VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

FÚZE SENZORŮ PRO DETEKCI A LOKALIZACI OSOB V MÍSTNOSTI

SENSOR FUSION FOR DETECTING AND LOCATING PEOPLE IN A ROOM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Jakub Vondráček

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jan Najman, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Bc. Jakub Vondráček**
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Najman, Ph.D.**
Akademický rok:	2022/23

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

Fúze senzorů pro detekci a lokalizaci osob v místnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Detekce a lokalizace osob v místnosti je problém, který je možné řešit s pomocí mnoha různých druhů senzorů, ty však mají svá omezení (přesnost, rychlost, cena).
Sloučením informací získaných z více různých senzorů by tak mělo být možné dosáhnout spolehlivější detekce a lokalizace přítomnosti člověka, než při použití informací získaných z jednoho nebo více senzorů samostatně.
Výsledkem by mělo být samostatné zařízení s řídicí jednotkou, na které bude implementován algoritmus pro fúzi dat z připojených senzorů.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši v oblasti dostupných technologií a konkrétních hardwarových a softwarových řešení pro detekci a lokalizaci osob v místnosti.
2. Na základě rešerše vyberte vhodnou řídicí jednotku a několik variant senzorů. Otestujte možnosti detekce a lokalizace osob u jednotlivých senzorů.
3. Navrhněte a naprogramujte algoritmus pro fúzi dat z vybraných senzorů tak, aby se vzájemně vhodně doplňovaly.
4. Otestujte a vyhodnoťte funkčnost zařízení v praxi za různých podmínek prostředí (větší počet osob, zhoršené světelné podmínky, apod.).

Seznam doporučené literatury:

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

CHEN, Michael Z. Q. Sensor fusion: A review of methods and applications. In: 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) [online]. IEEE, 2017, s. 3853-3860 [cit. 2022-10-19]. Dostupné z: doi:10.1109/CCDC.2017.7979175

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou fúze několika senzorů za účelem detekce a lokalizace osob v místnosti. Zaměřena je primárně na využití spojení levných senzorů a jejich implementaci takovým způsobem, aby jejich fúze vytvořila systém, který má zřejmé výhody v porovnání s dražšími jedno senzorovými řešeními.

V první části práce je provedena rešerše, která představuje základní problematiku detekce, lokalizace a počítání osob v místnosti. Za účelem využití v praktické části práce, je zde také uvedeno, jakými konkrétními senzory je možné těchto funkcionalit dosáhnout a jaké řídící jednotky jsou vhodné pro takový systém. Nakonec jsou v této sekci shrnuty konkrétní komponenty a softwarové nástroje, které jsou dále použity v rámci praktické části práce. Zahrnuto je také odůvodnění tohoto výběru.

V druhé části práce je popsán konkrétní návrh výsledného systému, který je schopen plnit funkce detekce, lokalizace a počítání osob v místnosti. Tento praktický návrh je popsán včetně veškerých východisek, zapojení a zejména algoritmu, který byl pro fúzi senzorů použit. Celý systém je následně otestován, na základě čehož je jeho fungování vyhodnoceno. V poslední sekci práce je vytvořený systém doplněn o model krytu a uchycení na zeď.

Klíčová slova

Fúze senzorů, detekce lidí, lokalizace lidí, PIR senzory, ultrazvukové senzory, infračervené senzory, radarové senzory

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the problem of fusion of several sensors for the purpose of detecting and locating people in a room. It is primarily about using measured sensors and implementing them in such a way that their connection creates a system that has obvious advantages compared to more expensive single sensor solutions.

In the first part of the work, research is carried out, which presents the basic issues of detection, localization and counting of people in rooms. To be used in the practical part of the work, it is also indicated here which specific sensors can be used to achieve these functions and which control units are suitable for such a system. Finally, it summarizes specific components and software tools, which are further supplemented in the practical part of the work. The rationale for this selection is also included.

The second part of the thesis describes the specific design of the resulting system, which can perform the functions of detection, localization and counting of people in the room. This practical proposal is described including all starting points, connections and especially the algorithm that was used for sensor fusion. The entire system is subsequently tested, based on which its functioning is evaluated. In the last section of the thesis, the created system is supplemented with a model of a cover and wall mount.

Key words

Sensor fusion, people detection, people localization, PIR sensors, ultrasonic sensors, infrared sensors, radar sensors

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VONDRÁČEK, Jakub. *Fúze senzorů pro detekci a lokalizaci osob v místnosti*. Brno, 2023. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149714. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Najman.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Fúze senzorů pro detekci a lokalizaci osob v místnosti* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	Jakub Vondráček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Najmanovi, Ph.D, za vedení, ochotu, cenné připomínky a rady, které mi poskytnul při vytváření této závěrečné práce. Také bych chtěl tímto poděkovat mé rodině a přátelům za podporu během mého studia.

OBSAH

ÚVOD 11
1 Rešeršní studie 12
1.1 Senzory pro detekci, počítání a lokalizaci osob v místnosti 12
1.1.1 PIR senzory 15
1.1.2 Ultrazvukové sensory 20
1.1.3 Termokamery 22
1.1.4 Radarové sensory 25
1.1.5 Lidar 27
1.1.6 Ostatní varianty sensorů 29
1.2 Řídící jednotky pro implementaci fúze senzorů 29
1.2.1 Arduino 30
1.2.2 Raspberry Pi 31
1.2.3 Ostatní varianty 32
1.3 Použité komponenty 33
1.3.1 Raspberry Pi 4 B 33
1.3.2 Ultrasonické senzory HY-SRF05 34
1.3.3 Termokamera Panasonic Grid-EYE 35
1.3.4 Mikrovlnný senzor HW-MS03 36
1.3.5 PIR senzor HC-SR501 37
1.3.6 Raspberry Pi kamera v1.3 38
1.4 Použité softwarové nástroje 39
2 Řešení a výsledky 41
2.1 Testování detekce, lokalizace a počítání lidí samostatných senzorů 41
2.1.1 Ultrasonické senzory 41
2.1.2 Mikrovlnný senzor 43
2.1.3 PIR senzor 44
2.1.4 Termokamera 44
2.1.5 RGB kamera 47
2.2 Základní koncept a východiska systému 49
2.3 Použité zapojení a uspořádání 49
2.4 Algoritmus 51
2.4.1 Detekce pohybu osob 52
2.4.2 Lokalizace osob 52
2.4.3 Počítání osob 53
2.4.4 Sdílení s uživatelem přes server 55
2.5 Testování 56
2.5.1 Za dobrých světelných podmínek 56
2.5.2 Za špatných světelných podmínek 58
2.6 Vyhodnocení 61
2.7 Vytvoření modelu uchycení systému 62
ZÁVĚR 65

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 67

ÚVOD

Detekce a lokalizace osob v místnostech je úloha, která se řeší v mnoha aplikacích a obzvlášť se zvýšeným monitorováním osob v době pandemií jako například Covidové, je využití čím dál širší. Bezpečnostní a dohledové systémy jsou využívány pro monitorování lidí v místnostech za účelem omezení šíření nemoci, detekce neoprávněného vniknutí nebo jako pomocný prvek automatizovaného systému, který umožní například rozsvícení světel dle obsazenosti místnosti.

Tradiční přístupy detekce a lokalizace lidí se spoléhají na jeden sensor, vybraný dle konkrétní aplikace. Příkladem může být PIR sensor pro detekci osob nebo RGB kamera pro jejich lokalizaci. Nevýhodou tohoto přístupu je, že každý jeden senzor má své nedostatky, které nelze vyřešit, jelikož jsou omezeny jeho technologickým principem. U PIR senzoru to může být jejich malá citlivost na pomalé pohyby a například u klasické RGB kamery nepoužitelnost za špatných světelných podmínek. Pro zlepšení těchto negativních vlastností se často využívají pouze vylepšené, ale obvykle také výrazně dražší varianty těch stejných senzorů. Druhou variantou s velkým potenciálem však může být využití více typů levnějších senzorů a následná fúze z nich získaných dat.

Fúze senzorů představuje integraci informací z různých zdrojů. Těmi mohou být termokamery, ultrasonické senzory, PIR senzory a podobně. Myšlenka aplikovaná v této práci je spojení dat získaných z různých senzorů takovým způsobem, že pokryjí alespoň částečně nedostatky jednotlivých komponentů, a zároveň umožní větší univerzálnost použití, než kdyby byly využity samostatně.

Pro reálnou aplikaci této myšlenky v praxi je v rámci této práce nejdříve proveden rozbor všech základních variant senzorů, které se pro detekci a lokalizaci osob v praxi využívají. Následně je v rámci rešeršní části také rozebráno, jaké řídící jednotky je reálně možné použít pro provedení samotné fúze vícero těchto senzorů. Na základě takto provedené rešerše byly vybrány veškeré komponenty, které byly dále použity. Všechny tyto komponenty a použité nástroje jsou hlouběji rozebrány v poslední sekci teoretické části této práce, tak aby bylo zřejmé, proč právě tyto byly vybrány pro praktické testování.

Na začátku praktické části práce jsou nejdříve všechny vybrané senzory otestovány samostatně a jejich fungování vyhodnoceno. To umožňuje dále srovnat, jak velký přínos měla jejich fúze v hlavní sekci praktické části této práce.

Následně je shrnut celý koncept vytvářeného systému a východiska, které má výsledný produkt splnit. Dále je popsána již konkrétní integrace, zapojení tohoto systému a použitý algoritmus, pomocí kterého byla veškerá data zpracována.

Celkové fungování systému je nakonec vyhodnoceno na základě testování, které kontroluje použití produktu pro stanovené cíle za různých testovacích podmínek. Těmi je například různý počet osob, různé světelné podmínky a konkrétně vybrané specifické scénáře, u kterých je očekáváno zhoršení rozpoznatelnosti pomocí tohoto systému. V poslední části je systém doplněn o návrh modelu krytu a uchycení.

1 Rešeršní studie

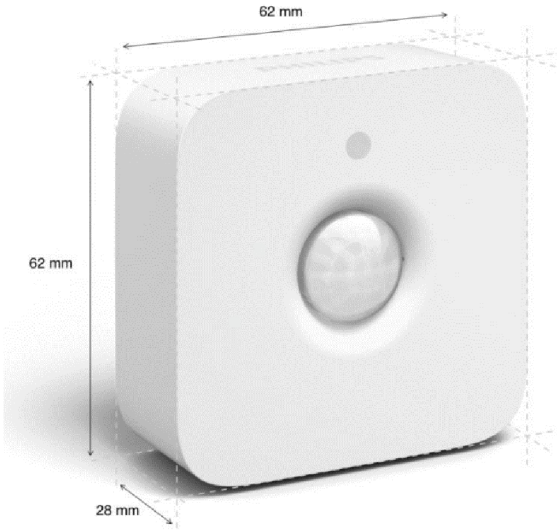
1.1 Senzory pro detekci, počítání a lokalizaci osob v místnosti

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tyto úlohy mají široké použití v aplikacích jako jsou bezpečnostní systémy, automatizace v rámci budov nebo čistě pro analytické zpracování dat o osobách v rámci budov, které může být následně například využito pro úpravu daných prostor dle aktuální obsazenosti. V této sekci práce jsou nejprve blíže rozebrány funkcionality detekce, lokalizace a počítání osob v místnosti separátně. Pro každou část je blíže popsáno jejich využití v praxi a uveden souhrn senzorů, které se používají pro tento konkrétní účel. V dalších podkapitolách jsou blíže rozebrány všechny základní možnosti senzorů, které je možné použít, jejich základní principy fungování i výhody a nevýhody jejich použití.

Detekce osob

Pod pojmem detekce osob rozumíme detekci přítomnosti lidí v rámci stanoveného prostoru. Tato úloha je typicky využita v rámci bezpečnostního systému nebo za účelem automatizace určitého prvku budov. Standartně jsou prvky pro detekci osob napojeny na nějaký větší systém, který při zaznamenané detekci aktivuje jiný prvek. U bezpečnostních systému to může být například alarm, u automatizačních systému je velmi typické například aktivování pohonů pro otevírání dveří.

Detekce osob je z uvedených třech úloh nejzákladnější, a proto pro ni je možné využít široké spektrum senzorů. Pokud navíc uvažujeme detekci osob pouze v rámci konkrétní místnosti, je tato úloha ještě výrazně jednodušší, jelikož nemusíme uvažovat takové množství pohybového šumu, jako je například ve venkovním prostředí (projíždějící auta, ohýbající se stromy apod.).Pro samotnou detekci se tedy nejběžněji využívají PIR (pasivní infračervené) senzory, jejichž hlavní výhodou je typicky cena, a také omezení detekce pohybů, které nezpůsobil člověk, jelikož z jejich principu reagují pouze na pohyb objektů se zvýšenou teplotou. Příkladem kompletního prodávaného produktu, který využívá ke snímání PIR sensor může být například Hue Motion Sensor (viz Obrázek 1), který bývá využit pro automatizaci v rámci domácností.



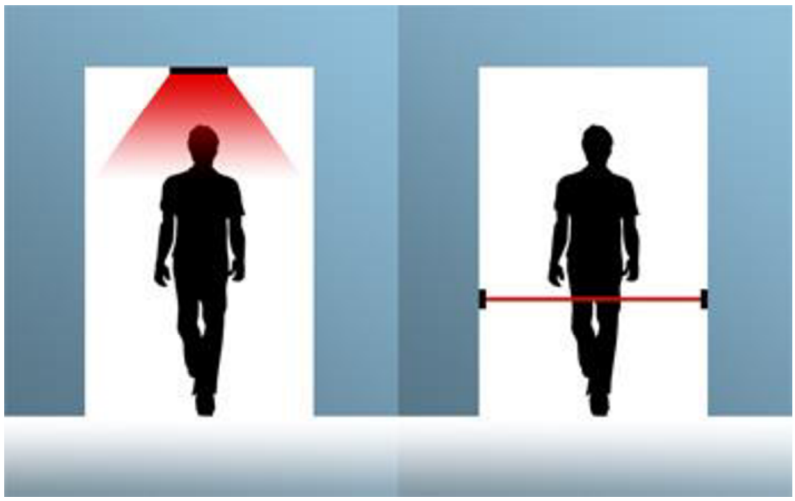
Obrázek 1 - HUE Motion sensor [1]

Alternativou mohou být sensory radarové, které jsou typicky citlivější a reagují na veškerý pohyb. Případně také senzory akustické, které ale typicky mají menší dosah a pouze omezené pole snímání.

Počítání osob

Počítání osob je proces při, kterém zjišťujeme kolik lidí je v daném prostoru. Tato data o obsazenosti sledované místnosti je dále možné využít zejména pro omezení přístupu více osob nebo naopak k úpravám prostoru dle aktuální vytěžitelnosti.

K počítání osob je možné použít dva základní principy. Prvním je přímého využití lokalizace osob v rámci daných prostor, z čehož by mělo být možné zjistit alespoň přibližný počet lidí. K takovému použití se standartně využívá nějaké podoby kamery, jako je například RGB nebo termokamera. Tato varianta je dále rozebrána v další sekci.
Dle konkrétního použití však může být v některých případech přesnější druhý způsob. Ten spočívá ve sledování vstupů do dané místnosti a vyhodnocování počtu lidí na základě průchodu menší sledovanou oblastí, kterou člověk musí při vstupu nevyhnutelně projít. Výhodou takovýchto systémů je také dodržení anonymity snímaných lidí.



Obrázek 2 - typy snímačů vstupu. Vlevo plošný, Vpravo paprskový [2]

Pro tento způsob jsou v praxi využívány dvě varianty zobrazené na Obrázku 2. První je varianta pomocí dvou ToF (Time of Flight) paprsků. Ty mohou být realizovány například pomocí akustických (ultrasonických) nebo optických (laserových) senzorů.
Druhou variantou je pomocí ToF technologie snímání celé vstupní plochy a vytvoření 3D mapy tohoto prostoru. To by mělo vylepšit zaznamenání příchodů a odchodů i u větších vstupů pro více osob najednou. Příkladem takového použití je 3D senzor na Obrázku 3.

Obrázek 3 - 3D hloubkový senzor Terabee pro počítání lidí [3]

Lokalizace osob

Lokalizací osob rozumíme stanovení alespoň přibližné polohy lidí v předem určeném prostoru. Ze tří popisovaných kategorií je tato úloha nejkomplexnější a téměř vždy, kdy jsme schopni lokalizovat osoby, jsme schopni je také detekovat a alespoň částečně počítat. Přesto je dobré pohlížet na tuto úlohu separátně, jelikož lokalizace neznamená nutně rychlou a přesnou detekci nebo počítání lidí.

Data o poloze osob je možné v praxi využít pro sledování obsazení konkrétních pracovišť v prostoru, což může vést k zefektivnění využití místnosti. Vypomáhat tato data mohou také například z bezpečnostního hlediska spolupráce robotů a lidí v rámci jednoho prostoru.

Ke spolehlivé lokalizaci osob v rámci místnosti je nutné znát velké množství dat, tak abychom mohli v prostoru rozlišit lidi od jiných předmětů. Z tohoto důvodu se nejčastěji využívá k lokalizaci nějaký typ kamery, které umožňují rozdělit prostor na velké množství snímaných bodů, které mají například barevnou, teplotní nebo vzdálenostní reprezentaci. Tato data pak ale pro správnou lokalizaci vždy musejí být nějakým způsobem zpracovaná, což celý systém dále komplikuje.

RGB kamery představují nejběžnější a nejlevnější způsob snímání prostoru za tímto účelem. Jejich výhodou je také velké množství možností, které lze vybrat dle konkrétního použití a dobře prozkoumané varianty zpracování jejich obrazu.

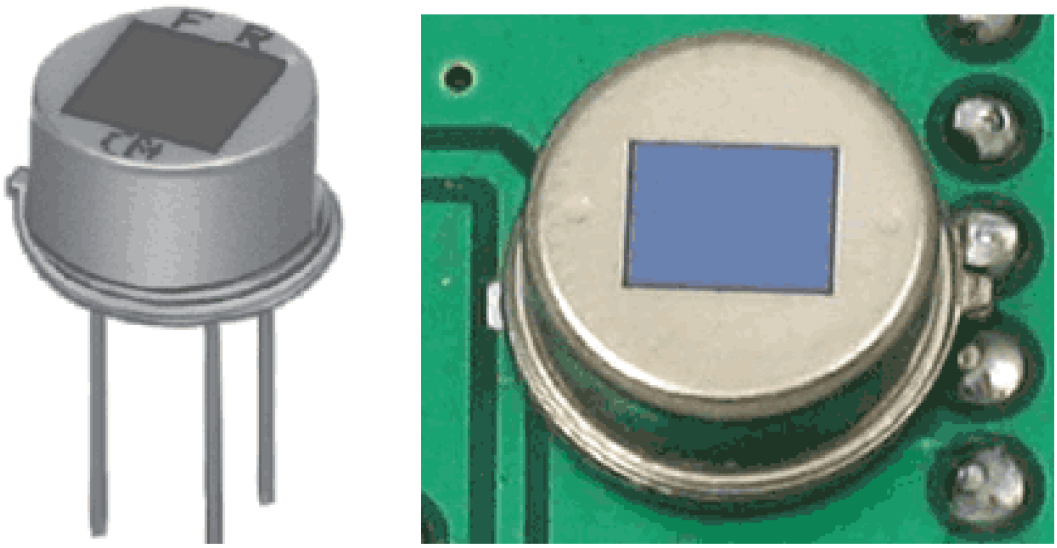
Oproti tomu termokamery jsou typicky výrazně dražší variantou, která však není ovlivněna světelnými podmínkami a v chladném prostoru jsou lépe schopny rozlišit rozdíl mezi člověkem a okolím. Kvůli vysoké ceně termokamer s vysokým rozlišením je tato varianta momentálně využívána spíše ve speciálních případech. Pro malé místnosti však vzniká potenciál u jejich nízko pixelových variant jako je například kamera MLX90641 na Obrázku 4.

Obrázek 4 - nízko pixelová kamera MLX90641 [4]

1.1.1 PIR senzory

Jakýkoliv objekt, který má nějakou teplotu, vyzařuje určité množství infračerveného záření. Čím teplejší je tento objekt, tím větší množství infračerveného záření emituje [5]. Tohoto jevu využívají PIR sensory, jelikož tyto sensory žádné záření nevyzařují, ale pouze zaznamenávají změny v naměřených hodnotách emitovaných ve svém okolí.

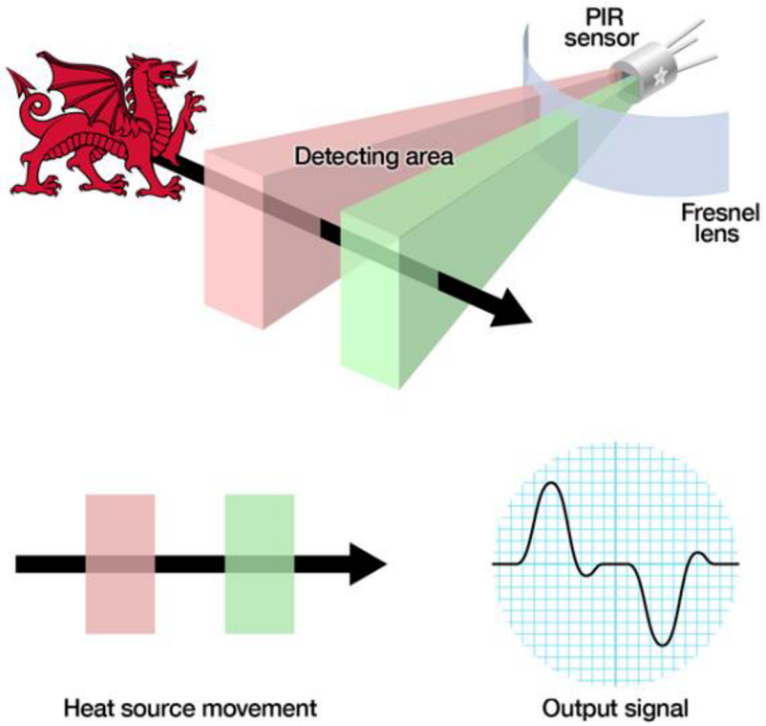
PIR sensor jako takový, je hermeticky uzavřená součástka, do které je vytvořené okno v materiálu, který propouští infračervené záření (viz Obrázek 5). Díky tomuto hermetickému uzavření je sensor velmi odolný vnějším vlivům.



Obrázek 5 - samotný hermeticky uzavřený sensor [6]

Za zmíněným oknem se nachází dvě jednotky, které jsou vyrobené ze speciálního materiálu citlivého na infračervené záření. V případě, že se v okolí nepohybuje žádný objekt o jiné teplotě, tyto dvě jednotky by měly zaznamenávat stejné množství infračerveného záření. Avšak v případě, že do měřeného prostoru vstoupí teplý objekt, zaznamená snímač diferenciální rozdíl mezi dvěma měřícími jednotkami, a tedy detekuje pohyb [7]. Snímače jsou typicky dále naprogramovány tak, aby byly nejcitlivější pro oblast infračerveného záření, které vyzařují lidi při standartní teplotě.

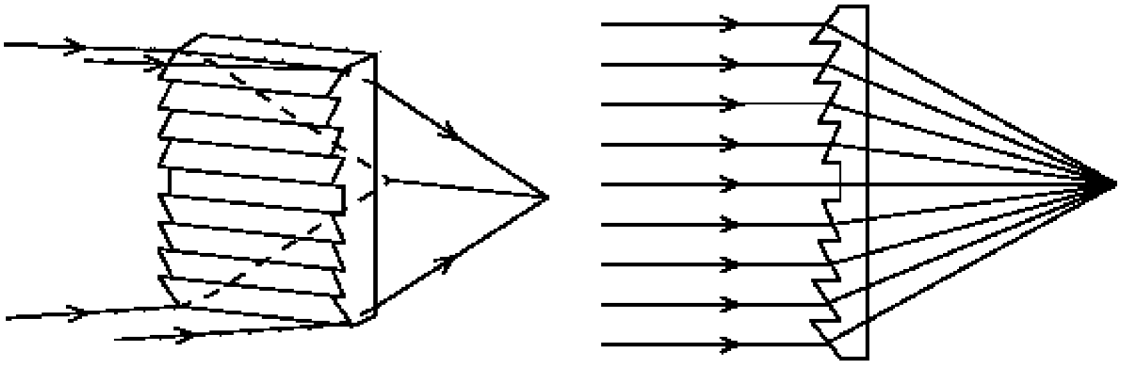
Změnu detekovanou sensorem můžeme vidět na Obrázku 6, kde jsou znázorněny detekční plochy sensoru, a zároveň jejich analogový výstup v případě průchodu teplého objektu. Při průchodu první plochou je zaznamenán kladný diferenciální rozdíl a při následném průchodu plochou druhou naopak rozdíl záporný.



Obrázek 6 - detekční plochy PIR sensoru a znázornění výstupního analogového signálu při průchodu objektu [7]

Konkrétní hotové sensory se v ohledu samotných snímačů mohou lišit zejména cenou a vzdáleností, na kterou jsou schopny zaznamenat změny v záření. Jak je již naznačeno v Obrázku 6, tyto snímače zaznamenávají změny pouze v malých prostorech přímo před nimi. Proto se v praxi téměř vždy pod pojmem PIR sensor skrývá celý hotový modul, který kromě sensoru obsahuje zejména PCB desku a optickou část, která výrazně zvyšuje využitelnost tohoto sensoru.

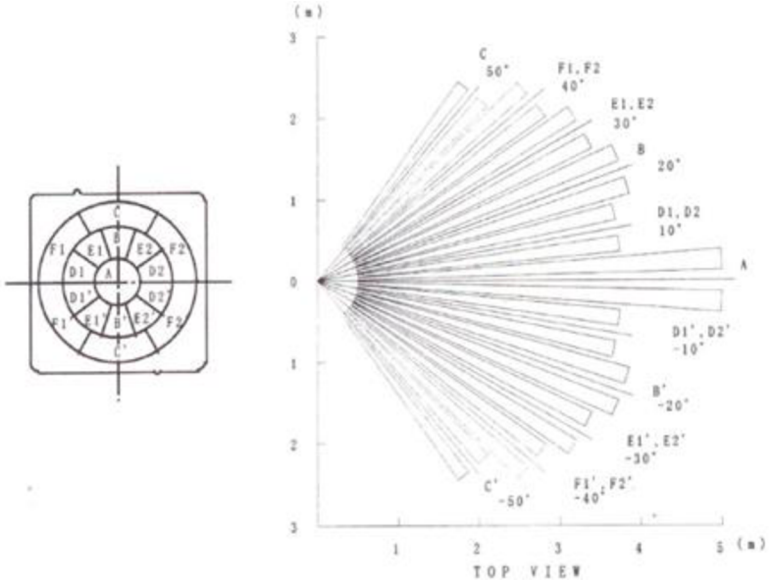
Optická část sensoru se již může výrazně více lišit mezi jednotlivými výrobci. Může se lišit tvarem, kvalitou zpracování, způsobem rozdělení zorného pole nebo třeba použitým materiálem. Využívá se primárně ke zvětšení oblasti, kterou je detektor schopný snímat (viz Obrázek 7). Optika v praxi rozdělí původní malé snímané obdélníky do mnoha segmentů ve větším zorném poli. To umožňuje zaznamenávat změny, respektive pohyb, nejen přímo před sensorem, ale právě v tomto rozšířeném poli [7].



Obrázek 7 - znázornění kondenzování světla pomocí čoček [8]

Optika je typicky vytvářena pomocí zrcadel nebo tzv. Fresnelových čoček. Hlavní výhodou zrcadlové optiky je, že nám dává možnost využití zrcadel s různými ohniskovými vzdálenostmi, a tedy lepší zaostření jednotlivých detekčních zón na jednotky snímače. Hlavní nevýhodou je naopak vyšší cena a limitované možnosti typů detekčních charakteristik [9].

Častěji se však využívá optika z Fresnelových čoček, jelikož je levnější, jednodušší na výrobu a lehčí. Optická soustava se skládá ve výsledku z mnoha segmentů, každý z nich na bázi Fresnelových čoček, tak aby mohlo dojít ke sběru dostatečného množství dat v každém z těchto segmentů (viz Obrázek 8).



Obrázek 8 - segmentace prostoru pomocí čoček [10]

Využití PIR sensoru pro detekci, lokalizaci a počítání osob

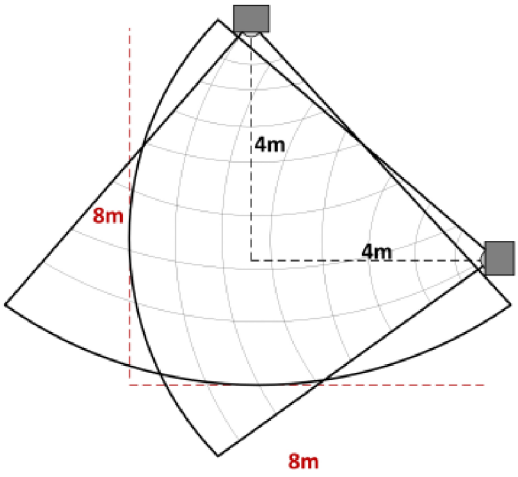
PIR sensory jsou velmi často využívané a osvědčené pro detekci osob, jelikož to je jejich primární účel. Díky rozdělení paprsků pomocí čoček, je možné zaznamenávat změny i poměrně malých pohybů na vzdálenost několika metrů. Díky své nízké ceně jsou tedy velmi vhodné pro toto využití i v rámci této diplomové práce.

Přestože PIR sensory se v praxi zatím pro lokalizaci osob v prostoru nevyužívají, některé studie se touto problematikou již zabývaly a teoreticky je možné je použít i pro tento účel. Pro některé tyto aplikace je nutné využít původního analogového signálu sensoru.

První nalezenou implementací je využití klasifikačních a rozpoznávacích algoritmů na bázi strojového učení. Na toto téma byla již vypracována bakalářská práce [11], kde se za pomocí manuálního označení dat spojeného se strojovým učením bylo možné dosáhnout přibližného určení přítomnosti, vzdálenosti (blíže vs. dále než 4,5m od sensoru) a polohy (vlevo vs. vpravo) člověka. Pro strojové učení zde bylo využito analogového výstupu sensoru. Výsledky však nejsou velmi přesvědčivé a nelze tímto způsobem sensor použít v praxi.

V rozsáhlejší studii [12] byly postavena soustava složená ze dvou setů po čtyřech PIR sensorech za účelem klasifikace a lokalizace lidí v prostoru (viz Obrázek 9). I v tomto případě bylo nutné pracovat s analogovými výstupy sensorů a kombinovat tato data. Každý jednotlivý PIR sensor lze naladit tak, aby byl nejcitlivější pro určitou konkrétní vzdálenost – největší peak-to-peak amplituda signálu při této vzdálenosti. Tímto způsobem bylo možné získat přibližnou pozici člověka ve 4 úrovních (pro každý sensor 1 konkrétní vzdálenost) – 1,2,3 a 4 metrů od sensorů. Jelikož takto je možné získat souřadnici pouze v jedné ose, pro lokalizaci

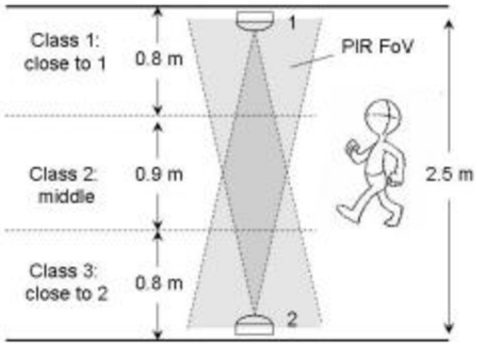
člověka v prostoru bylo nutné použít dvě soustavy sensorů a umístit pod vzájemným úhlem 90 stupňů.



Obrázek 9 - uspořádání PIR sensorů pro lokalizaci použité ve výzkumu [12]

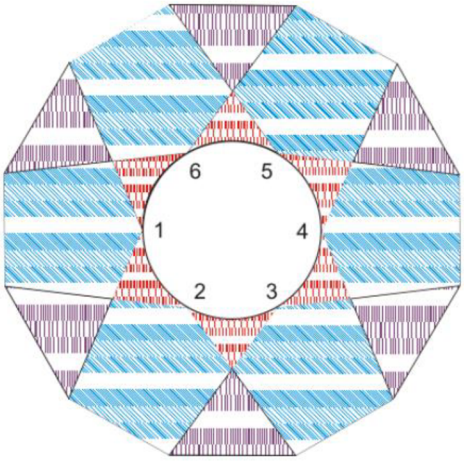
Při testování tohoto systému bylo zjištěno, že je možné tímto způsobem přibližně lokalizovat pohybujícího se člověka do vzdálenosti 5 metrů s chybou menší než 20 centimetrů v 80 % případů.

Tato práce částečně také navazuje na výzkum [13], který využívá 2 proti sobě směřující PIR sensory pro zjištění, ve které třetině 2,5 metru široké chodby se člověk nachází (viz Obrázek 10). Pomocí klasifikace bylo možné dosáhnout přesnosti přibližně 80-90 %.



Obrázek 10 - uspořádání sensorů ve výzkumu od Piero Zappi [13]

Dalším možným řešením pro lokalizaci člověka je využití většího množství sensorů, jejichž pásma se částečně prolínají. Tímto způsobem je však možné zjistit jen velmi přibližnou polohu dle toho v pásmu kterých sensorů se pohybující člověk nachází. Na Obrázku 11 lze vidět společná pásma dvou sensorů fialově, modře zorné pole jednoho senzoru a červeně slepá místa, kde žádný ze sensorů nesnímá.



Obrázek 11 - Zobrazení pásem viditelnosti senzorů [9]

Tato metoda nevyžaduje nutně tak rozsáhlé zpracování dat jako ty předchozí, přesto může být pro některé případy dobře využitelná.

Podobným systémem se dají použít i sensory v přibližně stejném bodě, s přesně danými natočeními vůči sobě a prolínajícími se snímanými úhlovými rozsahy, viz např. [14].

Nakonec pro samotné počítání osob pomocí PIR sensorů je již vytvořený patent, ten je však použitelný pouze pro příchod odchod osob přes předem danou oblast. Za pomocí dvou PIR sensorů za sebou je tak možné určit, zda osoba přišla nebo odešla a dle toho inkrementovat proměnnou počtu osob v místnosti [15].

Celkově je nutné říct, že využití PIR senzorů za účelem lokalizace a počítání osob je poměrně náročné a v rámci většího systému, který například je vytvářen v této diplomové práci, je vhodnější použít pro tuto funkčnost senzory jiné. Využití PIR senzorů je však velmi vhodné pro samotnou detekci osob.

Výhody

Hlavními přednostmi PIR sensorů je, že jsou malé, levné, velmi efektivní z pohledu spotřeby energie, relativně jednoduché na použití, dají se používat i ve tmě a zároveň se s časem neopotřebovávají [16]. Z těchto důvodů jsou velmi často používané pro detekování pohybu v běžných podmínkách, které nevyžadují dražší nebo složitější řešení.

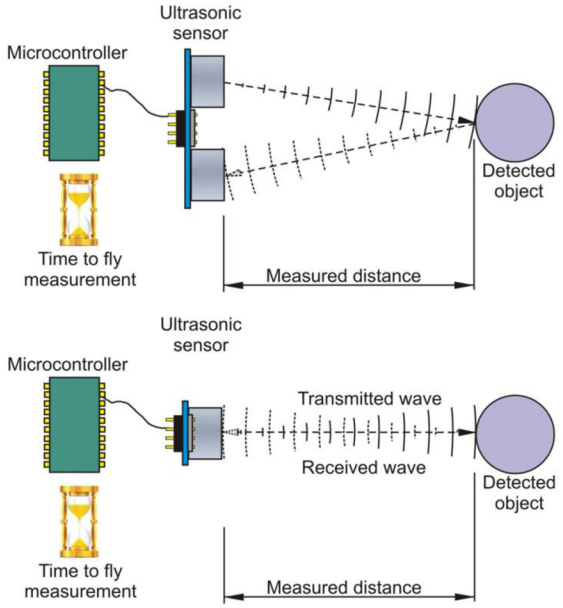
Nevýhody

Naopak mezi nevýhody tohoto typu sensorů pro detekci osob patří zejména relativně jednoduché ovlivnění nežádoucími faktory. Těmi může být například poryv větru, měnící se teplota, zvířata, slunce v zorném poli apod. To vše může způsobit, že detektor nesprávně detekuje pohyb člověka. Zřejmou nevýhodou je také fakt, že z principu nemůže detekovat člověka, který se nehýbe.

Dále je poměrně náročné z výstupního signálu určit polohu člověka, jelikož v praxi pouze porovnává dvě snímané plochy, které jsou rozčleněny do prostoru různě pomocí čoček. Přestože byly zkoumány a uvedeny některé možnosti využití těchto sensorů pro lokalizaci (a případné počítání osob v prostoru), reálné použití je často výrazně nepřesné, zpracování poměrně složité a je typicky nutné využít velké množství těchto sensorů zároveň. Nevýhodou je také, že je často nutné využít analogový signál sensoru, což mnoho výrobců ani neumožňuje. I přesto by pro některé konkrétní případy mohly být pro přibližnou lokalizaci použity vzhledem k jejich nízké ceně a energetické spotřebě.

1.1.2 Ultrazvukové sensory

Ultrazvukové sensory vzdálenosti mají vždy dvě základní části: vysílač a přijímač. Tyto dvě součásti mohou v některých případech být integrovány do jednoho modulu za účelem ušetření místa. Vysílač emituje zvukové vlny o vyšší frekvenci, než jakou je člověk schopen slyšet, tedy nad 20 kHz, typicky 30 – 500 kHz. Měření vzdálenosti těmito snímači funguje na podobném principu jako radar, tedy vysílač pošle vlny do prostoru, ty se odrazí od objektu před sensorem a vrátí se zpět do přijímače (viz Obrázek 12). Na základě délky času, který trval zvukové vlně od vyslání po návrat zpět do sensoru, je možné dopočítat vzdálenost objektu. Vzdálenost je rovna polovině času, který trval zvukové vlně dorazit zpět do sensoru (jelikož zvuk za tuto dobu musel dorazit k objektu a zpět), vynásobenou známou rychlostí zvuku. Ta se mírně může lišit dle teploty a případně vlhkosti [17].



Obrázek 12 - znázornění signálu pro jedno modulový a dvou modulový ultrazvukový sensor [18]

Ultrazvukové sensory se využívají pro široké množství úloh, jako jsou například anti-kolizní systémy, automatizace v rámci fabrik, navigace robotů, měření v rámci parkovacích systémů, detekce objektů apod. Mezi nejrozšířenější sensory, zejména pro nekomerční použití, patří měřič vzdálenosti HY-SRF05 (viz Obrázek 13), jelikož je uzpůsoben na práci s platformou Arduino, má rozsah detekce až 4,5 metru, ale hlavně je jedním z nejlevnějších na trhu s cenovkou několika desítek korun českých.

Obrázek 13 - ultrazvukový sensor HY-SRF05 pro Arduino [19]

Využití ultrazvukových sensorů pro detekci, lokalizaci a počítání osob

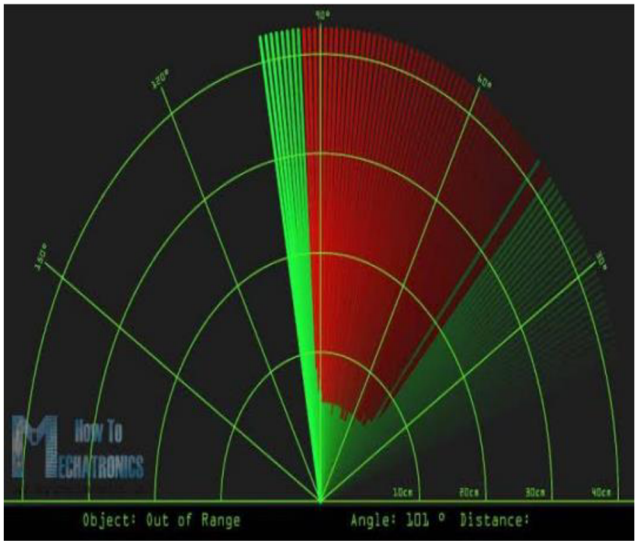
Detekce pomocí ultrazvukových senzorů je relativně jednoduše využitelná. Jelikož z principu těchto senzorů měří vzdálenost v prostoru před nimi, můžeme detekovat průchod člověka na základě změny změřené délky. Detekce však není z principu možná na velké ploše a je tedy vhodná pouze pro zaznamenání průchodu člověka konkrétním místem.

Ultrazvukové sensory se typicky nevyužívají k lokalizaci nebo počítání osob. Zaprvé, ačkoliv je schopný měřit přesnou vzdálenost, není na základě zvukových vln schopen rozeznat, jaký typ předmětu/člověka snímá. Zadruhé, nespornou nevýhodou pro toto použití je fakt, že snímač zaznamenává vzdálenost pouze v úzkém pásmu prostoru.

Přesto by pro účel této práce mohl být užitečný. Pro počítání lidí v místnosti je možné kombinací více senzorů tohoto typu nebo kombinací s jiným typem levného sensoru na bázi infračerveného záření vytvořit systém, který snímá člověka při vstupu či výstupu z místnosti. Pokud se nachází tyto dva senzory vedle sebe v místě, kterým musí člověk nevyhnutelně projít, stačí vyhodnotit, který ze senzorů byl aktivován dříve a z toho jsme schopni určit, zda člověk vešel do místnosti nebo z ní odešel.

Pokud bychom chtěli využít ultrasonický senzor pro lokalizaci osob, je možné vytvoření systému pro natáčení sensoru nebo použití většího množství těchto jednorozměrných sensorů. Na řešení tohoto problému je také již možné se odkázat na některé, z jichž vypracovaných studií.

Bylo vytvořeno několik studií/experimentů [20], které využívají servomotor, případně DC motor, pro natáčení již zmíněného ultrazvukového sensoru HY-SRF05, tak aby postupně mohl snímat celý prostor ve svém okolí. Propojením motoru, sensoru, řídící jednotky a počítače jsme tak schopni vytvořit 2D mapu okolí a případně zaznamenávat změny, které se v této rovině udály (viz Obrázek 14).



Obrázek 14 - příklad mapy zaznamenané kombinací obyčejného ultrazvukového sensoru a servomotoru [20]

Dále bylo již zkoumáno také využití kombinace více těchto statických sensorů pro určení polohy objektu, i v tomto případě je ale velmi omezující rozpětí snímaní sensoru a lokalizace je tedy možná jen na velmi malém prostoru [21].

Nakonec je dobré zmínit, že již byla vytvořena také studie [22], která zkoumala rozpoznání člověka od jiných objektů s využitím pouze ultrazvukového sensoru. Tato práce využívala skutečnosti, že každý povrch, odráží zvukové vlny jiným způsobem a pohlcuje jinačí množství energie. Z charakteru zvukové vlny, která se vrátila zpět do sensoru, bylo

možné za pomocí klasifikátoru a fuzzy logiky rozeznat předem stanovené objekty (včetně lidí) s poměrně dobrou přesností. Tato metodologie však byla testována pro konkrétní předem danou vzdálenost, s předem natrénovanými objekty. Pro využití rozpoznání člověka v obecném prostoru se nezdá tato metoda být vhodná.

Výhody

Hlavními přednostmi ultrazvukových sensorů je, že jsou poměrně malé, levné (i když obecně spíše dražší než PIR sensory), poměrně energeticky nenáročné, jednoduché na použití, vnější faktory obvykle výrazně neovlivňují jejich funkčnost a zejména jsou velmi přesné pro měření vzdálenosti drtivé většiny objektů. Výhodou je také poměrně velký dosah měření, kde v některých případech je možné měřit vzdálenost až do 16 metrů [23].

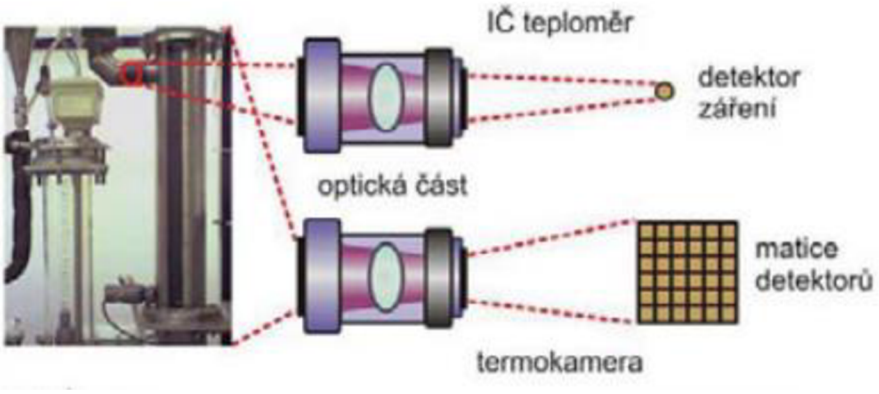
Nevýhody

Obecně patří mezi nevýhody, že s nimi nelze pracovat ve vakuu, mají v některých případech problém s detekcí u měkkých materiálů a pro určité použití může být nedostačující dosah [23]. Pro případ této práce se zdá tento senzor být vhodný zejména pro počítání lidí procházejících vstupem do místnosti. Naopak nepříliš vhodné jsou tyto senzory pro lokalizaci lidí. Zde je jasná nevýhoda hlavně v jednorozměrném měření vzdálenosti a také v neschopnosti rozeznat člověka od jiného objektu. Proto je nutné pro lokalizaci člověka kombinovat více sensorů nebo využít systému pro natáčení samotného sensoru, a to nejlépe v kombinaci s některým tepelným čidlem, které rozezná člověka od ostatních objektů. Důležité je také zmínit, že i případě systému, který je schopen natáčet sensor, je možné měřit pouze v rovině, která prochází tímto sensorem a není tudíž uskutečnitelné rozpoznání více objektů za sebou nebo v rovině paralelní s podložkou sensoru, jako to jde u některých jiných typů snímačů.

1.1.3 Termokamery

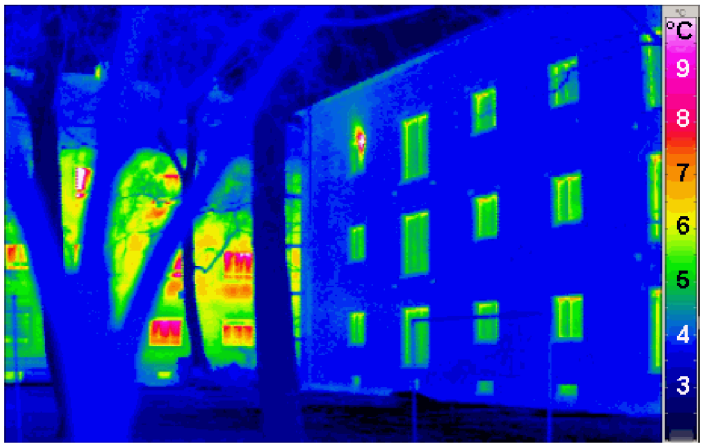
Termokamery, stejně jako PIR sensory, využívají faktu, že každý objekt s nějakou teplotou emituje určité množství infračerveného záření, a čím vyšší je teplota, tím více tohoto záření emituje. Principem funguje velmi podobně klasické kameře, akorát místo elektromagnetického vlnění ve viditelném spektru zaznamenává infračervené záření.

Optický systém v kameře, který je vyrobený ze speciálního materiálu, tak aby mohl propouštět infračervené záření (např. z germania), usměrní vyzařované infračervené záření na detektory záření. V případně jednoduchého infračerveného teploměru je zde pouze jeden detektor, naopak v případě termokamery se zde nachází celá matice takových detektorů, kde jejich počet určuje rozlišení kamery (viz Obrázek 15) [24].



Obrázek 15 - srovnání zpracování infračerveného teploměru a termokamery [24]

Rozlišení termokamer je typicky relativně malé, jelikož tepelná čidla v termokameře musí zaznamenávat energii, která má výrazně větší vlnové délky než viditelné světlo. To má za důsledek, že také jednotlivé elementy sensoru musí být výrazně větší [25]. Signál z maticového detektoru je dále zpracován v elektronických obvodech a obvykle převeden na barevný obraz (termogram – viz Obrázek 16) dle teplot.



Obrázek 16 - ukázka podoby termogramu [26]

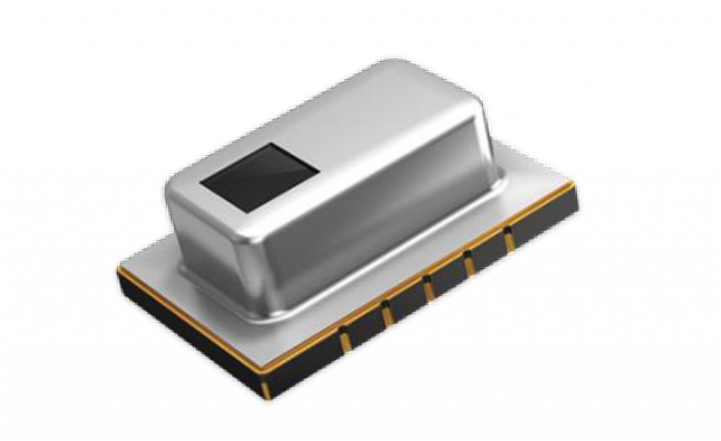
V průmyslu se termokamery využívají kdekoliv, kde je potřeba nejen znát teplotu konkrétního bodu, ale objektu jako celku, abychom mohli odhalit případná rizika. Monitorují se tak tepelné izolace, elektroinstalace, protipožární ochrany, stroje, zařízení apod. Využití je tedy skoro tak rozsáhlé, jako u klasické kamery. Jednotlivé kamery se v praxi liší zejména teplotním rozsahem, citlivostí a již zmíněným rozlišením, které také do značné míry udává cenu a velikost kamery. Právě cena je největší nevýhodou oproti ostatním sensorům, které byly dosud zmíněny. Pohybuje se pro základní kamery od cca 5000 Kč až po stovky tisíc korun za profesionální kamery s velkým rozlišením a objektivy.

Využití termokamer pro detekci, lokalizaci a počítání osob v místnosti

Co se týče samotné detekce, není problém termokamery pro tento účel využít, avšak pro tento úkol samostatně je její použití neefektivní. Jsou typicky řádově dražší než jednoduché PIR nebo radarové senzory, které jsou tuto úlohu splnit stejně dobře, ne-li lépe. Výhody termokamery se výrazně projeví až při náročnějších úlohách.

Termokamera by mohla být teoreticky ideální pro lokalizaci a počítání osob v místnosti, jelikož je schopná rozpoznat teplo lidského těla, obzvlášť ve vnitřních místnostech, kde je typicky teplota ostatních povrchů výrazně nižší a stálá. Lze koupit kameru s rozsahem a rozlišením přesně dle konkrétních potřeb a může fungovat i za tmy. Největší překážkou je však již zmíněná cena.

Důležité je si uvědomit, že pro případy snímání počtu lidí v místnosti je možné využít termokamery s velmi nízkým rozlišením, které by pro většinu jiných aplikací byly zcela nepoužitelné. I z toho důvodu vznikly sensory jako například Panasonic Grid-EYE (viz Obrázek 17) [27] nebo Omron D6T-44L-06 [28], což jsou prakticky termokamery s rozlišením pouze 8x8 nebo 4x4 pixelů. Lze je pořídit již od cenovky cca 1000 korun, což je zlomek ceny klasické termokamery. Tento sensor je přímo určen pro takový typ použití a např. výrobce Panasonic má k němu také předpřipravený algoritmus pro počítání lidí v zorném poli snímače.



Obrázek 17 - panasonic Grid-Eye sensor [27]

Na toto téma již byly opět vytvořené některé výzkumy [29,30,31], které ukazují, že tato metoda může být velmi vhodná pro lokalizaci a počítání osob v místnosti. Je však důležité zmínit, že jelikož má obraz relativně malé rozlišení, je třeba ho následně značně upravit a naprogramovat algoritmus, tak aby mohlo dojít k automatickému počítání a detekci lidí. Zmíněné výzkumy využívaly zejména učení na základě neuronových sítí a filtrování s využitím fuzzy logiky. Obě metody se ukázaly být velmi účinné s úspěšností 90–96 % pro počítání lidí v místnosti. Pro pouhé určení přítomnosti člověka by byla úspěšnost ještě větší.

Nejvýhodnější se pro kamery s tímto nízkým rozlišením jeví umístění na stropu, tak aby bylo možné jednoznačně odlišit jednotlivé osoby. Je však dobré zmínit, že vzhledem k omezenému úhlu zorného pole může být účinnost výrazně snížená, pokud je strop příliš nízko [32].

Jiné výzkumy pracují i s odlišným úhlem zorného pole [33], případně snímáním ve venkovním prostoru. V těchto případech už je ale vhodné použít kamery s vyšším rozlišením a zpracováním zaměřeným na konkrétní aspekty člověka.

Výhody

Mezi výhody patří možnost detekování i za tmy. Dále vytváření teplotní mapy, díky které je možné s velkou jistotou určit, že se opravdu jedná o člověka, aniž by bylo nutné náročné zpracování výstupu. Z dosavadních výzkumů byla naznačena velmi vysoká úspěšnost lokalizace člověka.

Nevýhody

Mezi nevýhody můžeme zařadit vyšší cenu oproti jednoduchým sensorům (avšak ve variantách s nízkým rozlišením mohou být v některých případech také výhodné), které byly dosud v této práci zmíněny. Dále možnost ovlivnění signálu teplotními změnami v prostoru, teplé/studené proudy od klimatizace, záření slunce apod.

1.1.4 Radarové sensory

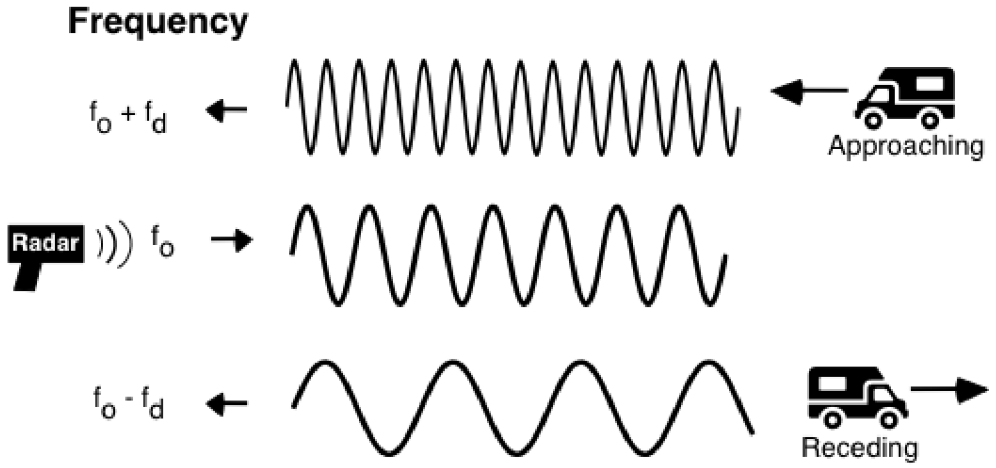
Jak již bylo zmíněno, radar funguje na velmi podobném principu jako ultrazvukový sensor. Opět obsahuje přijímač a vysílač, ale používá pro tuto funkci jednotnou anténu. Stejně jako ultrazvukový sensor, přepočítává čas, který trvá signálu dorazit zpět, na vzdálenost. Nejvýraznějším rozdílem je, že radar neemituje zvukové, ale radiové (elektromagnetické) vlny. To s sebou přináší určité specifické vlastnosti, jako je například fakt, že rádiové vlny nejsou ovlivněné vzduchem. Obecně je možné s pomocí radaru snímat okolí na výrazně větší vzdálenost a s větším úhlovým rozpětím. Další výhodou je, že radary jsou schopné detekovat pohyb i skrze některé materiály.

V některé literatuře se odděluje klasický radar, který můžeme najít například na lodích, od tzv. radarového sensoru, který se využívá v každodenním životě pro kontrolu dopravy, předpovědi počasí apod. Radar využívá rádiových vln, ty však zahrnují velké množství frekvencí od 3kHz do 300GHz. Radarové sensory tohoto typu se z tohoto důvodu dále dělí dle konkrétních frekvencí vln – například microwave (3-30 Ghz) nebo milimeterwave (30-300 GHz). Tyto sensory využívají bezdrátových technologií jako je například FMCW (Frequency Modulated Continous Wave) k detekování tvaru, rychlosti, trajektorií a pohybových charakteristik objektů. Pro zjištění rychlosti a směru pohybu objektu mohou také využívat Dopplerova efektu [34].

Radarové sensory mají velké množství různých typů. Mezi tři často používané patří zmíněný milimeter-wave sensor, CW (continous wave) Doppler radarový sensor a FMCW radarový sensor.

Mmwave sensor se často využívá v anti-kolizních systémech automobilů, navigačních systémech dronů a mnoho dalších bezpečnostních systémech. Mezi jeho výhody patří jednoduchá integrace, malá velikost a dobrá pronikavost skrz mlhu, kouř, prach apod.

CW Doppler sensor využívá k měření rychlosti objektu v různých vzdálenostech zmíněného Dopplerova efektu (viz Obrázek 18). Analyzuje tedy změny ve frekvenci odeslaného a přijatého signálu, díky čemuž je schopen určit přesnou relativní rychlost objektu [34].



Obrázek 18 - ukázka změn frekvence dle Dopplerova efektu [35]

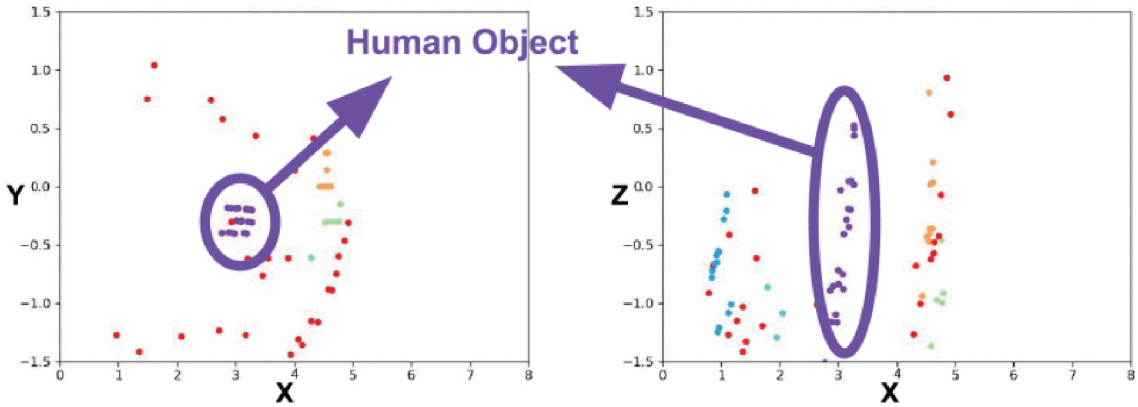
FMCW (frequency modulated continuous wave) sensor na rozdíl od CW sensoru je schopen během snímání měnit svou pracovní frekvenci. To umožňuje vznik časové reference, díky které je možné měřit vzdálenost stacionárních objektů. Vzdálenost i rychlost je v tomto případě možné měřit současně.

Využití radarových sensorů pro detekci, lokalizaci a počítání osob v místnosti

Pro detekci jako takovou jsou radarové senzory velmi dobře využitelné, jelikož i v nejlevnějších verzích dokáží zaznamenávat relativně malé pohyby, čímž mohou například vhodně doplňovat snímání pomocí PIR senzorů. Pro takové typy radarových senzorů je možné i jednoduché zpracování výstupu, jelikož stejně jako PIR senzory v tomto případě určují pouze dva stavy. Nevýhodou může být neschopnost sensoru rozeznat člověka od jiného pohybujícího se objektu na základě teploty a tím pádem je úspěšnost o to více definována algoritmem, který pro lokalizaci použijeme.

Radarové sensory mohou být vhodné i pro lokalizaci a počítání osob v místnostech. Na jejich využití tímto způsobem již zpracováno několik studií [36,37,38,39,40,41], které potvrzují možnost využití v této kategorii. Nejčastěji je využíván mmwave FMCW radar. Často jsou využívány sensory od společnosti Texas Instruments, mezi které patří například IWR1443 [38], IWR1642 [36] nebo IWR6843ISK [37]. To je způsobeno pravděpodobně zejména tím, že tato společnost nabízí k jejich sensorům tohoto typu také předpřipravený kód zahrnující právě také ukázku lokalizace lidí. Při uvážení připravenosti těchto sensorů pro náš konkrétní úkol, patří také mezi levnější varianty na trhu.

Zpracování získaného signálu je principiálně v mnoha studiích stejné. Zmíněný radar na výstupu zobrazí v prostoru body, od nichž se odrazil radiový signál zpět do sensoru. Tyto body lze následně porovnáním po sobě jdoucích hodnot očistit od nehýbajících se objektů. Přesto však nelze zabránit určitému šumu, z toho důvodu se jeví jako dobré řešení zpracovat body do shluků a následně pomocí natrénovaných neuronových sítí rozlišit člověka od ostatních předmětů a šumu. Hojně je ke zpracování využíván také rekurzivní Kalmanův filtr. Následně pokud již jsme schopni rozeznat člověka, můžeme za pomocí neuronových sítí také identifikovat konkrétní lidi od ostatních, což nám též umožňuje sledovat a zpracovávat jejich trajektorii v prostoru [38].



Obrázek 19 - ukázka bodového výstupu mmwave sensoru [38]

Z Obrázku 19 můžeme vidět jakou charakteristiku v prostoru zaznamenávaném sensorem má člověk stojící v prostoru. Na základě takovýchto dat jsme schopni natrénovat neuronovou síť pro rozpoznání člověka.

Ze zmíněných studií vyplývá, že tímto způsobem lze identifikovat a lokalizovat člověka chodícího v prostoru s úspěšností cca 80–90 %. Co se týče lidí nehybně stojících nebo sedících, byla průměrná úspěšnost spíše v řádu 60-70 % [49]. Úspěšnost je ale ovšem velmi závislá na konkrétním algoritmu, místnosti, konkrétní variantě senzoru apod.

Výhody

Výhodný momentálně může být prozatím zejména radarový sensor určený pouze pro detekci. Takové senzory je možné zakoupit v řádu desítek až stovek korun. I v porovnání s PIR senzory, které jsou pro tento účel nejpoužívanější. Radarové senzory jsou v některých směrech pohybu často citlivější než PIR senzory, mají většinou širší úhel snímání a případně mohou snímat i přes malé překážky.

Mezi výhody využití tohoto typu sensoru pro účel lokalizace lidí patří zejména možnost fungování i ve tmě nebo zhoršených podmínek viditelnosti. Dále pouze malé ovlivnění externími faktory jako je teplota, proudění vzduchu apod. Jedná se o relativně přesný způsob měření vzdálenosti i rychlosti a se správnou implementací a algoritmem se dá dosáhnout vysokých hodnot přesnosti. Výhodou může být také schopnost měřit i na poměrně velké vzdálenosti nebo skrze některé typy materiálů.

Nevýhody

Mezi nevýhody bude patřit nutné poměrně složité zpracování dat pro lokalizaci lidí, které na rozdíl od zpracování klasického obrazu není tak výrazně prozkoumané, veřejně dostupné a algoritmus je třeba dělat na míru konkrétnímu senzoru. Z tohoto důvodu si některé společnosti za integrované řešení lokalizace pomocí těchto senzorů mohou žádat vyšší tisíce korun. Dále některé typy materiálů mohou ovlivnit způsob jakým se odrazí signál, čímž dochází k nepřesnostem a šumu. Nakonec mohou výstup ovlivnit také některé zařízení, které využívají principu elektromagnetických vln, čímž opět může dojít k interferenci a špatnému vyhodnocení signálu.

1.1.5 Lidar

LiDAR (light detection and ranging) sensor funguje prakticky na stejném principu jako radar nebo ultrasonický sensor. Všechny tyto sensory se totiž řadí mezi tzv. TOF (time of flight) sensory. Stejně jako tyto sensory má přijímač i vysílač a na základě doby, která trvá signálu dorazit zpět, a změny vlnové délky, je schopen dopočítat vzdálenost objektu. Největším rozdílem je opět typ vln, který pro měření využívá. Lidar používá pro měření laserové paprsky [42].

Lidar díky své přesnosti, rychlé odezvě a schopnosti snímat na velké vzdálenosti má velmi široký záběr využití. Používá se v autonomních vozidlech pro snímání okolí, dále k mapování povrchu z dronů a vytváření topografických map nebo například v armádních podmínkách pro detekování biohazardu či pohybu nepřátelských vozidel [43]. Právě díky své odezvě, přesnosti a v rámci některých integrovaných řešení, které umožňují snímání 360 stupňů okolí, se však také využívá ke skenování místností, například u robotických vysavačů. Tento typ sensoru je dostupný i ve vývojových podobách, umožňujících pracování s výstupem dle našich dalších komponent a požadavků. Příkladem poměrně levné varianty takového senzoru může být sensor od společnosti Okdo zobrazený na Obrázku 20.

Obrázek 20 - Lidar sensor s 360i stupňovou detekcí [44]

Využití Lidar sensorů pro detekci, lokalizaci a počítání osob v místnosti

Jelikož má Lidar velmi podobný výstup s ostatními TOF sensory jako je například radar, je zřejmé i použití a zpracování tohoto signálu bude použitelné skrze podobné postupy. Více odlišující se variantou je naopak použití 3D lidarů, které jsou sice dražší, ale umožňují poměrně komplexní snímání okolního prostoru nejen v rovině, ale také v rámci relativně velkého vertikálního úhlu. I zde již byly pro podobné využití zpracovány výzkumy [45,46], které dokazují využitelnost lidarových sensorů pro toto použití.

I v tomto případě se však využívá podobných principů zpracování, které již byly zmíněny u ostatních metod: segmentace, klasifikace zejména pomocí neuronových sítí a využití Kalmanova filtru, což nám v praxi umožňuje pohybující se objekty (lidi) nejen lokalizovat, ale také sledovat a analyzovat jejich pohyb. Zmíněné výzkumy vykazují velmi dobrou přesnost i ve větších místnostech, s překážkami a větším počtem pohybujících se lidí.

Výhody

Výhodou lidarových sensorů, že obecně nejsou velmi citlivé na změny světelných podmínek a okolního prostředí obecně. Dále je velké množství hotových sensorů, které umožňují snímání v rozsahu 360 stupňů a případně také 3D snímání. Jsou velmi často využívány díky možnosti snímat na velmi velké vzdálenosti, dle konkrétní potřeby. Díky charakteru vlnových délek signálu tento typ sensoru také umožňuje vysokou přesnost měření v porovnání s radary i ultrasonickými sensory [47].

Nevýhody

Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními TOF sensory je jejich vyšší cena. Stejně tak může být pro náš případ nevýhodou neschopnost nativně rozpoznat člověka za pomocí teploty, což komplikuje náročnost algoritmů pro zpracování této informace v prostoru. Pro silné lidary může být laserový paprsek škodlivý pro lidské oko. Toto by však neměl být problém v rámci snímání místností, kde je potřeba pouze relativně malý dosah sensoru [42].

1.1.6 Ostatní varianty sensorů

RGB kamera

Standartní RGB kamera umožňuje pořizovat záznam obrazu s velkým rozlišením za relativně nízkou cenu. Vzhledem k dostupnosti těchto kamer, je zpracování obrazu z těchto kamer velmi dopodrobna prozkoumáno a na základě pokročilých algoritmů lze dobře monitorovat také pohyb lidí v místnosti.

Je také možno využít tzv. stereo kamer, které prakticky fungují jako kombinace dvou RGB kamer, díky čemuž je možné získat také přibližnou hloubkovou mapu prostoru [48]

Výhody – velký výběr variant dle potřeby, mnoho již provedených výzkumů na rozpoznání člověka

Nevýhody – problém s fungováním ve zhoršených světelných podmínkách / ve tmě, energeticky náročné oproti jednoduchým sensorům, nemožnost využití teplotních dat pro definitivní určení člověka a narušení anonymity lidí ve snímaném prostoru

Kombinované

Myšlenka aplikovaná v této práci, tedy fúze dat z více sensorů za účelem lepší funkčnosti, již samozřejmě v praxi byla určitými způsoby implementována. V této sekci jsou uvedeny některé příklady, s jakými sensory může dávat fúze dat smysl.

1. **Kinect** – toto zařízení zaměřené na snímání pohybu využívá dat RGB kamery a infračervených snímačů, které se vzájemně doplňují pro vytvoření 3D mapy prostoru.
2. **LOCI** – ve studii [49] byla za účelem lokalizace lidí využita kombinace PIR sensoru a termočlánkového čidla, které funguje na podobném principu, jako v této práci zmíněné termokamery s nízkým rozlišením. Tato kombinace měla ve zkoumaném případě v 80% případů přesnost na 35 cm.
3. **Dual tech pohybové sensory** – zejména za účelem snížení chybovosti sensoru přítomnosti se v praxi prodávají tzv. dual tech sensory, které využívají primárně kombinace PIR a mikrovlnného sensoru [50]
4. **Mm-wave radar + RGB kamera** – této kombinace využila studie [51] pro robustní lokalizaci osob, která umožňuje sledovat člověka i přes překážky

Můžeme vidět, že variant již bylo prozkoumáno nespočet. Z tohoto důvodu je tedy zejména nutné zvážit výhody a nevýhody jednotlivých sensorů a aplikovat fúzi těch, které se nejlépe hodí pro naše konkrétní využití.

1.2 Řídící jednotky pro implementaci fúze senzorů

V předchozí kapitole byly shrnuty hlavní možnosti senzorů, které je možné použít za účelem detekce, lokalizace a počítání lidí. Senzory samy o sobě však nejsou schopny data zpracovat dle potřeby, a už vůbec není možné provést adekvátní fúzí dat, pokud používáme větší množství senzorů různých typů. Z tohoto důvodu je potřeba pro vytvářený systém vybrat vhodnou řídící jednotku.

Řídící jednotka představuje v tomto kontextu malý počítač nebo mikrokontroler, ke kterému jsou všechny senzory zapojeny a dále zpracovává všechna data dle našich potřeb. V rámci této práce byla jednotka vybírána zejména dle těchto hledisek: cena, výkon, možnosti připojení většího množství senzorů, dostupnost a jednoduchost implementace.

1.2.1 Arduino

Arduino desky jsou vytvářeny se zaměřením na jednoduchou implementaci a širokou kompatibilitu. Jejich velkou výhodou je rozšířenost jejich použití v praxi i ve vzdělávání, což způsobuje velkou dostupnost podpůrných materiálů i hardwaru, které práci s těmito deskami zjednodušují. Dělí se do 3 základních rodin: Nano, MKR a Classic [52].

Nano Arduina jsou zaměřena na kompaktní rozměry, ve kterých ale stále nalezneme mikrokontroler o stejných parametrech jako například v nejpopulárnějším Arduino UNO. Jejich výhodou je také nízká cena a zahrnutí 22 digitálních pinů, které lze použít jako vstup i výstup. Dle konkrétní specifikace mohou obsahovat přidané funkce jako například Bluetooth nebo Wi-Fi modul.

MKR rodina produktů Arduina je více zaměřená na projekty bez přidaných obvodů. Každá deska má rádiový modul, který umožňuje Wi-fi, Bluetooth, LoRa a další způsoby komunikace. Tato rodina produktů však používá procesor nižšího výkonu a její použití je výhodné zejména při práci s audiem [52].

Classic rodina produktů zahrnuje pravděpodobně nejznámější produkty jako je například Arduino UNO (viz Obrázek 21), Due, Mega nebo Zero. Tyto desky jsou již rozměrově větší, ale vyznačují se zejména svou univerzálností. Tyto desky jsou také jejich nejpoužívanějším a nejvíce zdokumentovaným produktem, což dále zjednodušuje práci s nimi [53].

Jelikož projekt vytvářený v rámci této práce nevyžaduje striktní omezení rozměrů, a naopak výhodou je řídící jednotka, která umožňuje dostatečný výkon a velké možnosti propojení, bylo při výběru řídící jednotky pohlíženo zejména na rodinu produktů Classic. Konkrétně byly vyhodnoceny jako nejlépe použitelné modely Uno nebo Due.

Obrázek 21 - Arduino UNO rev3 [53]

Arduino Uno je zcela nejrozšířenějším produktem Arduina. Míra dokumentace a dostupných nadstaveb vytváří Uno ve velmi vhodný produkt pro náš projekt. Obsahuje 14 digitálních pinů, což by pro naše účely mělo být také dostatečné. Hlavním nedostatkem pro aplikaci fúze sensorů je nízký výkon. Řešením by mohlo být právě použití Arduino Due, které je z této řady produktů nejvýkonnější. Kromě zvýšeného počtu digitálních pinů obsahuje nejen výkonnější mikrokontroler, ale také vyšší hodnoty použitelé Flash paměti a RAM. Nevýhodou použití Due je samozřejmě vyšší cena, avšak pro složitější zpracování signálů se zdá být tato varianta výhodnější. Pokud by však požadavky byly ještě vyšší je třeba zvážit jako řídící jednotku jiné produkty jako je například Raspberry Pi.

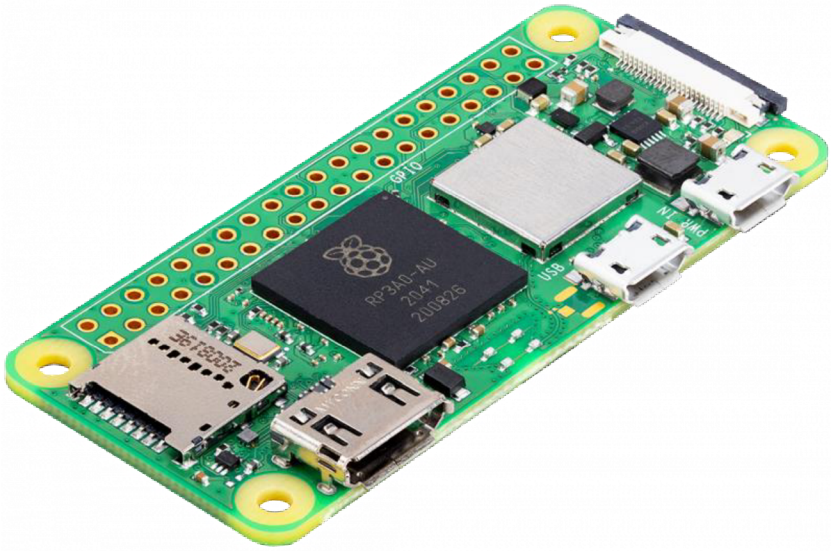
1.2.2 Raspberry Pi

Na rozdíl od Arduina, které z principu využívá mikrokontroleru, standartní Raspberry Pi funguje jako plnohodnotný počítač, a má tedy svůj operační systém, mikroprocesor apod. Je to tedy výrazně komplexnější systém, s vyšším výkonem, většími možnosti využití, ale také vyšší cenou, vyšší spotřebou energie a obecně větší složitostí.

Stejně jako Arduino dělí Raspberry Pi své modely do několika kategorií: standartní, Zero a Pico. Modely Pico jsou jediné, které nefungují jako plnohodnotný počítač, ale jako mikrokontroler. Zaměřením modelové řady Pico je opět zejména kompaktní použití, avšak v porovnání se Arduino modely nabízí lepší výkon za srovnatelnou cenu. Umožňuje také přístup přes 26 pinů a více variant komunikačních protokolů jako například UART, SPI nebo I2C [54].

Pokud je však naším cílem výpočetně náročné zpracování dat či obrazu a například používání knihoven strojového učení, je vhodné použít některou z plnohodnotných klasických variant Raspberry Pi nebo Raspberry Pi Zero.

Raspberry Pi Zero (respektive Zero 2 W – viz Obrázek 22) je základní variantou Raspberry Pi počítačů. V porovnání se standartní variantou neobsahuje nativně možnost Wi-fi ani Bluetooth, má menší možnosti připojovacích konektorů a výkon stejný jako nejstarší varianta standartních modelů. Tyto nevýhody jsou vykompenzovány výrazně nižší cenovkou a poloviční velikostí.



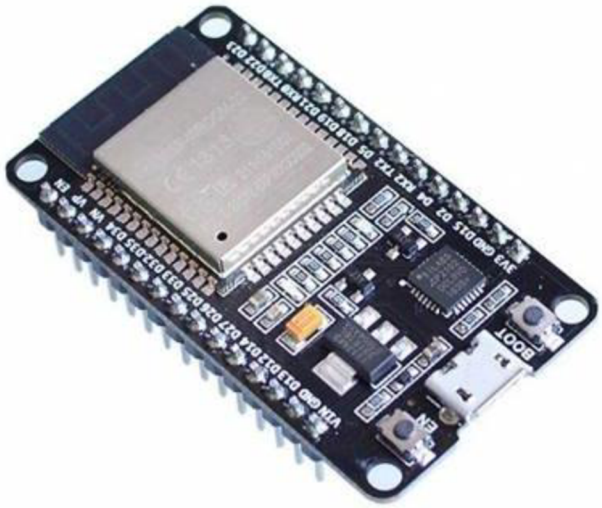
Obrázek 22 – Raspberry Pi Zero 2 W [55]

Naopak nejvýkonnější variantou je aktuální standartní model Raspberry Pi 4 B. Nabízí kompaktní rozměry, velkou konektivitu, rozsáhlé možnosti rozšíření a zejména již poměrně vysoký výkon. Dle potřebné RAM je navíc možné zvolit si variantu s 1 až 8 GB RAM. Nevýhodou výběru této jednotky pro řízení systému fúze senzorů může být zejména vyšší cena v porovnání s ostatními zmíněnými produkty, a také vyšší spotřeba energie. Díky své univerzálnosti je však možné tuto jednotku využít pro výrazně širší typy zpracování, což může mít za výsledek ucelenější a funkčnější systém.
Nakonec je ale dobré zmínit, že vzhledem ke své popularitě, je momentálně Raspberry Pi 4 nedostatkové zboží. Z toho důvodu jsou v mnoha případech úplně nedostupné nebo je jejich cena výrazně nad tou standartní.

1.2.3 Ostatní varianty

Produkty Raspberry Pi a Arduino mají zásadní výhodu ve své rozšířenosti, a tím pádem také rozsáhlosti dokumentace nebo například velké možnosti příslušenství. Na trhu se však nachází mnoho dalších variant počítačů a mikrokontrolerů, které by teoreticky mohli být také velmi dobře použitelné pro tento projekt. Příkladem mohou být následující.

ESP 32 – Tuto vývojovou desku znázorněnou na Obrázku 23 lze dobře použít jako alternativu k některým Arduino modelům. Přestože se nejedná o plnohodnotný počítač, umožňuje výrazně vyšší výkon, širokou škálu periferií a nativně možnost Wi-fi i Bluetooth [56]. Výhodou je také možnost použití systému ESP Home, který je zaměřen na vytváření prvků chytré domácnosti a umožňuje tak dobré propojení se senzory i rozsáhlou dokumentaci.



Obrázek 23 - vývojová deska ESP 32 [56]

STM 32 – Je obdobnou alternativou od firmy STMicroelectronics [57]. Dle konkrétní desky se jedná o velmi podobnou možnost jako ESP 32. Nenabízí však nativně Wi-fi ani Bluetooth a neumožňuje jednoduchý systém k propojení se senzory jako je například ESP Home.

Radxa Rock Pi – Vzhledem k nedostatku Raspberry Pi na trhu může být Radxa Rock Pi dobrou alternativou. Jedná se o téměř kopii originálního Raspberry Pi, avšak umožňuje i výkonnější specifikace například s 16 GB RAM [58]. Nevýhodou je zde zejména menší pokrytí uživateli a s tím spojené faktory.

1.3 Použité komponenty

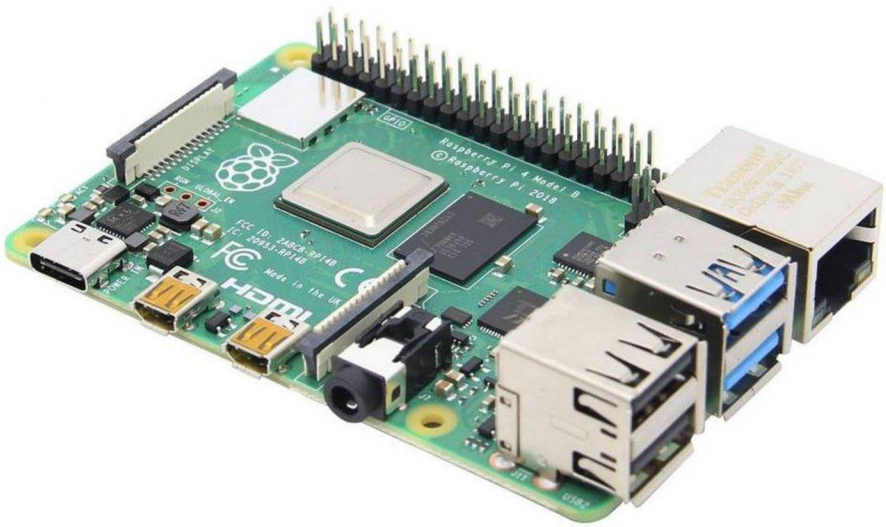
V této sekci práce jsou shrnuty všechny komponenty, které jsou dále použity v rámci praktického provedení práce. U každého komponentu je napsáno zdůvodnění jeho výběru a uvedeno, pro jakou část jsou tyto komponenty využívány.

1.3.1 Raspberry Pi 4 B

Jako řídící jednotka systému byl vybrán počítač Raspberry Pi 4B (viz Obrázek 24), a to konkrétně ve variantě se 4 GB RAM. Tato varianta již byla vybrána primárně na základě dostupnosti, jelikož byla k dispozici v rámci mechatronické laboratoře VUT FSI, a jak již bylo zmíněno možnosti koupě nového Raspberry Pi jsou v momentální době omezené.

Důvodů použití Raspberry Pi jako řídící jednotky bylo několik:

1. **Výkon** – Jedná se o nejvýkonnější jednotku ze všech uvažovaných v rámci rešerše. Záměr na výkon vychází z toho, že v rámci vytvářeného konceptu systému jsem uvažoval možnost náročnějšího zpracování obrazu RGB kamery nebo termokamery např. pomocí knihoven využívajících neuronové sítě.
2. **Dostupnost a cena** – V rámci této výkonnostní kategorie je tento počítač při standartních cenách stále příznivě naceněn a výhody, které plynou z masového využití tohoto produktu jej dělají výhodným. Vzhledem k tomu, že byla tato jednotka již dostupná v rámci VUT FSI, uvažuji tuto řídící jednotku do konceptu systému tak, jako by cena byla standartní.
3. **Jednoduchost implementace** – Jak již bylo zmíněno, masové využití Raspberry Pi způsobuje velmi dobré zdokumentování všech jeho funkcí, a také velké množství příslušenství a senzorů určené přímo kompatibilní pro tuto jednotku. Výhodou je zde také velké množství GPIO pinů, možnost programování přímo na jednotce a nativní programování v Pythonu.
4. **Možnosti přenosu dat** – Jelikož Raspberry Pi umožňuje připojení přes Wi-fi i Ethernet, je možné také jednoduché sdílení dat přes Ethernet. Díky adekvátnímu výkonu je možné zpracovaná data také sdílet téměř real-time.



Obrázek 24 – Raspberry Pi 4B [59]

1.3.2 Ultrasonické senzory HY-SRF05

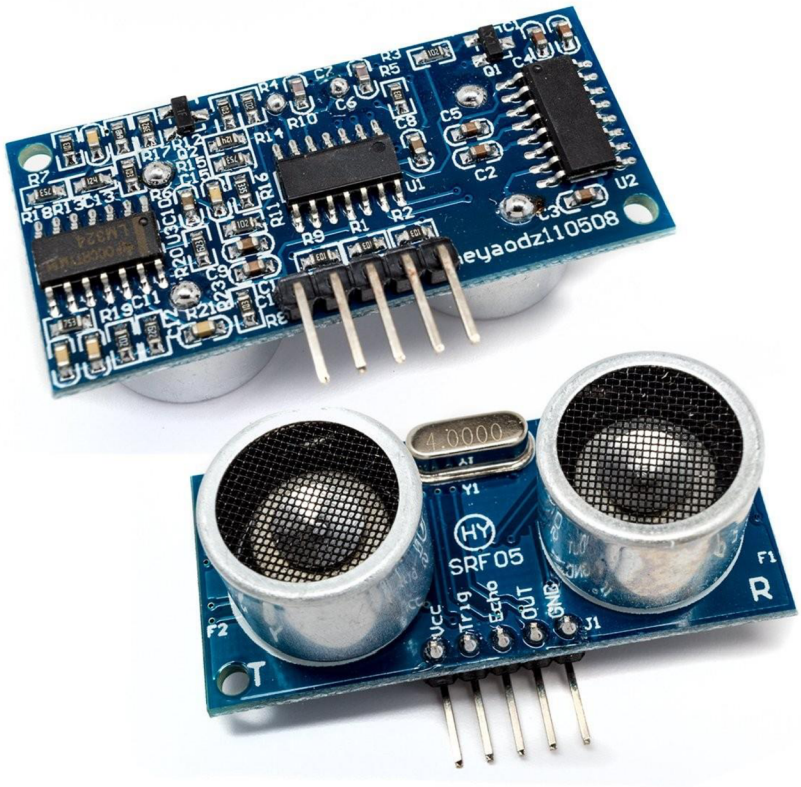
Ultrazvukové senzory jsou obecně nejlépe použitelné pro měření vzdálenosti v jednom směru. To velmi dobře umožňuje také detekci pohybu v tomto místě. To samotné je pro detekci v rámci celé místnosti nevyužitelné, ale myšlenka aplikovaná v této práci stojí na použití dvou takových senzorů u vstupu do místnosti. Na základě toho, který ze dvou vedle sebe umístěných senzorů detekuje změnu dříve, jsme schopni počítat průchody danou oblastí.

Jelikož uvažujeme monitorování pouze na malou vzdálenost kolem dveří, bylo možné vybrat pravděpodobně nejlevnější ultrasonické senzory na trhu s názvem HY-SRF05 (viz Obrázek 24), což také velmi dobře zapadá do konceptu projektu, dle kterého chci využít větší množství co nejlevnějších senzorů.

Zvolený senzor má více než dostatečné rozpětí snímání od 2 do 450 centimetrů s vysokou přesností až 0.3 cm [60]. Dále má velmi nízkou spotřebu energie a jeho použití je velmi dobře zdokumentováno, což zlehčuje práci s ním.

Nevýhodou zvolení tohoto konkrétního senzoru může být naopak v porovnání s některými konkurenčními produkty poměrně široký zorný úhel 15 stupňů. To při použití dvou těchto senzorů ve vzájemné blízkosti může například způsobit, že se jejich signály budou vzájemně narušovat. Malou komplikací může být také použití pracovního napětí 5 V, což se neshoduje s napětím používaným u Raspberry Pi, a je tedy třeba přizpůsobit pro komunikaci s řídící jednotkou napětí pomocí napěťového děliče.

V rámci výsledného systému jsou tyto senzory použity pro počítání lidí. Vzhledem k tomu, že senzory používáme dva, jsme schopni rozlišit příchod člověka od jeho odchodu a na základě toho vyhodnotit aktuální počet lidí v místnosti.



Obrázek 25 – ultrazvukový senzor HY-SRF05 [60]

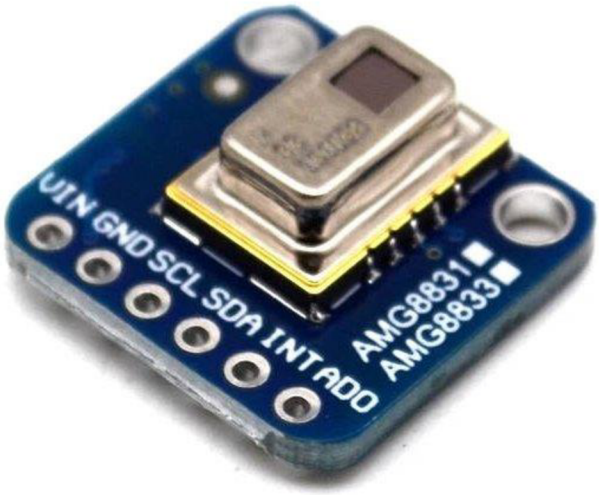
1.3.3 Termokamera Panasonic Grid-EYE

Hlavním problémem použití termokamer v rámci uvažovaného systému je jejich cena. Jelikož se tento projekt zaměřuje na použití co nejlevnějších komponentů, které zároveň splňují stanovenou funkčnost, byla za účelem lokalizace lidí v místnosti vybrána termokamera AMG8833 Grid-Eye (viz Obrázek 26).

Jedná se o prakticky jednu z nejlevnějších možností termokamery, což je umožněno díky jejímu velmi nízkému rozlišení 8x8 pixelů. Takové rozlišení je sice nevhodné pro složité zpracování obrazu, avšak mělo by být dostatečné na přibližné určení polohy člověka v rámci místnosti.Maximální měřenou vzdáleností 7 metrů zároveň tato termokamera splňuje požadavky, které jsou dále přiblíženy v kapitole 2.1 Základní koncept a východiska vytvářeného systému.

Výhodou tohoto modulu je také možnost komunikace přes I2C, jednoduchá integrace s Raspberry Pi, relativně malý odběr proudu 4,5 mA.a rychlost snímání 10 krát za sekundu. Poněkud malé je naopak rozpětí snímání 60 stupňů, což prakticky zamezuje umístění doprostřed stropu (nejvhodnější pro odlišení jednotlivých lidí od sebe) větší místnosti se standartní výškou stropů, jelikož by kamera nebyla schopná snímat celou plochu [61].

V rámci výsledného systému je tato termokamera používána primárně pro funkci lokalizace. Přestože je pomocí ní možné také detekovat, či počítat lidi, pro tyto funkcionality byly vybrány jiné senzory, tak aby bylo nejlépe využito předností každého z nich. V některých specifických případech, kdy jsme si ale jistí, že data z termokamery udávají přesnější hodnoty počtu lidí nebo samotné detekce, je jí využito pro doplnění ostatních senzorů i v tomto ohledu.



Obrázek 26 – modul termální kamery Panasonic AMG8833 [61]

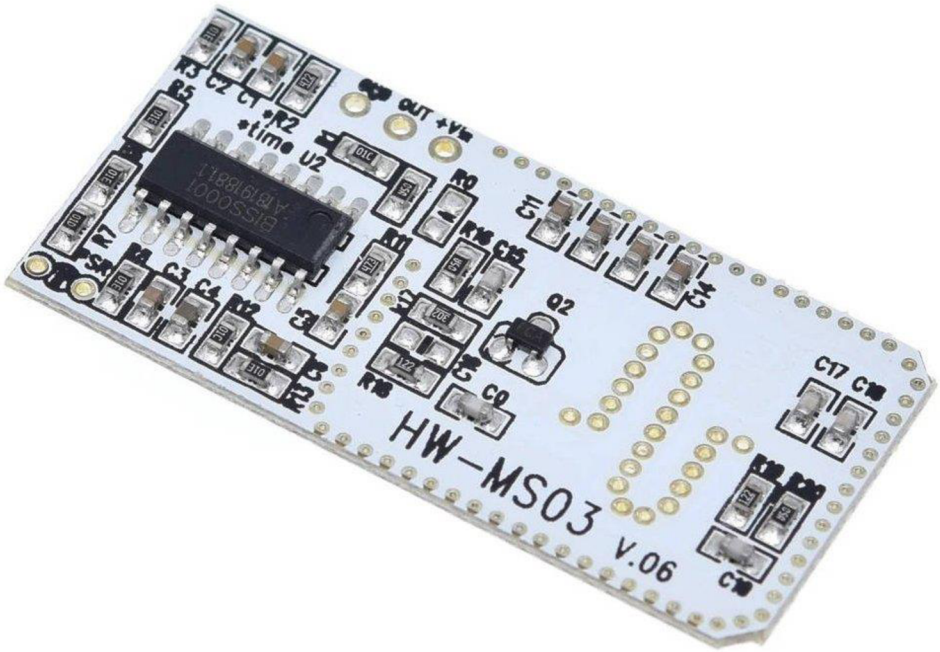
1.3.4 Mikrovlnný senzor HW-MS03

Radarové senzory jsou ze svého principu obecně velmi vhodné pro detekci pohybu, a proto jeden využívám i v rámci této práce. Abych dodržel koncept uvažovaného systému zvolil jsem opět nejlevnější variantu, která splnila stanovené požadavky.

Vybraný mikrovlnný senzor HW-MS03 (viz Obrázek 27) má velkou řadu výhod. Cenově se pohybuje v řádu pouhých desítek korun, umožňuje snímat pohyb až na 10 metrů a úhel detekce je 180 stupňů, takže je schopen bez problému snímat celou místnost [62]. Díky radarové technologii umožňuje navíc snímat také přes malé překážky, což je výhodné zejména při umístění senzoru v rohu místnosti. Pro účely detekce je zde výhoda také v jednoduchosti zpracování dat, jelikož senzor dává na výstup pouze dva stavy: 0 (žádný pohyb) nebo 1 (zaznamenán pohyb).

Naopak nevýhodou v porovnání s jinými například mmwave senzory může být teoreticky nižší citlivost, rychlost, omezené nastavování parametrů nebo neumožnění rozlišení různých typů pohybu. Cena těchto lepších senzorů je však obvykle mnohonásobně vyšší.

Jak již bylo zmíněno, v rámci vytvářeného systému je tento senzor použit pro funkci detekce pohybu. Aby byly co nejvíce omezeny negativní parametry jako je například jeho menší citlivost, je v této funkci doplněn PIR senzorem, který má vůči radarovému senzoru taky některé výhody. Příkladem může být, že radarový senzor má z principu vyšší citlivost při pohybu směrem k/od senzoru, a naopak PIR senzor je citlivější při pohybu doleva/doprava.



Obrázek 27 – Mikrovlnný detektor pohybu HW-MS03 [62]

1.3.5 PIR senzor HC-SR501

PIR senzory jsou nejvyužívanějším typem senzorů pro detekci osob, jelikož relativně spolehlivě umožňují rozeznat člověka od pohybu něčeho chladného a zároveň patří obecně spíše mezi levnější senzory. Jelikož pro potřeby malých místností je dostatečný téměř jakýkoliv PIR senzor, byl dle konceptu vybrán jako jeden z nejlevnějších senzor HC-SR501 (viz Obrázek 28).

Kromě toho, že je tento senzor pravděpodobně nejlevnější na trhu, má řadu dalších výhod. Umožňuje dosah až do vzdálenosti 7 metrů, úhel detekce až 120 stupňů, má možnost nastavení doby sepnutí po zaznamenání pohybu i míry citlivosti. Díky nízké cenovce je také velmi často používán ve vývojových systémech a jeho použití je tedy velmi dobře zmapované. Stejně jako radarový senzor HW-MS03 je výhoda také v jednoduchosti zpracování výstupních dat, jelikož vydává pouze dva stavy dle zaznamenání pohybu.

Nevýhodou zvolení tohoto senzoru může být oproti některým variantám opět nižší citlivost, rychlost nebo možnost nastavení parametrů. Vzhledem ke zlomkové ceně oproti jiným produktům je však jeho použití oprávněnou volbou v rámci uvažovaného systému.

Jak je již zmíněno u popisu použitého mikrovlnného senzoru, tyto dva senzory se v rámci naší aplikace vzájemně doplňují pro umožnění co nejlepší detekce pohybu a zároveň dodržení co nejmenší celkové ceny produktu.

Obrázek 28 – HC-SR501 PIR detektor pohybu [63]

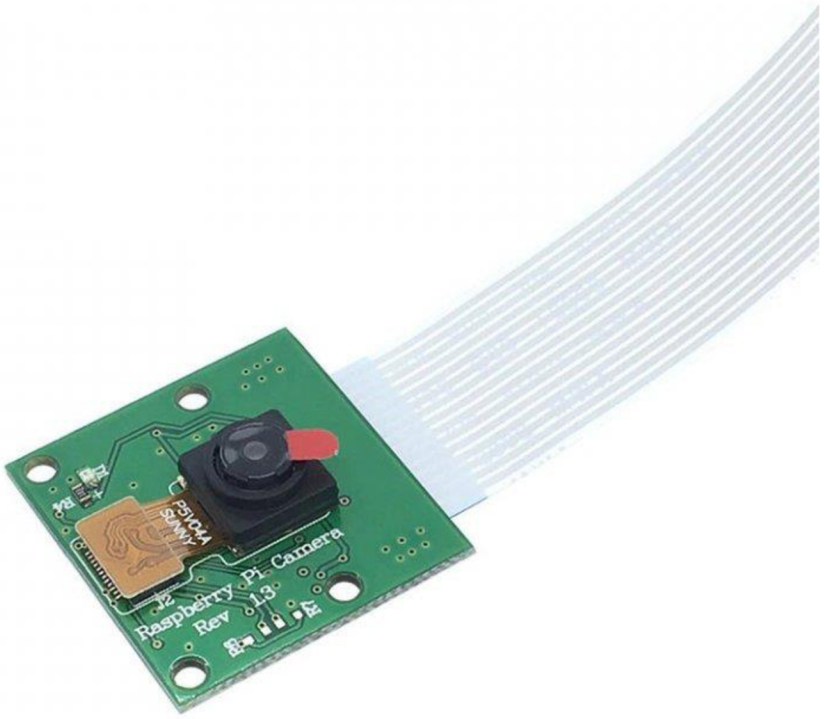
1.3.6 Raspberry Pi kamera v1.3

Pravděpodobně nejuniverzálnějším komponentem, který lze využít pro lokalizaci lidí je RGB kamera. Pro tento projekt jsem zvolil jednu z nejlevnějších RGB kamer na trhu s názvem Raspberry Pi camera v1.3 (viz Obrázek 29), která je navíce přímo vytvořená pro spolupráci s řídící jednotkou Raspberry Pi, kterou v rámci práce využívám.

Největší výhodou výběru této kamery je právě velmi nízká cena v kombinací s dostatečnou kvalitou. I přes cenu okolo 200 Kč, je tato kamera schopná pořizovat video v rozlišení Full HD, což poskytuje velké množství dat, které mohou být dále zpracovány pro lokalizaci lidí v místnosti. Vzhledem k tomu, že knihovny před trénované pro rozpoznání lidí v principu fungují s jakoukoliv kamerou s dostatečným rozlišením a podmínky ve kterých bude použita kamera v tomto projektu jsou poměrně jednoduché (menší místnost), je pro naše potřeby její použití ideální.

Nevýhodou zvolení této kamery může být relativně malý pozorovací úhel 54x41 stupňů [64]. Případně v porovnání s výrazně dražšími kamerami zde můžeme pocítit například horší dynamický rozsah a obecně horší citlivost senzoru, což způsobuje, že kamera není schopná se tak dobře vypořádat se zhoršenými světelnými podmínkami.

V rámci výsledného systému se kamera využívá pro lokalizaci i počítání lidí. Aby však byly omezeny její nedostatky, ve zhoršené viditelnosti tyto funkce přejímají senzory ultrasonické v kombinaci s termokamerou, jelikož nejsou nijak ovlivněny světelnými podmínkami.



Obrázek 29 – Raspberry Pi kamera v1.3 [64]

1.4 Použité softwarové nástroje

Při vytváření projektu fúze senzorů bylo potřeba využít nejen většího množství komponentů, ale také softwarových nástrojů. Celý algoritmus bylo třeba naprogramovat, pro zpracování dat z kamer využít některé specifické knihovny a celý systém nasdílet na server koncovému uživateli. V této kapitole je shrnuto, které nástroje byly použity pro tyto činnosti a proč.

Programování algoritmů

K vytvoření algoritmů a propojení senzorů s Raspberry Pi byl primárně využit programovací jazyk Python. Ten byl zvolen primárně jelikož operační systém této řídící jednotky je postaven na Linuxu, který primárně využívá **Python** k fungování. Díky tomu je i většina dokumentace, která se zaměřuje na Raspberry Pi řešena v tomto programovacím jazyce a je tedy nejjednodušší jeho implementace.

Při programování algoritmu bylo také využito některých knihoven, které umožňují komplexní zpracování obrazu dle našich konkrétních požadavků. První z nich byla **COCO** knihovna pro zpracování obrazu RGB kamery. Druhou využívanou knihovnou byla **OpenCV**, která byla využita pro základní zpracování obrazu obou kamer, ale také pro určení polohy člověka z dat termokamery. Bližší popis použití těchto kamer je dále zmíněn v rámci kapitoly 2.4. Algoritmus v praktické části této práce.

Obrázek 30 – logo knihovny OpenCV [65]

Sdílení dat na server

Aby bylo možné vytvořenou fúzi dat ze senzorů prakticky využít, je nutné dostat tato data z řídící jednotky ke koncovému uživateli. A jelikož je plánováno použití systému samostatně ve sledované místnosti, bude muset mít uživatel ke zpracovaným datům přístup vzdáleně.

Existuje vícero způsobů, kterými můžeme bezdrátově dynamicky sdílet zaznamenávaná data. Na krátké vzdálenosti lze použít Bluetooth spojení nebo bezdrátové komunikační technologie Zigbee. Pro jednoduchá data je možné například také použít protokol MQTT, který je nejčastěji používán v rámci IoT (Internet of Things) aplikacích. Pokud je však požadavkem sdílet data i na větší vzdálenost a přenášet i data složitějšího formátu, je pravděpodobně nejvhodnějším řešením sdílení těchto dat přes server na Wi-fi. Pro výsledný řídící systém pak tímto také vzniká požadavek na Wi-fi pro připojení řídící jednotky a vytvoření serveru.

Pro vytvoření serveru bylo využito frameworku **Flask**, jehož využití je vhodné zejména pro jednoduché webové aplikace, jako například ta, která je plánována v rámci této práce pro pouhé sdílení dat s koncovým uživatelem. Jeho výhodou je, že nevyžaduje použití žádných konkrétních dalších nástrojů, vnitřních knihoven a nemá nativně ani implementovanou žádnou vrstvu na databáze [66]. To umožňuje právě rychlé zprovoznění jednoduché aplikace a na případné další úpravy lze již využít pouze rozšíření, které aktuálně potřebujeme. Další výhodou v rámci mého projektu je, že Flask využívá programovacího jazyku Python, který se primárně používá ve zbytku celého projektu při programování na Raspberry Pi.

Obrázek 31 – logo Flask frameworku [67]

Samotná konstrukce stránky byla dále vytvořena v **HTML** (Hypertext Markup Language) s malými úpravami v CSS (Cascading Style Sheets). Jelikož však bylo také potřeba dynamicky aktualizovat všechny proměnné včetně obrázků vzniklých zpracováním dat z kamer, bylo třeba využít pro tuto funkci také **Javascript**. Konkrétně byl zde zejména použit tzv. AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) request. Díky tomu nemusí uživatel načítat stránku pokaždé když chce vidět aktuální informace a vše se aktualizuje téměř v reálném čase bez nutnosti jakékoliv interakce klienta.

2 Řešení a výsledky

V této sekci jsou ukázány postupy a výsledky praktické části této diplomové práce, jejímž hlavním cílem je vytvoření funkčního systému, který vznikl fúzí vícera senzorů tak, aby spojil některé jejich samostatné výhody.

Nejdříve je zde popsáno a otestováno, jakým způsobem jsou schopny zvolené senzory fungovat pro detekci, lokalizaci a počítání osob samostatně. Následně je ukázaný vývoj systému, který kombinuje jejich funkční části včetně zapojení, konceptu, algoritmu, testování, vyhodnocení a návrhu krytu, do kterého by se dal celý systém uzavřít pro použití v praxi.

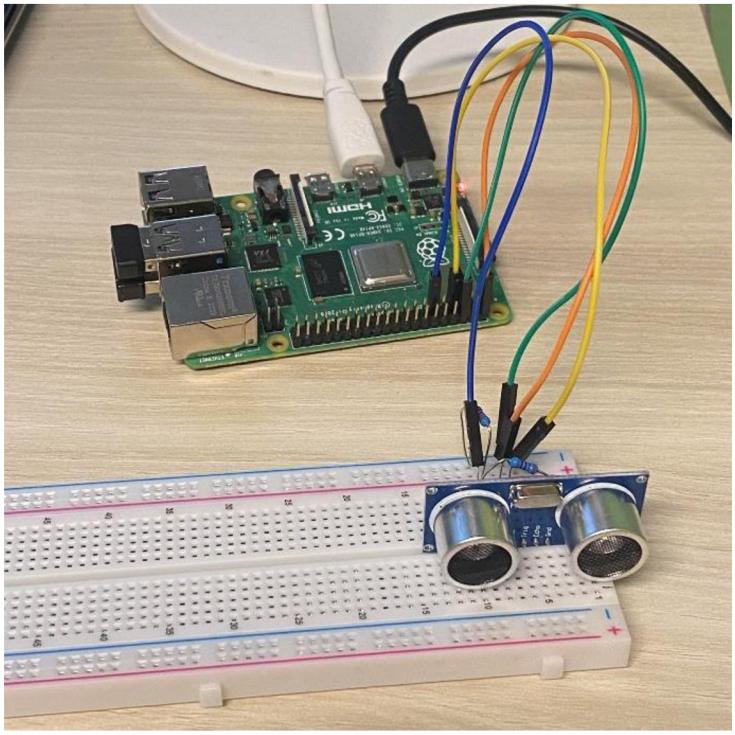
2.1 Testování detekce, lokalizace a počítání lidí samostatných senzorů

Jak již bylo zmíněno, nejdříve byly všechny senzory testovány samostatně, což je ukázáno v této kapitole. Toto separátní testování bylo provedeno zaprvé pro ověření fungování každého senzoru, ale za druhé také pro názorné srovnání, čeho jsou schopny jednotlivě a čeho je schopen systém jako celek po jejich fúzi. Cílem je dosáhnout výsledku, který by bez fúze nebyl možný.

2.1.1 Ultrasonické senzory

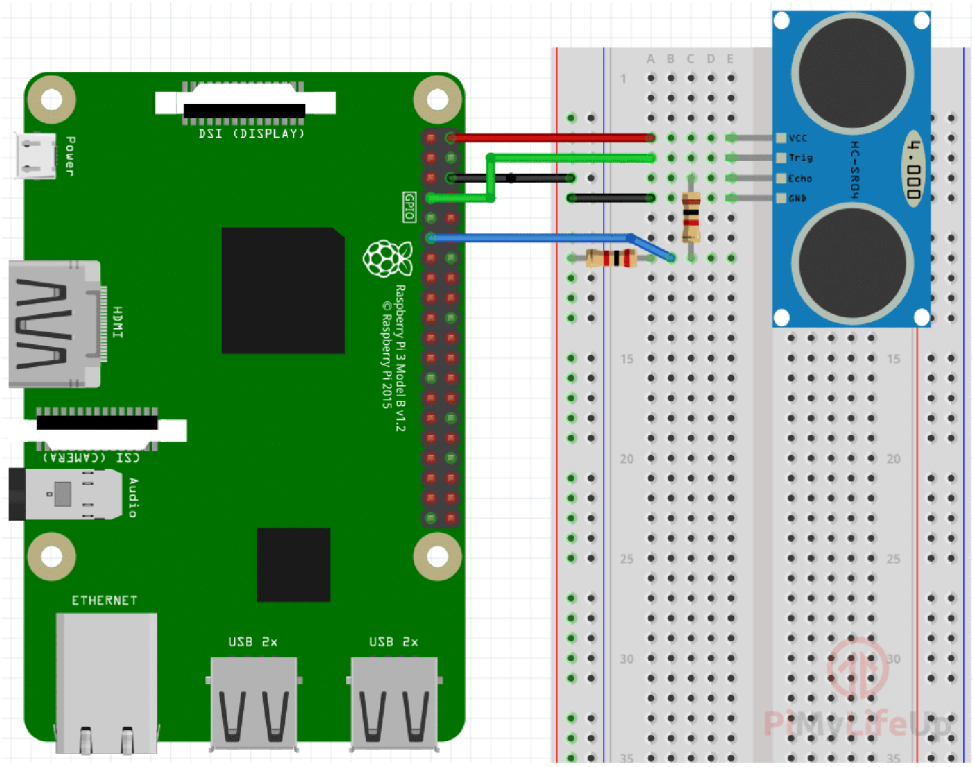
Ultrasonické senzory samy o sobě nejsou schopny spolehlivě lokalizovat ani počítat lidi v rámci místnosti, aniž by jich bylo použito velké množství po celém zkoumaném prostoru nebo motorizované uchycení, které by umožňovalo skenovat prostor ve dvou dimenzích místo dimenze jedné, ve které jsou nativně schopny měřit. Obě tyto řešení jsou však velmi nepraktické, a tak byly tyto senzory testovány samostatně pouze pro funkci počítání lidí.

Senzor HY-SRF05 má pět výstupů: GND, OUT, Trigger, Echo a Vcc. Výstup OUT v našem případě nevyužíváme, GND propojíme se zemí na Raspberry Pi, Trigger a Echo připojujeme na GPIO piny. Zapojení je znázorněno na Obrázku 32 a 33.



Obrázek 32 – připojení ultrasonického senzoru k řídící jednotce

Jelikož tento ultrasonický senzor nativně s napětím 5 V, ale naše řídící jednotka pracuje s 3,3 V logikou, je třeba použít rezistory a vytvořit tak napěťový dělič mezi pinem Echo a řídící jednotkou.



Obrázek 33 – zapojení senzoru k řídící jednotce [68]

Poté co byly zapojeny oba sensory tímto způsobem, byla otestovaná jejich funkčnost. Pomocí jednoduchého programu bylo možné vypočítat na základě doby ozvěny ultrasonického signálu vzdálenost překážky od senzorů. Na základě testování bylo zjištěno, že spolehlivé měření je zaručeno pouze do maximální vzdálenosti cca 2-3 metrů, kdy byla zjištěna maximální naměřená odchylka 10 centimetrů, přestože datasheet produktu uváděl měření až do 4,5 metru. Pro uvažovaný systém byla však tato vzdálenost dostatečná, jelikož mají být senzory použity blízko dveří, a tak byly tyto senzory i dále použity.

V rámci dalšího testování byl vytvořen algoritmus, který byl schopen na základě toho, který ze senzorů zaznamenal změnu měřené vzdálenosti jako první, určit počet lidí vstupujících do místnosti i vystupujících z ní. Po odečtení těchto hodnot je tedy možné určit aktuální obsazení místnosti. Takovéto počítání lidí bylo testováno v poloze stejné jako na Obrázku 42 pro 100 standartních průchodů a systém bezchybně určil aktuální počet. Kromě standartních průchodů byl systém také testován na speciální podmínky, kdy byla očekávána chyba.

Na základě tohoto testování byl následně algoritmus vyladěn, aby omezil nesprávné zaznamenávání průchodu v případě, že někdo před senzory pouze staticky stojí. Některé nedostatky, ale jednoduše z principu fungování nebylo možné doladit. Příkladem je zejména moment, kdy skrze dveře prochází dva lidé zároveň. Tuto akci systém nevyhnutelně vyhodnotí jako průchod pouze jednoho člověka, což se podepíše na nesprávnosti určení počtu lidí v místnosti. S tímto nedostatkem se tedy musí počítat, jelikož z principu metody toto není možné nijak ošetřit. V ostatních případech však funguje systém velmi dobře a senzory jsou tedy schopny určovat počet lidí i za všech světelných podmínek, aniž by bylo potřeba fúze s dalšími senzory. Lokalizace a detekce však v místnosti již možná samostatně není.

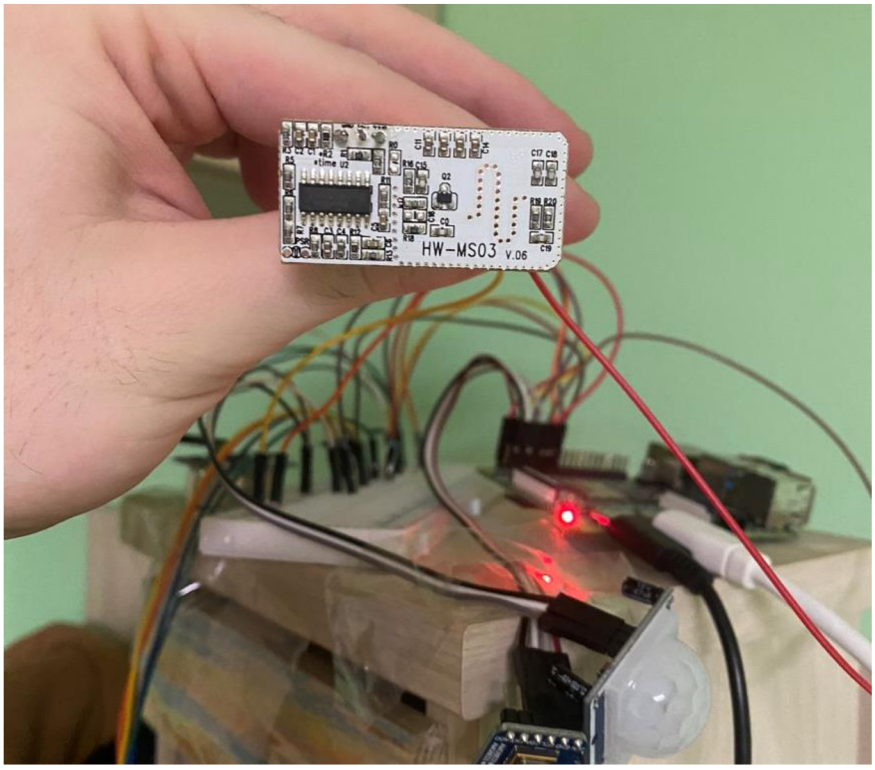
2.1.2 Mikrovlnný senzor

Radarové senzory se v praxi dají používat i pro lokalizaci nebo počítání lidí v prostoru. Senzory, které jsou toho schopné však jsou poměrně drahé a náročnost vytvoření dobře fungujícího algoritmu je náročná, pokud nekoupíme již vytvořené řešení od výrobce, které ale dále zvedá cenu systému. Pro účely této práce byl tedy zvolen naopak radarový senzor velmi levný, jehož jediným účelem je detekovat pohyb. Zvolený mikrovlnný senzor má pouze 3 výstupy: GND, Out a Vcc. Datový výstup Out můžeme připojit přímo na jeden z GPIO pinů Raspberry Pi. To dále zjednodušuje práci s daty, jelikož není třeba pro tento účel data nijak dále zpracovávat a zjišťujeme přímo buď výstup 1 (je detekován pohyb) nebo 0 (není detekován pohyb). Tímto se zdá být zajímavou alternativou například k PIR senzorům, jejichž výstup funguje na stejném principu. Jelikož navíce pracuje nativně s napětím 3.3 V je také kompatibilní s Raspberry Pi bez nutnosti napěťového děliče. Sensor v reálném zapojení je možné vidět na Obrázku 34.

Při samostatném testování bylo ověřeno, že tento senzor splňuje všechny očekávané vlastnosti a je schopen zaznamenat i relativně malé pohyby. Čím větší vzdálenost byla, tím větší pohyb byl nutný pro detekci. Důležité ale je, že při pohybech okolo 10 centimetrů byla otestována detekce až na vzdálenost osm metrů.

Nakonec jelikož je senzor stejně jako PIR senzor v rámci uvažovaného systému určen pouze pro detekci, byly testovány společně, abychom mohli zjistit, zda má nějaký význam jejich souběžné použití. Testováním se potvrdilo, že se senzory vzájemně velmi dobře doplňují následujícími způsoby:

1. Mikrovlnný senzor je citlivější při pohybu směrem k senzoru, naopak PIR senzor je citlivější na pohyb kolmý vůči němu
2. Mikrovlnný senzor má větší snímací vzdálenost i úhel, ale naopak doba reakce PIR senzoru se zdá být lepší pro zřejmé blízké pohyby
3. Mikrovlnný senzor je z principu schopen snímat pohyb i přes malé překážky, což PIR senzor nezvládá



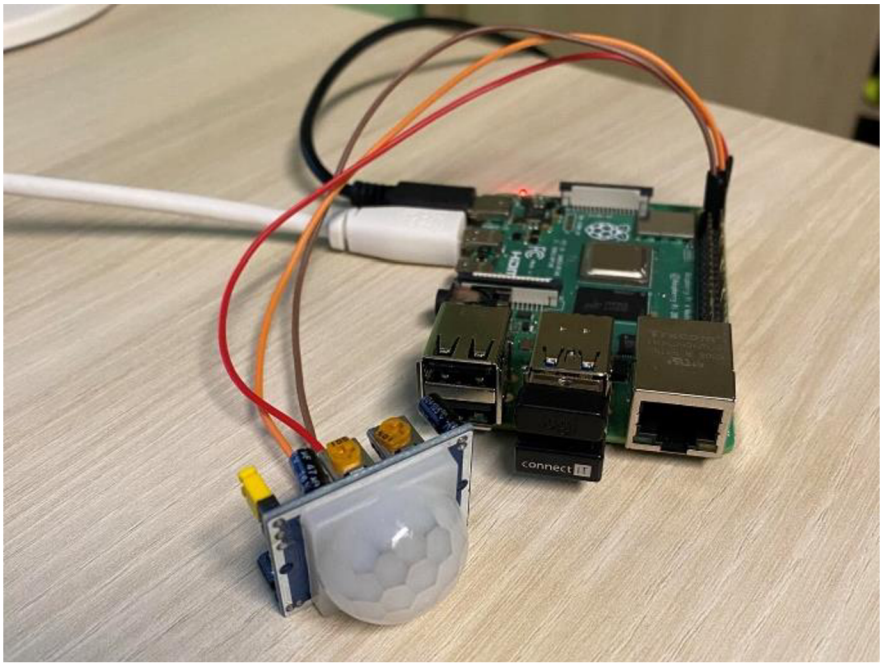
Obrázek 34 – senzor HW-MS03 v reálném zapojení

2.1.3 PIR senzor

PIR senzor, stejně jako mikrovlnný senzor standartně slouží pouze pro detekci pohybu lidí ve snímaném prostoru. Pro zapojení slouží 3 piny na výstupu: GND, Out a Vcc. Tento PIR senzor pracuje nativně s 3,3 V logikou, což je kompatibilní s Raspberry Pi. Výstupní Out je připojen na GPIO pin Raspberry Pi a má pouze dva stavy: je zaznamenán pohyb nebo není zaznamenán pohyb. Reálné zapojení je ukázáno na Obrázku 35. U tohoto konkrétního PIR senzoru je také výhoda jednoduché možnosti nastavení jeho citlivosti a času odezvy, díky čemuž je možné fungování senzoru přizpůsobit pro naše konkrétní použití. V naší aplikaci jsem senzor nastavil tak, aby měl co největší citlivost a po zaznamenání pohybu ukazoval na výstupu hodnotu 1 po dobu cca 3 sekundy. Tento časový interval se osvědčil jako ideální, aby hodnota výstupu nepřepínala při každém menším pozastavení člověka.

Samostatně byl senzor testován pro pohyb člověka po celé místnosti. Pro větší pohyby kolem 20 centimetrů senzor fungoval až na maximálně cca 7 metrů, což odpovídá hodnotě udávané výrobcem. Ideálně však fungoval ve vzdálenostech do 4 metrů, jelikož v tomto rozmezí byl schopen zaznamenat i relativně malé pohyby například člověka sedícího u stolu.

Jak již bylo zmíněno pro srovnání byl následně tento senzor testován souběžně s mikrovlnným senzorem, díky čemuž se ukázal význam použití těchto senzorů souběžně i přesto, že v principu plní oba stejnou funkci detekce pohybu.

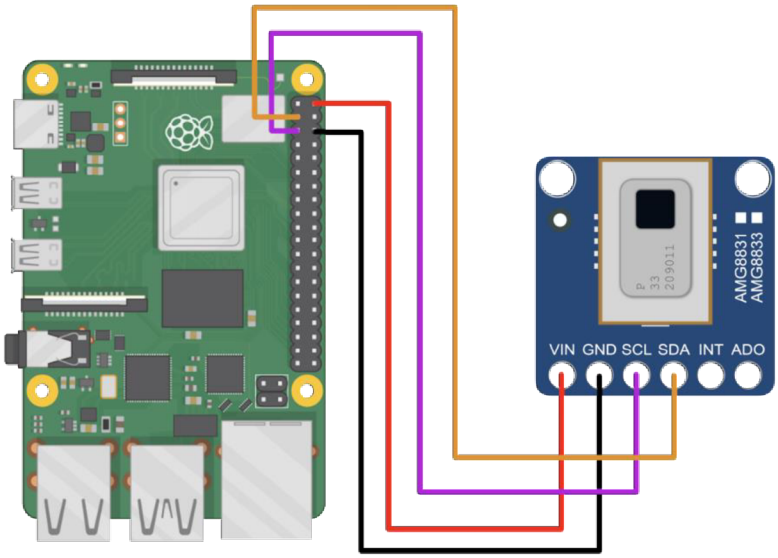


Obrázek 35 – PIR senzor HC-SR501 v reálném použití

2.1.4 Termokamera

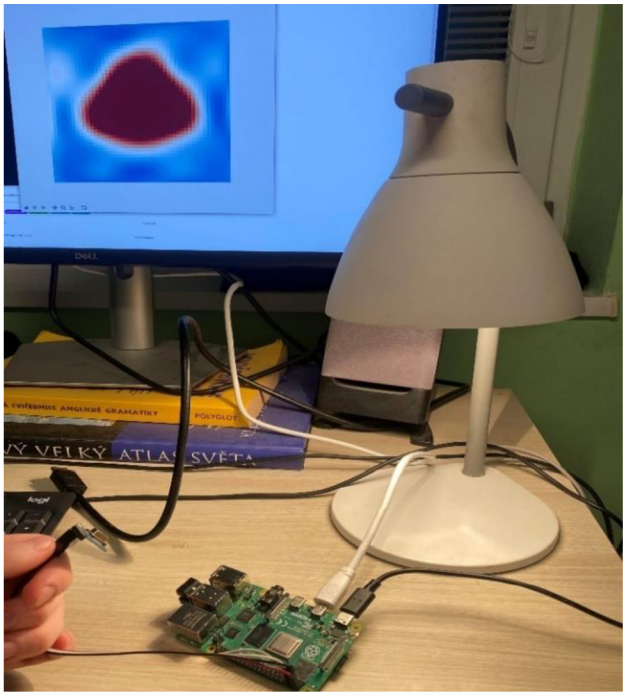
Dalším komponentem, který byl testován samostatně je termokamera AMG8833 Grid-Eye od společnosti Panasonic. Na rozdíl od předchozích testovaných senzorů je ji možné využít výrazně univerzálněji. Teoreticky je pouze pomocí této termokamery detekovat, lokalizovat i počítat lidi v místnosti.

K zapojení této kamery je vytvořeno 6 výstupů: VIN, GND, SCL, SDA, INT a ADO. Výstup INT a ADO jsem v rámci této práce nevyužíval, jelikož pro komunikaci přes sběrnici I2C stačí použít výstupní piny SCL a SDA. Ty stačí k Raspberry Pi připojit přes jakékoliv z 27 GPIO pinů. Konkrétní použité zapojení je naznačeno na Obrázku 36.



Obrázek 36 – zapojení termokamery AMG8833 k Raspberry Pi 4B [69]

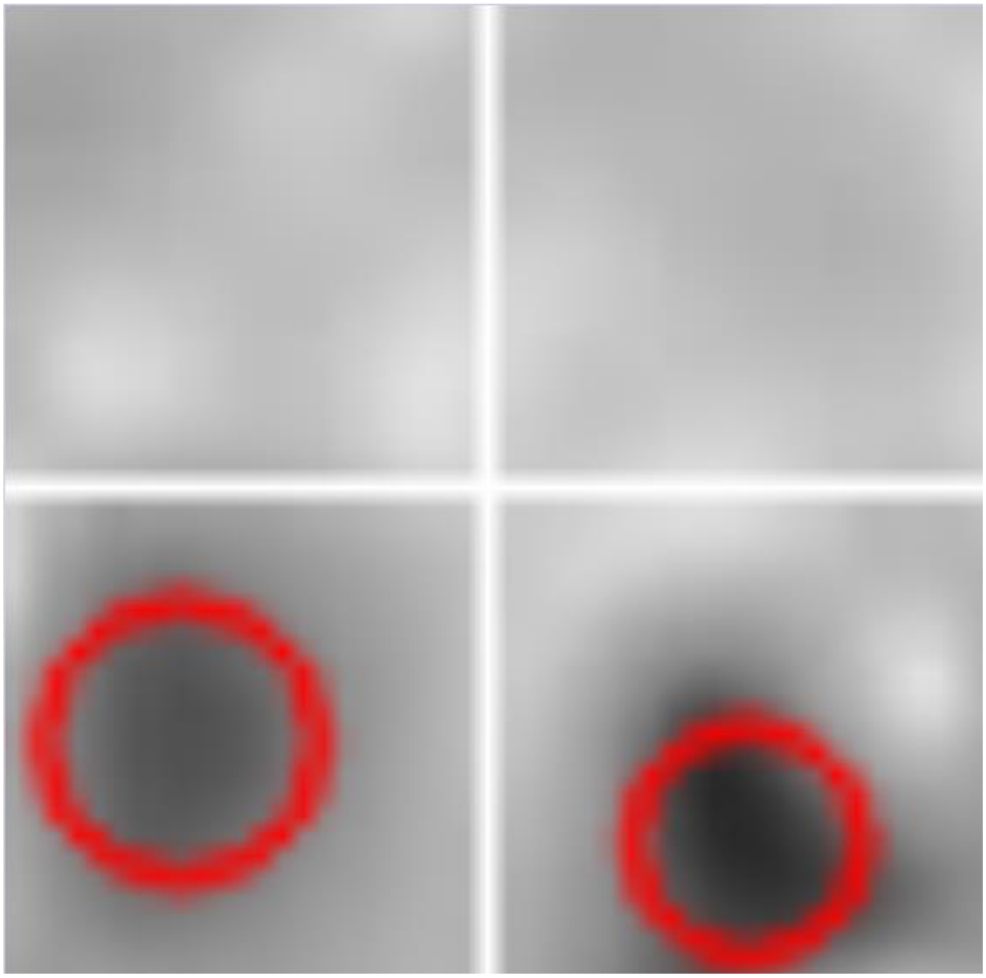
Samotné testování již bylo v tomto případě náročnější. Obraz, který lze vytvořit jednoduchým naformátováním hodnot 8x8 pixelů je velmi hrubý a prakticky není z něj možné identifikovat osobu ve větší vzdálenosti. Abychom mohli s daty lépe pracovat využíváme zde následně bikubickou interpolaci. Ta nám umožňuje vytvořit doplňující odhady přechodů mezi zaznamenanými pixely a každý odhad počítá na základě okolí 4x4 pixelů. Tímto obohacujeme celý obraz na rozlišení 48x48 pixelů, což celkově zjemňuje obraz. Vzniklý interpolovaný obraz je ukázán na Obrázku 37. Přestože nepřidáváme do obrazu žádná další reálná data ale pouze jejich uměle vytvořené odhady, je z něj více zřejmé, co se v obraze odehrává a je možné jej následně lépe zpracovávat dalšími metodami. Nevýhodou této metody může být, že uvažuje jemné přechody mezi pixely, což nemusí být ve všech případech pravda a algoritmus nám takto doplní světelný stín tam, kde už teoreticky nemusí být.



Obrázek 37 – interpolovaný obraz termokamery při natáčení horké lampy

Samotnou interpolací je částečně možné vidět, kde se osoby nacházejí v rámci obrazu. V našem případě však chceme, aby toto vyhodnocení polohy probíhalo v rámci programu.

Z toho důvodu bylo dále využito knihovny OpenCV. Ta obsahuje velké množství funkcí a integrovaných algoritmů, které umožňují zpracovávat obraz dle potřeby. Vzhledem k malému rozlišení termokamery není možné vidět přesně obrysy lidí, a proto byla pro zpracování využita primárně funkce Simple Blob Detector, která umožňuje jednoduše detekovat shluky bodů v obraze podobných parametrů. Výhodou zde je také možnost jednouchého nastavení typu shluků, které chceme detekovat, dle velikosti, barvy, kruhovitosti apod. To umožňuje rozlišit v obraze člověka od jiných teplých předmětů. Aby funkce fungovala co nejlépe, byl obraz také převeden do stupňů šedé. Nakonec pro názorné zobrazení uživateli bylo nastaveno, aby rozpoznané shluky, které dle parametrů odpovídají potencionálně člověku, byly zakroužkovány a vykresleny ve finálním obraze (viz Obrázek 38).



Obrázek 38 – Zobrazení rozpoznání dvou lidí v místnosti pomocí termokamery

Při samotném testování byla zjištěna poměrně dobrá úroveň rozpoznání, pokud bereme v úvahu, že snímáme pouze 8x8 pixelů. Termokamera je schopná rozpoznat teplo člověka na maximální vzdálenost okolo pěti metrů. Zároveň není problém rozpoznat více lidí zároveň (maximálně byly testovány 4 osoby) v případě, že se nenachází příliš blízko sobě. Při přiblížení (překrytí z pohledu kamery) však lidé splývají v jeden shluk bodů a kamera je tedy zaznamenává jako jednoho člověka.

Pro porovnání je tedy termokamera pro lokalizaci nebo počítání osob rozhodně horší než RGB kamera ve standartních podmínkách, jelikož na výstupu máme výrazně méně dat ke zpracování. Avšak velmi zásadní výhodou je univerzálnost jejího použití, protože není nijak ovlivněna světelnými podmínkami, což z ní dělá zajímavou možnost pro použití v případech, kdy ji chceme aplikovat také například v noci a nepotřebujeme nutně vysokou přesnost počítání lidí v obraze. Pro detekci obsazení některého úseku obrazu stačí. Další výhodou je nižší náročnost zpracování obrazu, jelikož pracujeme s malým množstvím dat oproti klasické RGB kameře. To umožňuje například rychlejší frekvenci snímání nebo menší zahřívání řídící jednotky, která data zpracovává.

Pro samotné počítání lidí pak naopak může být u místností s jedním vchodem lepší použít ultrasonické senzory u dveří, jelikož ty také nejsou ovlivněny světelnými podmínkami a výstup (dle našeho testování) je stabilnější.

Pro samotnou detekci člověka je termokamera sice funkční, ale v porovnání s vhodnými radarovými nebo PIR senzory je pro tento účel příliš drahá, pomalá a má menší rozpětí snímaného prostoru.

2.1.5 RGB kamera

Posledním testovaným komponentem této diplomové práce byla Raspberry Pi kamera v1.3. Stejně jako v případě termokamery je s pomocí ní samostatně možné detekovat, počítat i lokalizovat lidi.

Zapojení této konkrétní kamery k řídící jednotce Raspberry Pi je velmi jednoduché, jelikož je přímo pro kamery tohoto typu připraven jeden konektor CSI. Tento konektor je přímo v ceně také připraven na samotné kameře a není tedy třeba zabírat žádné další piny Raspberry Pi (viz znázornění na Obrázku 39).

Obrázek 39 – Ukázka zapojení Rasberry Pi kamery v1.3 k řídící jednotce přes CSI konektor [70]

Při testování byla pro pořízení obrazu a základní zpracování opět využita knihovna OpenCV. Díky vysokému rozlišení byla možnost hlouběji zpracovat obraz pro vysokou šanci rozpoznání člověka pomocí dalších nástrojů.

Vzhledem k velkému rozšíření použití RGB kamer existuje rozsáhlé množství knihoven, které umožňují zpracování obrazu dle konkrétních potřeb. Jednou z nejobsáhlejších knihoven pro detekci objektů je COCO (Common Objects in Context) knihovna, která byla využita v této práci. Obsahuje velmi rozsáhlý dataset a systém na rozpoznávání objektů na základě před trénovaných konvolučních neuronových sítí, což zaručuje vysokou míru správné klasifikace objektů. Program lze zároveň relativně jednoduše nastavit tak, aby jediným rozpoznávaným objektem byl člověk, což je ideální pro naše použití.

Obrázek 40 – zpracovaný výstup RGB kamery

Na Obrázku 40 je již možné vidět, jakým způsobem vypadá výstup obrazu, který zpracujeme pomocí COCO knihovny. Díky neuronovým sítím a široké databázi obrázků jsme schopni nejen určit polohu člověka v obraze, ale také zapsat pravděpodobnost, se kterou je tento člověk správně detekován.

Při samostatném testování této kamery bylo ověřeno, že za standartních podmínek je s ní tímto způsobem velmi dobře detekovat, počítat i lokalizovat lidi v rámci místnosti. Ve většině případů algoritmus neměl problém detekovat ani sedícího člověka, více lidí zároveň (testovány maximálně 4) anebo člověka ve větší vzdálenosti (testována byla maximálně vzdálenost cca osm metrů).

To vše dělá z této kamery dobrý komponent pro všechny požadované vlastnosti systému vytvářeného v této práci. Přesto však můžeme najít několik nedostatků, které lze fúzí s jinými senzory vylepšit. Hlavním je samozřejmě neschopnost kamery rozpoznat jakýkoliv pohyb při zhoršení světelných podmínek (např. setmění). Dále se ale také projevuje jako nevýhoda samotné zpracování tohoto obrazu. Jelikož kamera dává na výstup obraz s vysokým rozlišením, je sice možné lépe detekovat objekty, zároveň je však celý proces poměrně výpočetně náročný, a to obzvláště při využití komplexních algoritmů COCO knihovny. To způsobuje, že řídící jednotka Raspberry Pi je schopná zpracovat maximálně cca 1 snímek za sekundu. V praxi to znamená, že pro například samotnou detekci pohybu je následně tento systém výrazně pomalejší než při použití jednoduchých radarových nebo PIR senzorů.

2.2 Základní koncept a východiska systému

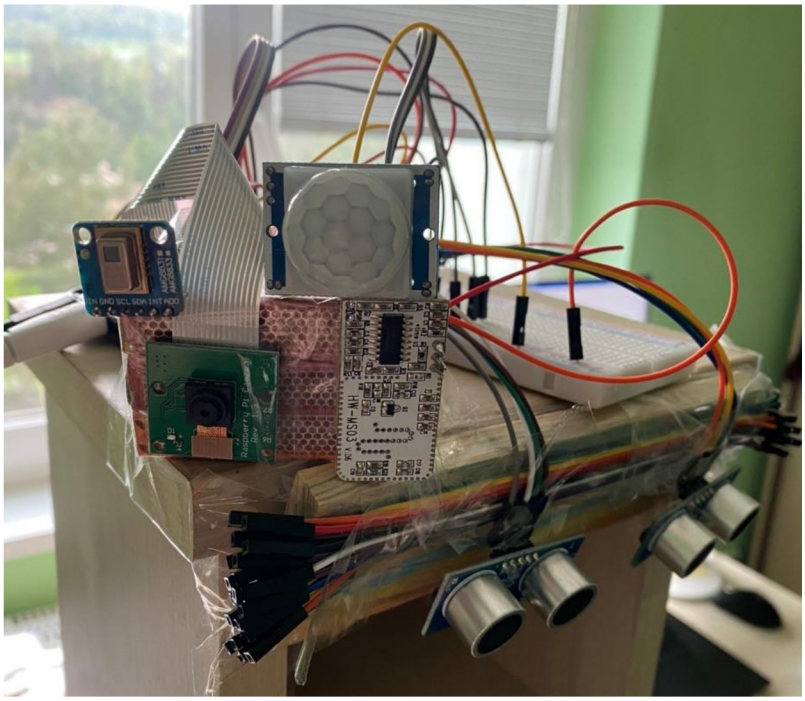
Před vytvořením samotného výsledného systému pomocí fúze více senzorů, je třeba si definovat, jaké požadavky na systém máme. Koncept celého výsledného produktu lze definovat pomocí těchto základních hledisek: cena, funkce a prostředí, ve kterém bude systém použitý.

Cena – Cílem je vytvořit dohromady fungující celek, který je však založený na nejlevnějších možných komponentech, které jsou schopné alespoň přijatelně splnit jim přidělenou funkci v rámci předem definovaného prostředí. Tím by mělo být ověřeno, zda kombinace více levných senzorů má potencionální výhodu oproti drahému senzoru jednoho typu. Zároveň by nejlépe i přes použití většího množství senzorů měl být levnější než některé specializované jedno senzorové řešení, které jsou na trhu nabízeny.

Funkce – Výsledný systém musí být schopen detekovat pohyb, počítat lidi v místnosti a určit alespoň jejich přibližnou polohu v rámci snímané plochy. Podstatné je ale také, že by měl systém být schopen fungovat i za všech světelných podmínek – tma nebo například přímé prudké světlo přes okno. Všechny tyto funkce by zároveň měly být dostatečné úrovně na to, aby byly potencionálně lepší než některé jiné řešení nabízené na trhu využívající senzor pouze jednoho typu.

Používané prostředí – Uvažované prostředí je místnost menších rozměrů (např. meetingová místnost nebo menší laboratoř) o maximální velikosti 7x7 metrů a s pouze jedním vstupem. Přestože bude snaha vytvořit systém co nejuniverzálnější, v takovémto prostředí by měl fungovat nejlépe a bude také testován v místnosti podobného charakteru. Důležité je, že místnosti tohoto typu jsou velmi časté například v rámci firem, škol i domácností, a tak by měl mít systém potencionál reálného využití.

2.3 Použité zapojení a uspořádání



Obrázek 41 – uspořádání všech použitých senzorů

Pro vytvoření finálního systému byly použity všechny zmíněné senzory, které již byly testovány samostatně. Stejně tak zapojení odpovídá tomu uvedenému v těchto sekcích, jediným rozdílem bylo propojení napájení pro některé komponenty přes nepájivé pole, jelikož Raspberry Pi nemá dostatečný počet výstupních napájecích pinů pro takové množství senzorů (viz zapojení na Obrázku 41). Ze stejného důvodu byly na nepájivém poli propojené země některých senzorů.

Co se týče uspořádání, je podstatné, že celý systém je umístěný u jednoho z vrchních rohů vstupních dveří, tak jak je znázorněno na Obrázku 42. Termokamera, RGB kamera, PIR senzor i radarový senzor jsou pak uchyceny takovým způsobem, aby jejich snímané pole pokrývalo co největší plochu místnosti. Naopak senzory ultrasonické jsou nasměřovány tak, aby jejich vysílaný signál byl paralelně se dveřmi se vzájemným rozestupem několika centimetrů. Pro co nejlepší fungování je nutností, aby také byly nasměřovány tak, že člověk vcházející do místnosti musí nevyhnutelně tyto signály přerušit. Tím je zaručeno, že ho systém zaznamená.

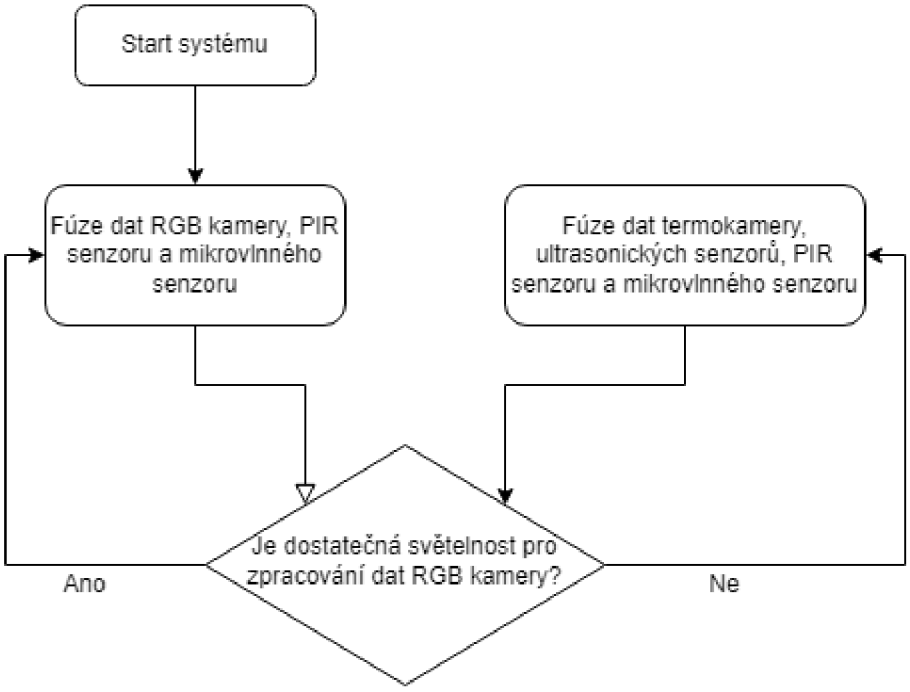
Obrázek 42 – testovaná poloha senzorů

2.4 Algoritmus

Vytvářený algoritmus by měl co nejlépe spojovat fungování jednotlivých senzorů tak, abychom byli schopni detekovat, lokalizovat i počítat lidi v místnosti. Kromě těchto funkcí lze jeho fungování značně rozlišit do dvou stavů:

1. **Světelné podmínky jsou dostatečné pro zpracování obrazu RGB kamery** – V tomto případě funguje systém v režimu RGB kamera v kombinaci s PIR senzorem a radarovým a senzorem. Data termokamery a ultrasonických senzorů pro lokalizaci a počítání lidí jsou za dobrého osvětlení méně spolehlivá než zpracovaná data RGB kamery. Naopak pro samotnou detekci pohybu jsou typicky rychlejší senzory PIR a radarové, takže je i v tomto stavu používáme.

2. **Světelné podmínky nedostatečné pro RGB kameru** – V takovém případě pro plnění stanovených funkcí využíváme kombinace všech senzorů kromě RGB kamery, jelikož data z ní jsou v tomto případě prakticky nepoužitelná.



Obrázek 43 – diagram základního fungování systému

Rozlišení, zda jsou světelné podmínky dostatečné (viz Obrázek 43) pro zpracování dat RGB kamery je vyhodnoceno z dat RGB kamery samotných. Na základě váženého průměru hodnot jednotlivých pixelů jsme schopni jednoduše určit přibližné aktuální světelné podmínky, aniž bychom celý systém zdržovali náročným zpracováním RGB obrazu pomocí neuronových sítí při podmínkách nedostatečných. Toto ověření aktuálního stavu probíhá v rámci každého cyklu algoritmu, takže je systém na změnu schopen reagovat velmi rychle.

V následujících sekcích je popsáno, jakým způsobem funguje systém pro plnění jednotlivých funkcí detekce, lokalizace a počítání lidí. Všechny tyto funkce však fungují souběžně a uživatel má možnost vidět výstup všech těchto funkcí zároveň přes server.

2.4.1 Detekce pohybu osob

Co se týče samotné detekce pohybu člověka, spoléhá se algoritmus zejména na vzájemné doplnění senzoru radarového a PIR senzoru. Jelikož tyto senzory přímo dávají na výstup hodnotu 1 v případě, že zaznamenají pohyb, je zpracování velmi jednoduché. Prakticky v tomto případě spočívá fúze pouze v souběžném kontrolování obou sensorů, a sledujeme, zda alespoň jeden z nich zaznamenává pohyb. To zvyšuje citlivost detekce pohybu systému. Všechny výhody tohoto vzájemného doplnění již byly zmíněny v kapitole 2.1., ve které byly tyto senzory testovány separátně bez zbytku systému.

Při dostatečných světelných podmínkách je navíce brán v potaz zpracovaný obraz RGB kamery. Pokud na základě něho vyhodnotíme, že se již v místnosti nachází člověk, ale ani jeden ze zbylých senzorů jeho pohyb nezaznamenal, znamená to totiž pravděpodobně, že se člověk pohybuje tak málo, že ho pouze není schopen zachytit PIR senzor ani senzor radarový. A tedy detekce člověka je uživateli tedy zobrazena jako aktivní i v tomto případě.

Naopak za světelných podmínek nedostatečných pro RGB kameru bylo nakonec vyhodnoceno, že se budou uvažovat pouze samotná data PIR a radarových senzorů. Termokamera má totiž v tomto případě vyšší pravděpodobnost chybného zaznamenání člověka než RGB kamera, jelikož pracuje s menším množstvím dat, což by údaje o detekci mohlo spíše zhoršovat.

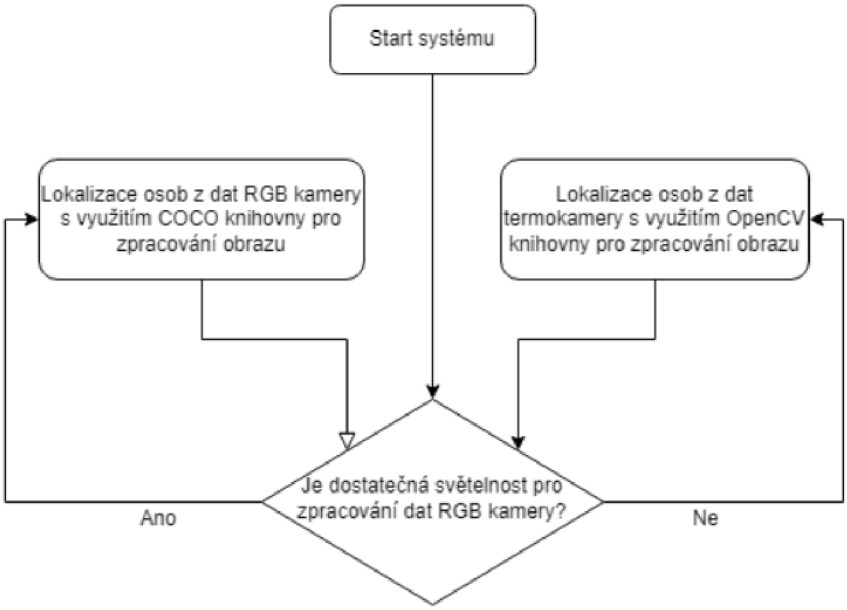
2.4.2 Lokalizace osob

Lokalizaci lidí v prostoru se opět liší dle dvou základních stavů stanovených na základě světelných podmínek (viz Obrázek 44). V případě, že jsou světelné podmínky dostatečné, používá se pro lokalizaci osob v rámci místnosti RGB kamera s využitím COCO knihovny pro určení polohy člověka. Přesnější popis, jakým je RGB kamera použita je již popsán v kapitole 2.1.5.

Naopak při nedostatečných světelných podmínkách je využito dat termokamery. Zde je využito OpenCV knihovny (bez využití neuronových sítí). Bližší popis je již popsán při samostatném testování termokamery v kapitole 2.1.4.

Jediným rozdílem zde je, že jsem ve finálním systému navíce rozdělil obraz termokamery na 4 sekce. Tímto způsobem si uživatel může nastavit kameru, tak aby pokrývala určitá pracoviště a výsledný algoritmus je naprogramován tak, aby nejen ukazoval přibližné určení polohy z termokamery, ale zároveň vypisoval, které z těchto 4 pracovišť je obsazené. Tato funkce byla doplněna, jelikož lokalizace pomocí termokamery je pouze velmi přibližná a uživatel není schopen z obrazu s jistotou určit, kde přesně se člověk nachází. Navíce se v datech v některých krátkodobých momentech zobrazují chybné určení. Toto zpracování tedy umožňuje předat přehlednější data lokalizace člověka v místnosti a pro jejich určení nezáleží, zda je u pracoviště jeden nebo více lidí, které termokamera v malém prostoru stejně není schopna rozlišit. Zároveň je v algoritmu ošetřeno krátkodobé chybné určení polohy člověka, jelikož zaznamená obsazenost daného stanoviště až po krátkém časovém úseku, kdy termokamera zaznamenává stabilně člověka v dané oblasti.

U zpracování RGB kamery není takové zpracování potřebné, jelikož určení polohy je výrazně přesnější a uživatel vidí také samotný obraz prostoru, ze kterého si jednoduše může ověřit, zda RGB kamera opravdu správně detekovala člověka. Porovnání zobrazení obrazů lokalizace za různých světelných podmínek je znázorněno na Obrázku 45.



Obrázek 44 – diagram lokalizace

Obrázek 45 – srovnání lokalizace osoby ve stejné poloze ve tmě (nalevo) a za světla (vpravo)

2.4.3 Počítání osob

Stejně jako u ostatních funkcí, i pro počítání lidí se fungování této funkce výrazně liší dle světelných podmínek snímaného prostoru (viz diagram na Obrázku 46). V případě dobrých světelných podmínek se algoritmus spoléhá na data lokalizace osob RGB kamery. Jelikož je s pomocí RGB kamery zmíněným způsobem možné s dobrou přesností určit polohu i vícero lidí, je možné je na základě této metody také následně spočítat.

Naopak při zhoršených světelných podmínkách se vytvořený algoritmus spoléhá primárně na dva ultrasonické senzory. Jejich použití pro počítání lidí je již popsán v kapitole 2.1.

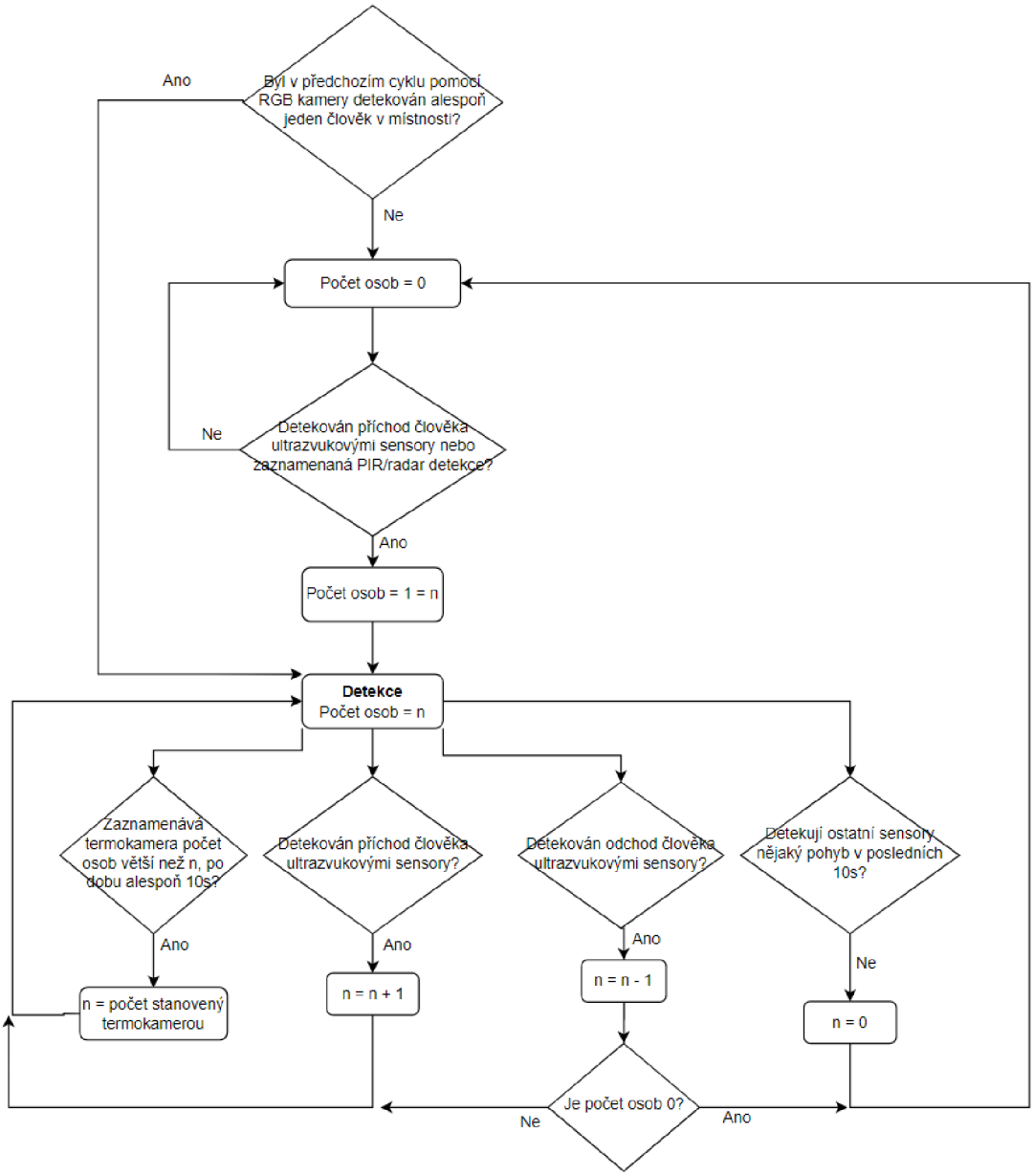
Pro větší robustnost systém jako celku je však v některých případech ovlivněn počet lidí ostatními senzory. V případě, že v předchozích cyklech byl zaznamenán určitý počet lidí

pomocí RGB kamery, převezme se tato hodnota i pro počátek počítání pomocí senzorů ultrasonických. Tím je možné uvažovat i lidi, které se již nachází v místnosti.

Dalším doplňujícím prvkem jsou data termokamery. Ty sice obecně pro stabilní určení počtu lidí nejsou příliš vhodné, avšak v případě, že stabilně ukazují větší počet lidí v místnosti, než bylo detekováno ultrasonickými senzory, je proměnná počtu lidí aktualizovaná dle této hodnoty. Tím je opět možné omezit nesprávné čtení pomocí ultrasonických senzorů například v případě, že snímaným vstupem projde více lidí zároveň.

Dalším kontrolním prvkem jsou PIR a radarový senzor, které jsou určeny pro detekci. Pokud stabilně detekují pohyb člověka v místnosti, potvrzuje to, že se alespoň jeden člověk v místnosti nachází. Dle toho je opět aktualizovaná hodnota proměnné určujících počet lidí v místnosti na hodnotu 1, což opět zpřesňuje tento výstup.

Posledním kontrolním prvek ultrasonických senzorů je stav, kdy žádný z ostatních senzorů nedetekuje žádného člověka v místnosti po dobu 10 sekund. V tomto případě dojde k vynulování proměnné počtu lidí, což umožňuje ošetřit případy, kdy odejdou dveřmi dva lidé zároveň, což způsobí špatné spočítání pomocí ultrasonických senzorů.



Obrázek 46 – diagram algoritmu pro počítání lidí ve zhoršených světelných podmínkách

2.4.4 Sdílení s uživatelem přes server

Poslední částí algoritmu, kterou bylo třeba naprogramovat, bylo sdílení výstupních proměnných všech předchozích částí algoritmu přes server. Těmito proměnnými byla stabilně detekce pohybu a aktuální spočet osob v místnosti. Dle světelných podmínek dále byl přes server sdílen zpracovaný obraz RGB kamery s lokalizací osob nebo naopak zpracovaný obraz termokamery včetně lokalizace. V případě termokamery však zároveň bylo separátně vypsáno, které ze 4 sekcí jsou obsazeny, a které obsazeny nejsou.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4 Použité softwarové nástroje, využívám pro sdílení s uživatelem Flask, k vytvoření podoby stránky HTML a CSS, a k zaručení dynamického aktualizování všech proměnných bez nutnosti obnovení stránky samotné využívám tzv. AJAX request.

Abychom mohli na konkrétní místa stránky namapovat požadované proměnné, bylo využito app.route metody v rámci Flask frameworku. Zároveň je potřeba při sdílení převést proměnnou do JSON formátu, tak aby se s ní dalo lépe dále pracovat. Ukázkou může být sdílení proměnné počtu lidí:

```
@app.route('/number_of_people')
def number_of_people():
    return json.dumps({'number_of_people': number_of_people})
```

Po tomto zpracování již můžeme v rámci HTML kódu stránky využít Javascript a konkrétně zmíněný AJAX request pro aktualizaci proměnné:

```
    <div id="number_of_people"></div>
    <script src="https://code.jquery.com/jquery-
3.6.0.min.js"></script>
    <script>
      $(document).ready(function() {
        setInterval(function() {
          $.ajax({
            url: '/number_of_people',
            success: function(data) {
              $('#number_of_people').text('Number of people: ' +
data);
            }
          });
        }, 1000); // Update the variable every 1 second
      });
    </script>
```

Ze skriptu můžeme vidět, že v našem případě aktualizujeme proměnné každou 1 sekundu.

Pro sdílení obrazu však využíváme jiné metody. Zde používáme funkcí yield a Response v rámci Pythonu. To nám umožňuje po využití app.route metody namapovat obraz přímo na zdroj HTML bloku img, aniž by bylo třeba převádět obraz na json formát:

```
<img src="{{ url_for('video') }}"/>
```

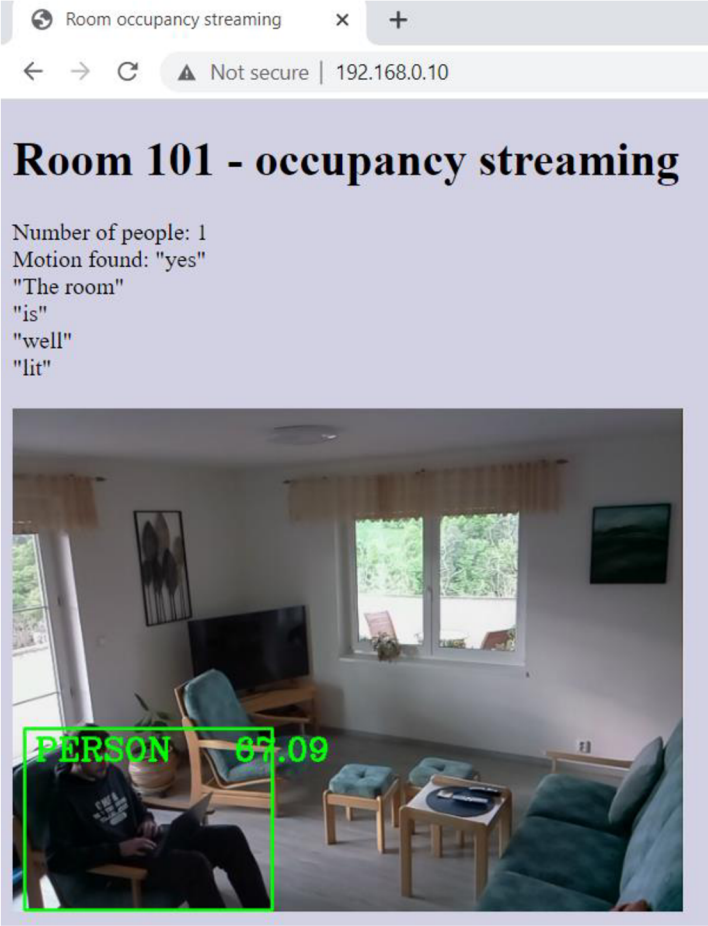
2.5 Testování

Pro otestování vytvořeného systému bylo zpracováno několik testovaných scénářů. Ty zahrnují pohyb 1 i více osob za různých světelných podmínek po celé ploše místnosti. Dále je zahrnuto testování speciálních případů, u kterých jsem předpokládal, že může dojít k problémům fungování systému. Hodnocení správného fungování bylo založeno na datech, které byly čteny ze serveru, tak aby to bylo srovnatelné s tím, jakým způsobem by systém použil uživatel v praxi. Celé testování probíhalo v místnosti 4,5x6,5 metru s okny, jedním vstupem a stropním osvícením. Pro každé ze světelných podmínek bylo testováno maximálně pohyb 4 osob najednou. V následující části jsou blíže popsány testované scénáře, jejich průběh a nakonec vyhodnocení.

2.5.1 Za dobrých světelných podmínek

1 osoba

V této části byla testována varianta, kdy se v místnosti pohybuje pouze jeden člověk. Ten vstoupí do místnosti a následně se na chvíli zastaví a posadí v každém rohu snímané oblasti. Tímto způsobem bylo možné zjišťovat správnost detekce a lokalizace na co největším rozpětí vzdáleností, ale také různé polohy člověka (při chůzi, v sedě, stojící na místě, otočený zády ke kameře, bokem i čelem k ní), abychom mohli zjistit, zda v některém z případů systém vykazuje chybné výsledky. Přenášený obraz je znázorněn na Obrázku 47.

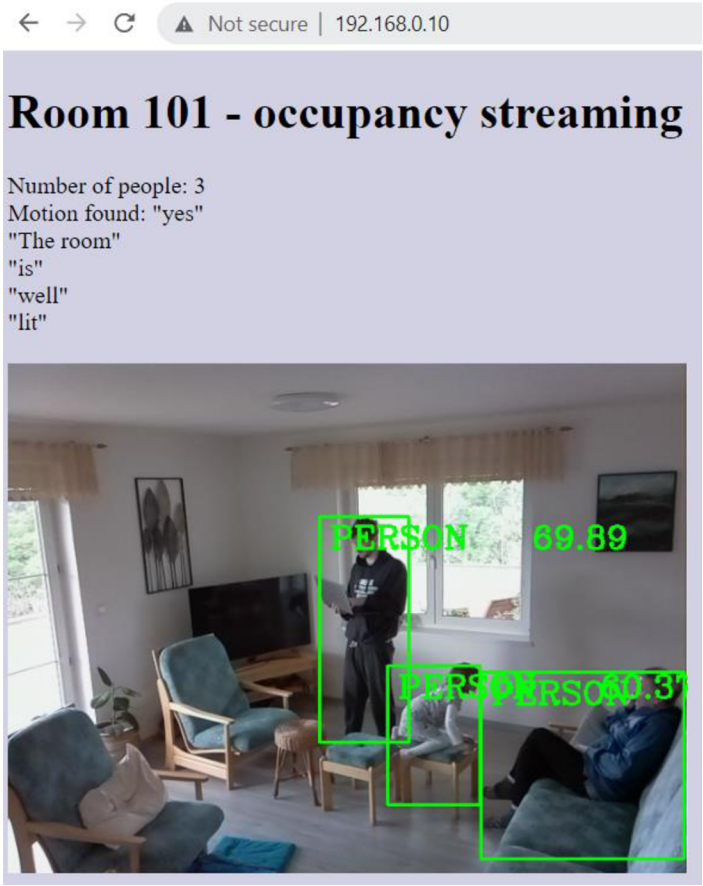


Obrázek 47 - Obraz přenášený klientovi přes server při pohybu jedné osoby v místnosti (za dobrého osvětlení)

Výsledky v tomto případě byly přesvědčivé, jelikož systém zaprvé detekoval přítomnost člověka téměř okamžitě a zobrazil, že již není nikdo detekován okamžik po jeho odchodu. Zadruhé lokalizace člověka fungovala s vysokou pravděpodobností, a jediné případy kdy občas došlo ke krátkodobému výpadku lokalizace byl při rychlém pohybu skrze místnost. Je třeba také zmínit, že zobrazovaný obraz není plynulý a aktualizuje se uživateli pouze cca 1 za sekundu kvůli náročnosti zpracování dat. Za dobrých světelných podmínek je funkce počítání osob v místnosti přímo navázána na funkci lokalizace osob, avšak v případě pouze 1 člověka systém uvažuje přítomnost 1 osoby již na základě detekce pomocí PIR a radarové senzoru. Z toho důvodu i ve výjimečných případech, kdy dojde k výpadku lokalizace pomocí RGB kamery, systém stále správně uvažuje 1 osobu v místnosti.

Více osob

Druhý testovaný scénář bylo testování fungování systému pro více lidí v místnosti zároveň (viz Obrázek 48). Pohyb všech osob byl opět testován včetně vstupu, výstupu a přesunu mezi jednotlivými stanovišti rozmístěními po celé rozloze místnosti. Tímto způsobem bylo zejména testována funkce počítání lidí a porovnání, zda má více lidí nějakým způsobem vliv na funkčnost systému.



Obrázek 48 – Obraz přenášený klientovi přes server při pohybu více lidí v místnosti (za dobrého osvětlení)

Výsledky tohoto testování ukázali, že větší osob lidí v tomto režimu systému nemá na snímání žádný vliv a detekce, lokalizace i počítání lidí fungovalo se stejnou úspěšností jako v případě testování pohybu jednotlivce v místnosti. Jedinou změnou bylo, že případ krátkodobé chyby lokalizace zde měl vliv i na počítání lidí, jelikož ze senzorů PIR a mikrovlnného nejsme schopni určit, zda je zaznamenáván pohyb jednoho nebo více lidí.

Speciální případy

1. **Člověk stojí v rohu místnosti, kde není dosah kamery** – Vzhledem k omezenému zornému poli RGB kamery vzniká v rohu místnosti malá část prostoru, která není monitorována. V tomto případě není možné jiným způsobem lokalizovat člověka a je tedy třeba počítat s tímto nedostatkem systému a nastavit kameru dle toho, jaká oblast je pro nás nejdůležitější. Samotná detekce vzhledem k širokému snímanému poli mikrovlnného senzoru však stále funguje velmi dobře a systém tedy je stále schopen detekovat osobu a ví, že minimálně jedna osoba se ve zbytku místnosti stále nachází.

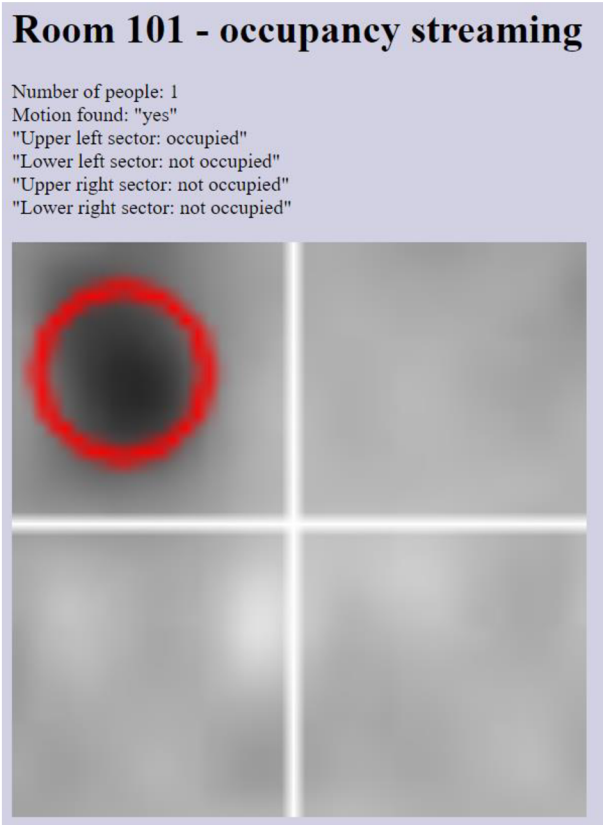
2. **Více lidí blízko sobě** – V některých případech, kdy se dva lidé částečně vzájemně v obraze RGB kamery výrazně překrývají dochází k nepřesnému určení počtu lidí. Tato situace je však ve většině případů pouze krátkodobá, ale je třeba s ní počítat. Lokalizace však vždy funguje správně alespoň pro jednoho z těchto lidí.

3. **Zhasnutí světel v místnosti** – V případě, že byly zhasnuty světla, systém se bezproblémově automaticky přepíná do režimu pro nedostatečné světelné podmínky, který je testován v následující sekci.

2.5.2 Za špatných světelných podmínek

Jelikož se fungování celého systému výrazně liší za dobrého světla a v podmínkách nedostatečných pro RGB kameru (ve tmě), byly scénáře pro 1 osobu a pro více osob opakovány stejným způsobem i v těchto podmínkách.

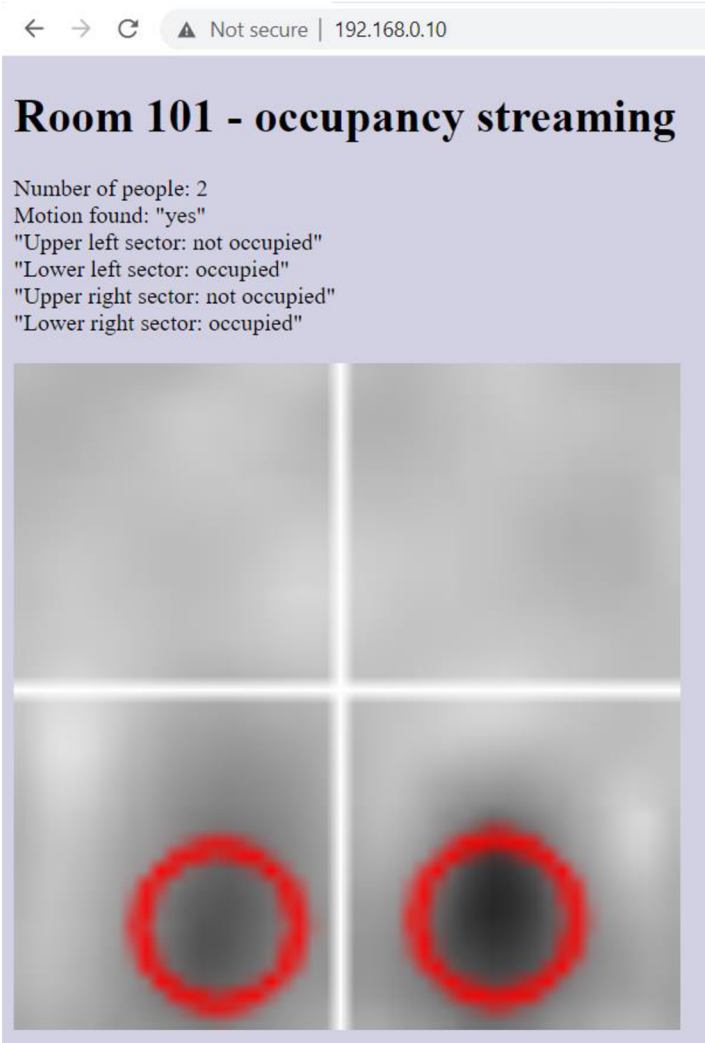
1 osoba



Obrázek 49 – Obraz přenášený uživateli přes server při pohybu jednoho člověka v místnosti (tma)

Výsledky byly i v tomto případě velmi dobré. Detekce člověka samotná fungovala prakticky stejně jako za světla, jelikož fungování PIR a radarových senzorů se se světelnými podmínkami nemění. Co se týče lokalizace, ta fungovala sice v principu hůře než z dat RGB kamery, ale pokud uvažujeme pouze určení, v jaké ze 4 sekcí obrazu se člověk nachází (jak je již popsáno v kapitola 2.4.2. lokalizace osob), tak byla správnost určení v mém testování bezproblémová. Počítání osob je v případě 1 osoby samozřejmě i v těchto podmínkách jednoduché, jelikož při detekci pohybu systém automaticky uvažuje, že se nachází v místnosti alespoň jedna osoba, takže zde byla úspěšnost prakticky zaručená.

Více osob



Obrázek 50 – Obraz přenášený klientovi při pohybu dvou lidí v místnosti

Výsledky testování pro více osob byly i v této variantě dobré. Naopak s výjimkou speciálních případů, které jsou dále zmíněny, bylo například počítání lidí ještě stabilnější, jelikož samotný pohyb lidí uvnitř místnosti již data ultrasonických senzorů nijak neovlivňuje. K selhání počítání zde mohlo dojít pouze při průchodu dveřmi. Lokalizace osob fungovala i pro více lidí dobře v rámci 4 stanovených sekcí. Detekce funguje primárně stále na stejném principu, takže zde ani ke zhoršení výsledků dojít nemohlo.

Speciální případy

1. **Více lidí blízko sobě** – Stejně jako u dat RGB kamery při dobrých světelných podmínkách, i v případě zhoršených světelných podmínek a snímání termokamerou dochází ke zhoršení vyhodnocení dat. Na rozdíl od použití RGB kamery se v tomto případě nespoléháme na termokameru pro počítání lidí, ale pouze pro jejich lokalizaci. Vzhledem k nízkému rozlišení termokamery a nastavení algoritmu dle předpokládaného shluku bodů v obraze pro detekci jednoho člověka, může zde dojít k neschopnosti lokalizace těchto lidí, jelikož snímaný tvar dvou lidí u sebe neodpovídá tomu předpokládanému.

2. **Vstup více lidí zároveň** – Za zhoršených světelných podmínek jsou za funkci počítání lidí primárně zodpovědné senzory ultrasonické. Pokud dojde k souběžnému vstupu více lidí kontrolovaným vstupem zároveň, dochází nevyhnutelně k dočasné chybě v počítání lidí v místnosti. Tato chyba je následně vyřešena při odchodu všech lidí z místnosti, anebo při stabilním zaznamenání těchto více lidí pomocí termokamery.

3. **Člověk stojí před ultrasonickými senzory** – Vzhledem k použití ultrasonických senzorů pro počítání lidí byla při stabilním narušení obou signálů očekávána chyba. Po testování byl algoritmus odladěn takovým způsobem, že pokud jsou přerušeny oba signály stabilně, nedochází k započítání odchodu ani příchodu. Pokud tedy k chybě dojde, je zde rozdíl v počtu pouze o 1 osobu, jelikož algoritmus v některých případech nesprávně určí, kterým směrem člověk nakonec po zastavení odejde.

4. **Člověk je celý zakrytý** – Tímto je myšlena situace, kdy je například člověk zády k termokameře. V této situaci má povrch člověka z pohledu termokamery nižší teplotu než standartně. V některých případech termokamera i přesto člověka zaznamená, ale obzvláště v případě, že se v místnosti nachází další člověk, který má odhalenou hlavu, může zde vznikat problém nepřesné lokalizace zahaleného člověka.

5. **Člověk stojí v rohu místnosti, kde není dosah kamery** – Tento problém samozřejmě vzniká i za zhoršených světelných podmínek, kdy se člověk nachází mimo zorné pole termokamery. Toto již bylo popsáno v případě speciálních případů testování za dobrých světelných podmínek.

2.6 Vyhodnocení

Vyhodnocení systému provedu na základě hledisek stanovených v rámci konceptu uvažovaného systému v kapitole 2.2. a zaměřím se primárně na splnění funkčnosti s ohledem na proběhlé testování.

První základní funkcí, kterou měl systém splnit byla detekce člověka ve snímaném prostoru. Tato funkce byla primárně zajištěna pomocí PIR a radarového senzoru, ale některé krajní případy byly zároveň podchyceny pomocí RGB kamery i termokamery. Funkce byla splněna velmi dobře za všech světelných podmínek. Zejména je potřebné zmínit, že byl splněn předpoklad, že senzory se vzájemně doplňují a systém jako celek plní tuto funkčnost výrazně lépe, než jak to bylo možné splnit pomocí kteréhokoliv ze senzorů testovaných separátně.

Přestože bylo možné najít některé velmi vzácné příležitosti, kdy detekce nebyla správná (například pokud se člověk nacházel v rohu místnosti mimo snímané rozpětí RGB kamery a termokamery, a zároveň se vůbec nehýbal), úspěšnost určení detekce byla velmi vysoká, a takovéto případy by se již následně dali jednoduše ošetřit náhradou některých komponentů za dražší. Těmi by mohla být například RGB kamera nebo termokamera se širším polem snímání prostoru.

Druhou funkcí, kterou systém měl plnit bylo počítání lidí v místnosti. Způsob plnění této funkce se výrazně lišil dle aktuálních světelných podmínek a primárně se ní podílela RGB kamera a ultrasonické senzory. Některé krajní případy byly ale také zajištěny pomocí ostatních senzorů. Za standartních podmínek algoritmus pro počítání lidí fungoval bezchybně za všech světelných podmínek, a i v tomto případě bylo dosaženo výrazně vyšší přesnosti, než kdybychom použili některý ze senzorů samostatně.

V případě počítání lidí již existovalo více specifických případů, kdy mohlo dojít k chybnému určení. Příkladem může být více lidí za sebou v místnosti nebo při průchodu přes ultrasonické senzory. S těmito případy je však třeba počítat, jelikož ani dražší senzory by pravděpodobně nebyly schopny v tomto uspořádání určit počet lidí přesněji. Pro vyšší úspěšnost by bylo třeba výrazně upravit celý systém například přidáním kamery na další místo v místnosti, tak aby byla pokrytá kompletně celá a data kamer se mohly vzájemně doplňovat.

Třetí požadovanou funkcí byla lokalizace osob v místnosti. Tuto funkci dle světelných podmínek plnila RGB kamera nebo termokamera. Správnost detekce byla o něco lepší za dobrých světelných podmínek pomocí RGB kamery, jelikož poskytuje výrazně více dat. Avšak i v případě použití termokamery byla přesnost v drtivé většině případů dostatečná alespoň pro určení, ve které ze 4 sekcí obrazu se člověk nachází. I zde tak byl splněn požadavek, že výsledný systém je schopen lokalizovat člověka přesněji či ve více okolních podmínkách než při použití pouze jedné z kamer.

Lokalizace byla ze tří zmíněných funkcí nejnáročnější, a tak zde v některých specifických momentech docházelo k nepřesnostem. Příkladem je více lidí za sebou nebo lidé v rohu místnosti mimo zorné pole kamery. Tyto komplikace by v tomto případě z velké části mohli být eliminovány použitím dražších komponentů jako termokamera s vyšším rozlišením nebo kamery se širším zorným polem. Pokud ale porovnáme například cenu termokamery s vysokým rozlišením s cenou celého systému vytvořeného v této práci, můžeme vidět, že naše výsledky jsou více než adekvátní.

Stanovený koncept systému byl tedy splněn a na základě testování v předpokládaném prostředí použití bylo potvrzeno, že fúze více levnějších senzorů může ve výsledku vytvořit

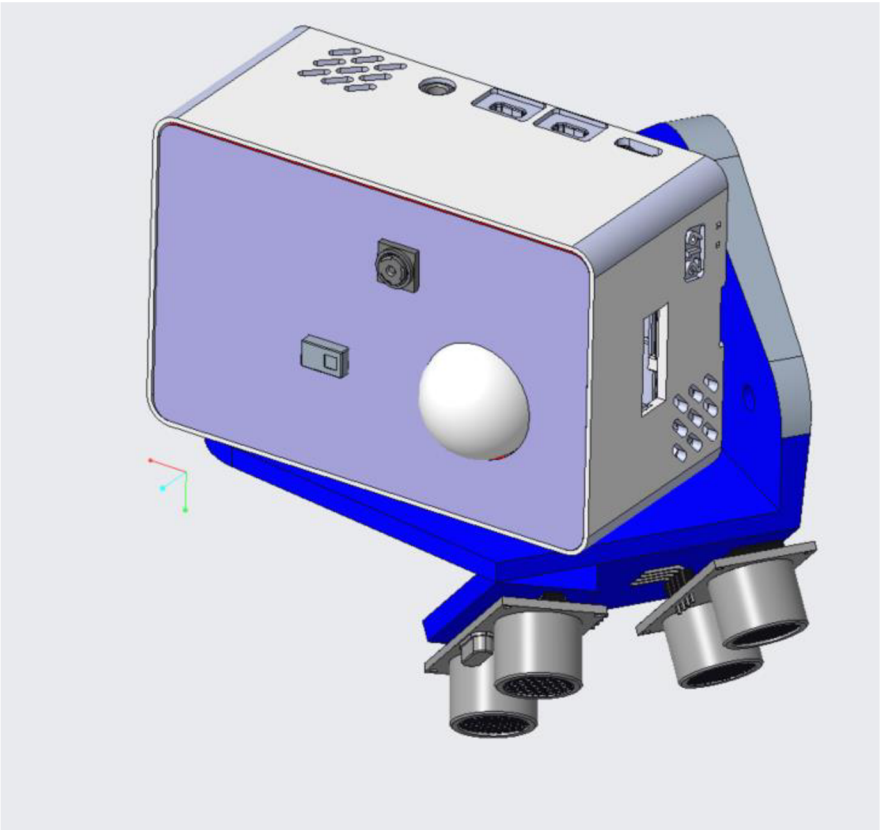
výrazně robustnější systém pro detekci, lokalizaci a počítání lidí než při použití jednoho dražšího senzoru.

2.7 Vytvoření modelu uchycení systému

Primární účel této práce bylo vytvořit systém, který ukáže, jakými způsoby se mohou vhodně senzory doplňovat při detekci, lokalizaci a počítání lidí na reálně otestovaném prototypu. Pro doplnění je v této sekci dodatečně vytvořen 3D model krytu, do kterého by mohl být celý systém usazen a držák, přes který by byl následně přidělán na vhodné místo ve snímané místnosti.

Kryt systému vychází z již vytvořeného volně dostupného modelu pro kryt samotného Raspberry Pi [71]. To s sebou nese mnoho výhod, jelikož víme, že rozměrově bude sedět na řídící jednotku a obsahuje také otvory na všechny potřebné výstupy Raspberry Pi. Díky tomu je možné napájet systém klasickým způsobem přes USB-C konektor nebo také například přes Ethernet (Power over Ethernet). Tato varianta byla také v rámci testování odzkoušena i na reálném prototypu s využitím PoE splitteru [72] a pasivního PoE injektoru [73].

Dále byl mnou kryt však značně upraven, aby splňoval veškeré požadavky, které na něj v tomto případě máme. Zaprvé byl zvětšen, aby se do něj dala zakomponovat deska plošných spojů pro propojení jednotlivých komponentů. V testovaném prototypu sice bylo pro tento účel používáno pouze nepájivé pole, to však v praxi je třeba nahradit robustnějším propojením právě přes DPS. Zvětšení bylo také nutné, aby se do něj vlezly komponenty samotné – PIR sensor, mikrovlnný senzor, RGB kamera a termokamera. Kromě mikrovlnného senzoru, který je schopen zaznamenávat pohyb i skrze kryt byly dále vytvořeny otvory v krytu pro zbytek těchto senzorů (viz Obrázek 51).

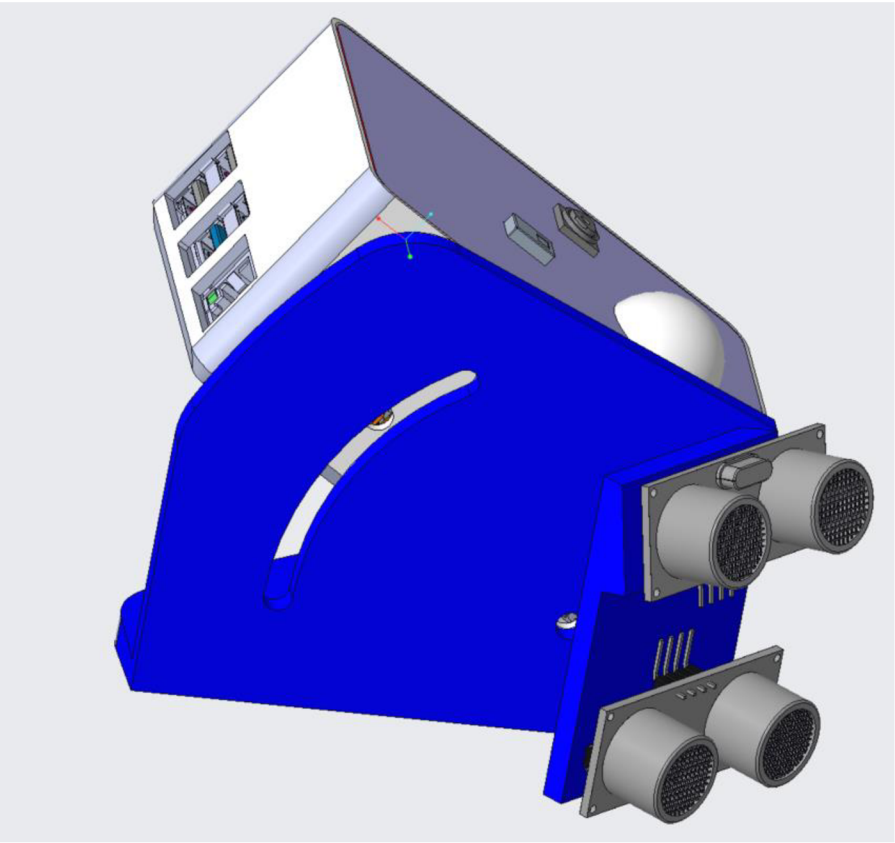


Obrázek 51 – model uchycení vytvořeného systému

Jedinými senzory umístěnými mimo tělo krytu jsou ultrasonické. Toto rozhodnutí bylo provedeno z vícero důvodů. Zaprvé by se umístěním uvnitř těla celý kryt výrazně zkomplikoval a zvětšil, což by zhoršilo praktičnost celého řešení. Druhým a podstatnějším důvodem byl jejich prostor snímání. Ten se totiž výrazně liší od ostatních senzorů a pro stabilní fungování je třeba ho zachovat stejný pro všechny typy místností. Proto bylo lepším řešením rozdělit jejich uchycení od zbytku systému, tak aby byly jejich výsledky stabilní, a naopak zbytek systému bylo možné natočit do prostoru dle konkrétního charakteru místnosti. Poslední výhodou tohoto řešení je také fakt, že pokud v některých konkrétních případech není možné použít ultrasonické senzory pro zpřesnění počítání lidí, je možné je jednoduše odpojit a použít zbytek krytu samostatně v kompaktnější podobě.

Pro co nejlepší spolehlivost ultrasonických senzorů bylo v návrhu také zahrnuto 15stupňové vzájemné vyosení jejich uchycení. Tím by mělo být zaručeno, že se vzájemně jejich signály nebudou rušit, jelikož 15 stupňů by měl být maximální rozptyl jejich signálu.

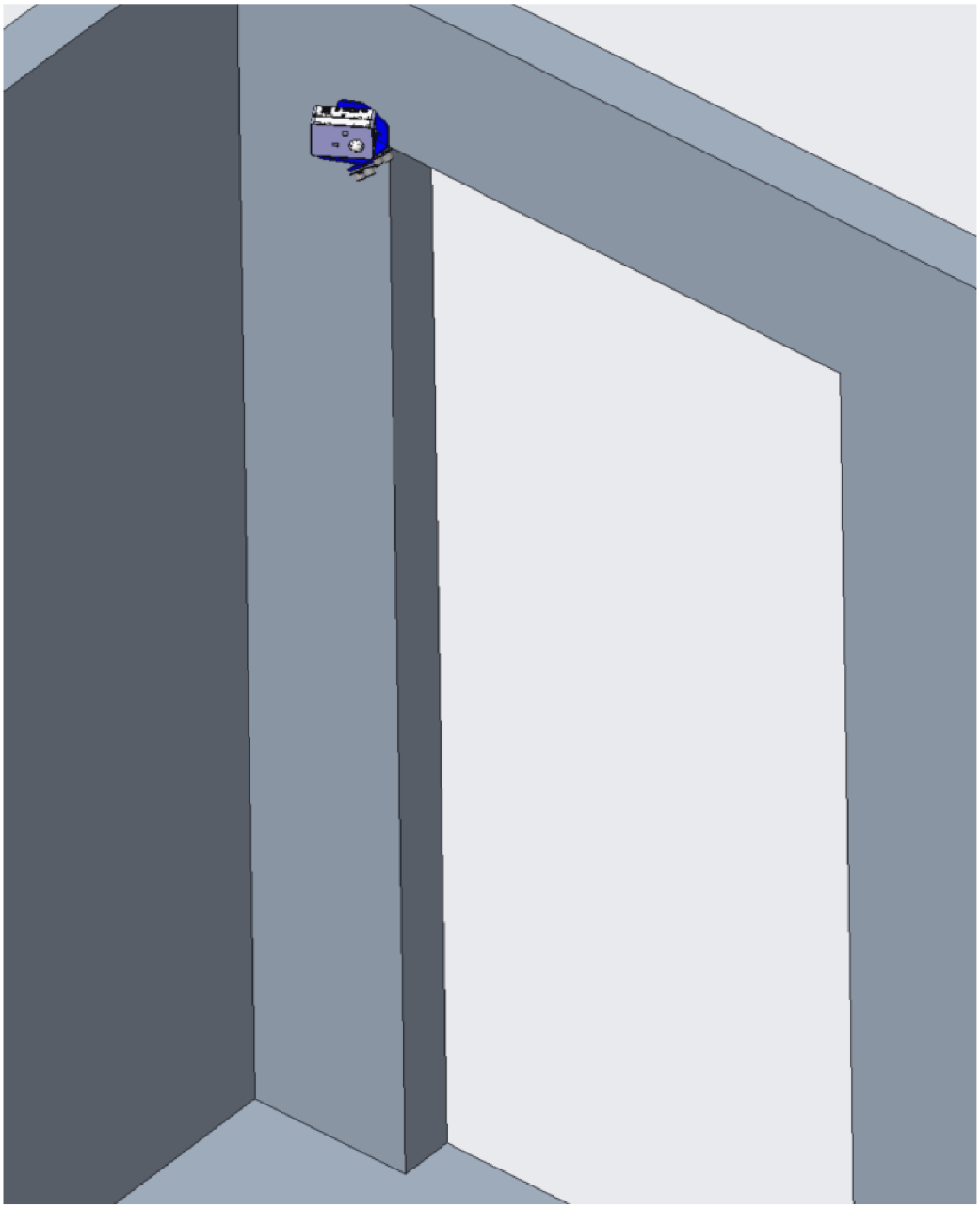
Uchycení ultrasonických senzorů je uvažováno v tomto případě statickým přilepením na plošky držáku. Pro napojení ke zbytku systému byla v krytu senzoru vytvořen otvor, kterým je možné protáhnout kabely napojené na tyto senzory.



Obrázek 52 – model uchycení vytvořeného systému

Aby se dalo upravit nasměrování ostatních senzorů umístěných v krytu, byly v krytu i v držáku vytvořeny otvory, díky kterým je možné tyto díly k sobě upevnit, ale také právě nastavit požadovaný úhel natočení dle požadavků pro konkrétní místnost (viz Obrázek 52).

Uvažované uchycení v rámci místnosti je vždy u horního rohu dveří, který je blíže k rohu místnosti (viz Obrázek 53). Při použití tohoto umístění je zaručeno nejlepší možné fungování systému.



Obrázek 53 – znázornění uvažovaného umístění konstrukce

Nakonec je ale třeba zmínit, že tento model uchycení systému nebyl zatím reálně testován a je možné, že například z důvodu přehřívání řídící jednotky by jej bylo ještě potřeba mírně upravit pro optimální fungování. Principálně však odpovídá stanoveným požadavkům.

ZÁVĚR

Mezi hlavní cíle této práce bylo vytvoření rešerše v oblasti dostupných technologií pro detekci a lokalizaci osob v místnosti. Dále výběr vhodných komponentů, jejich otestování a vytvoření algoritmu, který vytváří fúzi jejich dat vhodným způsobem. Posledním cílem bylo sestavený systém otestovat a vyhodnotit.

První sekce rešeršní části práce byla věnovaná zejména konkrétním senzorům, které v praxi umožňují provádět funkce detekce, počítání lidí a lokalizace. U každého z nich byl uveden jejich základní princip fungování a byly podrobněji rozebrány možnosti, jakým způsobem již byly tyto senzory pro zmíněné funkce použity a shrnuty výhody i nevýhody jejich použití.

Druhá sekce rešeršní části byla zaměřena na výběr řídící jednotky pro fúzi dat více senzorů. Blíže byly rozebrány varianty od různých výrobců a zmíněno, které možnosti jsou vhodné pro konkrétní případy použití.

Výstupem prvních dvou sekcí rešeršní části práce bylo vytvoření přehledu o senzorech, možnostech jejich použití i vhodném výběru řídících jednotek, což jsou znalosti, které bylo přímo potřeba využít při následném zpracování praktické části této práce. Na základě této rešerše bylo možné nakoupit vhodné senzory, vymyslet jejich nejvhodnější použití v rámci systému jako celku a na základě zvolených požadavků vybrat také adekvátní řídící jednotku systému.

Ve třetí sekci rešeršní části poté již byly shrnuty základní informace ke všem vybraným komponentům pro zpracování části praktické. Tato část byla zaměřena primárně na ukázání výhod i nevýhod těchto komponentů a odůvodnění jejich výběru. Nakonec byly také krátce zmíněny softwarové nástroje, které jsou v rámci praktické části práce využívány.

Tato sekce umožnila primárně poukázat na možnosti a limity jednotlivých komponentů, s čímž bylo potřeba počítat při vytváření jejich reálné fúze.

První sekce části praktické se zabývala otestováním jednotlivých komponentů samostatně. To nám dále umožnilo nejen vědět jejich funkčnost při reálném použití, ale také to sloužilo jako podklad pro porovnání fungování senzorů samostatně s fungováním systému vytvořeného fúzí těchto senzorů v další části. Všechny senzory byly zprovozněny a bylo ověřeno, že splňují alespoň minimální požadavky, které byly určeny pro jejich další využití v rámci uvažovaného systému.

V druhé sekci praktické části byl ukázán vývoj systému využívajícího fúze zvolených senzorů. V rámci toho byl nejdříve definován jeho koncept se zaměřením na uvažované funkce, cenu i prostředí, ve kterém má být použitý. Po definování konceptu již bylo možné vytvořit a popsat přesně algoritmus, pomocí kterého systém mohl využít přednosti jednotlivých senzorů za účelem robustní detekce, lokalizace i počítání lidí.

Po zpracování algoritmu byl celý systém otestován a vyhodnocen. Testování proběhlo za mnoha podmínek včetně pohybu jedné i více osoby, různých světelných podmínek nebo také za speciálně zvolených situacích, ve kterých bylo očekáváno zhoršení odezvy systému na základě principu jeho fungování.

Při vyhodnocení výsledků testování bylo zjištěno, že na jednu stranu má systém určité nedostatky, a to zejména v některých specifických případech jako je například pohyb více lidí velmi blízko sobě nebo pohyb člověka v části místnosti, kam nedosáhne zorné pole kamery. Na stranu druhou bylo docíleno požadovaného efektu, což bylo zejména dosáhnout takového fungování systému, že v porovnání s použitím pouze jednotlivých senzorů je detekce, lokalizace i počítání lidí robustnější. Zejména je třeba zmínit, že díky fúzi dat senzorů bylo docíleno univerzálnější možnosti použití než ve srovnání s některými jednotlivými senzory

dražšími než je cena námi vytvořeného systému jako celku, jelikož to principiálně neumožňují. Například ani velmi drahá RGB kamera z principu nemůže být ideálně použita pro zpracování dat v noci, a naopak jenom velmi drahé termokamery umožňují takové rozlišení obrazu ke zpracování, jako levná RGB kamera ve dne. To potvrzuje velký potenciál ve fúzi levnějších senzorů i pro komerční použití a tato práce ukazuje jakým způsobem, a jaké typy senzorů lze vhodně zkombinovat.

Přestože systém byl testován v podobě prototypu pomocí spojení přes nepájivého pole a provizorní uchycení, v poslední části této práce byl proveden také 3D návrh krytu systému a vhodného příslušenství pro připevnění systému na zeď na předpokládané místo použití.

Reálné spojení a uzavření tímto způsobem v praxi samozřejmě může vytvořit některé další problémy, které se nedají jednoduše z modelu určit jako je například možné přehřívání systému. Zde se tedy nabízí možnosti další možnosti rozšíření a vylepšení dle konkrétního praktického použití fúze senzorů zpracované v této diplomové práci.

Tato práce byla zaměřena na použití primárně velmi levných senzorů. Na základě testování však byly ukázány některé zřejmé nedostatky, které by použitím lepších senzorů bylo možné vylepšit. Proto dalším potencionálním rozšířením systému by mohlo být také použití některých vhodně zvolených dražších komponentů jako je například RGB kamera s širším zorným polem, termokamera s lepším rozlišením nebo mmwave senzor s možnostmi přesné detekce pohybu včetně dýchání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Hue Motion sensor. In: *Philips-hue.com* [online]. c2018-2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.philips-hue.com/cs-cz/p/hue-hue-motion-sensor/8719514342125

[2] People counters. In: *Trafsys.com* [online]. c2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.trafsys.com/people-counting/

[3] Terabee People Counting L-XL. In: *Terabee.com* [online]. c2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.terabee.com/shop/people-counting/terabee-people-counting-l/

[4] IR MLX90641. In: *Botland.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://botland.cz/vysokoteplotni-pyrometricke-senzory/20551-ir-mlx90641-16-12px-55st-fov-i2c-waveshare-20465-5904422381653.html

[5] Infrared light. In: *Nasa.gov* [online]. 18.03.2004 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/F_Infrared_Light_5-8.html

[6] PIR sensor. In: *Learn.adafruit.com* [online]. 2012 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://learn.adafruit.com/assets/512

[7] How PIRs work. In: *Learn.adafruit.com* [online]. 2012 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/how-pirs-work

[8] [Fresnel lens]. In: *Learn.adafruit.com* [online]. 2012 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://learn.adafruit.com/assets/516

[9] ŠIMÍČEK, Jan. *Detekce pohybu objektu PIR sensory v polární konfiguraci* [online]. Praha, 2015 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/62028. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.

[10] [Fresnel lens spread]. In: *Learn.adafruit.com* [online]. 2012 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://learn.adafruit.com/assets/520

[11] BENEŠ, Martin. *Counting people using a PIR sensor* [online]. Brno, 2019 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.fit.vut.cz/study/thesis-file/21967/21967.pdf. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

[12] NARAYANA, Sujay, R. Venkatesha PRASAD, Vijay S. RAO, T. V. PRABHAKAR, Sripad S. KOWSHIK a Madhuri Sheethala IYER. PIR sensors. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2015, 2015-04-13, s. 142-153 [cit. 2023-05-25]. ISBN 9781450334754. Dostupné z: doi:10.1145/2737095.2742561

[13] ZAPPI, Piero, Elisabetta FARELLA a Luca BENINI. Pyroelectric InfraRed sensors based distance estimation. In: *2008 IEEE Sensors* [online]. IEEE, 2008, 2008, s. 716-719 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-4244-2580-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICSENS.2008.4716542

[14] RAES, Godfried-Willem. *Infrared body sensing* [online]. 02.10.2010 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.logosfoundation.org/ii/infrared_sensing.html

[15] TYCO FIRE AND SECURITY GMBH. Method and systém for counting using passive infrared detectors. European Patent Office EP2732440A2. Dostupné z: https://patents.google.com/patent/EP2732440A2

[16] PIR Motion sensor tutorial. In: *instructables.com* [online]. 2009 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.instructables.com/PIR-Motion-Sensor-Tutorial/

[17] COOK, Jeremy. Ultrasonic sensors: How they work [online]. 04.04.2018 [cit.2023-05-25]. Dostupné z: https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/ultrasonic-sensors-how-they-work-and-how-to-use-them-with-arduino

[19] KELEMEN, Michal, Ivan VIRGALA, Tatiana KELEMENOVÁ, Lubica MIKOVÁ, Peter FRANKOVSKÝ, Tomáš LIPTÁK a Milan LORINC. *Distance measurement via using of ultrasonic sensor* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://pubs.sciepub.com/automation/3/3/6

[20] HY-SRF-05. In: dratek.*cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1735-meric-vzdalenosti-ultrazvukovy-5pin-hy-srf05-pro-arduino.html

[21] ARUN FRANCIS, G., M. ARULSELVAN, P. ELANGKUMARAN, S. KEERTHIVARMAN a J. VIJAYA KUMAR. Object Detection Using Ultrasonic Sensor. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* [online]. **2019**(8) [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i6s/F60570486S19.pdf

[22] NGUYEN, Thuc Tuyen. *Prostorový ultrazvukový snímač vzdálenosti* [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://core.ac.uk/outputs/30291870 .Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

[23] SONIA, Achyut Mani TRIPATHI, Rashmi Dutta BARUAH a Shivashankar B. NAIR. Ultrasonic sensor-based human detector using one-class classifiers. In: *2015 IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-6 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-4673-6698-4. Dostupné z: doi:10.1109/EAIS.2015.7368797

[24] Advantages and limitations of ultrasonic sensors. In: *maxbotix.com* [online]. 11.09.2019 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.maxbotix.com/articles/advantages-limitations-ultrasonic-sensors.htm/

[25] SOVA, Jan, Karel KADLEC. *Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití* [online]. 23.04.2014 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://old.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf

[26] How do thermal cameras work? In: *flir.eu* [online]. 16.06.2020 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.flir.eu/discover/rd-science/how-do-thermal-cameras-work/

[27] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Termografie* [online]. c2022 [citováno 25. 05. 2023]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Termografie&oldid=21866241

[28] Infrared Array Sensor Grid-EYE. In: *industrial.panasonic.com* [online]. c2022 [citováno 25. 05. 2023]. Dostupné z: https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/grid-eye

[29] D6T-44L-06. In: *cz.farnell.com* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/omron-electronic-components/d6t-44l-06/sensor-thermal-mems-4x4/dp/2218000

[30] KRAFT, Marek, Przemysław ASZKOWSKI, Dominik PIECZYŃSKI a Michał FULARZ. Low-Cost Thermal Camera-Based Counting Occupancy Meter Facilitating Energy Saving in Smart Buildings. *Energies* [online]. 2021, **14**(15) [cit. 2023-05-25]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14154542

[31] JEON, Eun, Jong KIM, Hyung HONG, Ganbayar BATCHULUUN a Kang PARK. Human Detection Based on the Generation of a Background Image and Fuzzy System by Using a Thermal Camera. *Sensors* [online]. 2016, **16**(4) [cit. 2023-05-25]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16040453

[32] CHARVÁT, Michal. *Detection of People in Room Using Low-Cost Thermal Imaging Camera* [online]. Brno, 2018 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/85164. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně

[33] UDREA, Ioana, Cristian Gabriel ALIONTE, Georgeta IONASCU a Tudor Catalin APOSTOLESCU. New research on People Counting and Human Detection. In: *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* [online]. IEEE, 2021, 2021-7-1, s. 1-6 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-6654-2534-6. Dostupné z: doi:10.1109/ECAI52376.2021.9515115

[34] WONG, Wai Kit, Zeh Yang CHEW, Chu Kiong LOO a Way Soong LIM. An Effective Trespasser Detection System Using Thermal Camera. In: *2010 Second International Conference on Computer Research and Development* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 702-706 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-0-7695-4043-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICCRD.2010.161

[35] What is a radar sensor. In: *elprocus.com* [online]. c2013 – 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.elprocus.com/radar-sensor/

[36] Police Doppler Radar. In: *copradar.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://copradar.com/chapts/chapt3/ch3d1.html

[37] HUANG, Xu, Hasnain CHEENA, Abin THOMAS, Joseph K. P. TSOI a Bin GAO. Indoor Detection and Tracking of People Using mmWave Sensor. *Journal of Sensors* [online]. 2021, 1-14 [cit. 2023-05-25]. ISSN 1687-7268. Dostupné z: doi:10.1155/2021/6657709

[38] LI, Shenglei, Reiko HISHIYAMA. *Counting and tracking people with mmWave sensor in the restaurant* [online]. 2022, [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/pjsai/JSAI2022/0/JSAI2022_3S4IS402/_pdf/-char/ja

[39] ZHAO, Peijun, Chris Xiaoxuan LU, Jianan WANG, Changhao CHEN, Wei WANG, Niki TRIGONI a Andrew MARKHAM. MID: Tracking and Identifying People with Millimeter Wave Radar. In: *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)* [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 33-40 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-7281-0570-3. Dostupné z: doi:10.1109/DCOSS.2019.00028

[40] LI, Shenglei, Reiko HISHIYAMA. *A field people counting test using mmWave radar in the restaurant* [online]. 2021, [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.ieice.org/publications/conference-FIT-DVDs/FIT2021/data/pdf/CM-002.pdf

[41] GU, Tianbo, Zheng FANG, Zhicheng YANG, Pengfei HU a Prasant MOHAPATRA. MmSense. In: *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Millimeter-wave Networks and Sensing Systems* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2019, 2019-10-07, s. 45-50 [cit. 2023-05-25]. ISBN 9781450369329. Dostupné z: doi:10.1145/3349624.3356765

[42] WU, Chenshu, Feng ZHANG, Beibei WANG a K. J. RAY LIU. MmTrack: Passive Multi-Person Localization Using Commodity Millimeter Wave Radio.

In: *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications* [online]. IEEE, 2020, 2020, s. 2400-2409 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-7281-6412-0. Dostupné z: doi:10.1109/INFOCOM41043.2020.9155293

[43] Ultrasonic sensors vs. LiDAR. In: *maxbotix.com* [online]. 20.04.2021 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.maxbotix.com/articles/lidar.htm

[44] LiDAR. In: *ssla.co.uk* [online]. c2013 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.ssla.co.uk/lidar/

[45] LiDAR_LD06. In: *rs-online.com* [online]. c2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cz.rs-online.com/web/p/vyvojove-nastroje-pro-snimace/2037609

[46] SHACKLETON, John, Brian VANVOORST a Joel HESCH. Tracking People with a 360-Degree Lidar. In: *2010 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 420-426 [cit. 2023-05-25]. ISBN 978-1-4244-8310-5. Dostupné z: doi:10.1109/AVSS.2010.52

[47] BENEDEK, Csaba. 3D people surveillance on range data sequences of a rotating Lidar. *Pattern Recognition Letters* [online]. 2014, **50**, 149-158 [cit. 2023-05-25]. ISSN 01678655. Dostupné z: doi:10.1016/j.patrec.2014.04.010

[48] Types of distance sensors and how to select one? In: *seeedstudio.com* [online]. 2020 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/23/distance-sensors-types-and-selection-guide/

[49] MUÑOZ-SALINAS, Rafael, Eugenio AGUIRRE a Miguel GARCÍA-SILVENTE. People detection and tracking using stereo vision and color. *Image and Vision Computing* [online]. 2007, **25**(6), 995-1007 [cit. 2023-05-26]. ISSN 02628856. Dostupné z: doi:10.1016/j.imavis.2006.07.012

[50] NARAYANA, S., V. RAO, R. V. PRASAD, A. K. KANTHILA, K. MANAGUNDI, L. MOTTOLA a T. V. PRABHAKAR. LOCI: Privacy-aware, Device-free, Low-power Localization of Multiple Persons using IR Sensors. In: *2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)* [online]. IEEE, 2020, 2020, s. 121-132 [cit. 2023-05-26]. ISBN 978-1-7281-5497-8. Dostupné z: doi:10.1109/IPSN48710.2020.00018

[51] Dual tech motion detecting sensors. In: *alarmgrid.com* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.alarmgrid.com/browse/dual-tech-motion-detectors

[52] ZEWGE, Natnael S., Youngmin KIM, Jintae KIM a Jong-Hwan KIM. Millimeter-Wave Radar and RGB-D Camera Sensor Fusion for Real-Time People Detection and Tracking. In: *2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA)* [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 93-98 [cit. 2023-05-26]. ISBN 978-1-7281-3118-4. Dostupné z: doi:10.1109/RITAPP.2019.8932892

[53] Arduino hardware. In: *arduino.cc* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/hardware

[54] Arduino Uno Rev3. In: *arduino.cc* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3

[55] Raspberry Pi Pico. In: *raspberrypi.com* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/

[56] Raspberry Pi Zero 2 W. In: *rpishop.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://rpishop.cz/raspberry-pi-zero/4311-raspberry-pi-zero-2-w-5056561800004.html

[57] Vývojová deska ESP32. In: *dratek.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1581-esp-32s-esp32-esp8266-development-board-2.4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-antenna-module.html

[58] STM32 Arm Cortex MCUs. In: *st.com* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html

[59] Radxa Rock Pi 5B. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/radxa-rock-pi-5b-rk3588-4gb-ram/

[60] Raspberry Pi 4b 4GB RAM. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/raspberry-pi-4b-4gb-ram/

[61] HY-SRF05. In: *dratek.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1735-meric-vzdalenosti-ultrazvukovy-5pin-hy-srf05-pro-arduino.html

[62] Panasonic AMG8833. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/panasonic-amg8833-modul-termalni-kamery-64px/

[63] Doppler radar HW-MS03. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/detektor-pohybu-mikrovlnny-doppler-radar-hw-ms03/

[64] HC-SR501 PIR detektor pohybu In: *briv.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.briv.cz/p/5663/hc-sr501-pir-detektor-pohybu

[65] Raspberry Pi kamera 5MP v1.3. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/raspberry-pi-kamera-5mp-v1-3/

[66] OpenCV. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2001-2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/OpenCV#/media/File:OpenCV_Logo_with_text_svg_version.svg

[67] GRINBERG, Miguel. *Flask web development*. O'Reilly Media, 2018. ISBN 9781491991732.

[68] Flask. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, c2001-2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flask_%28web_framework%29#/media/File:Flask_logo.svg

[69] Raspberry Pi distance sensor using the HC-SR04. In: *pimylifeup.com* [online]. 30.01.2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://cdn.pimylifeup.com/wp-content/uploads/2018/03/Distance-Sensor-Fritz.png

[70] HRISKO, Joshua. *Thermal Camera Analysis with Raspberry Pi (AMG 8833).* 24.01.2021 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://makersportal.com/blog/thermal-camera-analysis-with-raspberry-pi-amg8833

[71] 5MP Raspberry Pi camera module v1.3. In: *hallroad.org* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://hallroad.org/5mp-raspberry-pi-camera-module-v1.3-in-pakistan.html

[72] Case for Raspberry Pi 4. In: *grabcad.com* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/case-for-raspberry-pi-4-1

[73] PoE splitter 5V/2,4A. In: *laskakit.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/poe-splitter-5v-2-4a--usb-cB

[74] Ubiquiti POE-48-24W-G. In: *alza.cz* [online]. c2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.alza.cz/ubiquiti-poe-48-24w-g-d4803665.htm