože každá stavební konstrukce má určitou tepelnou setrvačnost. K dalšímu zpřesnění by došlo, pokud bychom znali počet osob v místnosti.

Každá osoba vydává tělesné teplo, které může mít zásadní vliv na vnitřní teplotu. Pokud by se v menším prostoru nacházelo více osob, mohlo by docházet ke zbytečnému přetápění. Jak je patrné z tohoto příkladu, čím více dat je možné nasbírat, tím přesnější může být regulace a tím více je možné ušetřit energii. Proto jsou hlavním prvkem každé domácí automatizace senzory. Dalším příkladem využití senzorů může být například zabezpečení domu. Můžete využít senzory pohybu, okenní a dveřní senzory, které kontrolují, za jsou okna/dveře otevřená/otevřené nebo zavřená/zavřené nebo například, zda nedošlo k násilnému vniknutí oknem (= rozbití okna).

Senzory jsou zařízení, která reagují na fyzikální vlastnost či podnět, které přeměňují na výstup, jenž může být zpracován elektrickým zařízením. Výstup může být ve formě napětí, proudu nebo náboje. V kontextu této práce se nejvíce využívají senzory teploty, vlhkosti nebo intenzity osvětlení. Pro tuto práci jsou však nejdůležitější senzory pro detekci pohybu nebo přítomnosti osob. [10]

Dalším krokem po sběru dat je jejich uložení a následná analýza. K uložení může být využito domácí nebo cloudové úložiště.

Řídící jednotky poté, podle nasbíraných dat, posílají příkazy akčním členům.

Akční členy jsou prvky, které reagují na intenzitu elektrické zátěže nebo na elektrický signál, na jehož základě vykonají určitou činnost. Může se jednat například o ovládání žaluzií, spínání světel nebo ovládání hlavic pro vytápění.

Pro interakci domácí automatizace s lidmi slouží zobrazovací a ovládací prvky. Může se jednat o mobil, tablet či nástěnný ovládací panel. Na těchto zařízeních je uživatel schopný například sledovat nasbíraná data, ovládat akční členy či nastavit požadovanou teplotu. [7]

2.2 Architektura domácí automatizace

Podle [11] se struktura domácí automatizace dělí do tří vrstev. Ve spodní vrstvě se nacházejí všechna zařízení pro ovládání a detekci (senzory, akční členy) – tato vrstva se nazývá field layer (provozní vrstva). Druhá vrstva se nazývá automation layer (automatizační vrstva) a dochází v ní ke zpracování měření a ovládání regulace. Management layer (řídící vrstva) je nejvyšší vrstva, která slouží jako interface pro správu. V této vrstvě dochází k ukládání dat a komunikaci s ostatními systémy. [12]

Ke komunikaci v provozní vrstvě slouží sběrnice, díky které spolu mohou komunikovat všechny prvky v této vrstvě. Díky sběrniceovému vedení se snížilo množství potřebného materiálu pro vedení ve srovnání s původní technologií analogového vedení, kdy musela být pro každé zařízení vedena kabeláž zvlášť. Prvky na sběrnici spolu komunikují digitálně, a proto musí mít každý prvek vlastní logiku. [13]

2.3 Komunikační technologie

V následující části jsou shrnuty nejběžnější komunikační protokoly v automatizaci budov.

KNX

KNX je celosvětově používaný komunikační protokol, který vznikl spojením tří standardů, mezi které patří European Home Systems Protocol (EHS), Batibus a European Installation Bus (EIB). [14]

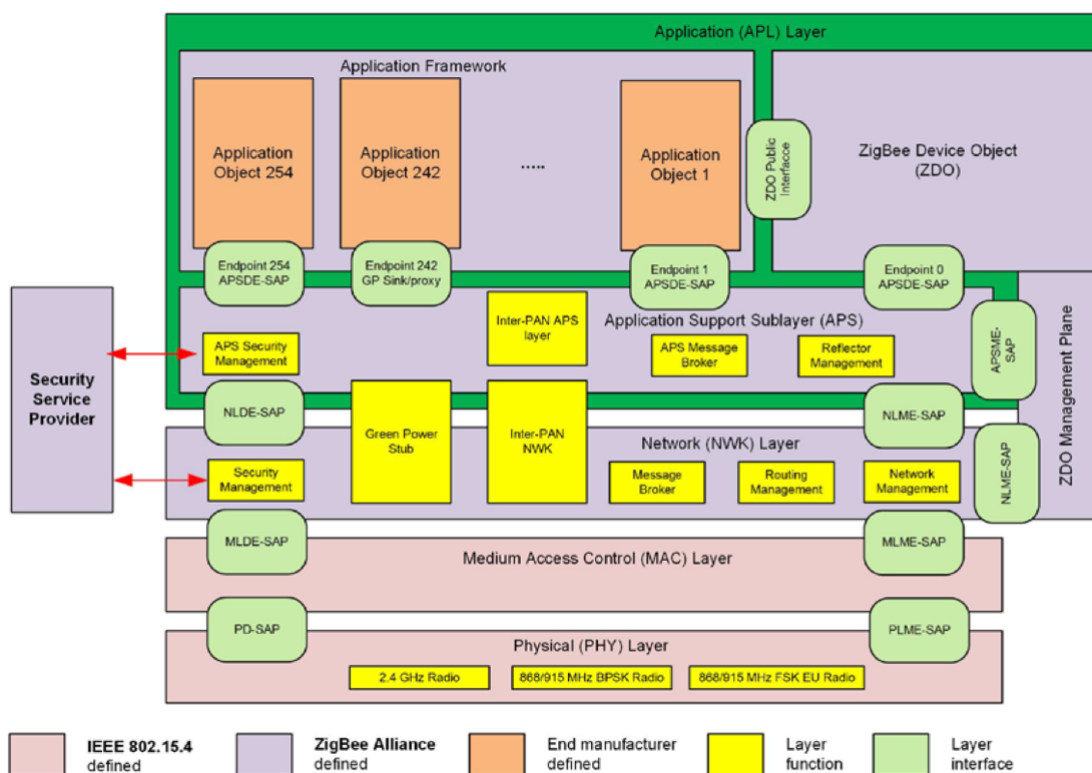
Jedná se o decentralizovaný sběrniceový systém, ke komunikaci dochází přímo mezi jednotlivými prvky, které jsou připojeny na sběrnici. KNX podporuje komunikaci point-to-point, ale také vícesměrové vysílání. Ke konfiguraci se využívá Engineering Tool Software (ETS). Pro zapojení je možné využít topologii stromového (dále jen tree), liniového nebo hvězdicového (dále jen star) typu, díky čemuž je tento protokol vhodný pro rozsáhlé instalace. Komunikace je možná jak po sběrnici, tak bezdrátově. [15]

ZigBee

Zigbee je komunikační protokol, který je hojně využíván v domácích automatizacích nebo například v průmyslových řídicích systémech. Stále více využívaný systém zaujímá své místo díky svým vlastnostem, kterými jsou velmi nízká spotřeba a zároveň nízká cena. Jedná se o obousměrný bezdrátový komunikační standard, který je postaven na standardu IEEE 802.15.4. Tento standard může být aplikován v topologii hvězdicového typu, stromového typu nebo typu mesh. V ZigBee síti se nacházejí ZigBee koordinátor, koncové prvky a routery (v případě topologie tree a mesh). ZigBee koordinátor zastává funkce spouštění sítě a nastavování hlavních klíčových parametrů sítě. ZigBee koordinátor ovládá celou síť a komunikuje napřímo s koncovými prvky, pokud se jedná

o topologii star. V topologii tree nebo mesh může ještě komunikovat s routery, které danou informaci nebo povel posílají dále k dalším prvkům sítě. Avšak nejčastěji využívaná topologie je již zmíněná topologie mesh. V této podobě se jedná o decentralizovanou síť, ve které je mnoho rovnocenných zařízení, která spolu navzájem komunikují (takzvaná peer-to-peer komunikace), díky čemuž se zvyšuje spolehlivost sítě. V případě výpadku jednoho zařízení mohou být data přenesena jinými cestami. Každé zařízení v této síti může být zařízení, které dále rozšiřuje tuto síť bez závislosti na ZigBee koordinátoru. [16]

Architektura ZigBee sítě se skládá z jednotlivých vrstev, jak je vidět na obrázku Obr. 1. Každá z vrstev zastává určité funkce a vždy poskytuje sadu služeb vrstvě nad touto vrstvou.



Obr. 1: ZigBee architektura [16]

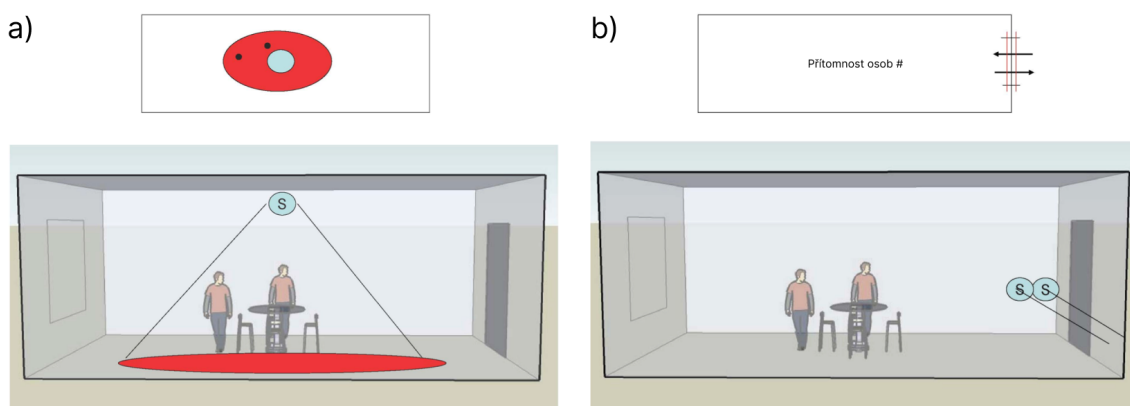
3. Senzory pro detekci osob

Pro detekci osob v místnosti můžeme využít senzory, které monitorují určitou oblast (nejlépe celou místnost nebo její část, pokud se jedná o větší prostor, kde se nachází více senzorů), nebo pouze vstupní body neboli hranice oblasti (viz obrázek 2) [7]. V dnešní době je nejčastěji využívána první metoda, u které se využívají senzory pohybu a přítomnosti.

Avšak na trhu existuje také řešení, které je schopné počítat lidi jak v určené oblasti, tak při průchodu hranice této oblasti. Jedná se o kameru Dahua Stereo Vision People Counting. [17]

Senzory pohybu jsou schopné zaznamenat pouze pohyb, takže pokud je osoba v zorném poli senzoru v klidu, senzor pohybu nic nedetekuje. Na druhou stranu senzor přítomnosti využívá více technologií a je schopen detektovat přítomnost osob i v případě, že jsou v klidu. V obou případech se nejčastěji využívá PIR senzor, který je popsán v kapitole 3.1.1.1. Senzor přítomnosti může dále využívat kromě PIR senzoru také například ultrazvukový senzor, který je zmíněn v kapitole 3.1.2.2 [18]. Tuto technologii například využívá společnost TDK, která popisuje jako jednu z výhod, že fungují za jakýchkoliv světelných podmínek [19]. Pro senzory přítomnosti se stále častěji využívají kombinace těchto technologií, aby bylo docíleno vyšší přesnosti. Společnost Legrand například spojuje využití technologií PIR a ultrazvukových snímačů [20].

Výhodou první metody je, že dochází k opětovné detekci ať se přítomná osoba nachází (v případě senzoru přítomnosti) nebo pohybuje (v případě senzoru pohybu) kdekoliv v oblasti (místnosti). Pokud by stejné senzory byly využity druhou metodou, kdy by snímaly pouze hranici dané oblasti, nedocházelo by k opětovné detekci, dokud by osoba opět nepřekročila hranici oblasti. Docházelo by například k nežádoucímu vypínání osvětlení. K tomuto může také docházet, pokud senzory nepokrývají dostatečnou část plochy dané oblasti (místnosti).



Obr. 2: a) Senzor snímá určitou oblast. b) Senzor snímá hranici oblasti. [7]

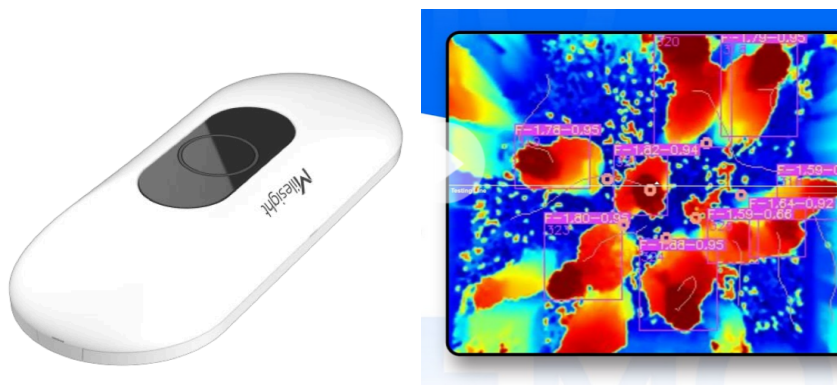
K účinnému využití druhé metody, ve kterém je snímána hranice oblasti, je důležité, aby byly senzory schopny určit, zda osoba vchází do dané oblasti, nebo z ní vychází. V takovém případě je možné rozlišit, zda se v místnosti stále nachází osoba, aniž by bylo nutné snímat celou oblast. V případě místností jsou pomyslnou hranicí dveře nebo jiný typ vstupu.

Na trhu již existuje řešení pro počítání lidí pomocí PIR senzorů (viz obrázek 3). DC500 je vhodné například do nákupních center, protože naměřená data odesílá například pouze jednou nebo dvakrát za hodinu, nebo pokud počet osob přesáhne určitou hraniční hodnotu. Z tohoto důvodu je toto řešení nevhodné pro tuto aplikaci. Zařízení využívá bezdrátovou síť LoRa. [21]



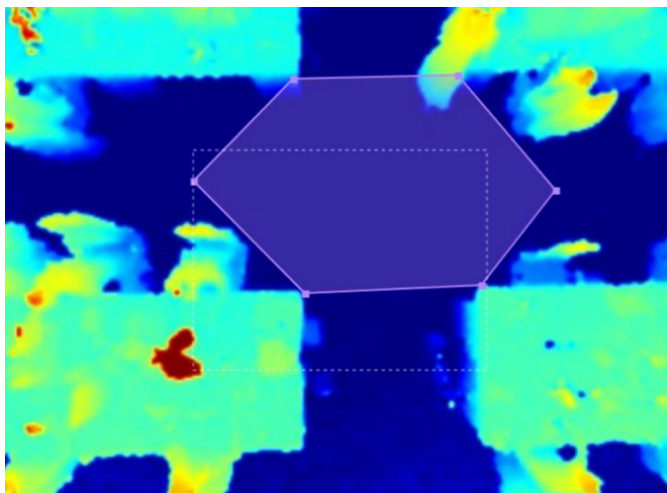
Obr. 3: DC500 PIR type LoRaWan people counter [21]

Mnohem pokročilejší řešení nabízí například společnost Milesight, která využívá Time of flight (dále jen ToF) senzory, které jsou popsány v kapitole 3.1.2, a pro vyhodnocení směru pohybu využívá strojové učení. Výrobce senzoru VS133 (viz obrázek 4) uvádí přesnost určení 99,8 % [22]. Toto řešení je schopné rozlišovat procházející osoby podle jejich výšky a dělit je do skupin děti a dospělí. Dále je také schopné rozlišit, zda se jedná o personál nebo návštěvníky. Pokud se toto zařízení správně upevní, může snímat větší plochu a být využito ke snímání vzdálenosti, směru pohybu nebo rychlosti daných osob, což je využíváno pro hlubší pochopení chování zákazníků. Pokud je nainstalován pro detekci směru pohybu ve dvou směrech (a tedy počítání osob), je možné nastavit až čtyři rozhodovací linie. Umí také určit, zda osoba opravdu prošla daným směrem nebo se pouze prochází pod senzorem a například mění směr. [23]



Obr. 4: AI ToF People Counting Sensor VS133 [23]

Společnost Milesight poskytuje také webové rozhraní, ve kterém je možné nastavit pravidla, podle kterých bude například daný senzor vyhodnocovat průchody nebo polohu osob, a další nastavení. Například může být upraven tvar snímané zóny, jak je možné vidět na obrázku 5. [24]



Obr. 5: Grafické zobrazení výstupu senzoru VS133 (ToF People Counting Sensor, Milesight), kde je možné vidět nastavení nepravidelné snímané zóny [24]

Další řešení, u kterého je uváděna velmi vysoká přesnost detekce, a to 98 %, je od společnosti Terabee (viz obrázek 6) [25]. Tento senzor pracuje na podobném principu jako zmíněná VS133. Výhodou tohoto senzoru je, že pokud je průchozí oblast příliš široká pro jeden senzor, je možné vedle sebe instalovat až pět těchto senzorů. Cena tohoto senzoru je přibližně 30 000 Kč, ale jedná se o kompletní řešení s možností komunikace přes síť LoRa. Výrobce nabízí široké spektrum možností konfigurace. Samostatný modul ToF kamery od stejného výrobce je dostupný za 6 000 Kč, ale tento poskytuje pouze základní data o vzdálenosti. [25]



Obr. 6: Terabee People Flow Counting L-XL [26]

Obě tato řešení jsou v souladu s nařízením GDPR, protože neukládají žádný vizuální záznam [26]. Avšak tato řešení jsou v porovnání s testovanými senzory v této práci mnohem složitější a mnohonásobně dražší.

Tato kapitola se zaměřuje na senzory, které je možné využít k detekci směru pohybu osob, čímž jsou vhodné pro snímání hranice oblasti. Pro tuto metodu je možné využít několik druhů senzorů. Jedním způsobem, jak detekovat osoby, může být například detekce tepelného záření, které vyzařuje každá osoba. Pro druhý způsob může být využita informace o vzdálenosti. Pokud v prostoru není žádná osoba, tak bude vzdálenost stále konstantní. Pokud ovšem do tohoto prostoru někdo přijde, senzor pro detekci vzdálenosti tuto osobu zaznamená.

3.1 Dělení dle použitých technologií senzorů

Senzory se dále mohou dělit do dvou skupin podle napájení.

První skupinou jsou senzory pasivní. Tyto senzory využívají určité fyzikální jevy k přeměně energie na elektrický signál nebo k jeho modifikaci. Například se může jednat o passive infrared sensor (dále jen PIR), který využívá pyroelektrický jev ke generování elektrického náboje. [10]

Druhou skupinou jsou senzory aktivní, které k tomuto úkonu potřebují dodat energii, a proto potřebují externí zdroj napájení. Jako příklad může být uveden termistor. Tento senzor nevytváří žádný elektrický signál, ale pokud jím necháme procházet elektrický proud, můžeme pomocí detekce změn proudu změřit jeho odpor, díky čemuž můžeme získat informace o teplotě v daném prostředí, protože se jedná o rezistor citlivý na teplotu. To znamená, že při změně teploty mění své vlastnosti. [10]

3.1.1. Tepelné (Infračervené) senzory

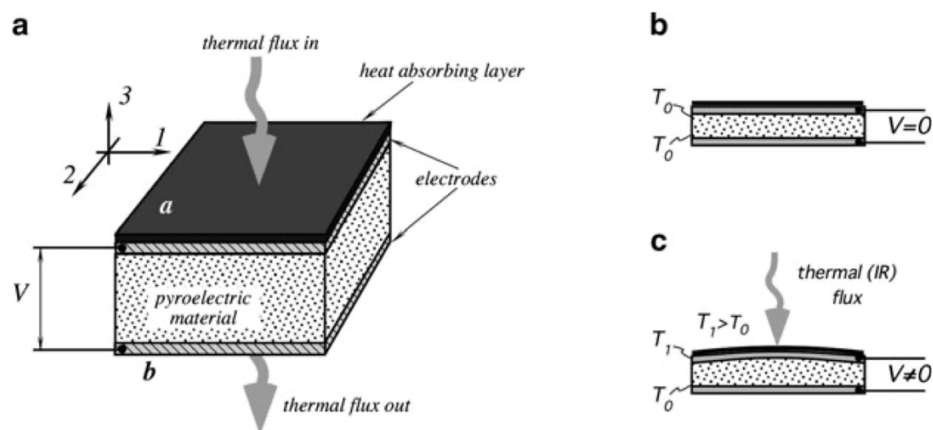
Pro detekci přítomnosti osob se v dnešní době využívají nejčastěji senzory, které k detekci využívají infračervené záření. Toto elektromagnetické záření je vyzařováno každým tělesem, jehož teplota je vyšší než absolutní nula ($T = 0 \text{ K}$) a které je spjato s pohyby atomů a molekul. Vlnová délka tohoto záření je závislá na teplotě tělesa, které záření vyzařuje, a proto se tomuto záření také říká tepelné záření. Pro tyto senzory je

nejdůležitější vlnová délka, která se přibližně rovná 4–20 μm , protože lidské tělo vyzařuje elektromagnetické záření, které je nejkoncentrovanější právě v těchto vlnových délkách. Z předešlých informací vyplývá hlavní výhoda těchto senzorů a to, že jsou citlivé především na tělesa, která mají přibližně stejnou teplotu jako lidské tělo (uvažovaná teplota povrchu lidské kůže v intervalu od 28 °C do 37 °C). To ale může být také nevýhoda, protože senzory mohou být ovlivněny jinými světelnými nebo tepelnými zdroji. [10]

3.1.1.1. Pasivní infračervené senzory (*Passive-infrared sensors, PIR*)

Nejdůležitější částí těchto senzorů jsou pyroelektrické materiály, které v reakci na změny infračerveného záření produkují elektrický náboj, čemuž se říká pyroelektrický jev. Jedná se o krystalické látky, u kterých se projevuje polarizace závislá na teplotě. To znamená, že například dopad infračerveného záření, které způsobí změnu teploty, může ovlivnit náhodnost orientací dipólů, ale také jejich zkrácení nebo prodloužení. [10]

Pyroelektrické materiály se v těchto senzorech využívají v podobě tenkých plátek, které mají z obou stran umístěné elektrody (viz obrázek 7).

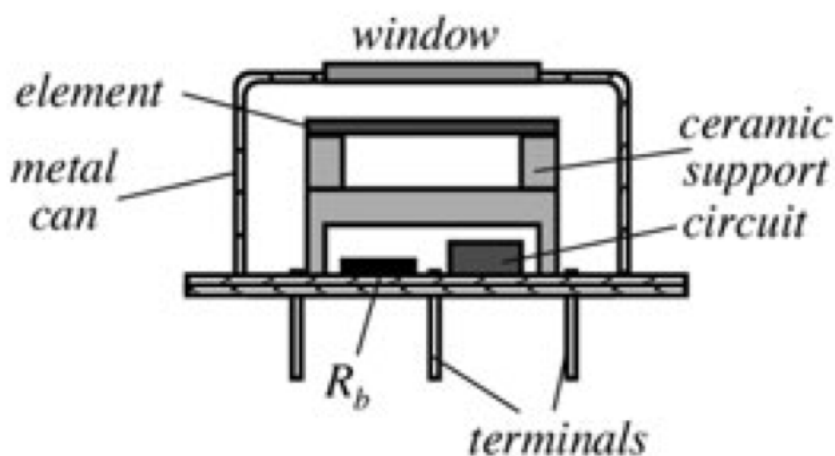


Obr. 7: a) Pyroelektrický senzor má dvě elektrody na opačných stranách krystalu; b) Tepelné záření působí podél osy 3 shora a je pohlcováno tepelně absorpční vrstvou. Teplo se vodivě šíří pyroelektrickým materiálem a je částečně vyzařováno směrem dolů ze strany a. Pyroelektrický senzor v neutrálním stavu; c) teplo rozšiřuje horní vrstvu, což vede k piezoelektrickému náboji; [10]

S pyroelektrickým jevem je úzce spojen také piezoelektrický jev, protože každý materiál, který vykazuje pyroelektrické vlastnosti, má také piezoelektrické vlastnosti.

Tyto vlastnosti se projevují při mechanickém namáhání těchto krystalických materiálů, díky čemuž dochází ke generování elektrického náboje. Při dopadu infračerveného záření na pyroelektrický krystal dochází k jeho ohřívání a následné deformaci materiálu v důsledku tepelné roztažnosti, což vyvolává mechanické napětí a následné generování elektrického napětí na elektrodách. [10]

Aby se zabránilo mechanickému namáhání způsobenému například zvukem nebo jinými vibracemi, jsou pyroelektrické prvky uloženy v ocelovém pouzdře s okénkem (viz obrázek 8). Tato okénka jsou vyrobena z materiálu, který propouští pouze určité vlnové délky elektromagnetického záření. [10]

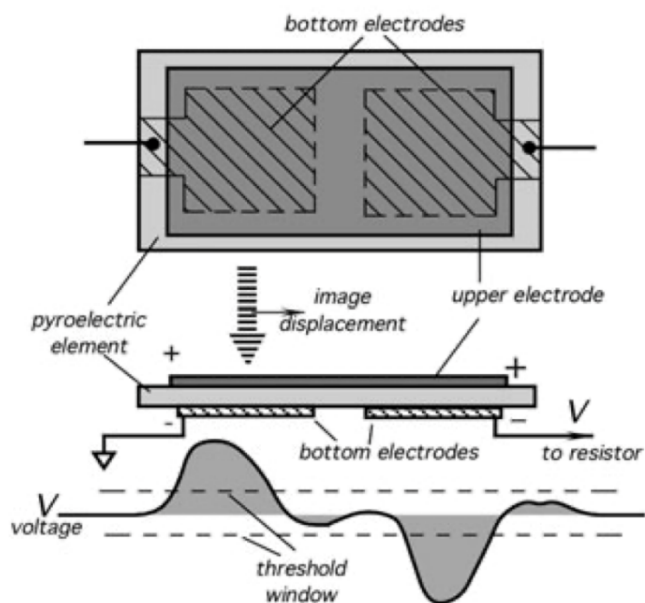


Obr. 8: Duální pyroelektrický senzor umístěný v kovovém obalu [10]

Dalším mechanismem, který má za úkol, aby senzor reagoval pouze na proměnné tepelné záření, je zapojení vždy minimálně 2 pyroelektrických prvků v sérii tak, aby každý generoval signál opačné polaroty. Jakékoliv vibrace či stálé tepelné záření ovlivňují vždy oba tyto elementy, signál se proto vyruší. Na druhou stranu, pokud před senzorem projde osoba, tak změnu tepelného toku zaznamená nejdříve jedna elektroda, teprve poté ta druhá. Protože na každou elektrodu musí dopadat rozdílné infračervené záření, aby došlo k detekci, nazývají se tyto senzory derivační. [10]

Na obrázku 9 je znázorněn průběh signálu z PIR senzoru, před kterým prošla osoba. Je vidět, že nejdříve zaznamenala změnu tepelného toku levá elektroda, proto má napětí kladnou polaritu. Následně došlo k zaznamenání stejného záření také druhou elektrodou, signál se proto vyrušil. Po průchodu osoby přímo před senzorem dochází

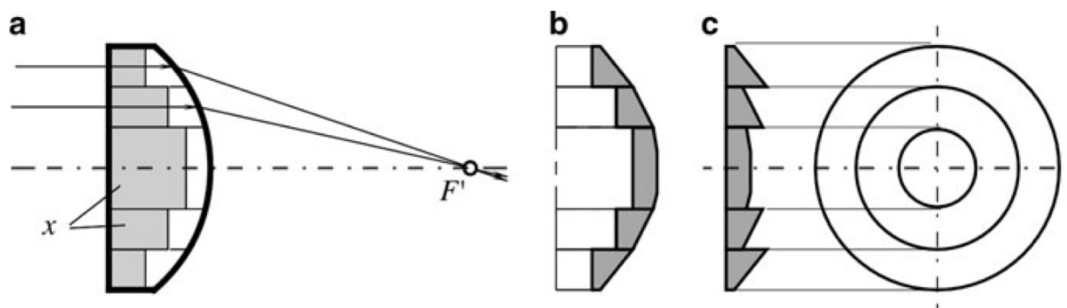
opět k tomu, že tepelné záření, které tato osoba emituje, dopadá pouze na pravou elektrodu, díky čemuž můžeme sledovat napětí se zápornou polaritou. [10]



Obr. 9: Duální pyroelektrický senzor. Snímací prvek s přední (horní) elektrodou a dvěma spodními elektrodami nanesenými na společném krystalickém substrátu. [10]

Proudy, které jsou generovány pyroelektrickými elementy, jsou velmi malé. Pohybují se v řádech 1 pA, a proto musí být zesíleny pomocí zesilovačů, aby s nimi bylo možné dále pracovat.

Pro zvýšení dosahu a zorného pole se u těchto senzorů používá Fresnelova čočka (viz obrázek 10), která je díky své konstrukci schopna koncentrovat více infračerveného záření na pyroelektrické elementy. Jejimi hlavními výhodami jsou cena a snadná výroba. Dále pomáhá chránit vnitřek senzoru před nečistotami a zároveň slouží jako filtr nežádoucích vlnových délek elektromagnetického záření. [10]

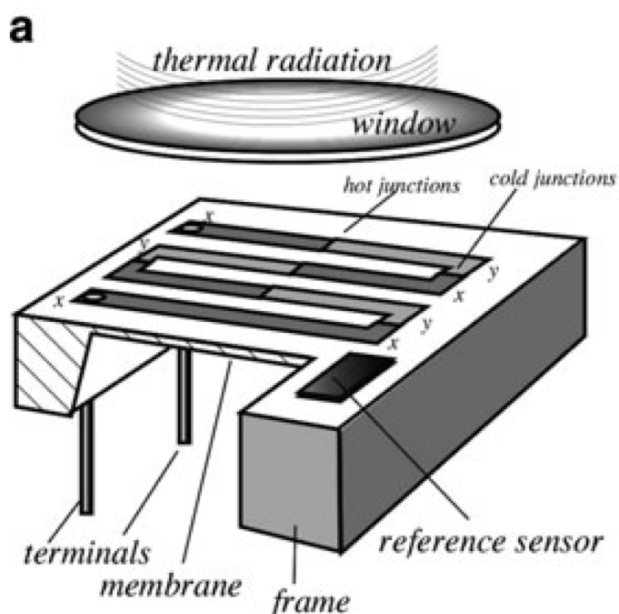


Obr. 10: Koncept Fresnelovy čočky [10]

3.1.1.2. *Thermopile (Thermopiles)*

Thermopile je složen z 50–100 termočlánků, které jsou zapojeny v sérii. Samotný termočlánek má velmi malou citlivost. Při změně teploty o 1 °C reaguje termočlánek v řádu desítek mikrovoltů. V sériovém zapojení se tato hodnota násobí počtem propojených termočlánků, a proto je thermopile mnohem přesnější než samotný termočlánek. [10]

Jak je zobrazeno na obrázku 11, thermopile se skládá z membrány, která má díky své konstrukci velmi malou tepelnou kapacitu, a proto dochází k výrazným tepelným změnám při dopadu tepelného záření. Dalšími částmi jsou takzvané teplé a studené konce. Každá z těchto částí je vytvořena z jiného materiálu, u kterého se hledí především na nízký tepelný odpor, vysoký tepelný koeficient a nízkou tepelnou vodivost. Vhodnou volbou materiálu s těmito vlastnostmi se dá zajistit nejlepší možný výkon daného termočlánku. Nejčastěji se pro tvorbu thermopilů vybírá krystalický nebo polykrystalický křemík. Pro správné fungování termočlánku by měly mít teplé a studené konce také opačná znaménka termoelektrických koeficientů. [10]



Obr. 11: Termočlánek pro detekci tepelného záření, ekvivalentní schéma s připojeným referenčním teplotním čidlem, x a y jsou různé materiály [10]

Již zmíněná membrána se v závislosti na dopadajícím nebo emitujícím záření ohřívá nebo ochlazuje, čímž vytváří rozdíl mezi studenými a teplými konci, díky čemuž dochází k tvorbě termoelektrického napětí. [10]

Stejně jako u PIR senzorů jsou snímací části ukryty v kovovém obalu (viz obrázek 12), aby bylo zabráněno nežádoucímu rušení. [10]



Obr. 12: Thermopile v TO5 obalu [10]

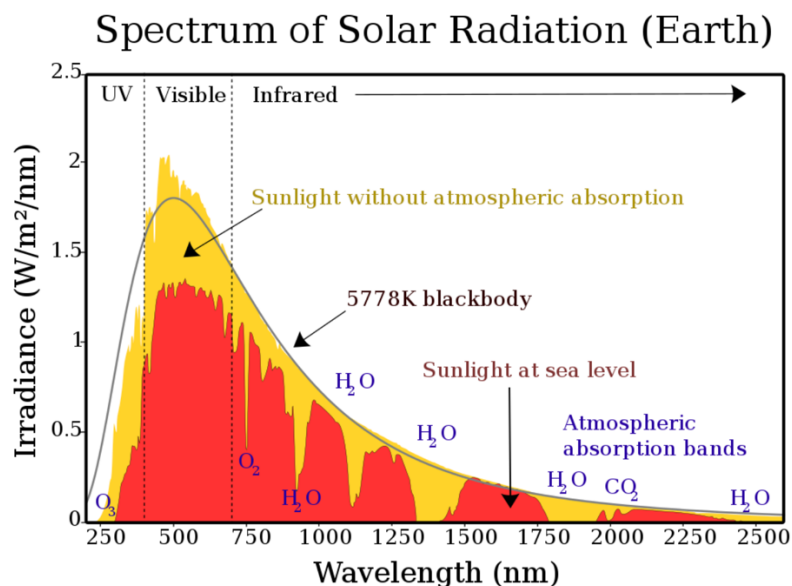
3.1.2. Senzory využívající detekci vzdálenosti

3.1.2.1. Optické Time of flight (ToF)

Dalším senzorem, který lze využít pro detekci osob, je takzvaný Time of flight. Tento senzor také pracuje se zářením v infračerveném spektru (využívá záření o vlnové délce 940 nm), ale pracuje na jiném principu. Hlavní rozdíl je, že nesnímá záření, které je vyzářeno osobou nebo jiným objektem, ale sám je emitorem a také snímačem. Senzor pracuje na principu měření vzdálenosti podle času letu emitovaného záření, které se při dopadu na předměty odráží a je opět přijímáno senzorem. Díky znalosti rychlosti světla (299 792 458 m/s) a také doby, během které záření uletí dráhu od senzoru k objektu a zpět, je senzor schopný dopočítat vzdálenost mezi senzorem a měřeným objektem. [27]

Vlnová délka 940 nm nebyla vybrána náhodně. Senzor může samozřejmě zaznamenat jakékoliv světlo na této vlnové délce, i když se nebude jednat o záření, které bylo emitováno tímto senzorem. V tomto případě by se jednalo o rušení a mohlo by dojít ke špatnému odečtu vzdálenosti. Na obrázku 13 je zobrazeno spektrum vlnových délek záření, které je emitováno Sluncem (žlutá oblast), a stejné záření po průchodu

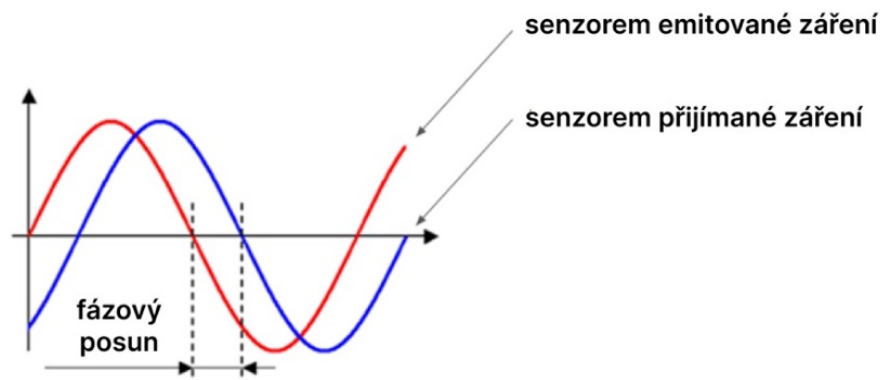
atmosférou (červená oblast). Jak je patrné, určité vlnové délky tohoto záření jsou rozptýleny nebo pohlceny v atmosféře Země. Právě záření o vlnové délce 940 nm je absorbováno vlivem existence vodních par v atmosféře, díky čemuž mohou tyto senzory pracovat bez většího rušení. [28]



Obr. 13: Graf spektra slunečního záření [27]

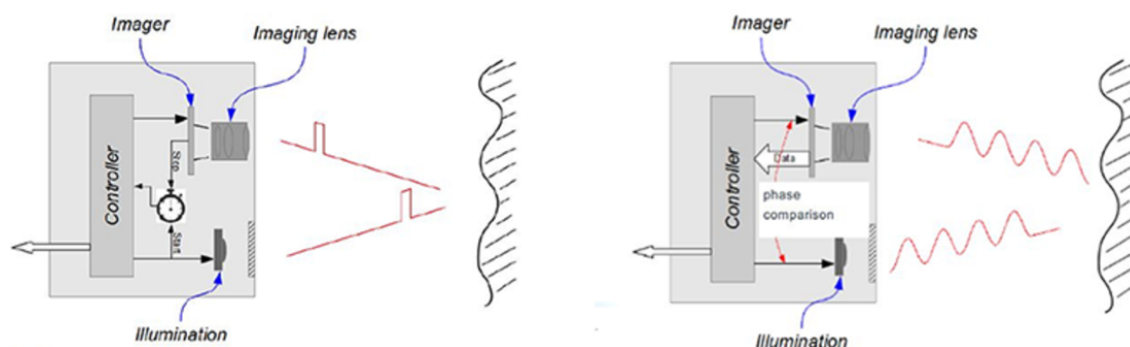
V dnešní době se ToF senzory dělí do dvou skupin podle principu emitace záření. Dělí se na přímé a nepřímé ToF senzory. Grafické zobrazení obou možností je vidět na obrázku 15. Oba tyto způsoby mohou kontinuálně měřit vzdálenosti, ale v určitých případech mohou mít své výhody. [28]

U přímých ToF senzorů je záření emitováno v krátkých pulsech, které trvají pouze několik nanosekund. Po odražení a zaznamenání tohoto pulsu je na základě doby letu vypočítána vzdálenost předmětu od senzoru. Na druhou stranu u nepřímých ToF senzorů je záření emitováno kontinuálně a vzdálenost je vypočítána na základě fázového posunu (viz obrázek 14). [28]



Obr. 14: Grafické znázornění fázového posunu záření, které senzor ToF emituje, a dopadajícího záření [29]

Nepřímé ToF senzory mají oproti přímým ToF sensorům vyšší rozlišení a dají se použít v multi-pixel 3D kamerách. [29] Takovouto kameru s rozlišením 80 x 60 pixelů lze například objevit v nabídce společnosti Terabea, která nabízí také jednodušší senzory pro detekci směru pohybu [30; 31].



Obr. 15: Grafické zobrazení přímých (vlevo) a nepřímých ToF senzorů (vpravo) [29]

3.1.2.2. Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory pracují na podobném principu jako ToF senzory, ale místo záření využívají mechanické vlny. Stejně jako ToF senzory obsahují vysílač, který generuje ultrazvukové vlny, a přijímač detekující vlny odrazené od předmětu, který se nachází před senzorem. Mechanické vlny jsou definovány jako mechanické stlačování a rozpínání média, ve kterém se vlny šíří. K tomuto ději dochází periodicky, a proto ho

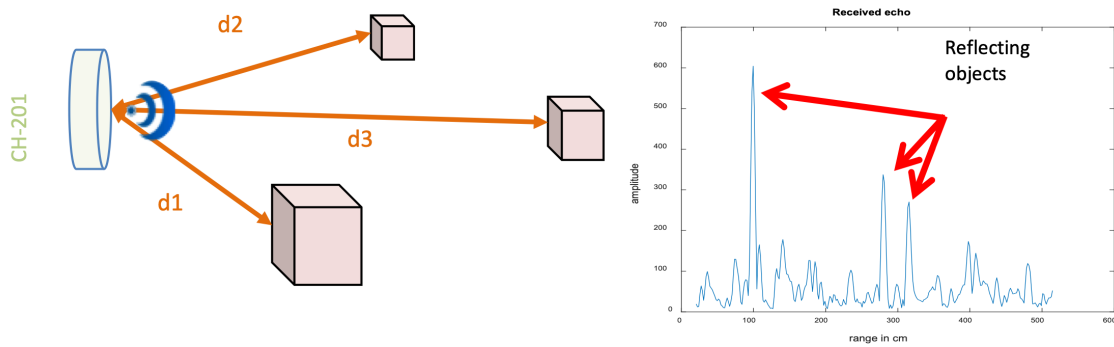
můžeme popisovat frekvencí. Lidský sluch je schopný zaznamenat akustické vlny o frekvenci od 20 Hz do 20 kHz. Jakékoliv mechanické vlny pod 20 Hz spadají do kategorie infrazvuku. Mechanické vlny o frekvenci vyšší, než je 20 kHz, se nazývají ultrazvukové vlny. Jak název napovídá, ultrazvukové senzory jsou projektovány tak, aby nerušily lidskou činnost a pracují s mechanickými vlnami, které mají mnohem vyšší frekvenci, než je zmíněná horní hranice slyšitelnosti lidského ucha. Frekvence vlnění generované těmito senzory se mohou pohybovat například kolem 32 kHz. [10]

K tomu, abychom byli schopni generovat ultrazvukové vlny, je zapotřebí, abychom rozpohybovali povrch média, ve kterém se má vlna šířit, čímž se zapříčiní jeho stlačení či rozpínání. Médium, ve kterém se mohou šířit mechanické vlny, může být jakákoliv látka od plynné, kapalně až po pevnou. [10]

V ultrazvukových senzorech se využívá již zmíněného piezoelektrického jevu. V předešlé kapitole bylo zmíněno, že pokud dojde k mechanické deformaci materiálu, který má piezoelektrické vlastnosti, začne se generovat napětí. Protože je tento děj vratný, je ho možné provést i naopak, přivést napětí a vytvořit mechanickou deformaci. V těchto senzorech se přivádí napětí na keramické destičky, které jsou díky piezoelektrickým vlastnostem ohýbány, čímž pohybují povrchem daného média (v tomto případě lze mluvit o vzduchu), tím pak generují mechanické vlny. Naopak při průchodu mechanické vlny keramickou destičkou dochází k jejímu ohýbání a ke generování napětí. [10]

Ultrazvukové senzory mohou pracovat dvěma způsoby. V jednom případě používá senzor piezoelektrický element jak pro generování, tak detekci vln. Aby mohl takto fungovat, generuje pouze krátké impulsy. Ve druhém případě, kdy senzor generuje vlny kontinuálně, je zapotřebí, aby obsahoval element zvlášť pro generování a zvlášť pro detekci vln. [10]

Jedním z těchto senzorů je například CH201. Tento ultrazvukový senzor detekuje pohyb na základě změn ve vzorcích odražených vln (viz obrázek 16). Z čehož vyplývá, že tento senzor není schopen detekovat osobu v klidu. [32]



Obr. 16: Vlevo: senzor se třemi objekty v různých vzdálenostech; Vpravo: Graf amplitud zobrazující detekci tří objektů a jejich příslušné vzdálenosti na základě doby šíření signálu. [32]

3.1.2.3. Mikrovlnné senzory

Mikrovlnné senzory patří do skupiny radarů (Radio Detection And Ranging) a pracují s vlnovými délkami, které jsou menší než 4 cm. Tyto vlnové délky mají výhodu v tom, že jsou schopné procházet prachem, mlhou či oblaky, ale zároveň jsou odraženy malými předměty, díky čemuž může dojít k jejich detekci. I tyto senzory pracují na stejném principu. Jsou vygenerovány vlny, které se odrazí od daného objektu, poté jsou opět zpracovány senzorem. Analyzováním fázového rozdílu je opět možné zjistit vzdálenost objektu, od kterého byly vlny odraženy. [10]

Nicméně další složkou, která může být analyzována, je změna frekvence. Díky znalosti Dopplerova jevu, který udává, že frekvence odraženého záření od objektu, který se pohybuje směrem k senzoru nebo od něj, se mění. Pokud se objekt pohybuje směrem k senzoru, frekvence odraženého záření se zvyšuje. Naopak, pokud se objekt pohybuje směrem od senzoru, frekvence odraženého záření se zmenšuje. K této detekci dochází pouze, pokud se objekt pohybuje relativně k danému senzoru. [10]

Pro detekci směru pohybu osob v budově je zapotřebí, aby byl senzor umístěn v okolí dveří, což znamená, že směr pohybu vzhledem k senzoru je přibližně 90 stupňů. Jak je patrné z následujícího vztahu (1), Dopplerův jev je pro tyto úhly téměř zanedbatelný, a proto jsou tyto senzory pro detekci směru pohybu tímto způsobem nevhodné. [10]

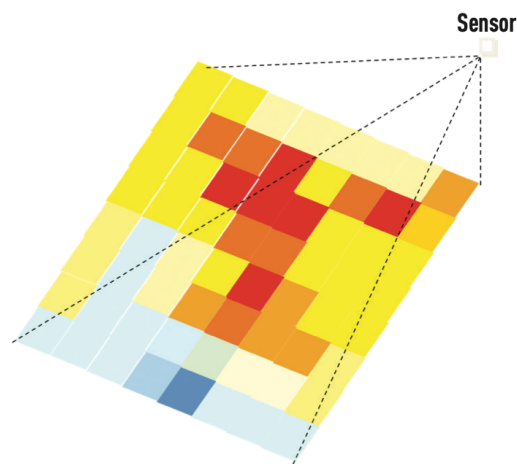
$$\Delta f \approx \frac{v}{\lambda_0} \cos \theta \quad (1)$$

Samozřejmě, pokud bychom umístili tyto dva senzory za sebe po směru pohybu, byli bychom schopni vytvořit logiku pro detekci směru pohybu jako s kterýmkoliv jiným senzorem, který detektuje například vzdálenost.

3.1.3. Ostatní používané technologie

3.1.3.1. Kamery v infračerveném spektru

Někdy mohou být za tento typ kamer považovány například pole termopilů. Thermopily, které byly zmíněny v kapitole 23, mohou být umístěny v poli například o velikosti od 8 x 8 po 120 x 84 [33]. Takto složené pole můžeme vyobrazit v tepelném obraze o stejném počtu pixelů (viz obrázek 17).



Obr. 17: Vyobrazení výstupů z pole termopilů (8 x 8) [34]

3.1.3.2. Kamery ve viditelném spektru

Moderní digitální kamery využívají typicky dva typy snímačů: CCD (charge-coupled device) a CMOS (complementary metal oxide semiconductor). Tyto snímače přetvářejí světlo na elektrický náboj a následně na elektronické signály. CCD snímače posílají náboj z pixelů pouze přes několik výstupních uzlů a převádějí je na napětí, zatímco CMOS snímače mají u každého pixelu vlastní zesilovač. Převod analogového signálu na digitální je u CCD snímačů zajištěno externím A/D převodníkem, zatímco u CMOS snímačů je převod zajištěn uvnitř senzoru. CMOS technologie je složitější, nabízí však více možností integrace a nižší spotřebu energie. CCD snímače jsou jednodušší a levnější na výrobu. [10]

V porovnání s ostatními zmíněnými senzory jsou kamery poměrně drahé. Hlavní nevýhodou je u nich určité narušení soukromí [35]. Za další nevýhodu můžeme považovat nutnost vyššího výpočetního výkonu, tedy také jejich spotřebu. Mezi výhody však můžeme řadit přesnost určení směru pohybu osob a také určení směru pohybu více osob najednou. [17]

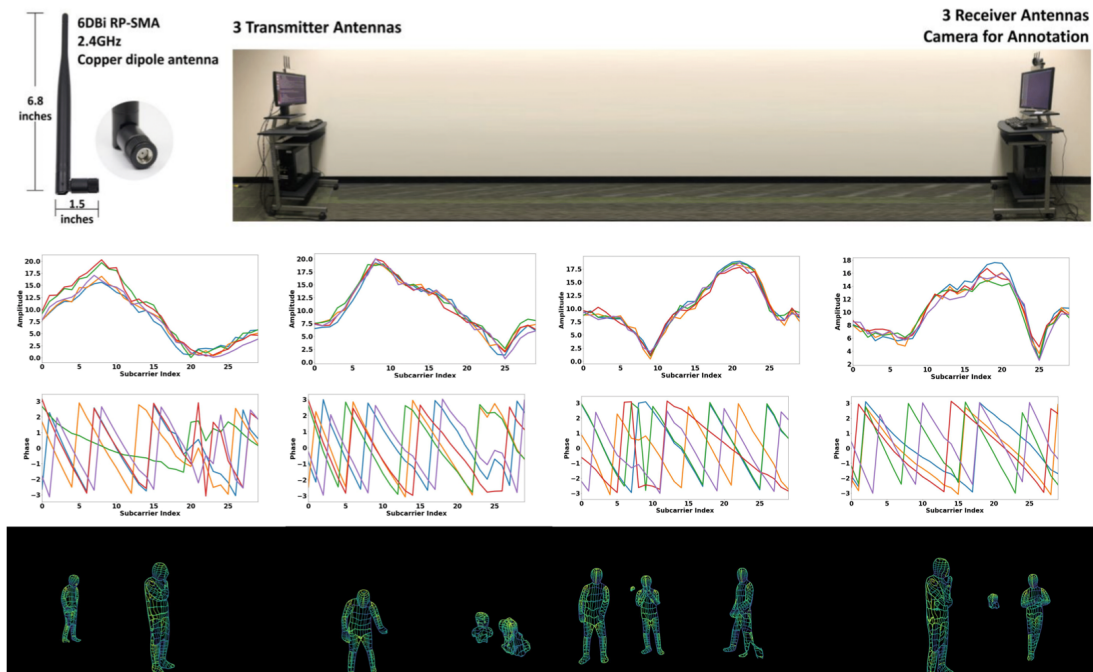
Kamery jsou schopny počítat lidi v určené oblasti nebo při překročení její hranice (viz obrázek 18). Pro tyto výpočty využívá většina kamer strojové učení.



Obr. 18: Snímek z kamery. Počítání lidí pomocí metody průchodu hranice oblasti. [36]

3.1.3.3. Detekce pomocí bezdrátové sítě WiFi

V roce 2022 se týmu z Carnegie Mellon University [37] podařilo detekovat přibližnou polohu osob pomocí technologie WiFi. Tento průlom byl možný díky pokročilým algoritmům strojového učení, které analyzují fáze a amplitudy WiFi signálů. Výhodami této aplikace je nezávislost na světelných podmínkách, ochrana soukromí a nižší cena v porovnání s kamerami ve viditelném spektru, které jsou zmíněné v předešlé kapitole 3.1.3.2. [37] Na dalším obrázku (19) je možné vidět využitý hardware pro zmíněný experiment, grafy amplitudy a fáze WiFi signálů a také výslednou vizualizaci jejich navrženého algoritmu.



Obr. 19: První řádek znázorňuje nastavení hardwaru. Druhý a třetí řádek představují záznamy amplitudy a fáze vstupního WiFi signálu. Čtvrtý řádek obsahuje algoritmem odhadnuté pózy a polohy osob. [37]

Díky této technologii by bylo možné snímat celou část určené oblasti. U podobných technologií není potřeba znát přesný počet osob v místnosti, ale pouze informaci, zda se v místnosti nachází osoba. Tato technologie se dá přirovnat k senzorům přítomnosti, které jsou popsány na začátku kapitoly 3.

4. Metody zpracování signálu pro detekci směru pohybu

4.1 Metoda vzájemné korelace (cross-correlation)

Vzájemná korelace je statistická metoda používaná k měření podobnosti a časového zpoždění mezi dvěma časovými řadami dat. Matematicky se vzájemná korelace $\phi_{pg}(\tau)$ dvou signálů $p(k)$ a $g(k)$ definuje jako:

$$\phi_{pg}(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} p(k) \cdot g(k + \tau), \quad (2)$$

kde τ je časový posun. Koeficient korelace určuje stupeň a směr vztahu mezi datovými řadami. [38]

V této práci bude využita vzájemná korelace pro porovnání dvou signálů a na základě vzájemného zpoždění bude možné určit směr pohybu osoby. Vzájemné zpoždění signálů se vztahuje k identifikaci časového rozdílu mezi dvěma signály. Toto zpoždění se určuje nalezením hodnoty τ , při které je funkce $\phi_{pg}(\tau)$ maximální. [38]

Vzájemnou korelaci je možné počítat několika způsoby. Jedná se o metody časové nebo frekvenční oblasti. Při práci s velkými soubory dat se v praxi využívá nejčastěji metoda frekvenční oblasti, protože je v tomto případě efektivnější díky využívání algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT). Metoda frekvenční oblasti je založena na teorému, který říká, že vzájemná korelační funkce dvou signálů je inverzní Fourierova transformace součinu Fourierových transformací obou signálů. [39]

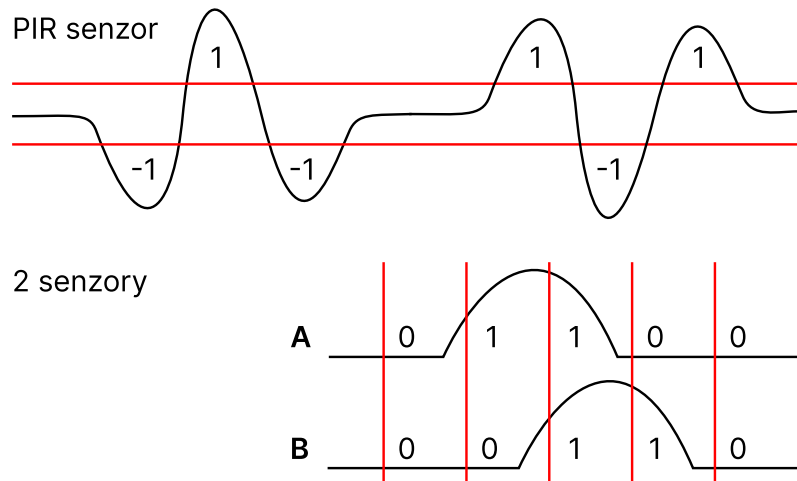
Metoda časové oblasti může mít zase výhody u kratších datových sad. Jedná se o součin obou signálů v každém časovém kroku, poté se tyto součiny sečtou pro všechny časové kroky v překrývajícím se rozsahu. Pokud mají násobené datové sady například pouze desítky vzorků, může být tato metoda vhodnější. [40]

4.2 Metoda detekce pomocí rozhodovací úrovně

Tuto metodu lze aplikovat buď pomocí fyzických komparátorů nebo softwarové implementace detekce hran, případně detekce průchodů zvolenou rozhodovací

úrovni ve výstupním signálu jednoho nebo dvou senzorů. Algoritmus detekce směru pohybu pak spočívá v určení pořadí vzniklých stavů dle typu použitého senzoru (viz obrázek 20). Například u PIR senzorů je to posloupnost překročení horní (1) a dolní (-1) rozhodovací hranice. Na obrázku 20 jsou posloupnosti -1, 1, -1 pro jeden směr a 1, -1, 1 pro směr druhý. U senzorů, které jsou instalovány v páru, nebo senzorů, u kterých lze vyčítat hodnoty ze dvou jejich částí nezávisle na sobě, je možné porovnávat vzájemnou posloupnost stavů. Jak je možné vidět na obrázku 20, senzor A nabude stavu jedna o jeden krok dříve než senzor B. Poté se také vrací ze stavu jedna do stavu nula o krok dříve, čímž je možné určit směr pohybu.

Tato metoda je vhodná pro implementaci se stavovým automatem a podrobněji se tomu věnuje kapitola 6.3.1. Výhodou této metody je velmi nízká výpočetní náročnost v porovnání se vzájemnou korelací. Pokud se využijí hardwarové komparátory, tak tato nízká výpočetní náročnost dále klesá. Jako nevýhoda se jeví potřeba stanovit vhodnou rozhodovací úroveň, což může být problematické, jak je například popsáno v kapitole 6.4.



Obr. 20: Metoda detekce pomocí rozhodovací úrovně

4.3 Metody s využitím strojového učení

Na rozdíl od předešlých metod je tato metoda schopna určit směr pohybu osob s mnohem vyšší přesností. Strojové učení lze využít na zpracování výstupu z kamer ve viditelném nebo infračerveném spektru, ale také z 2D senzorů (například ToF).

U kamer se využívá rozpoznání obrysu osob v datech. Následně je jeho pozice v zorném poli zpracována standardní metodou jako průchod určenou hranicí (viz obrázek 18).

U senzorů s vyšším rozlišením je možné detekovat průchod více osob v krátkém časovém sledu, což je klíčové například pro aplikace v rušných veřejných prostorech. S vyšším rozlišením ale také roste výpočetní náročnost.

Strojové učení lze například implementovat v kombinaci s bezpečnostními kamerami, avšak v tomto případě dochází k narušení soukromí, jak bylo již zmíněno v kapitole 3.1.3.2.

Ale jak ukazují práce na toto téma [41; 42], je možné využít PIR senzoru nebo sensorové sítě s aplikací strojového učení, čímž je možné eliminovat tento problém.

5. Návrh senzoru pro detekci směru pohybu s využitím PIR snímače

V této části diplomové práce je popsán navržený senzor přítomnosti s detekcí směru pohybu, který využívá PIR senzorů. Pro tuto část byl vytvořen vlastní plošný spoj, aby bylo možné upravovat potřebné parametry, díky čemuž bylo možné rychle a efektivně zkusit různé metody zpracování signálu. Tato část se zabývá využitím jak jednoho, tak i dvou PIR snímačů, kdy u obou těchto metod lze dosáhnout podobných výsledků. Je zde popsána metoda detekce směru pohybu osob, ale také následná komunikace s nadřazeným systémem domácí automatizace.

První metodou pro detekci směru pohybu je detekce polarity signálu, který přijímá obvod od PIR snímače. Toho lze dosáhnout díky konstrukci samotného PIR snímače, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.1.1. Polarita výstupního signálu PIR snímače je závislá na směru pohybu zaznamenaného předmětu (zde osoby).

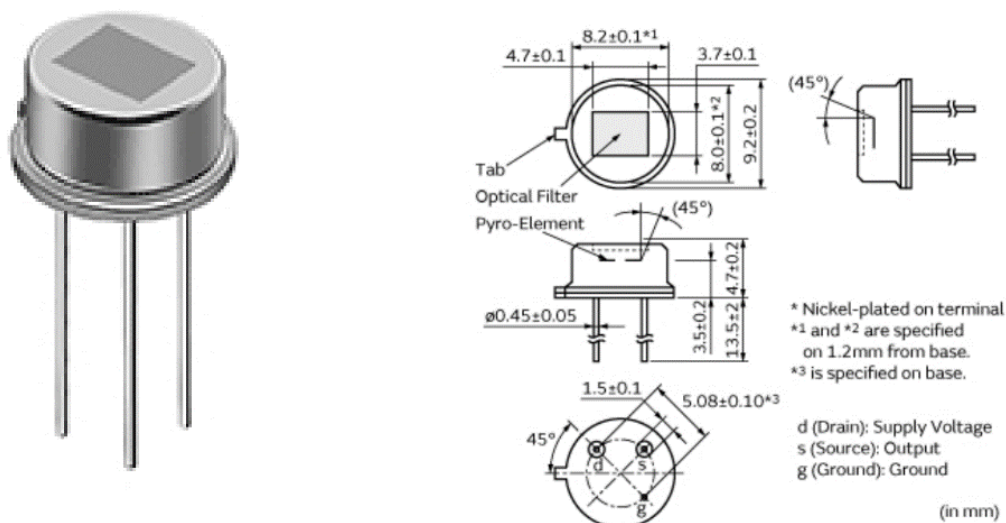
Další testovanou metodou je využití dvou PIR snímačů a metody zvané vzájemná korelace, která je zmíněná v kapitole 4.1. Pro tuto metodu je zásadní, aby se v zařízení nacházely dva PIR snímače a bylo možné porovnat dva různé signály, díky čemuž je možné zjistit směr pohybu procházející osoby.

5.1 Výběr hardwarového řešení

Snímač, který byl zvolen pro detekci směru pohybu, je Murata IRA-S230ST01, jehož parametry jsou ukázány v Tabulka 1. Jedním z rozhodujících parametrů byl počet pyroelektrických elementů (dále jen elementy), které snímají dopadající infračervené záření. V tomto senzoru se nacházejí dva elementy, což bylo zjištěno testováním, že vychází jako ideální počet, aby byl výstupní signál snadno analyzovatelný. Při průchodu osoby má signál symetrický tvar a je tak vhodnější pro primitivní metodu detekce směru pohybu přes stavový automat (viz kapitola 4.2). V prvotní fázi byl testován snímač se čtyřmi elementy, od kterého bylo upuštěno z důvodu náročnější analýzy výstupního signálu. Obrázek 21 obsahuje ukázkou pouzdra a rozměrů.

Tabulka 1: Parametry snímače Murata IRA-S230ST01 [43]

Rozsah provozních teplot	-40 °C až 70 °C
Zorné pole	$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$
Rozsah napájecího napětí	2 V až 5 V
Elementy	(2,0 x 1,0 mm) x 2
Odezva	4,6 mV
Optický filtr (Long Pass)	5 μm

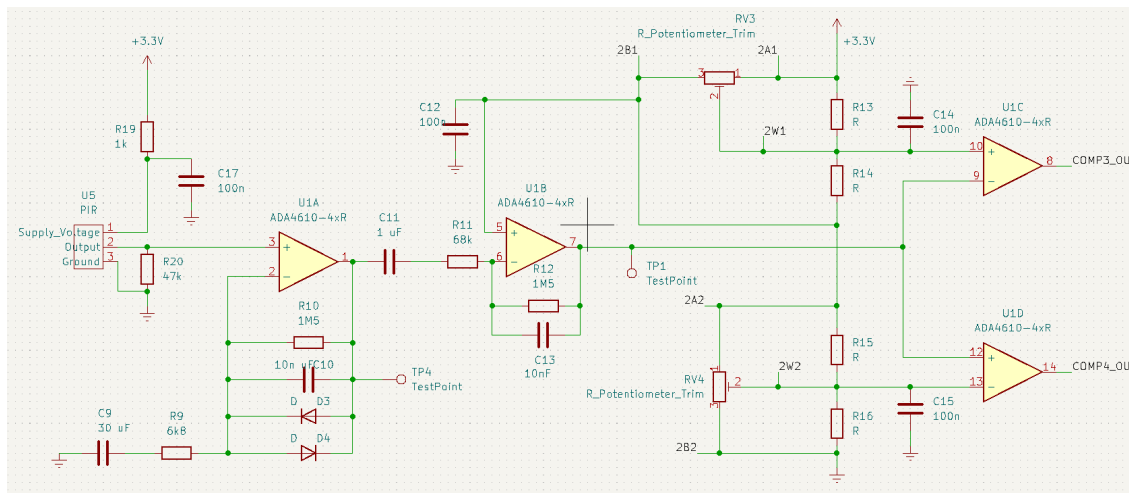


Obr. 21: Snímač IRA-S230ST01 [43]

Aby bylo možné výstupní signál jmenovaných PIR senzorů analyzovat mikrokontrolérem, je zapotřebí, aby byl tento signál zesílen. V tomto příkladu se jedná o sestavu dvou zesilovačů (viz obrázek 22). Pro tuto část plošného spoje bylo využito doporučené rozložení jednotlivých součástek podle výrobce [44], to je vhodné pro bateriově napájené bezdrátové PIR pohybové senzory. Schéma celého plošného spoje je možné vidět v Příloze č. 1.

Následné zpracování signálu je vysvětleno v kapitole 6.3. Pro fungování algoritmu je nutné nastavení rozhodovacích úrovní, aby bylo možné detekovat směr pohybu. Algoritmus využívá stavového automatu, kde kurčení stavů slouží rozhodovací úrovni, proto musí být nastaveny tak, aby byl detekován pohyb, pokud k němu opravdu dochází. Zároveň ale i tak, aby nebyl detekován pohyb, pokud k němu nedochází.

Do navrhovaného senzoru byly instalovány analogové komparátory, které umožňují nastavení rozhodovacích úrovní, díky čemuž došlo ke zjednodušení výpočetní náročnosti.



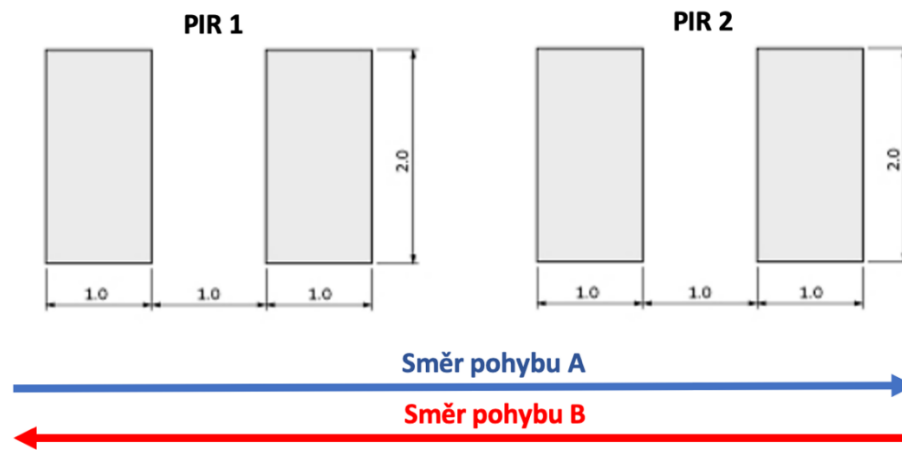
Obr. 22: Schéma části plošného spoje se dvěma zesilovači a dvěma komparátory

Tato část je využita pro zesílení signálu, ale také se v této části filtruje nežádoucí šum.

Jelikož je pro metodu vzájemné korelace zapotřebí dvou signálů, které jsou vzájemně porovnávány, jsou na tomto plošném spoji instalovány dva zmíněné PIR snímače. To také znamená, že se i části pro zesílení a filtraci signálu v navrhovaném plošném spoji nacházejí dvě.

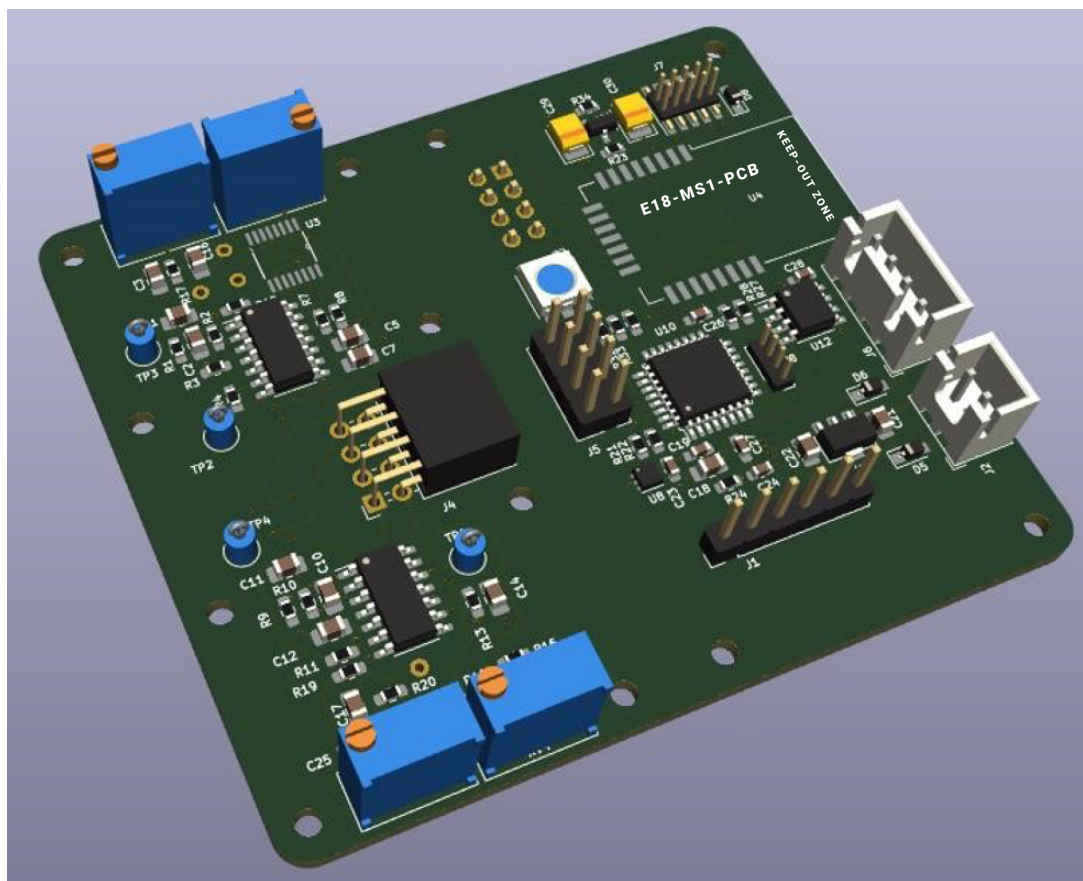
PIR snímače musí být umístěny tak, aby bylo možné detekovat směr pohybu osob. Musí být osazeny vedle sebe ve směru pohybu procházející osoby, ale také natočeny tak, aby elementy uvnitř těchto snímačů byly také vedle sebe po směru pohybu procházející osoby. Správné umístění a směr pohybu osoby je zobrazen na obrázku 23. Pokud by tomu tak nebylo, nebylo by tímto způsobem možné detekovat směr pohybu.

Na základě rozložení a natočení snímačů bude také záležet konečné umístění navrhovaného zařízení, proto je během návrhu uložení nutné brát v potaz i toto.



Obr. 23: Rozložení elementů vůči směru pohybu

Na obrázku 24 je možné vidět celé uspořádání vybraných hardwarových řešení. Cena tohoto řešení se pohybuje přibližně okolo 200 Kč.



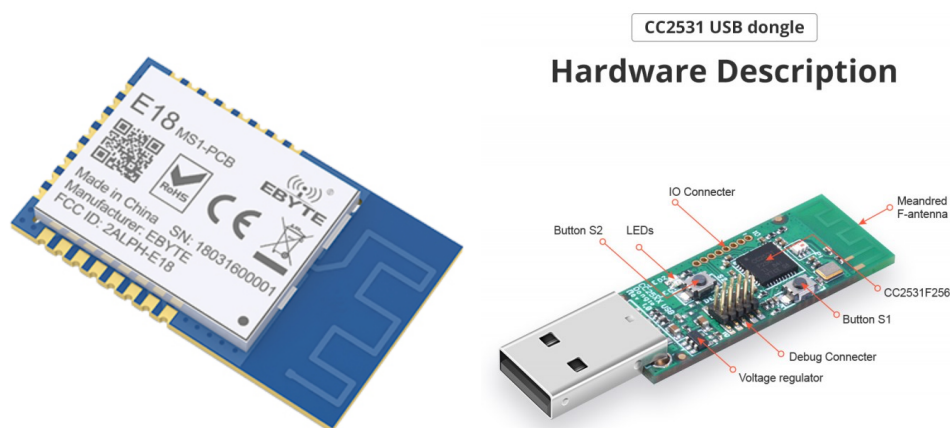
Obr. 24: 3D model navrženého plošného spoje

5.2 Komunikace

Nadřazeným systémem pro implementaci do domácí automatizace byl zvolen systém Home Assistant (dále jen HA), který se stará o komunikaci s jinými systémy domácí automatizace. Home Assistant je open-source platforma pro domácí automatizaci, která se zaměřuje na soukromí a místní ovládání. K tomuto systému může být například připojena chytrá žárovka, která bude zapnutá, pokud se bude v místnosti nacházet osoba, nebo vypnutá, pokud senzor rozpozná, že se v místnosti nikdo nenachází. K systému Home Assistant lze připojit například vytápění, chlazení nebo ovládání žaluzií. [45]

Tento systém je instalován na Raspberry Pi 4, které bylo vybráno díky flexibilitě a výpočetním schopnostem. Pro snadné ovládání je nutné, aby bylo Raspberry Pi připojeno k lokální síti. Pokud tomu tak je, je možné celé rozhraní zobrazit v prohlížeči kteréhokoliv počítače, který je připojen k téže síti.

Pro bezdrátovou komunikaci s navrhovaným senzorem, kde je implementován komunikační modul E18-MS1-PCB [46] (viz obrázek 25), je k Raspberry Pi připojeno zařízení CC2531 USB dongle [47] (viz obrázek 25), které zastává roli koordinátora v Zigbee architektuře. Tato technologie se vyznačuje velmi nízkou spotřebou energie, proto byla zvolena pro tento projekt, kde není důležité přeposílat velké množství dat. Přenášená data budou obsahovat pouze hodnotu počtu osob v místnosti a budou se přenášet pouze, pokud dojde ke změně této hodnoty.



Obr. 25: E18-MS1-PCB [46] a CC2531 USB dongle [47]

Aby mohl Home Assistant číst data z protokolu ZigBee, je využíván software Zigbee2MQTT, který funguje jako most překládající komunikační protokol ZigBee na MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), extrémně lehký protokol pro zasílání zpráv optimalizovaný pro sítě s malou šířkou pásma nebo vysokou latencí [48]. Konfigurace zařízení připojených ke koordinátoru lze provádět přes webové rozhraní Zigbee2MQTT (viz obrázek 26).

#	Pic	Friendly name	IEEE Address	Manufacturer	Model	LQI	Power
1		0x000d6ffffe4008bb	0x000d6ffffe4008bb (0x82D5)	Immax	07045L	49	
2		0x00124b00281ac3ef	0x00124b00281ac3ef (0xFF4F)	Unsupported		N/A	?
3		0x00124b00281a0000	0x00124b00281a0000 (0x582F)	Unsupported	switch.fel	N/A	

Obr. 26: Grafické rozhraní Zigbee2MQTT

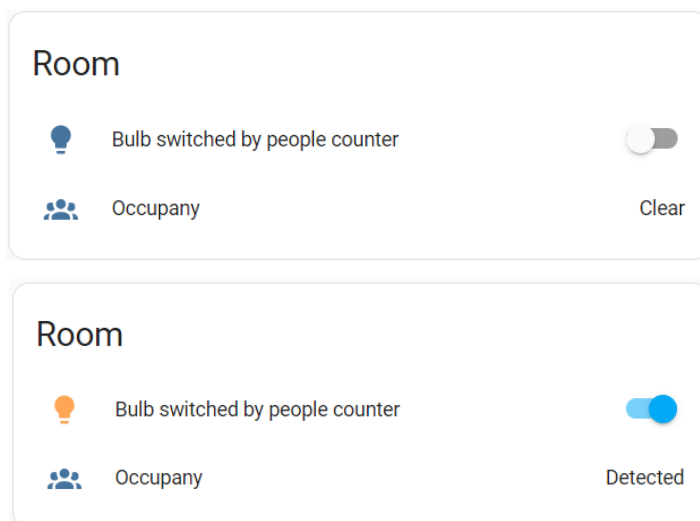
V této aplikaci je Zigbee2MQTT nainstalováno jako doplněk systému Home Assistant. V grafickém rozhraní byl v nastavení přidán konfigurační soubor, který zajišťuje kompatibilitu ZigBee modulu s PTVO firmwarem a Zigbee2MQTT zpracování zpráv (dále jen konfigurační soubor) (viz Příloha č. 2), který byl vygenerován pomocí ZigBee Configurable Firmware v2.5, jehož grafické rozhraní je možné vidět na obrázku 29 [49]. Tato varianta byla zvolena, aby nebylo nutné psát celé vlastní řešení. Po nastavení určitých konfigurací byla vygenerována většina podstatných souborů, aby bylo možné nastavit komunikační modul E18-MS1-PCB a následnou komunikaci s USB donglem a Raspberry Pi. Ve vygenerovaném konfiguračním souboru byla upravena část kódu, aby bylo možné přesně konvertovat přijímaná data. Dále byla přidána rozhodovací logika, aby byl nastaven stav přítomnosti osob (occupancy) podle toho, zda je počet osob v místnosti roven nule. Tuto rozhodovací logiku lze implementovat také v samotném senzoru. Atribut occupancy může nabývat dvou stavů, buď false, což je díky HA automaticky zobrazeno jako prázdné (clear), nebo true, což je díky HA automaticky zobrazeno jako obsazeno (detected) (viz obrázek 28). Tuto část kódu je možné vidět na obrázku 27. V PTVO Configuration byla zvolena možnost pro odesílání

vícetavových hodnot, aby bylo možné odesílat počet osob v místnosti, kvůli čemuž byl také v konfiguračním souboru zvolen ZigBee cluster genMultistateValue.

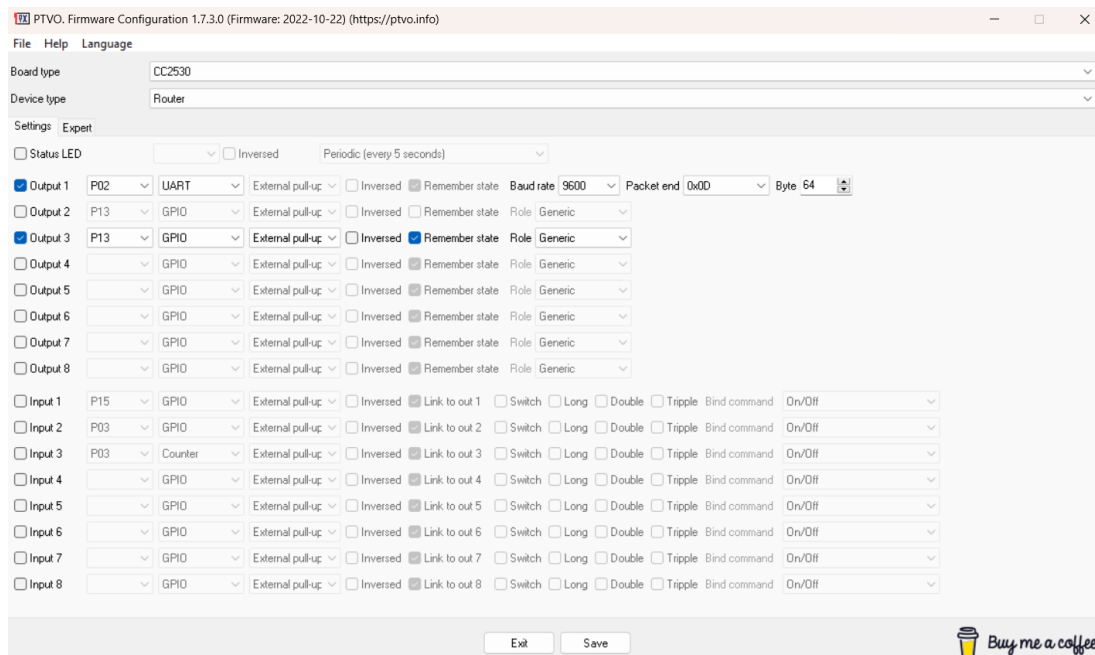
```
fz.my_occupancy_sensor = {  
  cluster: 'genMultistateValue',  
  type: ['attributeReport', 'readResponse'],  
  convert: (model, msg, publish, options, meta) => {  
    let data = msg.data['stateText'];  
    const payload = {};  
    if (data.includes("0")) {  
      payload['occupancy'] = false;  
    } else {  
      payload['occupancy'] = true;  
    }  
    payload['msg'] = data;  
    return payload;  
  },  
};
```

Obr. 27: Část kódu, který byl přidán do vygenerovaného konfiguračního souboru

Do systému Home Assistant byl také přidán inteligentní světelný zdroj, který byl následně propojen pomocí automatizace, aby se spínal v závislosti na přítomnosti osob (occupancy), jak je možné vidět na obrázku 28.



Obr. 28: Grafické zobrazení dvou možných stavů obsazenosti místnosti a závislého světelného zdroje. Toto zobrazení je možné vidět v hlavní sekci HA.

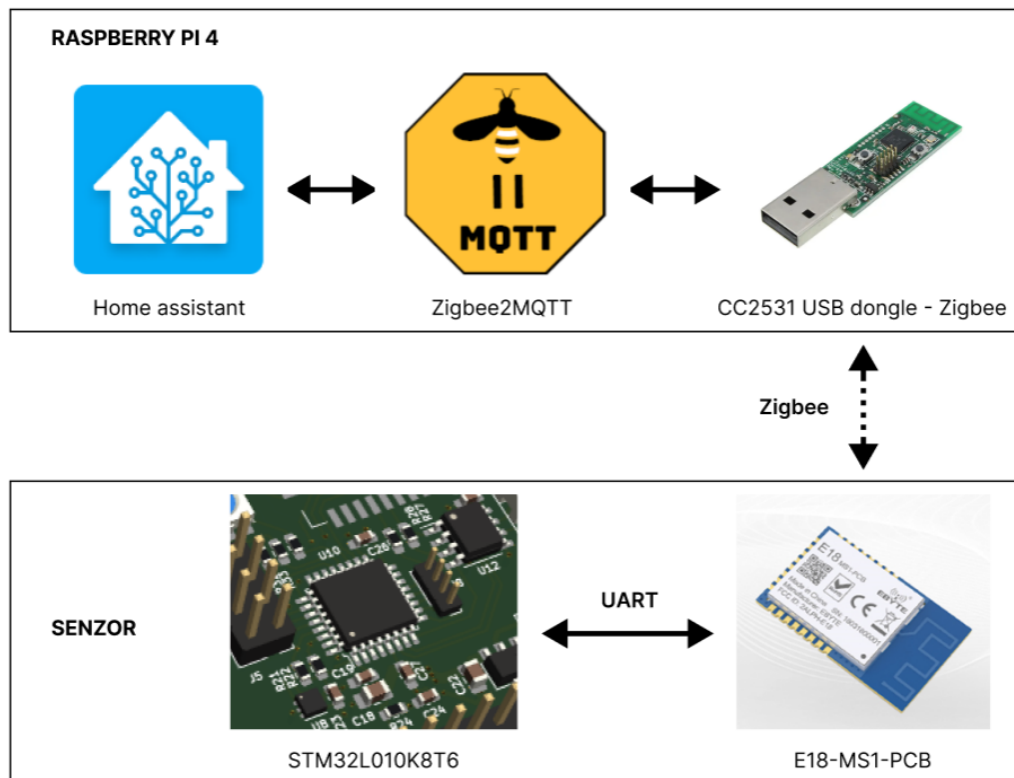


Obr. 29: PTVO Firmware Configuration [39]

Pro naprogramování modulu E18-MS1-PCB byl využit stejný firmware, kterým byl vygenerován konfigurační soubor. Tento modul zajišťuje komunikaci na straně navrženého senzoru a je založen na čipu CC2530 od společnosti Texas Instruments. Tento bezdrátový vysílač je použitelný pro ZigBee a 2,4 GHz protokol IEEE 802.15.4 [46].

Nakonec bylo v PTVO firmwaru také nastaveno, že modul E18-MS1-PCB komunikuje s mikrokontrolérem v navrhovaném zařízení prostřednictvím UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), kde opět dochází k přenosu informace o počtu osob. UART je komunikační protokol, který umožňuje sériovou komunikaci mezi zařízeními.

Celá komunikace od zpracovaných dat v mikrokontroléru navrhovaného senzoru až po přečtení těchto dat nadřazeným systémem Home Assistant, který ovládá další prvky domácí automatizace, je zobrazena na dalším obrázku (30).



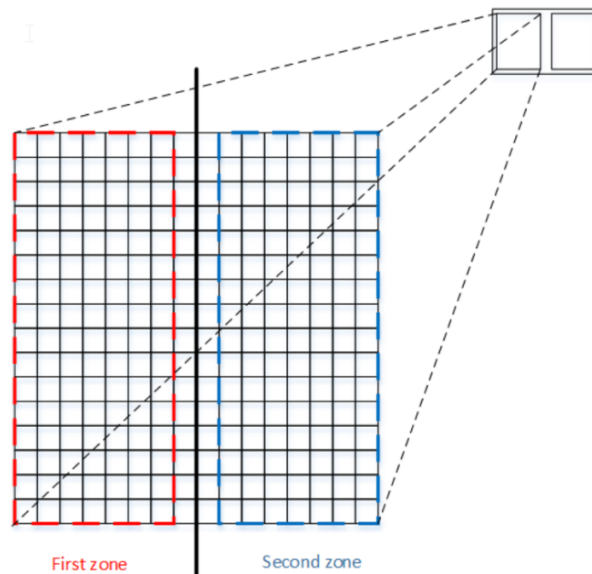
Obr. 30: Schéma celé komunikace senzoru s nadřazeným systémem

6. Srovnání více technologií pro detekci směru pohybu

V této části diplomové práce se nachází srovnání dvou senzorů, které se po úpravě dají také využít jako senzory pro kontrolu směru pohybu, a navrženého senzoru popsaného v předešlé kapitole. Každý z těchto senzorů pracuje na odlišném principu a nabízí jedinečné výhody i omezení. Jedná se o sensor VL53L1X [44], který pracuje na principu ToF, a termální kameru MLX90640 s thermopile maticí [50]. Hlavním cílem této části je analyzovat a porovnat, jak přesně a efektivně reagují na pohyb a jak tyto senzory detekují směr pohybu. Pro hlubší pochopení jejich funkčnosti budou zkoumány nejen teoretické aspekty, ale také praktické výsledky získané během testování.

6.1 ToF senzor VL53L1X

Tento senzor je schopný určit vzdálenost až na 400 cm. Jak bylo popsáno v kapitole 3.1.2, tento senzor emituje záření, které se odrazí od předmětu, a na základě doby letu je spočtena vzdálenost tělesa od senzoru. Tento senzor disponuje laserovým zářičem třídy 1, který vyzařuje záření s vlnovou délkou 940 nm, tedy pro lidské oko neviditelné záření. Pro detekci odraženého záření využívá přijímací pole SPAD (Single Photon Avalanche Diode). Jedná se o pole o velikosti 16 x 16. Hlavní výhodou tohoto senzoru je možnost rozdělit pole SPAD do dvou částí a nastavit si velikost těchto dvou částí neboli Region of Interest (dále jen ROI) (viz obrázek 31). Právě toto nastavení umožňuje využít VL53L1X pro detekování směru pohybu procházejících osob. Senzor se vyznačuje rychlou frekvencí určování vzdálenosti až 50 Hz. Ve skutečnosti je výsledná frekvence poloviční (tedy až 25 Hz), protože je vždy možné číst pouze jednu část (ROI). Cena tohoto senzoru je přibližně 470 Kč. [35]



Obr. 31: Příklad konfigurace pole SPAD [51]

6.2 Termální kamera MLX90640

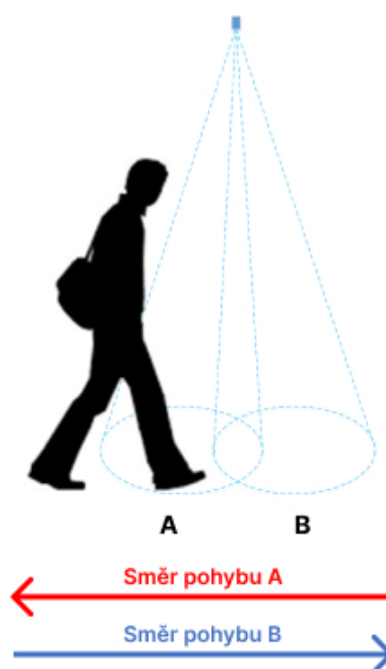
Druhým senzorem je termální kamera MLX90640, která obsahuje pole 24 x 32 IR snímačů. Toto pole lze opět rozdělit do dvou částí, tedy aplikovat stejný algoritmus (viz kapitola 6.3) pro detekci směru pohybu osob. Zařízení detekuje teplotu povrchu s přesností ± 2 °C. Tato přesnost by měla být dostačující, aby bylo možné rozlišit teplotu povrchu podlahy a procházející osoby ve vnitřním prostoru. Obnovovací frekvenci lze nastavit v rozsahu od 0,5 Hz do 64 Hz. Cena tohoto senzoru je přibližně 1700 Kč. [50]

6.3 Popis algoritmu pro detekci směru pohybu osob

Pro testované senzory byl vytvořen algoritmus, který na základě stavového automatu určuje směr pohybu osob. Pro senzory MLX90640 a VL53L1X je algoritmus stejný, protože oba využívají možnosti rozdělení snímací plochy na dvě části. Pro navržený senzor se algoritmus mírně liší (viz kapitola 6.3.2).

6.3.1. MLX90640 a VL53L1X

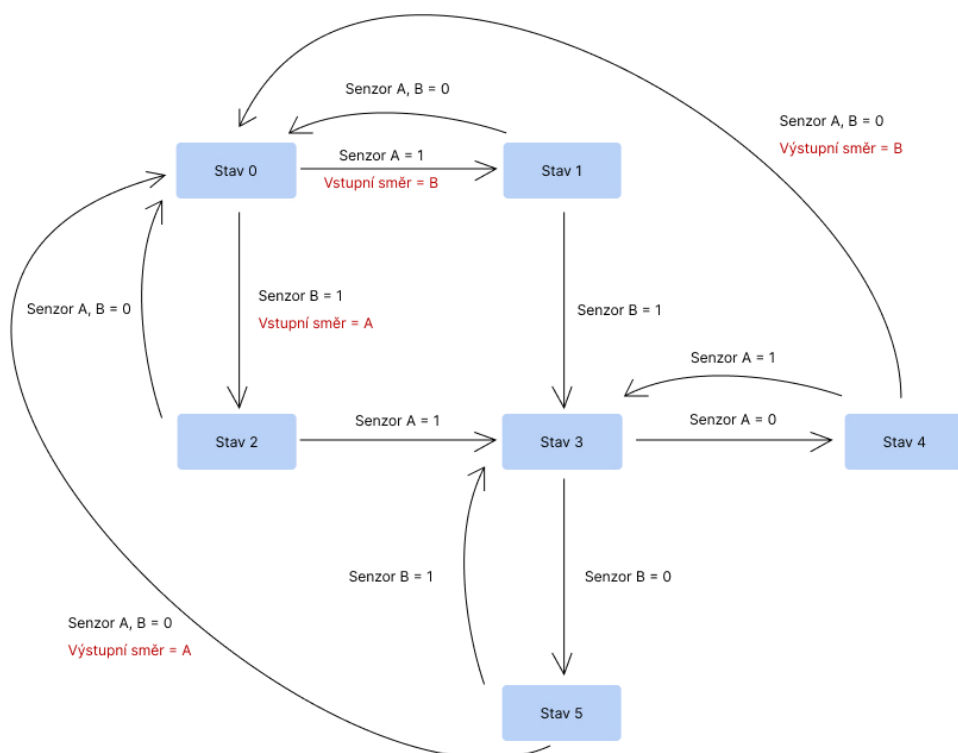
Tento algoritmus dokáže určit, zda osoba prošla ve směru A, B nebo zda se zastavila přímo před senzorem a vrátila se zpět stejným směrem, kterým přišla. Ať už se jedná o dvě určené části (ROI) nebo dva senzory vedle sebe, vždy lze definovat několik stavů. Pro zjednodušení popisu využijeme dvou senzorů A B (viz obrázek 32). Protože senzor, který detekuje osobu jako poslední, určuje směr pohybu, nazveme směr pohybu A ten, u kterého bude poslední detekce na senzoru A. Směr B bude naopak určen poslední detekcí na senzoru B.



Obr. 32: Určení senzorů A/B a směrů pohybu

Na obrázku 33 je vyobrazen stavový automat, který je využit v algoritmu pro detekci směru pohybu. Nejčastějším stavem je stav 0, protože je nastaven pokaždé, kdy ani jeden senzor nedetekuje pohyb či osobu. Na základě toho, zda první detekuje osobu senzor A nebo B, se algoritmus přesouvá do stavu 2 nebo 3. Také je aktualizována proměnná „vstupní směr“ na hodnotu 1 nebo 2 (1 pro A, 2 pro B), aby bylo možné na konci tohoto procesu určit, zda je počet osob v místnosti $n+1$ nebo $n-1$. Pokud jeden ze senzorů detekuje osobu, která poté půjde zpět, algoritmus se posune ze stavu 1 opět do stavu 0. Předpokládejme, že osoba pokračovala

v původním směru pohybu. Detekci nyní zaznamenávají oba senzory současně a algoritmus se přesouvá do stavu 3. Nyní záleží na tom, který ze senzorů nebude detekovat žádnou osobu, podle toho se dostaneme do stavu 4 nebo 5. Posledním krokem se opět dostáváme do stavu 0, protože osoba prochází a není detekována žádným senzorem. Během tohoto kroku je aktualizována proměnná „výstupní směr“ a na základě porovnání s proměnou „vstupní směr“ je algoritmus schopný určit, zda osoba prošla nebo se vrátila, případně i jakým směrem.



Obr. 33: Stavový automat pro detekci směru pohybu

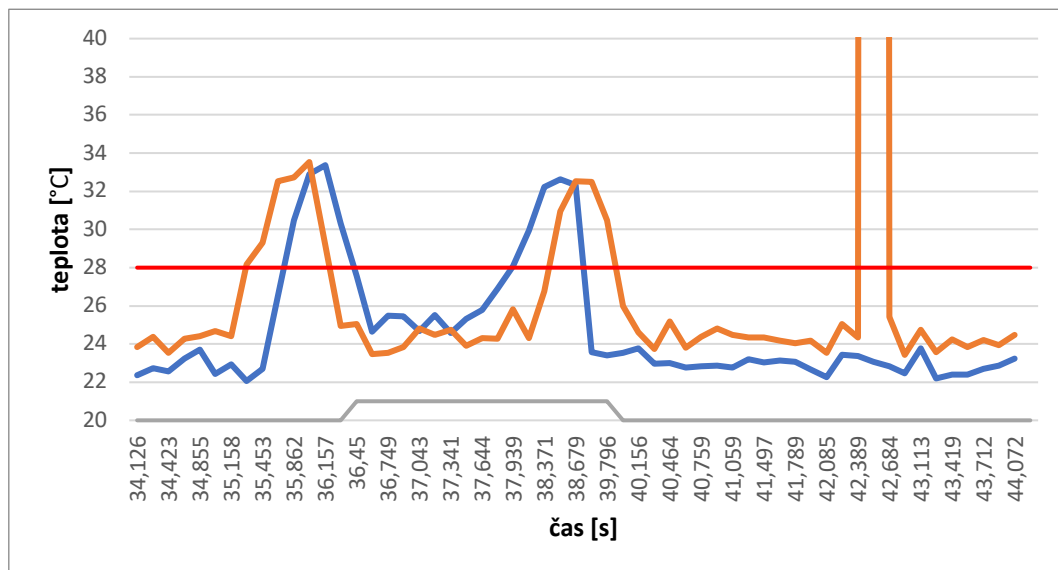
Díky tomuto stavovému automatu by mělo být možné eliminovat nežádoucí vlivy, které by mohly zmást senzor. Senzor by poté mohl určit průchod, ke kterému ve skutečnosti nedošlo. Mezi tyto vlivy může například patřit mávnutí rukou před senzorem.

6.3.1.1. MLX90640

Jak již bylo zmíněno výše, tento senzor je v algoritmu rozdělen do dvou částí, které jsou čteny nezávisle na sobě, díky čemuž je možné využít stavový automat. Pro algoritmus je důležité pouze to, jaká část je kdy a v jakém pořadí sepnuta (zaznamenává osobu). K zaznamenání osoby dojde ve chvíli, kdy algoritmus zaznamená vyšší teplotu, než je přibližná teplota pozadí (tedy podlahy). Protože teplota pozadí stále kolísá, byla zvolena pevná hodnota, která musí být překročena. S touto hodnotou se porovnává maximální naměřená hodnota z daného pole. Během testování bylo vyzkoušeno využití průměrné hodnoty, ale kvůli obnovovací frekvenci, rychlosti průchodu osoby a velikosti poměru plochy osoby (myšleno při pohledu shora a pouze části těla, která mají zaznamenaně vyšší teplotu, než je teplota podlahy) a snímané plochy byla vypočtená hodnota příliš nízká na to, aby ji bylo možné odlišit od teplot pozadí.

Po experimentálním měření byla jako rozhodující hodnota, kterou musí naměřená veličina k záznamu osoby přesáhnout, zvolena teplota 28 °C (červená přímká na obrázku 34). Experimentální měření probíhalo během jara a podzimu, takže nebylo možné zjistit vliv vysokých teplot, které se mohou vyskytovat během letních měsíců. Protože senzor i při průchodu osoby zaznamenal maximální teploty okolo 33 až 34 °C, je možné, že při přímém slunečním záření na pozadí, které je snímáno senzorem, nebo vysokých teplotách může dojít k chybovému vyhodnocení nebo k celkové nemožnosti použití senzoru v této aplikaci. Teplota podlahy se během experimentů pohybovala v rozmezí od 22 do 26 °C.

Protože je volena maximální teplota daného pole, může nastat situace, kdy jeden pixel zaznamená mnohonásobně vyšší hodnotu (viz obrázek 34). K chybnému určení průchodu by v tomto případě nemělo dojít díky logice stavového automatu.



Obr. 34: Časový průběh maximálních teplot obou částí senzoru při průchodu osoby (v obou směrech). Zobrazení možného výskytu chyby, kdy senzor zaznamená mnohonásobně vyšší teplotu. Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

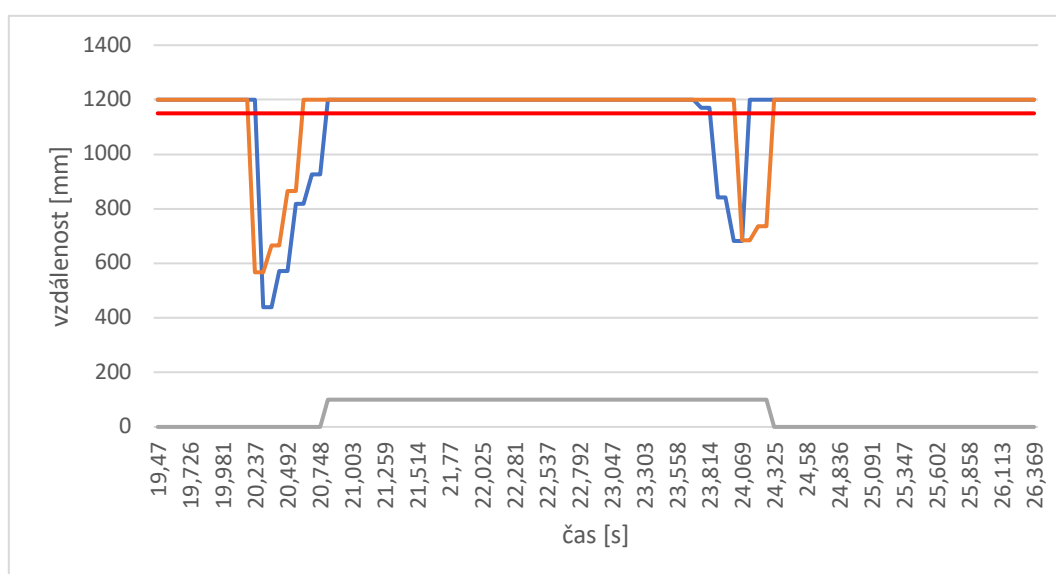
6.3.1.2. VL53L1X

Podobně jako tomu je u předchozího senzoru, je tento senzor rozdělen na dvě části. Toto rozdělení je aplikováno v algoritmu.

Na rozdíl od MLX90640 se porovnává průměrná vzdálenost dané části s mezní hodnotou.

U tohoto senzoru je možné nastavit měření vzdálenosti dvěma způsoby. Jedním z nich je nastavení krátkého rozsahu, který je vhodný pro vzdálenosti do 1300 mm, a druhým je nastavení dlouhého rozsahu, který se využívá pro měření vzdáleností do 4000 mm [52]. Pro tuto aplikaci by byl vhodný druhý způsob, ale bohužel se tím sníží obnovovací frekvence a také dojde ke zvýšení nepřesnosti měření. Naměřená vzdálenost je určena s chybou v řádu desítek procent, a navíc výstupní signál obsahuje periodické skoky ± 10 cm. Pravděpodobně z důvodu menší imunity vůči okolnímu rušení. Proto je zvolen první způsob (nastavení krátkého rozsahu), který je odolnější vůči okolnímu rušení, ale naopak dochází k přetékání hodnot. To je možné eliminovat vyřazením náhodných hodnot, díky výčtu pomocného registru [52]. Do takto vyfiltrovaných hodnot je poté uložena hodnota 1200. Pokud nikdo není před senzorem, měla by se vždy zobrazit vzdálenost 1200 mm (viz obrázek 35). Pokud někdo projde, tato hodnota se sníží. Z tohoto je možné určit rozhodovací hodnotu,

kteřou je nutné překročit, aby došlo k detekci. V této aplikaci byla zvolena rozhodující hodnota 1150 mm, pokud je průměrná hodnota dané části menší, je to bráno jako detekce osoby. Na obrázku 35 je zobrazen časový průběh obou částí ToF senzoru. Tento senzor byl instalován ve výšce 2400 mm. V obou zaznamenaných případech procházela osoba o výšce 1860 mm. Naměřená odchylka může být způsobena kombinací obnovovací frekvence a poměrem plochy procházející osoby (plocha osoby, kterou snímá senzor) a plochy, kterou snímá daný senzor. Z důvodu využívání průměrné vzdálenosti může být tato hodnota nepřesná.



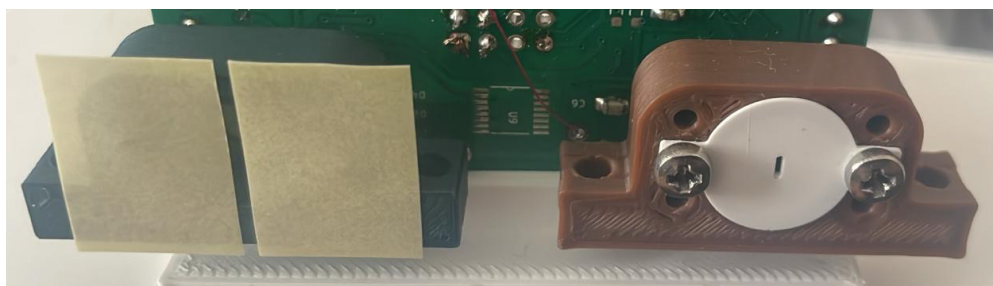
Obr. 35: Průběh naměřených vzdáleností z ToF senzoru. Zvláště zobrazen průběh z ROI 1 a ROI 2. Šedivá křivka značí zaznamenaní pohybu a jeho směr. Červená přímka značí rozhodující hodnotu.

6.3.2. Navržený senzor

U tohoto senzoru funguje stavový automat podobně, jako je popsáno v předešlé kapitole pro ostatní senzory. Předem jsou definované stavy, na jejichž posloupnosti algoritmus vyhodnotí, zda se jednalo o průchod osoby směrem A, nebo směrem B. Jak je možné vidět na obrázku 36, průběhy výstupních signálů jsou v obou směrech téměř totožné, pouze jsou s obrácenou polaritou. Aby se algoritmus dostal do určitého stavu, musí se signál dostat nad/pod horní/dolní hraniční hodnotu. Tyto hodnoty určuje nastavení instalovaných komparátorů. Hodnoty byly zvoleny tak, aby byl senzor schopen detekovat maximální počet průchodů, ale zároveň aby

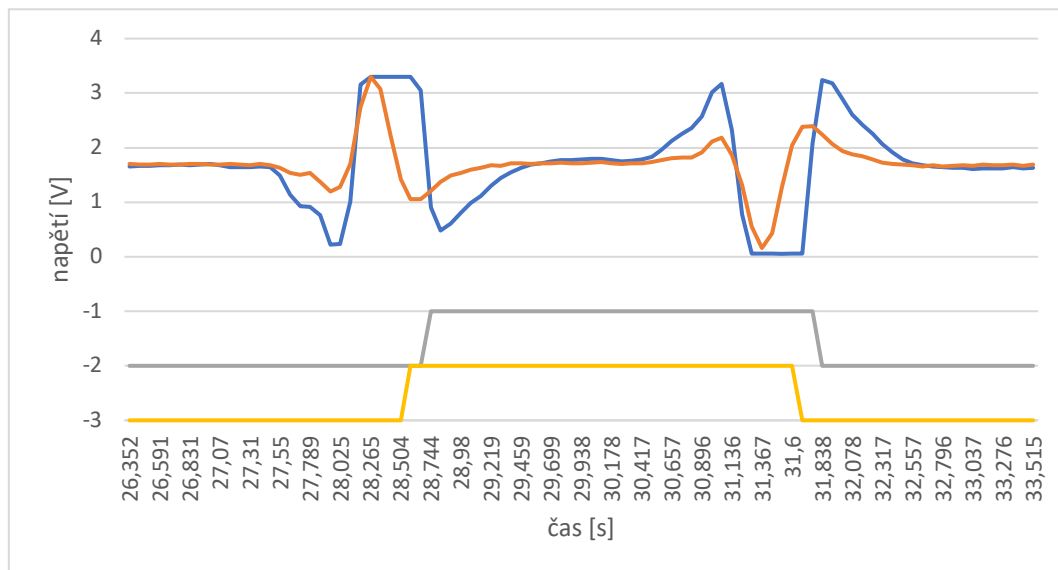
nedocházelo k detekci pohybu, pokud žádný neprobíhá. Hodnoty byly nastaveny na základě experimentálních měření. Na základě posloupnosti překročení horní nebo dolní hraniční hodnoty je možné určit směr pohybu.

Protože navržený senzor obsahuje dva PIR snímače, aby bylo možné otestovat vzájemnou korelaci, je možné v tomto měření otestovat dvě různá stínění PIR snímačů. A to z důvodu, že k určení směru pohybu osoby je zapotřebí pouze jeden PIR snímač. Pro tuto aplikaci je ideální, pokud je zorné pole senzoru dostatečně široké, aby snímalo celou šířku vstupu. Zároveň nesmí být příliš široké v kolmém směru, aby nedocházelo k detekci při pohybu osoby v blízkosti snímané oblasti. Z tohoto důvodu byly zvoleny místo Fresnelovy čočky úzké štěrbinu. Na obrázku 36 je možné vidět nalevo štěrbinu, která omezuje zorné pole pouze ze dvou stran. Oproti tomu zorné pole snímače, který se nachází vpravo, je omezeno ze čtyř stran.



Obr. 36: Dvě různá stínění PIR snímačů pro experimentální měření

Vliv jednotlivých stínění je možné pozorovat na průběhu signálu obou těchto snímačů (viz obrázek 37). Oranžovou barvou je vyobrazen průběh signálu ze snímače, který má zorné pole omezeno ze čtyř stran, a modrou barvou je vyobrazen průběh signálu ze snímače, který má zorné pole omezeno ze dvou stran. Z tohoto obrázku je patrné, že se zvětšením rozměrů štěrbinu intenzita signálu roste. To je způsobeno větším množstvím dopadajícího záření. To může způsobit saturaci, která je ve většině aplikací nežádoucí, ale v tomto případě není shledána jako problém. Naopak lze říci, že větší množství dopadajícího záření má kladný vliv na určení směru pohybu, pokud je zdroj (tedy osoba) více zahalen.



Obr. 37: Průběh signálu dvou PIR snímačů. Snímač, který má omezen zorné pole ze dvou stran (oranžová), a snímač, který má omezen zorné pole ze čtyř stran (modrá). Žlutá (pro oranžový průběh) a šedivá (pro modrý průběh) křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

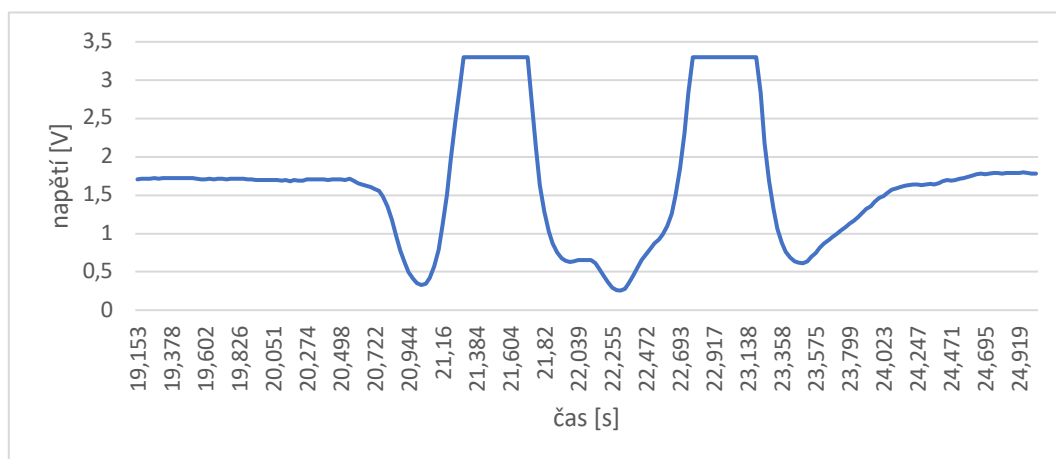
6.4 Experimentální měření

Výše zmíněné senzory byly podrobeny několika různým experimentálním měřením. Hlavním cílem těchto měření bylo zjistit silné a slabé stránky senzorů, objevit jejich limity a nastínit ideální způsob jejich využití. Aby bylo možné tyto senzory porovnat, měření probíhalo vždy u všech tří senzorů najednou. Pro ukládání dat bylo použito Raspberry Pi 4 [53]. MLX90640 a VL53L1X využívají podobný algoritmus (viz Příloha č. 2), proto byly připojeny k totožnému zařízení. Zvolené zařízení se nazývá Teensy 4.1 [54], se kterým senzory komunikují pomocí protokolu I2C. Toto zařízení následně komunikuje přes USB rozhraní s Raspberry Pi 4. Na Raspberry Pi je druhý USB port využíván USB-UART převodníkem [55], který zajišťuje komunikaci s mikrokontrolérem navrženého PIR senzoru.

Pro ukládání dat ze dvou sériových portů byl vytvořen skript v programovacím jazyce Python. Tento algoritmus ukládá data z daných portů a přiřkládá časovou značku ke každému řádku, aby bylo možné jejich následné porovnání.

6.4.1. Detekce směru pohybu více různých osob

Aby bylo možné určit účinnost detekce směru pohybu, je nutné provést testy na více různých postavách. V tomto experimentálním měření participovaly celkem tři osoby. První osoba je vysoká 175 cm, je drobné postavy, druhá osoba je vysoká 180 cm, má silnější postavu a třetí osoba je vysoká 187 cm, je střední postavy. Celkem bylo provedeno 107 průchodů. ToF senzor a termální kamera měly v tomto případě shodnou chybovost. Oba senzory nezaznamenaly tři průchody, avšak každý jiný. Navržený senzor nezaznamenal nebo chybně určil směr u dvou průchodů. Účinnost těchto senzorů je proto téměř shodná, avšak ToF senzor a termální kamera si umí lépe poradit s průchody osob, které jdou těsně za sebou. Navržený senzor v tomto případě nedetekuje druhý průchod kvůli charakteru průběhu signálu (viz obrázek 38). Naměřená data je možné vidět v Příloze č. 3.



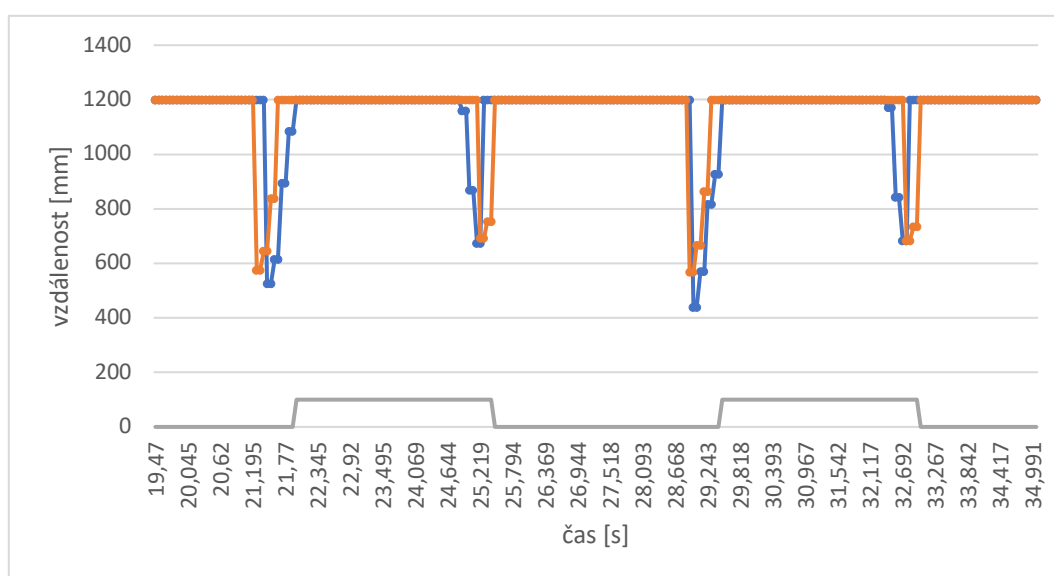
Obr. 38: Průběh signálu z navrženého senzoru při průchodu dvou osob těsně za sebou

6.4.2. Vliv oděvu na detekci směru pohybu

Senzory byly otestovány na účinnost detekce v závislosti na oděvu procházející osoby. Během tohoto experimentálního měření byly vyzkoušeny čtyři různé kombinace oděvu. Pro každou kombinaci bylo provedeno 10 průchodů. Protože byl senzor umístěn nad dveřmi, testovaný subjekt měl spodní část oděvu vždy stejnou. Dolní polovina těla osoby byla vždy úplně zahalena. Během testování byly otestovány tyto kombinace oděvu: krátký rukáv (bílé tričko), dlouhý rukáv (černá mikina s dlouhým rukávem, nutné brát jako další vrstvu), dlouhý rukáv a pokrývka hlavy (černá kšiltovka), dlouhý rukáv a pokrývka hlavy. Naměřená data je možné najít v Příloze č. 3.

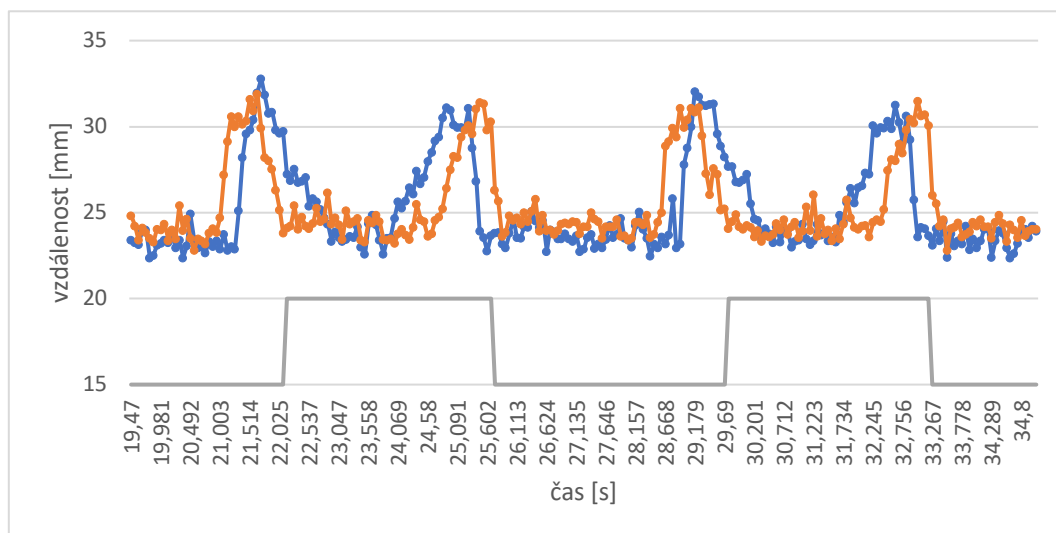
6.4.2.1. Výsledky měření vlivu oděvu (krátký rukáv)

Experimentální měření pouze s tričkem bylo provedeno několikrát. Poprvé bylo provedeno s tričkem šedivé barvy. Během tohoto měření bylo zjištěno, že ToF senzor není téměř schopen zaznamenat přibližně 50 % průchodů. To mohlo být způsobeno kombinací barvy nebo materiálu tohoto trička. Byly proto vyzkoušeny také jiné barvy a materiály, ale u všech ostatních pokusů senzor reagoval podobně jako u zaznamenaných průchodů. Některé z nich je možné vidět na obrázku 39. ToF senzor v tomto případě správně určil směr pohybu ve 100 % průchodů.



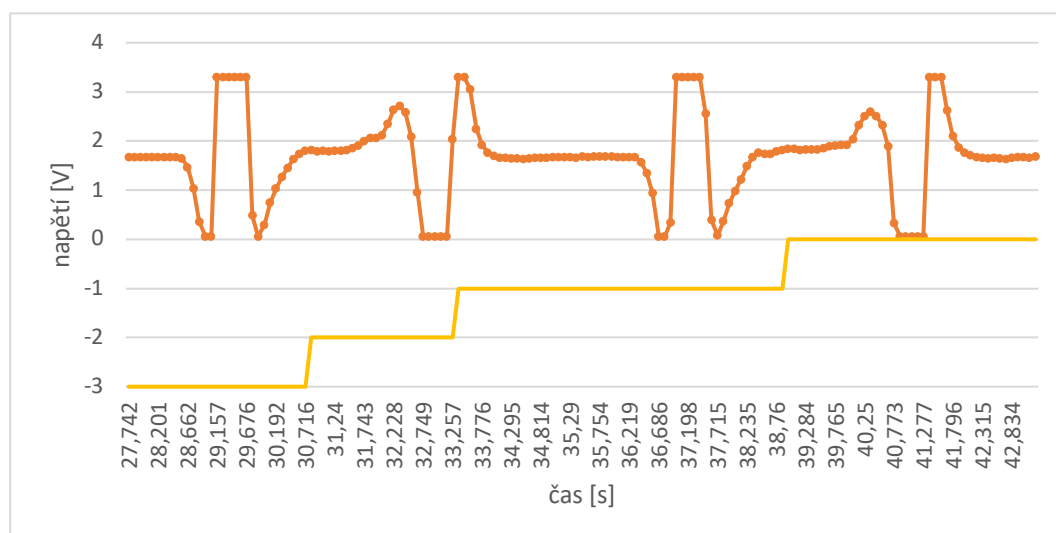
Obr. 39: Čtyři průchody naměřené ToF senzorem (osoba s krátkým rukávem). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

Senzor MLX90640 určil přesně všech deset průchodů, proto jsou na obrázku 40 vyobrazeny pouze čtyři z nich. Ostatní data vypadají velice podobně, a proto je zbytečné vykreslovat je všechna.



Obr. 40: Čtyři průchody naměřené senzorem MLX90640 (osoba s krátkým rukávem). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

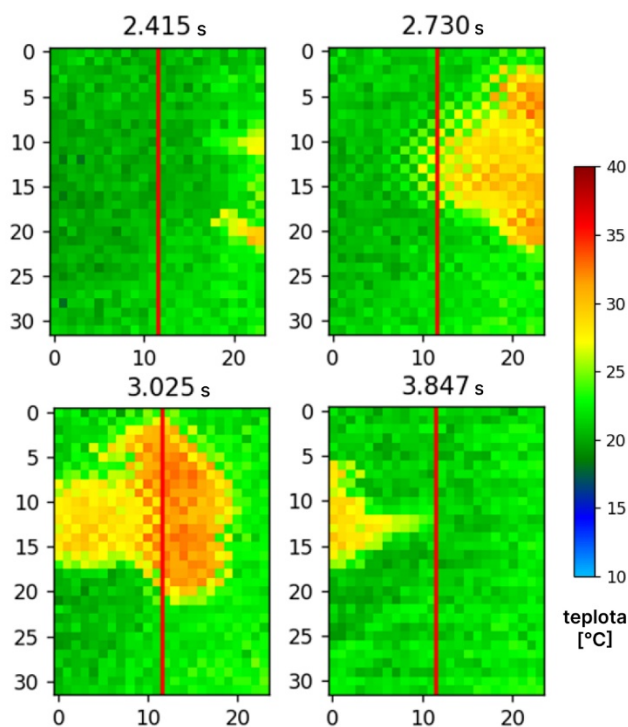
Během tohoto měření navržený senzor nedetekoval nebo chybně určil směr pohybu u tří průchodů z deseti. To může být způsobeno výběrem stínění, které bylo vybráno, aby bylo možné určit směr pohybu i u více zahalených osob. Na obrázku 41 je možné vidět čtyři průchody osoby s krátkým rukávem, z nichž tři jsou chybně určeny.



Obr. 41: Čtyři průchody naměřené navrženým senzorem (osoba s krátkým rukávem). Žlutá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

Na obrázku 42 je možné vidět čtyři snímky z termální kamery MLX90640. Jednotlivé pixely jsou rozlišeny pomocí barvy, která je určena podle hodnoty

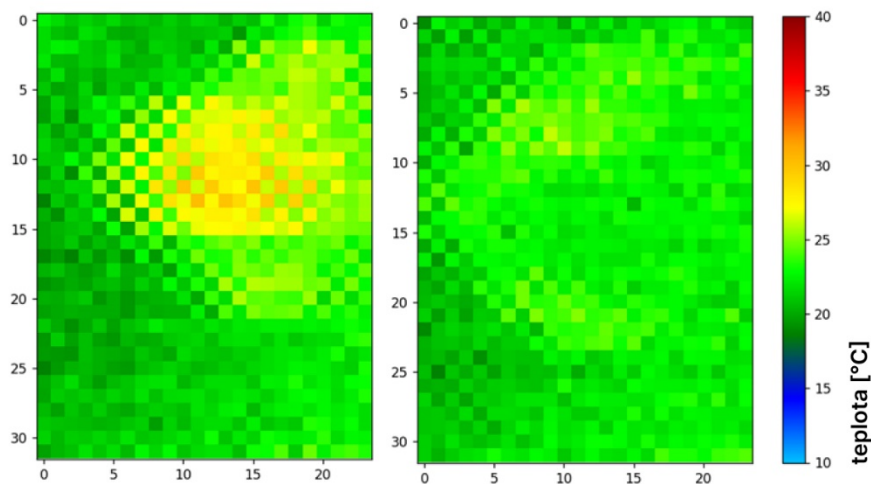
zaznamenané teploty (všechny hodnoty jsou ve °C). Z obrázku je zřejmé, že osobu nejprve zaznamená pravá polovina (rozdělena na dvě půlky pomocí červené přímky), poté obě poloviny, nakonec pouze levá polovina. Díky tomuto pořadí je možné projít všemi stavy stavového automatu a určit směr pohybu.



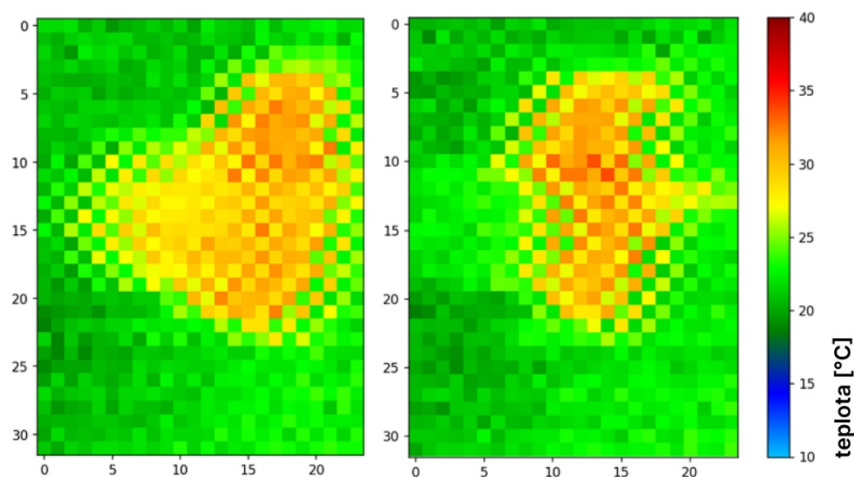
Obr. 42: Vizualizace průchodu osoby pomocí teplot [°C] jednotlivých pixelů ze senzoru MLX90640 (osoba s krátkým rukávem). Červenou přímkou je naznačené rozdělení snímací plochy.

6.4.2.2. Výsledky měření vlivu oděvu (dlouhý rukáv, dlouhý rukáv a pokrývka hlavy, krátký rukáv a pokrývka hlavy)

Pro zbylé testy má ToF senzor také přesnost 100 %, proto se dá předpokládat, že kromě zmíněné anomálie se šedivým tričkem má oděv na ToF senzor zanedbatelný vliv. Určité snížení přesnosti lze sledovat u senzoru MLX90640, který u testu, během kterého procházela osoba s dlouhým rukávem a pokrývkou hlavy, neurčil ani jediný průchod. Na obrázku 43 vpravo je vidět, že osoba téměř splývá s pozadím, a proto nebyl senzor schopen určit směr pohybu. Senzor zaznamenal zvýšení teploty, které ale nebylo pro záznam dostatečné. Na dalších obrázcích (43, 44) je možné vizuálně porovnat vliv oděvu na výsledné vyzařování osoby v infračerveném spektru.

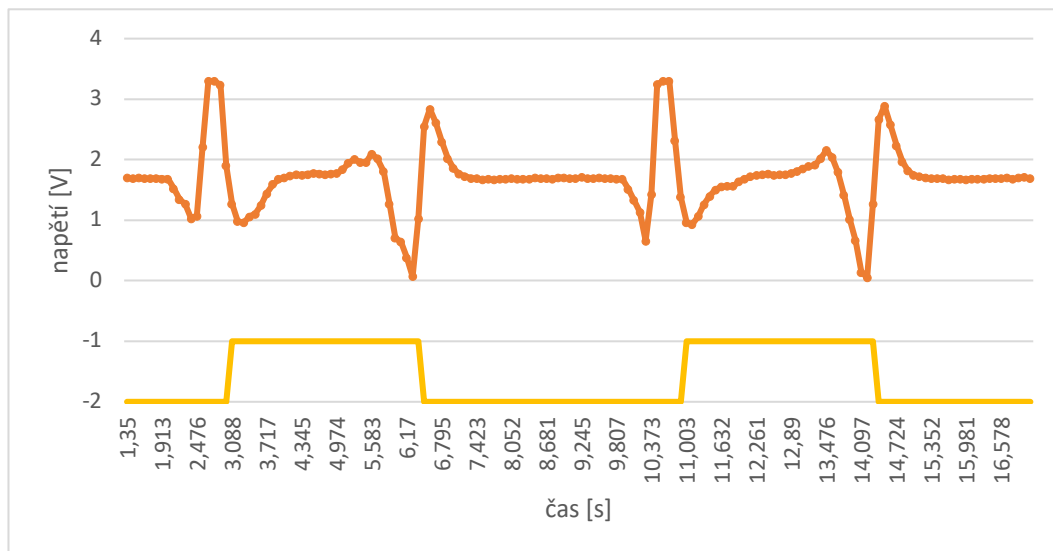


Obr. 43: Vizualizace teplot jednotlivých pixelů z MLX90640 (zleva: osoba s dlouhým rukávem, osoba s dlouhým rukávem a pokrývkou hlavy)



Obr. 44: Vizualizace teplot jednotlivých pixelů z MLX90640 (zleva: osoba s krátkým rukávem, osoba s krátkým rukávem a pokrývkou hlavy)

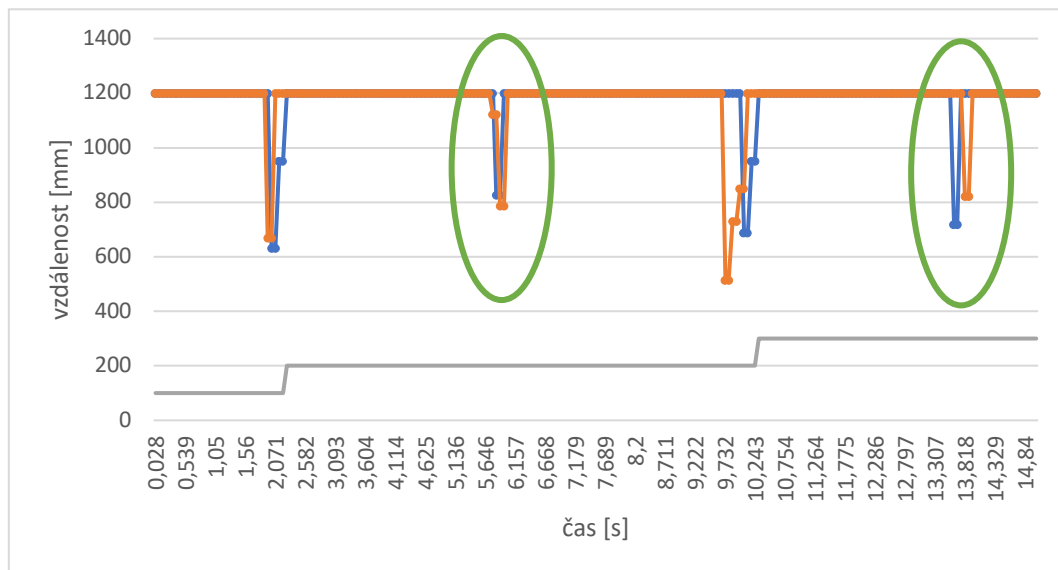
Z logické úvahy by se dalo předpokládat, že navržený senzor bude reagovat podobně a že nebude schopen určit směr pohybu. Na obrázku 45 je vidět, že senzor v tomto případě jednotlivé průchody zaznamenal a také správně určil směr pohybu. stejně tak u zbylých šesti průchodů. Pozitivní vliv na tyto výsledky má výběr stínění, které omezuje zorné pole snímače pouze ze dvou stran, je zmíněno v kapitole 6.3.2.



Obr. 45: Časový průběh signálu čtyř průchodů osoby s dlouhým rukávem a pokrývkou hlavy z navrženého PIR senzoru. Žlutá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

6.4.3. Vliv rychlosti chůze procházející osoby

Senzory byly také testovány na vliv rychlosti průchodu. Aby bylo testování zjednodušeno, byla naměřena data pouze pro pomalou, střední a rychlou (běh) chůzi. Na navržený a MLX90640 senzor nemá rychlost chůze téměř žádný vliv, pokud bereme v potaz určení směru pohybu. Navržený senzor určil všechny průchody správně a MLX90640 určilo správně devět z desíti průchodů. Tak, jak je pro senzor MLX90640 zásadní, zda je osoba celá zahalena, je pro ToF senzor zásadní rychlost chůze průchodu. Přesněji se jeho přesnost určení směru pohybu snižuje s rychlostí chůze procházející osoby, protože počet vzorků signálu během průchodu je nedostatečný pro spolehlivé určení směru pohybu. Stejně jako v předešlé kapitole také zde bylo naměřeno vždy deset průchodů. Během pomalé a střední rychlosti chůze určil ToF senzor všechny směry pohybu správně. Pouze během rychlé chůze, která se spíše podobala běhu, vůbec nezaznamenal tři průchody. Zbylých sedm určil správně. Na obrázku 46 je možné vidět dva nezaznamenané a dva zaznamenané průchody. Protože se ale jedná o senzory, které by primárně měly být umístěny v budovách, kde se převážně chodí zmíněnou pomalou nebo střední rychlostí chůze, neměly by tyto výsledky způsobovat výrazné problémy.



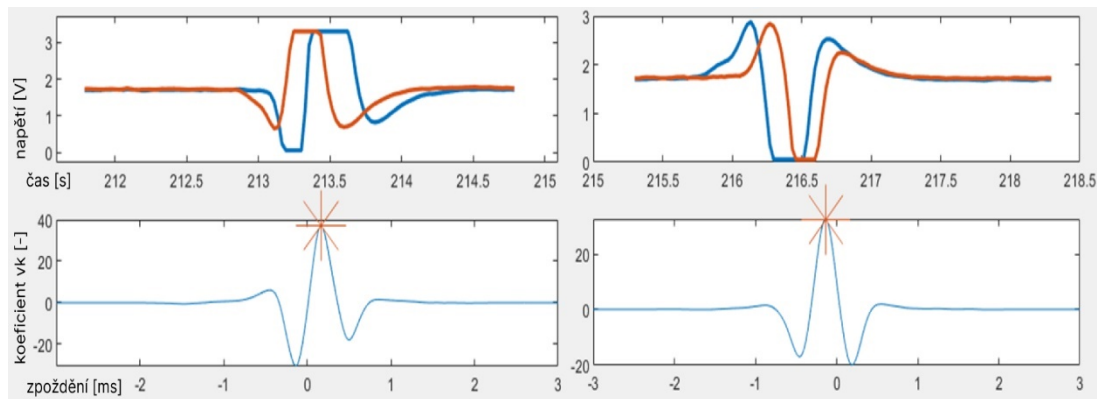
Obr. 46: Dva zaznamenané a dva nezaznamenané průchody (vyznačeno elipsami) ToF senzorem (běh). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.

6.4.4. Využití vzájemné korelace pro detekci směru pohybu

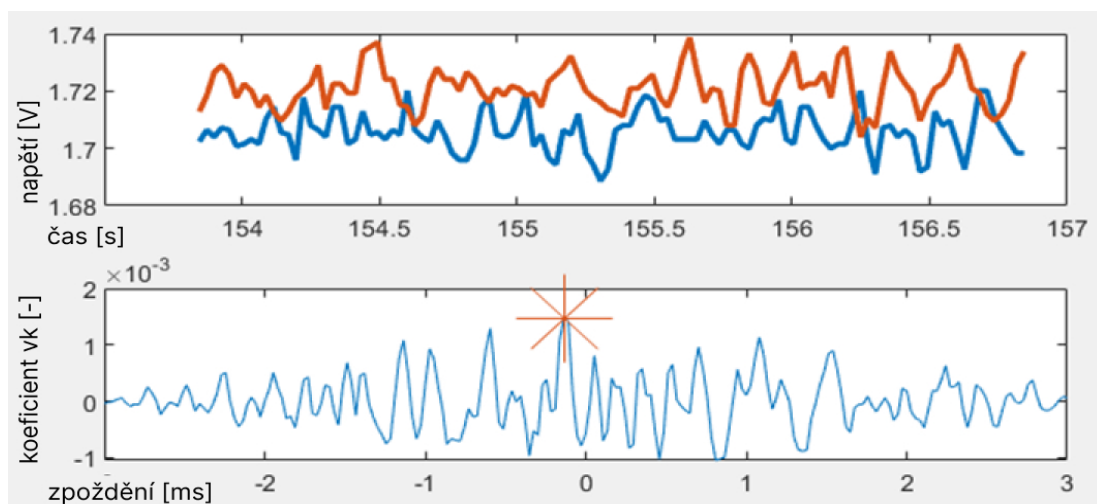
V této části diplomové práce budou popsány výsledky aplikace vzájemné korelace pro určení směru pohybu osob. Základem analýzy je implementace algoritmu vzájemné korelace v prostředí MATLAB, jehož vstupní data jsou získána ze stejných experimentálních měření jako v předešlých kapitolách.

Vzájemná korelace je počítána z datových řad podle vztahu na straně 28. Tyto řady mají pevně danou délku podle počtu vzorků za sekundu. V tomto případě se jedná o počet vzorků během tří sekund (typická doba jednoho průchodu). Protože se jedná o relativně krátké datové řady, je v tomto případě možná implementace přímo v mikrokontroléru s omezeným výpočetním výkonem, s využitím výpočtu z definičního vztahu vzájemné korelace popsané v kapitole 4.1.

Pro identifikaci korelačního maxima a daného časového zpoždění mezi signály je využita metoda vyhledávání globálního maxima funkce. Poté je určeno zpoždění, které je převedeno na milisekundy. Na dalších obrázcích je možné vidět grafické zobrazení průchodů ze všech tří senzorů. Pro demonstraci detekce směru pohybu jsou pro PIR senzory zobrazeny oba směry pohybu a také klidový stav, u kterého ani jeden senzor nedetekuje pohyb. Jak je vidět na obrázcích 47 a 48, pokud nedochází k detekci pohybu, korelační koeficient je oproti korelačnímu koeficientu při detekci pohybu o několik řádů nižší. Totéž platí i pro ostatní senzory.

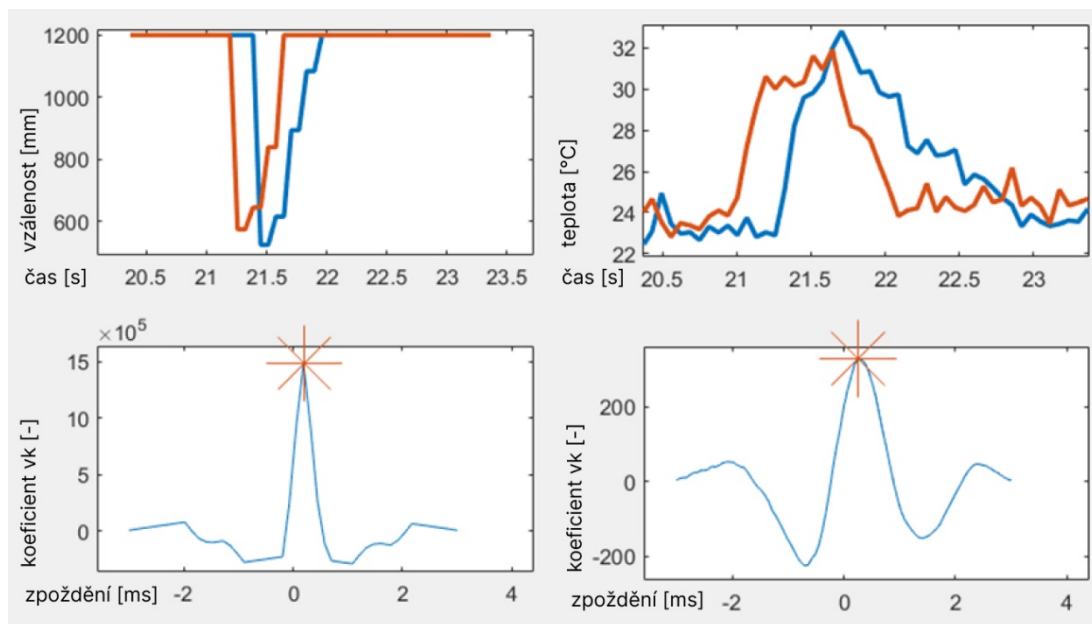


Obr. 47: Výstupy PIR senzorů pro oba směry pohybu (nahore) a vzájemné korelace (dole). Hvězdami jsou označeny korelační maxima, jejichž hodnoty korelačního koeficientu jsou zleva rovny 37 a 32. Zpoždění jsou zleva rovny 162 ms pro jeden směr a -135 ms pro druhý směr.



Obr. 48: Dva signály z PIR senzorů, které nedetekují žádný pohyb, a grafické zobrazení vzájemné korelace. Hvězdou je označeno korelační maximum, jehož hodnota korelačního koeficientu (osa y spodního grafu) je rovna 0,00148. Zpoždění (osa x spodního grafu) je rovno -135 ms.

Například pro termální kameru se hodnoty korelačního koeficientu pohybují při detekci pohybu v řádu stovek a v řádu jednotek při detekci žádného pohybu. Pro ToF senzor je to při detekci pohybu přibližně 10^6 , a pokud nedochází k žádné detekci, tak se korelační koeficient rovná nule (v klidovém stavu jsou výstupní hodnoty ToF senzoru téměř stále konstantní).



Obr. 49: Vlevo: Výstupy ToF senzoru při detekci pohybu. Vpravo: Výstupy termální kamery. Ve spodní části se nachází grafické zobrazení vzájemné korelace pro jednotlivé senzory. Hvězdami jsou označeny korelační maxima.

Díky řádovým rozdílům je možné nastavit rozhodovací hodnotu korelačního koeficientu, která určuje, zda se jedná o pohyb. Dále se přečte hodnota zpoždění, díky které je možné určit také směr, protože nabývá buď kladné, nebo záporné hodnoty podle směru pohybu procházející osoby.

Touto metodou je možné detekovat směr pohybu u každého průchodu, který byl zaznamenán během experimentálního měření. Chybové určení směru pohybu může nastat, pokud dojde k chybovému čtení jedné části senzoru nebo celého senzoru.

7. ZÁVĚR

Obsahem této práce bylo navržení a realizace embedded modulu senzoru přítomnosti s využitím detekce směru pohybu osob v budově pomocí přímého zpracování signálu z PIR snímače. Toto řešení má pomoci se spotřebou energií, může být například napojeno na logiku osvětlení, větrání nebo vytápění. Navržený senzor umí komunikovat pomocí standardu ZigBee, díky čemuž je možné ovládat zmíněné technologie. To bylo vyzkoušeno na ovládání světelného zdroje v závislosti na počtu osob v místnosti, pomocí nadřazeného systému Home Assistant.

Navržený senzor přítomnosti s detekcí směru pohybu byl otestován s vyhodnocením pomocí primitivní detekce sekvence hran a přes měření zpoždění s využitím vzájemné korelace. Implementace se vzájemnou korelací poskytuje v daném případě pouze minimální zvýšení spolehlivosti, a tak byl finální senzor implementován pouze s primitivní metodou.

Navržený senzor byl dále podroben experimentálním měřením, při nichž byl porovnáván se senzory fungujícími na odlišných principech. Cílem bylo zjistit, zda dokáže detekovat směr pohybu a jak na tuto detekci má vliv oděv osoby procházející před senzorem, stejně jako rychlost její chůze. Celkově bylo zaznamenáno 176 průchodů. Zmíněnými technologiemi byl ToF senzor a termální kamera s thermopile maticí. ToF senzor má o něco horší výsledky, pokud se jedná o rychlou chůzi, ale celkově má přesnost určení směru pohybu v laboratorních podmínkách přibližně 94,29 %. Termální kamera nebyla schopna detekovat pohyb, pokud byla osoba téměř celá zahalena (dlouhý rukáv a pokrývka hlavy). Pokud by tyto průchody byly vynechány z výpočtů, byla by přesnost této kamery přibližně 98,33 %. Přesnost určení směru pohybu navrženého senzoru je 92,86 % ze všech naměřených průchodů. Spolehlivost detekce směru pohybu u všech senzorů závisí na podmínkách měření. Implementací vzájemné korelace v testovaných senzorech se jejich přesnosti zvýšily.

Testování senzorů bylo zaměřeno výhradně na přímé průchody osob, při kterých nedocházelo k žádnému zastavení nebo změně rychlosti. V reálné aplikaci může například nastat pohyb, kdy se osoba zastaví uprostřed zorného pole senzoru a vrátí se zpět. Tuto situaci způsob vyhodnocení navrženého senzoru neumí rozpoznat, ale díky fungování stavového automatu u ToF senzoru a termální kamery jsou tyto

senzory schopny v některých případech určit, že se osoba vrátila, a neměnit tedy počet osob v místnosti.

Navržený senzor by měl sloužit jako levná náhrada stávajících řešení, která jsou zmíněná v kapitole 3, jejichž ceny jsou až třicetkrát vyšší.

S uvážením výhod a nevýhod testovaných senzorů se jeví jako nejlepší možnost využití silných stránek navrženého a ToF senzoru, které se vzájemně doplňují, a vytvořit tak senzor, který by teoreticky mohl obstát v reálné aplikaci.

8. Citovaná literatura

- [1] Zelená dohoda pro Evropu. *Consilium* [online]. 2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/>
- [2] Buildings. In: *IEA – International Energy Agency* [online]. 2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- [3] European Green Deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings. In: *European Commission* [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683
- [4] GONZÁLEZ-TORRES, M., L. PÉREZ-LOMBARD, Juan F. CORONEL, Ismael R. MAESTRE a Da YAN. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**(8), 626-637 [cit. 2023-12-11]. ISSN 23524847. Dostupné z: [doi:10.1016/j.egy.2021.11.280](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.280)
- [5] Výsledky měření koncentrace CO₂ v ložnici. In: *TZB-info* [online]. 2018 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-bytovych-domu/17867-vysledky-mereni-koncentrace-co2-v-loznici>
- [6] AGARWAL, Yuvraj, Bharathan BALAJI, Rajesh GUPTA, Jacob LYLES, Michael WEI a Thomas WENG. Occupancy-driven energy management for smart building automation. *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2010, 2010-11-02, **2010**, 1-6 [cit. 2023-12-11]. ISBN 9781450304580. Dostupné z: [doi:10.1145/1878431.1878433](https://doi.org/10.1145/1878431.1878433)
- [7] *Occupancy Sensor System*. Stockholm (Sweden), 2007. Diplomová práce. KTH Information and Communication Technology.
- [8] GRUBISIC, Maja, Abraham HAIM, Pramod BHUSAL, et al. Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates. *Sustainability* [online]. 2019, **11**(22), 1-51 [cit. 2023-12-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: [doi:10.3390/su11226400](https://doi.org/10.3390/su11226400)
- [9] MANNAN, Mehzabeen a Sami G. AL-GHAMDI. Indoor Air Quality in Buildings: A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, **18**(6), 1-25 [cit. 2023-12-11]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: [doi:10.3390/ijerph18063276](https://doi.org/10.3390/ijerph18063276)
- [10] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors* [online]. 4th edition. New York, NY: Springer New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6465-6. Dostupné z: [doi:10.1007/978-1-4419-6466-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6466-3)
- [11] FERNBACH, Andreas, Wolfgang GRANZER a Wolfgang KASTNER. Interoperability at the management level of building automation systems: A case study for BACnet and OPC UA. In: *ETFA2011* [online]. Toulouse (France): IEEE, 2011, s. 1-8 [cit. 2023-12-11]. ISBN 978-1-4577-0017-0. Dostupné z: [doi:10.1109/ETFA.2011.6059106](https://doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059106)
- [12] Design Optimization and Implementation of Smart Building Management System in Nigeria. In: *Journal of Instrumentation and Innovation Sciences*

- [online]. 4. Nigeria: MAT JOURNALS, 2019, s. 1-16 [cit. 2023-12-11]. ISSN 2456-9860. Dostupné z: doi:10.5281/zenodo.3465243
- [13] FUHLÄNDER-VÖLKER, Daniel, Martin LINDNER a Matthias WEIGOLD. Design Method for Building Automation Control Programs to Enable the Energetic Optimization of Industrial Supply Systems. *Procedia CIRP* [online]. 2021, **104**, 229-234 [cit. 2023-12-11]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2021.11.039
- [14] DOMINGUES, Pedro, Paulo CARREIRA, Renato VIEIRA a Wolfgang KASTNER. Building automation systems: Concepts and technology review. *Computer Standards & Interfaces* [online]. 2016, **45**, 1-12 [cit. 2023-12-11]. ISSN 09205489. Dostupné z: doi:10.1016/j.csi.2015.11.005
- [15] LOHIA, Karan, Yash JAIN, Chintan PATEL a Nishant DOSHI. Open Communication Protocols for Building Automation Systems. *Procedia Computer Science* [online]. 2019, **160**, 723-727 [cit. 2023-12-11]. ISSN 18770509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2019.11.020
- [16] *Zigbee Specification* [online]. 22. zigbee alliance, 2017 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2022/01/docs-05-3474-22-0csg-zigbee-specification-1.pdf>
- [17] DH-IPC-HDW8341X-3D: 3MP Dual-Lens People Counting AI Network Camera. In: *OnlineCameraShop* [online]. c2022 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://www.onlinecamerashop.nl/eng/mwdownloads/download/link/id/1030>
- [18] Occupancy Sensors vs Motion Sensors. In: *Beringar* [online]. 2022 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://beringar.co.uk/occupancy-sensors-vs-motion-sensors/>
- [19] Ultrasonic Presence Detection. In: *TDK InvenSense* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/ultrasonic-presence-detection/>
- [20] Dual Tech Occupancy Sensor 24V DC, center mount 360°. In: *Legrand* [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.legrand.us/lighting-controls-and-systems/occupancy-and-vacancy-sensors/ceiling-wall-mount-occupancy-sensors/dual-tech-occupancy-sensor-24v-dc-center-mount-360-degree/p/dt-300>
- [21] DC500 – Dingtek PIR type LoRaWan People counter. In: *Elecom Electronics Supply* [online]. c2012 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.elecomes.com/products/dc500-dingtek-pir-type-people-counter?variant=40195702489248>
- [22] AI ToF People Counting Sensors. In: *Milesight* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.milesight.com/iot/product/lorawan-sensor/vs133>
- [23] AI ToF People Counting Sensor VS133: Featuring LoRaWAN®. In: *Milesight* [online]. c2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://resource.milesight.com/milesight/iot/document/vs133-datasheet-en.pdf>

- [24] AI ToF People Counting Sensor VS133 User Guide. In: *Milesight* [online]. c2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://resource.milesight.com/milesight/iot/document/vs133-user-guide-en.pdf>
- [25] Terabee People Counting L-XL - Improve facility efficiency with accurate people counting data. In: *Terabee* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/shop/people-counting/terabee-people-counting-l/>
- [26] Terabee People Flow Counting L-XL. In: *Terabee* [online]. c2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://terabee.b-cdn.net/wp-content/uploads/2022/06/Terabee-People-Counting-L-XL-Specification-sheet.pdf>
- [27] A brief introduction to Time-of-Flight sensing. Part 1 The basics. In: *Terabee* [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-1-the-basics/>
- [28] Time-of-Flight principle. In: *Terabee* [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>
- [29] A brief introduction to Time-of-Flight sensing. Part 2 Indirect ToF Sensors. In: *Terabee* [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-2-indirect-tof-sensors/>
- [30] Terabee 3Dcam 80x60 Specification sheet. In: *Terabee* [online]. c2019 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: https://www.terabee.com/wp-content/uploads/2019/03/Terabee_3Dcam80x60_specsheet-2.pdf
- [31] TeraRanger Evo People Counter Specification Sheet. In: *Terabee* [online]. c2021 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/wp-content/uploads/2021/01/Evo-People-Counter-1.pdf>
- [32] Chirp Microsystems Ultrasonic Presence Detection App Note. In: *TDK Chirp Microsystems* [online]. 2020 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2020/09/AN-000214-Ultrasonic-Presence-Detection-App-Note-v1.0.pdf>
- [33] HTPA120x84d. In: *Heimann sensor* [online]. c2023 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://cdn.website-editor.net/>
- [34] Thermopile Arrays Enable New Generation of Automation Systems. In: *Mouser electronics* [online]. c2023 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: https://www.mouser.com/pdfdocs/panasonic_grid-eye_wp_v8.pdf
- [35] DUAL IP PEOPLE COUNTING CAMERA. *OnlineCameraShop* [online]. c2022 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://www.onlinecamerashop.nl/eng/dual-ip-people-counting-camera.html>
- [36] KUMAR SINGH, AMAN, DHEERAJ SINGH a MOHIT GOYAL. People Counting System Using Python. In: *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* [online]. Gr. Noida (India): IEEE, 2021, 2021-4-8, s. 1750-1754 [cit. 2023-12-16]. ISBN 978-1-6654-0360-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICCMC51019.2021.9418290

- [37] GENG, Jiaqi, Dong HUANG a Fernando DE LA TORRE. *DensePose From WiFi* [online]. In: . Pittsburgh (PA, USA): Carnegie Mellon University, 2022 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: doi:10.48550/arXiv.2301.00250
- [38] Cross Correlation. In: *ScienceDirect* [online]. 2016 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/cross-correlation>
- [39] FFT Based Cross Correlation Computations. In: *Learn Particle Image Velocimetry* [online]. 2022 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <http://www.learnpiv.org/fft/>
- [40] Practical Guide to Cross-Correlation. In: *Scicoding* [online]. 2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://scicoding.com/practical-guide-to-cross-correlation/>
- [41] TSOU, Peng-Rong, Cheng-En WU, Yen-Ru CHEN, Yun-Ting HO, Jun-Kai CHANG a Hsiao-Ping TSAI. Counting People by Using Convolutional Neural Network and A PIR Array. In: *2020 21st IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)* [online]. Versailles [France]: IEEE, 2020, s. 342-347 [cit. 2024-01-07]. ISBN 978-1-7281-4663-8. Dostupné z: doi:10.1109/MDM48529.2020.00075
- [42] BENEŠ, Martin. *Counting People Using a PIR Sensor*. Brno, 2019. Bachelor's Thesis. Brno University of Technology.
- [43] IRA-S230ST01. In: *Murata Manufacturing Co., Ltd.* [online]. 2022 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.murata.com/en-us/products/productdetail?partno=IRA-S230ST01>
- [44] TLV854x 500-nA, RRIO, Nanopower Operational Amplifiers for Cost-Optimized Systems. In: *Texas Instruments* [online]. 2018 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/snosd29e/snosd29e.pdf?ts=1668161767862>
- [45] *Home Assistant* [online]. c2023 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.home-assistant.io>
- [46] E18-MS1-PCB. In: *Ebyte* [online]. c2018 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.ebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=122>
- [47] Zigbee CC2531 USB Dongle. In: *Voltio* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.voltio.cz/cs/ostatni/501-zigbee-cc2531-usb-dongle.html>
- [48] Zigbee2MQTT. *Zigbee2MQTT* [online]. 2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.zigbee2mqtt.io/guide/getting-started/#installation>
- [49] Zigbee Configurable Firmware v2.5. In: *Zigbee Hobbyist. Rock Pi 4 SBC*. [online]. 2021 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://ptvo.info/zigbee-switch-configurable-firmware-v2-210/>
- [50] Adafruit MLX90640 IR Thermal Camera Breakout – 55 Degree. In: *Adafruit* [online]. 2022 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/4407>
- [51] Counting people with the VL53L1X long-distance ranging Time-of-Flight sensor. In: *STMicroelectronics* [online]. 2020 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z:

https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2600-counting-people-with-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf

- [52] SparkFun_VL53L1X_Arduino_Library. In: *Github* [online]. 2022 [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: https://github.com/sparkfun/SparkFun_VL53L1X_Arduino_Library/blob/master/src/SparkFun_VL53L1X.h
- [53] Raspberry Pi 4 Model B – 4GB RAM. In: *RPishop.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-4/1598-raspberry-pi-4-model-b-4gb-ram-765756931182.html>
- [54] Teensy® 4.1 Development Board. In: *PJRC: Electronic Projects* [online]. 2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>
- [55] LaskaKit CH340 programmer USB-C, microUSB, UART. In: *LaskaKit* [online]. c2023 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/laskakit-ch340-programmer-usb-c--microusb--uart/>

9. Seznam obrázků

Obr. 1: ZigBee architektura [16]	14
Obr. 2: a) Senzor snímá určitou oblast. b) Senzor snímá hranici oblasti. [7]	16
Obr. 3: DC500 PIR type LoRaWan people counter [21]	16
Obr. 4: AI ToF People Counting Sensor VS133 [23]	17
Obr. 5: Grafické zobrazení výstupu senzoru VS133 (ToF People Counting Sensor, Milesight), kde je možné vidět nastavení nepravidelné snímané zóny [24]	18
Obr. 6: Terabee People Flow Counting L-XL [26]	18
Obr. 7: a) Pyroelektrický senzor má dvě elektrody na opačných stranách krystalu; b) Tepelné záření působí podél osy z shora a je pohlcováno tepelně absorpční vrstvou. Teplo se vodivě šíří pyroelektrickým materiálem a je částečně vyzařováno směrem dolů ze strany a. Pyroelektrický senzor v neutrálním stavu; c) teplo rozšiřuje horní vrstvu, což vede k piezoelektrickému náboji; [10]	20
Obr. 8: Duální pyroelektrický senzor umístěný v kovovém obalu [10]	21
Obr. 9: Duální pyroelektrický senzor. Snímací prvek s přední (horní) elektrodou a dvěma spodními elektrodami nanesenými na společném krystalickém substrátu. [10]	22
Obr. 10: Koncept Fresnelovy čočky [10]	22
Obr. 11: Termočlánek pro detekci tepelného záření, ekvivalentní schéma s připojeným referenčním teplotním čidlem, x a y jsou různé materiály [10]	23
Obr. 12: Thermopile v TO5 obalu [10]	24
Obr. 13: Graf spektra slunečního záření [27]	25
Obr. 14: Grafické znázornění fázového posunu záření, které senzor ToF emituje, a dopadajícího záření [29]	26
Obr. 15: Grafické zobrazení přímých (vlevo) a nepřímých ToF senzorů (vpravo) [29]	26
Obr. 16: Vlevo: senzor se třemi objekty v různých vzdálenostech; Vpravo: Graf amplitud zobrazující detekci tří objektů a jejich příslušné vzdálenosti na základě doby šíření signálu. [32]	28
Obr. 17: Vyobrazení výstupů z pole thermopilů (8 x 8) [34]	29
Obr. 18: Snímek z kamery. Počítání lidí pomocí metody průchodu hranice oblasti. [36]	30
Obr. 19: První řádek znázorňuje nastavení hardwaru. Druhý a třetí řádek představují záznamy amplitudy a fáze vstupního WiFi signálu. Čtvrtý řádek obsahuje algoritmem odhadnuté pózy a polohy osob. [37]	31
Obr. 20: Metoda detekce pomocí rozhodovací úrovně	33
Obr. 21: Snímač IRA-S230ST01 [43]	36
Obr. 22: Schéma části plošného spoje se dvěma zesilovači a dvěma komparátory	37
Obr. 23: Rozložení elementů vůči směru pohybu	38
Obr. 24: 3D model navrženého plošného spoje	38
Obr. 25: E18-MS1-PCB [46] a CC2531 USB dongle [47]	39

Obr. 26: Grafické rozhraní Zigbee2MQTT	40
Obr. 27: Část kódu, který byl přidán do vygenerovaného konfiguračního souboru	41
Obr. 28: Grafické zobrazení dvou možných stavů obsazenosti místnosti a závislého světelného zdroje. Toto zobrazení je možné vidět v hlavní sekci HA.	41
Obr. 29: PTVO Firmware Configuration [39]	42
Obr. 30: Schéma celé komunikace senzoru s nadřazeným systémem	43
Obr. 31: Příklad konfigurace pole SPAD [51]	45
Obr. 32: Určení senzorů A/B a směrů pohybu	46
Obr. 33: Stavový automat pro detekci směru pohybu	47
Obr. 34: Časový průběh maximálních teplot obou částí senzoru při průchodu osoby (v obou směrech). Zobrazení možného výskytu chyby, kdy senzor zaznamená mnohonásobně vyšší teplotu. Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	49
Obr. 35: Průběh naměřených vzdáleností z ToF senzoru. Zvláště zobrazen průběh z ROI 1 a ROI 2. Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr. Červená přímka značí rozhodující hodnotu.	50
Obr. 36: Dvě různá stínění PIR snímačů pro experimentální měření	51
Obr. 37: Průběh signálu dvou PIR snímačů. Snímač, který má omezen zorné pole ze dvou stran (oranžová), a snímač, který má omezen zorné pole ze čtyř stran (modrá). Žlutá (pro oranžový průběh) a šedivá (pro modrý průběh) křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	52
Obr. 38: Průběh signálu z navrženého senzoru při průchodu dvou osob těsně za sebou	53
Obr. 39: Čtyři průchody naměřené ToF senzorem (osoba s krátkým rukávem). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	54
Obr. 40: Čtyři průchody naměřené senzorem MLX90640 (osoba s krátkým rukávem). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	55
Obr. 41: Čtyři průchody naměřené navrženým senzorem (osoba s krátkým rukávem). Žlutá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	55
Obr. 42: Vizualizace průchodu osoby pomocí teplot [°C] jednotlivých pixelů ze senzoru MLX90640 (osoba s krátkým rukávem). Červenou přímkou je naznačené rozdělení snímací plochy.	56
Obr. 43: Vizualizace teplot jednotlivých pixelů z MLX90640 (zleva: osoba s dlouhým rukávem, osoba s dlouhým rukávem a pokrývkou hlavy)	57
Obr. 44: Vizualizace teplot jednotlivých pixelů z MLX90640 (zleva: osoba s krátkým rukávem, osoba s krátkým rukávem a pokrývkou hlavy)	57
Obr. 45: Časový průběh signálu čtyř průchodů osoby s dlouhým rukávem a pokrývkou hlavy z navrženého PIR senzoru. Žlutá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	58
Obr. 46: Dva zaznamenané a dva nezaznamenané průchody (vyznačeno elipsami) ToF senzorem (běh). Šedivá křivka značí zaznamenání pohybu a jeho směr.	59
Obr. 47: Výstupy PIR senzorů pro oba směry pohybu (nahore) a vzájemné korelace (dole).	60

Obr. 48: Dva signály z PIR senzorů, které nedetekují žádný pohyb, a grafické zobrazení vzájemné korelace. Hvězdou je označeno korelační maximum, jehož hodnota korelačního koeficientu (osa y spodního grafu) je roven 0,00148. Zpoždění (osa x spodního grafu) je rovno -135 ms. 60

Obr. 49: Vlevo: Výstupy ToF senzoru při detekci pohybu. Vpravo: Výstupy termální kamery. 61

10. Seznam příloh

Příloha č. 1: Schéma plošného spoje

Příloha č. 2: Vývojové soubory

Příloha č. 3: Naměřená data