

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunikační techniky

## Zpřesnění určení polohy překážek na trase pro nevidomé – část II - LIDAR

**Jan Hrazdíra**

Školitel: prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.

Školitel–specialista: Michal Rada

Obor: Kybernetika a robotika

Leden 2020



## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce prof. Pavlu Zahradníkovi za jeho rady, trpělivost a vstřícnost při tvorbě této bakalářské práce.

## Prohlášení

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

V Praze, 7. ledna 2019

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím bezkontaktních senzorů k navigaci a orientaci nevidomých. Jsou zde uvedeny příklady problémových překážek, které nevidomý člověk není schopen odhalit pomocí bílé hole. Dále jsou zde popsány všechny běžně používané senzory pro bezkontaktní měření vzdálenosti a odhalování překážek. Na závěr práce jsou uvedeny výsledky měření s lidarem RPLIDAR A1M8, pomocí kterého byly detekovány popsané problematické překážky.

**Klíčová slova:** Detekce překážek, Lidar, Radar, Sonar, TOF, Hlubková kamera, Nevidomí

**Školitel:** prof. Ing. Pavel Zahradník,  
CSc.  
Fakulta elektrotechnická,  
Technická 1902/2, Praha,  
místnost: B3-603

## Abstract

This bachelor thesis deals with the use of contactless sensors for navigation and orientation of visually impaired people. Examples of problematic obstacles that visually impaired people are unable to detect using a white cane are presented. All common contactless ranging and obstacle detection sensors are described. At the end of this thesis results of measurement with lidar RPLIDAR A1M8 are presented. Lidar was used to detect described problematic obstacles.

**Keywords:** Obstacle detection, Lidar, Radar, Sonar, TOF, Time of flight, Depth camera, Visually impaired

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	4.5.3 Využití sonaru	27
<b>2 Orientace a navigace s těžkým zrakovým postižením</b>	<b>3</b>	4.6 Radar	28
2.1 Druhy zrakového postižení	3	4.6.1 Typy radaru	28
2.2 Navigace a orientace v prostoru	4	4.6.2 Jak radar funguje	29
2.3 Detekce překážek	5	4.6.3 Využití radaru	30
2.4 Těžko odhalitelné a nebezpečné překážky	5	4.7 Lidar	31
<b>3 Současné možnosti navigace a orientace těžce zrakově postižených</b>	<b>7</b>	4.7.1 Typy lidarů	31
3.1 Klasické kompenzační pomůcky	7	4.7.2 Jak lidar funguje	32
3.1.1 Optické pomůcky	7	4.7.3 Využití lidarů	33
3.1.2 Bílá hůl	7	<b>5 Testování lidarů</b>	<b>35</b>
3.1.3 Vodící pes	8	5.1 Cíl měření	35
3.2 Moderní navigační a orientační pomůcky	8	5.2 RPLIDAR A1M8	35
3.2.1 ELC	8	5.3 Postup měření	35
3.2.2 Substitute eyes	9	5.4 Výsledky měření	36
3.2.3 Inteligentní brýle	9	<b>6 Diskuze</b>	<b>39</b>
3.2.4 Opasek s kamerou a ultrazvukovým senzorem	10	<b>7 Závěr</b>	<b>41</b>
<b>4 Sensory používané pro bezkontaktní detekci překážek</b>	<b>11</b>	<b>A Snímky překážek</b>	<b>43</b>
4.1 Time of Flight senzory	11	<b>B Literatura</b>	<b>49</b>
4.1.1 Měření vzdálenosti pomocí TOF senzorů	11	<b>C Zadání práce</b>	<b>55</b>
4.1.2 Měření rychlosti pomocí TOF senzorů	13		
4.2 Kamera	13		
4.2.1 Lineární model kamery	14		
4.2.2 Detekce překážek pomocí klasické kamery	16		
4.3 Hloubková kamera	16		
4.3.1 Stereokamera	17		
4.3.2 Strukturované světlo	19		
4.3.3 Time-of-Flight kamera	21		
4.3.4 Využití hloubkových kamer	23		
4.4 Infračervený senzor	23		
4.4.1 Aktivní a pasivní IR senzory	24		
4.4.2 Měření vzdálenosti IR senzorem	24		
4.4.3 Využití IR senzorů	25		
4.5 Sonar	26		
4.5.1 Aktivní a pasivní sonary	26		
4.5.2 Jak sonar funguje	26		

## Obrázky

2.1 Nebezpečně umístěná poštovní schránka. ....	6
2.2 Další příklady nebezpečných překážek. ....	6
3.1 Detekce překážek pomocí ELC [10]	9
3.2 Inteligentní brýle s hmatovým displejem [12] .....	10
3.3 Opasek vybavený ultrazvukovými senzory a pouzdem pro kameru vyvinutý na polytechnické univerzitě v Bukurešti [13] .....	10
4.1 Odeslaný a přijatý, pulzní a spojitý signál TOF senzoru. ....	12
4.2 Dírková komora [15] .....	14
4.3 Promítnutí bodu P do roviny obrazu přes dírkovou komoru [14] .	14
4.4 Nalevo klasická kamera, napravo 3D kamera [22] .....	17
4.5 Jednoduchý model stereoskopické kamery .....	18
4.6 Jednoduchý model kamery založené na metodě strukturovaného světla [14] .....	19
4.7 Zkreslení strukturovaného vzoru [21] .....	20
4.8 Strukturované vzory: time-multiplexing vlevo, spatial neighborhood uprostřed, direct coding vpravo [20] .....	21
4.9 Měření času mezi odesláním a přijetím pulzního signálu [22] .....	21
4.10 Měření fázového rozdílu mezi odeslaným a přijatým signálem [22]	22
4.11 Snímek klasickou kamerou vlevo, Snímek gated kamerou vpravo [23]	23
4.12 Jednoduchý aktivní infračervený senzor [24] .....	24
4.13 Napětí na infračerveném senzoru v závislosti na vzdálenosti a barvě odrazové plochy. [25] .....	25
4.14 Rozlišení měřené vzdálenosti sonaru [29] .....	26
4.15 Odhadování směru na základě časového rozdílu [29] .....	27
4.16 Výpočet výkonu přijatého radiového signálu [34] .....	30
5.1 Vlevo rozdělení zorného pole lidarů do 5 oblastí. Vpravo lidarový snímek telefonní budky v metru vykreslený pomocí knihovny open3d. ....	36
5.2 Lidarový snímek prosklené telefonní budky bez odfiltrovaných izolovaných bodů. ....	37
A.1 Dopravní značka .....	43
A.2 Otevřená telefonní budka .....	44
A.3 Poštovní schránka .....	45
A.4 Větve 1 .....	46
A.5 Větve 2 .....	47

## Tabulky

2.1 Klasifikace zrakových postižení podle Ústavu zdravotnických informací a statistiky. [4] .....	4
5.1 Výsledky měření s lidarem. Tučně jsou zaneseny vzdálenosti, které byly naměřeny od sledované překážky. Ostatní vzdálenosti náleží jiným překážkám, které se v okolí vyskytovaly. Symbolem „-“ je označeno, že nebyla žádná překážka detekovaná. Snímky všech překážek naleznete v příloze A. ....	38





# Kapitola 1

## Úvod

Život s těžkým zrakovým postižením dokáže být náročný v mnoha ohledech. Problémy nastanou i při běžných každodenních činnostech, jako je nákup potravin v obchodě, při přístupu ke vzdělání nebo při hledání pracovního uplatnění. Velkou výzvu pak představuje navigace a orientace v prostoru.

Podle celosvětové organizace WHO (World Health Organization) žije na světě přibližně 285 milionů těžce zrakově postižených z toho 39 milionů nevidomých [1]. Není tedy divu, že již existuje mnoho projektů na pomoc takto postiženým lidem. Od projektů zaměřujících se na začlenění do společnosti po projekty využívajících moderních technologií k usnadnění přístupu k informacím nebo navigace ve městech. Tato práce vznikla v rámci projektu Pokročilá navigace nevidomých na Fakultě elektrotechnické v Praze.

Každý asi někdy potkal člověka s bílou slepeckou holí. Tato kompenzační pomůcka slepcům sice poskytne určitou informaci o jejich okolí, ale v některých případech se stane, že neodhalí všechny překážky a dotyčný do něčeho vrazí. Jde především o objekty volně trčící do vzduchu jako například příliš nízko vyvěšené reklamní štíty, otevřené telefonní budky nebo třeba větve stromů, které zasahují do ulice bez jakéhokoliv ohraničení.

V první části této práce poskytnu rešerši o možnostech navigace těžce zrakově postižených a popíšu senzory, které se běžně používají k bezkontaktnímu odhalování překážek. Jde především o senzory vzdálenosti jako jsou např. sonar, lidar a nebo hloubková kamera. U každého senzoru uvedu jakým způsobem funguje a uvedu několik typických aplikací.

V druhé části práce vyberu několik míst, které jsou pro nevidomé nebezpečné. Poté se na vybraných místech pokusím překážky detekovat lidarem RPLIDAR A1M8 a prodiskutuji použitelnost lidaru obecně pro vývoj asistenční pomůcky pro nevidomé.



## Kapitola 2

# Orientace a navigace s těžkým zrakovým postižením

V této kapitole bych se rád pokusil čtenářovi přiblížit, s jakými problémy se musí lidé se zrakovým postižením potýkat, kdykoliv se vydají ven ze svého domu. Jde především o orientaci a navigaci v prostoru.

Orientací je v tomto případě myšleno například jakým směrem má dotyčný vyrazit, jakým směrem dojde k přechodu přes silnici nebo kde začíná a kde končí chodník. Pokud mluvíme o navigaci je tím myšlen spíše méně detailní návod jak se dostat z jednoho místa na druhé. Tedy například instrukce typu na nejbližší křižovatce zahněte doprava, na zastávce nastupte do tramvaje linky 42 a vystupte na konečné zastávce. Nejprve ale popíši, jak se zraková postižení diagnostikují a do jakých kategorií se dělí.

### 2.1 Druhy zrakového postižení

V této práci se často objevují pojmy těžce zrakově postižený a nevidomý. Jde sice o velmi podobné pojmy, ale nejsou úplně totožné. Můžete například potkat člověka s bílou holí, kterému dělá problém nastoupit do tramvaje, ale když se usadí, může si vzít knihu a začít z ní číst. V tomto případě jde o krátkozrakého člověka a bychom měli mluvit o osobě s těžkým zrakovým postižením, nikoliv o nevidomém. Těžké zrakové postižení není žádný konkrétně vymezený pojem. Za lidi s těžkým zrakovým postižením jsou považováni ti, kterým už nepomáhají dioptrické brýle.[2]

Míra zrakového postižení se zjišťuje pomocí Snellových tabulek a měří se především zraková ostrost. „Při očním vyšetření se zkoumá zraková ostrost vyjádřená tzv. vizem udávaným zpravidla ve zlomku, kde první číslo znamená vzdálenost v metrech, ze které dotyčný čte a druhé číslo pak vzdálenost, ze které čte tu samou velikost písmene člověk s nepostiženým zrakem.“ [3] Jednotlivé kategorie zrakového postižení podle Ústavu zdravotnických informací a statistiky jsou v tabulce 2.1.

Jako nevidomý se považuje člověk se zrakovou ostroostí nižší než 3/60, což odpovídá kategoriím 3 až 5 v tabulce 2.1. Historicky se jména jednotlivých kategorií měnily, a proto se často v literatuře setkáme i s jinými názvy. Často se například setkáme s pojmy praktická nevidomost a úplná nevidomost.



je nutné výrazné barevné označení schodů, rohů, sloupů, prosklených ploch a dalších překážek. Osoby se zrakovým postižením stupně 5 nevyužívají vizuální podněty okolí a proto se více orientují pomocí hmatových a sluchových vodítek. Často využívají textury a sklon povrchů. [5]

Pro většinu těžce zrakově postižených však pohyb mimo jejich domov představuje stres, a tak 30% z nich nikdy neopouští svůj domov bez doprovodu. [6]

## 2.3 Detekce překážek

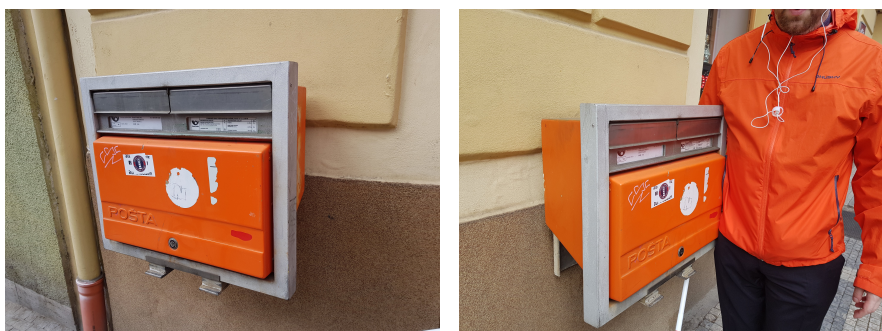
Největší nebezpečí představuje pro zrakově postižené přímá srážka s překážkou. To může vést i ke zranění, proto je schopnost odhalit včas překážky nesmírně důležitá. Klasická bílá hůl je v tomto ohledu výborným pomocníkem, ale nedokáže zabránit všem nehodám. Důvodem je, že s holí se běžně operuje jen na úrovni chodníku a asi 50cm nad ním. Pokud je ale překážka umístěna ve výši pasu nebo výše, tak ji nevidomý pravděpodobně neodhalí a vrazí do ní.

Americká statistika ukazuje, že více než 40% těžce zrakově postižených zažije srážku v úrovni hlavy alespoň jednou do měsíce a dalších 40% ji zažije alespoň jednou do roka. Přičemž 23% z těchto nehod jim způsobí zranění. 86% z těchto nehod se stalo mimo jejich domov. [7] Tato čísla jasně poukazují na nedostatek kompenzační pomůcky, která by byla schopna odhalovat a včas upozornit i na překážky ve výši hlavy.

## 2.4 Těžko odhalitelné a nebezpečné překážky

Samostatný pohyb zrakově postižených po městě omezuje velké množství vnějších vlivů, které vidící člověk snadno zaregistruje a předejde případné nehodě. Velké nebezpečí představuje jakákoliv úprava nevidomým již známého prostředí. Bez upozornění se totiž může lehce stát, že nevidomý nezaregistruje výkop nebo jakoukoliv jinou novou překážku. Mezi typické překážky, které nevidomé ohrožují, patří výlohy obchodů, ozdobné mříže, venkovní vitríny, neoznačené schody, nízké větve stromů zasahující do cesty, billboardy na ulicích, otevřené telefonní budky, které nelze detekovat v úrovni země holí, staveniště, zahrádky restaurací a pootevřené dveře, také obtížně detekovatelné holí. [5]

Dobrým příkladem nebezpečné překážky je také poštovní schránka na obrázku 2.1. Pokud by nevidomý sledoval vodící linii podél tohoto domu a o schránce nevěděl, pravděpodobně by do ní vrazil. Problém by vyřešilo přerušení vodící linie například stojanem, který by byl spojen s chodníkem. Tím pádem by se dal snadno odhalit bílou holí.



**Obrázek 2.1:** Nebezpečně umístěná poštovní schránka.

Další nepříjemností jsou mřížky zabudované do chodníku (viz obrázek 2.2a). Ať už jde o mříž zakrývající kanalizaci nebo okrasné mřížky, může se stát, že se do ní při chůzi hůl zasekne a při tom se poškodí.



**(a)** : Slepcká hůl se může zaseknout v kovové mříži.



**(b)** : Špatně umístěná vodicí linie.

**Obrázek 2.2:** Další příklady nebezpečných překážek

V neposlední řadě můžou nevidomým způsobovat problémy i samotné umělé vodicí linie, pokud jsou nesprávně vytvořené. Na obrázku 2.2b je vidět, že vodicí linie (červené dlaždičky) vede naprosto nesmyslně přímo mezi dvě informační tabule. V případě, že by nevidomý naprosto důvěřoval takovéto linii, mohl by přijít k úrazu.

## Kapitola 3

### Současné možnosti navigace a orientace těžce zrakově postižených

Pro většinu nevidomých je velmi důležité, do jaké míry dokáží být nezávislí na ostatních lidech. Proto se neustále vyvíjí a zlepšují všemožné kompenzační pomůcky, které jim tuto samostatnost do značné míry usnadňují. V této kapitole se nejdříve budu věnovat klasickým pomůckám. Poté se zaměřím na to, jaké moderní pomůcky těžce zrakově postižení používají nyní, díky vzniku moderních technologií.

#### 3.1 Klasické kompenzační pomůcky

Klasické kompenzační pomůcky jsou pomůcky netechnického typu. Jsou to většinou první, které se těžce zrakově postižení učí používat. Patří sem zejména optické pomůcky, vodící pes a bílá hůl, která hraje nezastupitelnou roli při orientaci v prostoru.

##### 3.1.1 Optické pomůcky

Optické pomůcky jsou pochopitelně jedny z nejběžnějších. Existuje jich celá řada, například lupy do ruky, stojánkové lupy, monokulár, Galileiho systém, Keplerův systém nebo filtrové brýle. Jsou určeny především pro osoby se zrakovým postižením kategorie 1 a 2, často také označované za osoby se zbytky zraku. Tyto pomůcky většinou obsahují nějakou čočku, která poskytuje zvětšení v rozsahu cca 3x až 20x a umožní tak využití slabého zraku např. k četbě.

##### 3.1.2 Bílá hůl

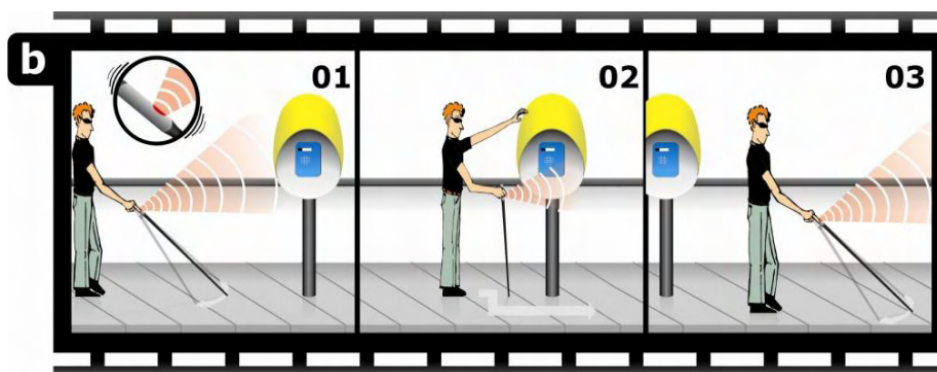
Bílé hole jsou pomůcky využívané především pro chůzi. Uživatelé poskytují hmatové informace o jejich okolí. Hole mohou být v bílém nebo červenobílém provedení. Červenobílá barva informuje o kombinovaném poškození zraku a sluchu. Dále se dělí na orientační, signalizační a opěrné.

Orientační hole jsou dlouhé hole zakončené robustnější pevnou nebo rotační koncovkou. Svou délkou zajišťují dostatečný odstup od překážek a tím zvyšují





bylo testováno na osmi zrakově postižených osobách. Všichni zúčastnění poté v dotazníku uvedli, že ELC funguje spolehlivě a že je jednoduché se ho naučit používat. Na druhou stranu zařízení pomáhá nevidomým pouze s detekcí překážky, ale přesné umístění překážky se uživatel nedozví. Slouží tedy spíše jako výstražné varování [10].



Obrázek 3.1: Detekce překážek pomocí ELC [10]

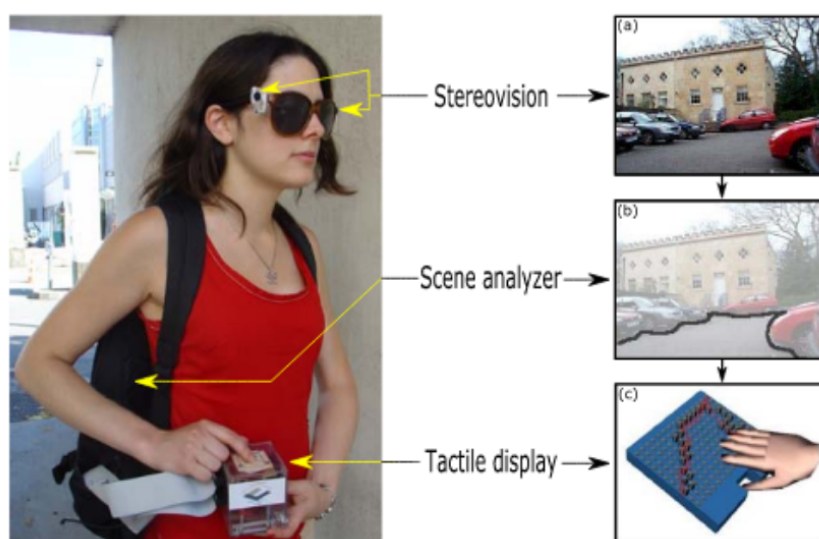
### 3.2.2 Substitute eyes

Substitute eyes je zařízení navržené jako náhražka bíle hole. Nosí se v ruce na místo hole a obsahuje dva ultrazvukové senzory a tři vibrační elektromotory. Tím, že jsou použity dva ultrazvukové senzory, je možné získat informaci, jestli je překážka napravo, nalevo a nebo přímo před zařízením. Podle toho pak zavibruje jeden z motorků. [11]

Autory práce byl proveden test, že pomocí této pomůcky je možné včas detekovat překážky a vyhnout se jim. Nicméně testování probíhalo pouze na jednom dobrovolníkovi, kterému byly zavázány oči a tím pádem nepovažují výsledky za přesvědčivé. Jelikož navíc uživatel nezískává hmatovou informaci pomocí bíle hole, je obtížné s touto pomůckou sledovat vodící linie. Nicméně pokud by proběhl další výzkum, mohla by vzniknout užitečná a především levná pomůcka jako doplněk ke klasické holi.

### 3.2.3 Inteligentní brýle

Inteligentní brýle je systém vyvinutý na francouzské univerzitě Paříž VI. Systém se skládá ze stereokamery umístěné v brýlích, počítače, který analyzuje okolní scénu a hmatového displeje. Na obrázku 3.2 je vidět, jak inteligentní brýle fungují. Stereokamera snímá prostor před uživatelem. Na snímcích jsou poté ohraničeny překážky a ty jsou zobrazeny na hmatovém displeji. Výsledky testování inteligentních brýlí ukázaly, že testované subjekty byly schopny porozumět výstupu hmatového displeje a orientovat se pomocí hmatových map. Testování však probíhalo na zdravých lidech, kteří měli pouze zakryté oči. [12]



Obrázek 3.2: Inteligentní brýle s hmatovým displejem [12]

### 3.2.4 Opasek s kamerou a ultrazvukovým senzorem

Na Polytechnické univerzitě v Bukurešti vyvinuli zajímavou pomůcku ve formě opasku, který využívá k detekci překážek kameru chytrého telefonu a 4 ultrazvukové senzory. Opasek je na obrázku 3.3. Systém dále obsahuje sluchátka s technologií *bone conduction*, která přenáší zvuk přes lícní kosti, a tím pádem zůstávají uši nevidomého odkryté a může tak stále naslouchat svému okolí. Video zaznamenané kamerou chytrého telefonu je použito jako vstup pro *object recognition* algoritmus. Obraz z kamery je porovnán s daty z ultrazvukových sensorů a na základě toho určen typ překážky a její vzdálenost. Nevidomý poté dostane do sluchátek zvukový signál, který mu hlásí, co za objekt před ním je a jak moc je nebezpečný. Systém byl testován 21 zrakově postiženými lidmi, kteří vyjádřili spokojenost a ocenili především, že mají při používání volné ruce a mohou tak stále používat bílou hůl, na kterou jsou zvyklí. [13]



Obrázek 3.3: Opasek vybavený ultrazvukovými senzory a pouzdrém pro kameru vyvinutý na polytechnické univerzitě v Bukurešti [13]

## Kapitola 4

### Senzory používané pro bezkontaktní detekci překážek

V této kapitole poskytnu rešerši o nejčastěji používaných bezkontaktních senzorech pro detekci překážek. Bezkontaktní senzory můžeme rozdělit na optické a neoptické. Neoptické senzory využívají k detekci překážek elektromagnetické záření o vlnové délce mimo viditelné a infračervené spektrum. Příkladem neoptických senzorů jsou technologie radar, která využívá rádiových vln, nebo také sonar, která využívá zvukových vln. Optické senzory využívají elektromagnetického záření o vlnové délce viditelného (400 – 700nm) a blízkého infračerveného (0.7 – 1000 $\mu$ m) spektra. Dále je můžeme rozdělit na aktivní a pasivní. Pasivní senzory využívají odrazu okolního světla od měřeného objektu. Typický pasivní senzor je klasická kamera. Aktivní senzory navíc obsahují zdroj záření, který po odrazu od měřeného objektu zachytávají a tím získávají informaci o jeho vzdálenosti případně struktuře. [14]

#### 4.1 Time of Flight senzory

Abych předešel opakujícímu se textu, rád bych se na začátek této kapitoly věnoval senzorům typu *Time of Flight* (TOF) v obecné rovině. Jde o aktivní senzory, které vyšlou signál a počítají dobu, po kterou se signál šíří prostředím k měřenému objektu, odrazí se, a znovu se vrátí k senzoru. Na základě tohoto časového úseku je možné dopočítat vzdálenost v jaké se objekt nachází. Do této kategorie patří především radar, sonar, lidar a TOF kamera.

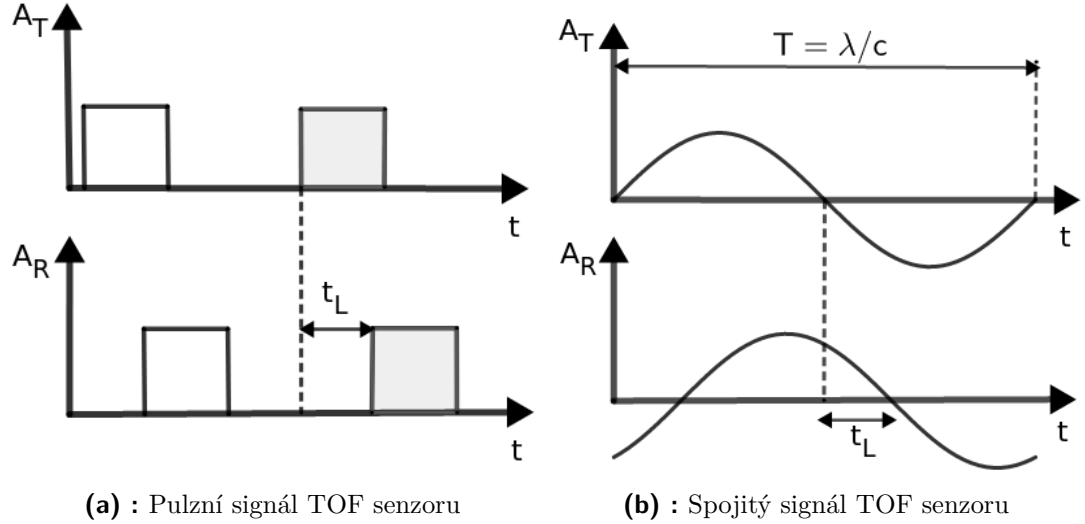
##### 4.1.1 Měření vzdálenosti pomocí TOF senzorů

Podle signálu, který TOF senzory vysílají se dělí na pulzní a spojitě. Pulzní senzory přímo měří čas mezi odeslaným a přijatým signálem. Obrázek 4.1a zobrazuje časový průběh amplitud odeslaného ( $A_T$ ) a přijatého ( $A_R$ ) pulzního signálu. Naměřený čas  $t_L$  můžeme převést na vzdálenost pomocí převodního vztahu:

$$d = \frac{t_L c}{2}, \quad (4.1)$$

kde  $c$  je rychlost, jakou se signál šíří příslušným médiem a  $d$  je vzdálenost, ve které se signál odrazí. Z rovnice 4.1 můžeme také odvodit rozlišení  $\Delta d$ , kde  $\Delta t_L$  je nejmenší časový úsek, který je systém schopný rozlišit [38]:

$$\Delta d = \Delta t_L \frac{c}{2}, \quad (4.2)$$



**Obrázek 4.1:** Odeslaný a přijatý, pulzní a spojitý signál TOF senzoru.

Pokud senzor vysílá spojitý signál, anglicky *continuous-wave* (CW), měření vzdálenosti může být provedeno pomocí měření fázového posuvu mezi odesílaným a přijímaným signálem. Na obrázku 4.1b je vidět, že přijímaný sinusový signál má zpoždění  $t_L$ . Jelikož perioda  $T$  je známá, znamená to, že hodnota  $t_L$  je přímo úměrná fázovému posuvu  $\Phi$  a můžeme jí spočítat jako:

$$t_L = \frac{\Phi}{2\pi} T = \frac{\Phi}{2\pi} \frac{1}{f}, \quad (4.3)$$

kde  $f$  je frekvence vysílaného signálu. Naměřená vzdálenost  $x$  a její rozlišení  $\Delta x$  je pak podle 4.1:

$$x = \frac{c}{4\pi f} \Phi, \quad (4.4)$$

$$\Delta x = \frac{c}{4\pi f} \Delta \Phi, \quad (4.5)$$

Porovnáním 4.2 a 4.5 si můžeme všimnout jednoho zajímavého závěru. Rozlišení senzorů, využívajících spojitých signálů, na rozdíl od pulzních není závislé čistě jen na rozlišovací schopnosti použité elektroniky, ale také na frekvenci signálu, který používáme. Nevýhoda spojitých signálů však spočívá v tom, že maximální měřitelný fázový posuv je  $2\pi$  a z toho důvodu i největší měřitelná vzdálenost je:

$$x_{max} = \frac{c}{4\pi f} 2\pi = \frac{c}{2f} = \frac{\lambda}{2} \quad (4.6)$$

Z tohoto důvodu se u CW senzorů používají často signály složené z více sinusoid s více různými vlnovými délkami. Pak platí, že nejmenší z těchto vlnových délek určuje rozlišení a největší udává maximální vzdálenost. [38]

### ■ 4.1.2 Měření rychlosti pomocí TOF senzorů

Kromě měření vzdálenosti je možné s využitím některých TOF senzorů měřit rychlost pohybujících se objektů. K tomu se využívá Dopplerův jev. Aby bylo možné měřit rychlost, je třeba, aby byl senzor schopen měřit frekvenci odraženého signálu.

Pokud se senzor a nebo sledovaný objekt pohybuje, frekvence odraženého signálu  $f_r$  bude jiná než frekvence vysílaného signálu  $f_t$ . Vztah mezi frekvencemi, za předpokladu, že se měřený objekt pohybuje rychlostí  $v$  směrem k vysílači signálu je vyjádřen rovnicí 4.7, kde  $c$  je rychlost, kterou se šíří signál.

$$f_r = f_t \frac{c + v}{c - v} \quad (4.7)$$

Rozdíl mezi frekvencemi  $f_t$  a  $f_r$  se nazývá Dopplerův posuv a s využitím 4.7 ho můžeme vyjádřit jako:

$$f_d = f_r - f_t = f_t \frac{2v}{c - v} \quad (4.8)$$

Za předpokladu, že  $v \ll c$ , což je v naprosté většině případů splněno, můžeme rovnici ještě zjednodušit:

$$f_d = f_t \frac{2v}{c} \quad (4.9)$$

Z rovnice 4.9 již snadno vyjádříme rychlost:

$$v = \frac{cf_d}{2f_t} \quad (4.10)$$

Všimněte si, že pokud by se objekt pohyboval v opačném směru a tím pádem by se prohodila znaménka v čitateli a jmenovateli v rovnici 4.7, na výsledku 4.10 by se nic nezměnilo.

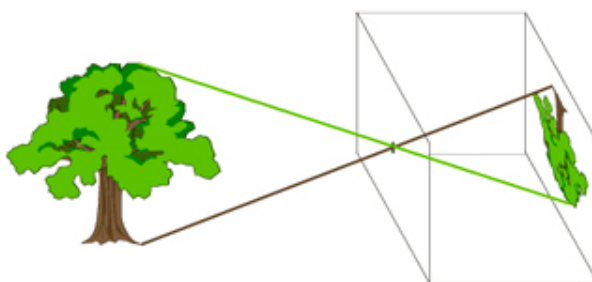
## ■ 4.2 Kamera

Kamera je maticový senzor, který zachycuje intenzitu světelných paprsků vyzářovaných okolím a na základě toho vytváří obraz. Jelikož spoléhá kamera na externí zdroj světla, je řazena mezi pasivní senzory. Existují však také 3D kamery, které na rozdíl od klasické kamery poskytují informaci o hloubce obrazu, a tyto kamery mohou mít i vlastní zdroj světla, proto jsou řazeny do kategorie aktivních senzorů. V této kapitole se budu věnovat pouze klasickým kamerám, tedy těm, které poskytují pouze barevný obraz bez informace o hloubce.

Každá digitální kamera obsahuje čočku, obrazový snímač a procesor, který provádí výpočty potřebné k získání finální fotky. Obrazový snímač je polovodičový senzor, který se skládá z obrovského množství fotodiod (pixelů), přičemž každá měří intenzitu světla. Využitím fotovoltického jevu generují elektrický signál přímo úměrný počtu zachycených fotonů.[14] Čočka zajišťuje, aby světelné paprsky vstupující dovnitř kamery dopadaly rovnoměrně na celou plochu obrazového snímače a tím tak zajišťuje, že obraz nebude rozmazaný.

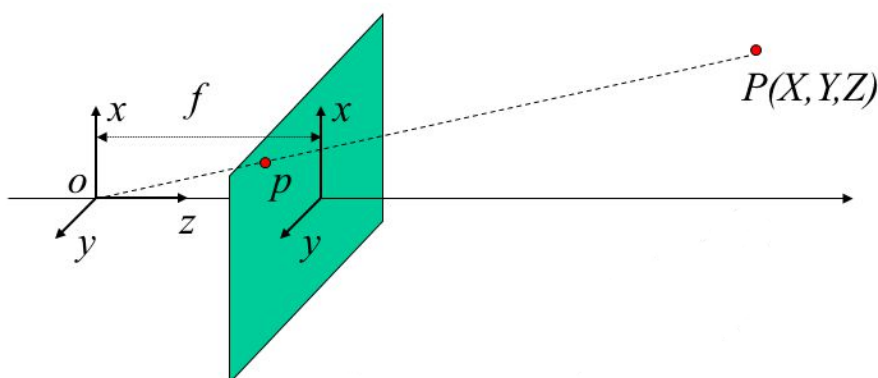
### 4.2.1 Lineární model kamery

K pochopení, jak se trojrozměrný objekt promítne na dvourozměrný obraz, používáme různé modely. Nejjednodušší z nich se nazývá dírková komora. Jde v podstatě o krabici, která má v jedné své stěně malý otvor. Princip fungování dírkové komory můžete vidět na obrázku 4.2. Světlo, které se odráží od stromu projde úzkou dírkou dovnitř temné komory a promítne se na její stěnu. Světlo se pohybuje po přímce, takže výsledný obraz uvnitř komory je vzhůru nohama.



Obrázek 4.2: Dírková komora [15]

Geometrie promítnutí vnějšího bodu do stěny komory (roviny obrazu) je nastíněna na obrázku 4.3. Střed zobrazení  $O$  (střed kamery) představuje díрку komory, která je u normální kamery nahrazena čočkou, přes kterou vstupuje světlo dovnitř zařízení. Čočka zaostřuje světelné paprsky na rovinu obrazu, která je na obrázku vyznačena zelenou barvou. Všimněte si, že pro účely tohoto modelu se rovina nachází před středem zobrazení. To je proto, abychom se vyhnuli otočené projekci. Ve skutečnosti se ale nachází tato rovina za středem zobrazení. Světelné paprsky, které dopadnou na rovinu obrazu jsou zachycovány obrazovým snímačem.



Obrázek 4.3: Promítnutí bodu  $P$  do roviny obrazu přes dírkovou komoru [14]

Rovnice 4.11 vyjadřuje transformaci třírozměrného bodu  $P(X, Y, Z)$  z okolního světa na dvourozměrný bod  $p(x, y)$  v rovině obrazu, která je ve vzdálenosti  $f$  od středu zobrazení. Vzdálenost  $f$  se běžně označuje jako ohnisková vzdálenost. V rovnici 4.12 je zapsána stejná transformace, ale tentokrát pomocí homogenních souřadnic a v maticovém tvaru. [14]

$$\mathbf{P} = [X, Y, Z]^T \rightarrow \mathbf{p} = [x, y] = \left[ f \frac{X}{Z}, f \frac{Y}{Z} \right] \quad (4.11)$$

$$\begin{pmatrix} fX/Z \\ fY/Z \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z} [\mathbf{K} | \mathbf{0}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{p} = \frac{1}{Z} [\mathbf{K} | \mathbf{0}] \mathbf{P} \quad (4.12)$$

Matrice  $\mathbf{K}$  o rozměrech  $3 \times 3$  se nazývá kalibrační matice. Pokud vezmeme v úvahu, že světlo dopadající na rovinu obrazu je měřeno skrze čtvercovou matici pixelů, můžeme model vylepšit tím, že posuneme střed obrazové roviny do rohu obrazového snímače. Za předpokladu, že rovina obrazu je paralelní s rovinou definovanou osami X a Y, dosáhneme tohoto posunu pouhým přičtením konstant  $c_x$  a  $c_y$  k projekci bodu, kde  $c_x$  a  $c_y$  vyjadřují vzdálenost projekce středu zobrazení od rohu snímače v pixelech. Kalibrační matice tak dostane tvar:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Může se stát, že jednotlivé pixely nemají čtvercový, ale obdélníkový tvar. To způsobí, že pokud se v rovině obrazu pohybujeme podél osy X dostaneme jiný počet pixelů na jednotku délky než pokud se pohybujeme podél osy Y. Pokud chceme zahrnout tuto skutečnost do modelu kamery musíme rozdělit ohniskovou vzdálenost  $f$  na dvě části  $f_x = fm_x$  a  $f_y = fm_y$ , kde  $m_x$ ,  $m_y$  vyjadřují počet pixelů na jednotku délky podél osy X a Y. [14]

Další fakt, který je třeba brát v úvahu je, že pixely nemusejí mít ani tvar obdélníku, ale mohou být mírně zkosené. Tuto skutečnost můžeme modelovat pomocí parametru  $s = f \cos(\alpha)$ , kde  $\alpha$  je úhel, který svírají strany pixelu. Kalibrační matice, která počítá s pixely, které nejsou čtverce, ale kosodélníky má tvar:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Doposud jsme se zabývali pouze tím, jak převedeme třírozměrný bod v soustavě souřadnic kamery. Pokud ale převádíme bod, který je zadán v souřadnicích nějaké jiné souřadnicové soustavy  $S_0$ , hodí se nám více obecný model:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{Z} \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]\mathbf{P} = \frac{1}{Z} \mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{P}, \quad (4.15)$$

kde  $\mathbf{T}$  je transformační matice složená z rotace  $\mathbf{R}$  a translace  $\mathbf{t} = -\mathbf{R}\mathbf{O}$ , kde  $\mathbf{O}$  je střed kamery v souřadnicích soustavy  $S_0$ . Rovnice 4.15 se nazývá lineární model kamery, který spouště aplikací poskytne dostatečnou aproximaci skutečné kamery. Nicméně jelikož světlo do reálné kamery neprochází malou dírkou, ale přes čočku, která přináší do modelu nelinearity bývá tento model nahrazován nelineárním modelem, kterému se v rámci této práce nebudu věnovat. Více o nelineárním modelu se dozvíte například zde: [14]

## 4.2.2 Detekce překážek pomocí klasické kamery

Nejčastější využití kamery je pouze pro pořizování fotografií či videa, ale dá se využít i pro detekci překážek. Jelikož kamera sama o sobě neposkytuje žádnou informaci o vzdálenosti, je detekce překážek závislá pouze na softwarovém zpracování obrazu.

Zajímavá aplikace je detekce překážek u pozemních robotů. V roce 1997 přišla L. M. Lorigo s metodou jak navádět robota na základě jedné kamery namířené tak, aby snímala i zem v bezprostřední blízkosti před robotem. Robot vyhodnotí oblast před sebou jako bezpečnou oblast bez překážek a na základě barev, které se vyskytují v této oblasti vyhodnotí zbytek pořízeného snímku. Pokud se barvy jednotlivých pixelů neshodují s barvami v bezpečné oblasti, jsou vyhodnoceny jako překážka. [16]

I přes to, že tato metoda předpokládá, že zem má všude stejnou barvu a že je vždy rovná, vychází z ní i některé moderní přístupy k navigaci pozemních robotů pomocí jedné kamery. Tae-Jae Lee, Dong-Hoon Yi a Dong-Il Dan Cho v roce 2015 představili ve své práci metodu založenou na stejném principu, která dokáže rozeznat pixely náležící překážce s přesností 81% při použití uvnitř budov. [17]

Další způsob, kterým se dá detekovat překážky je založen na předpokladu, že překážka je objekt, který se zvětšuje v po sobě jdoucích snímcích. Nejdříve jsou ze sekvence fotek vybrány klíčové body, které se nachází na všech snímcích. Tyto body jsou rozděleny na základě zvoleného *Object recognition* algoritmu do skupin reprezentujících tyto objekty. Poté se pro všechny body příslušející jednomu objektu spočítá obsah konvexního obalu a porovná se napříč sekvencí snímků. Pokud se obsah zvětšuje, jde o překážku. [18]

## 4.3 Hloubková kamera

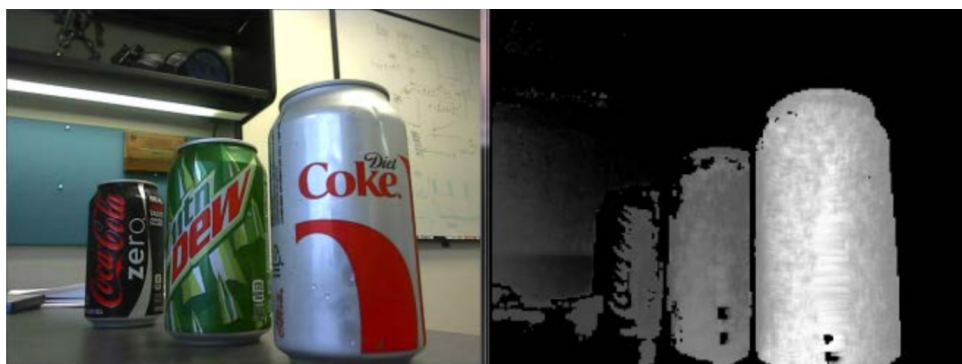
Hloubkové kamery, nebo také 3D kamery, jsou podobně jako klasické kamery maticové senzory, které však namísto barevného obrázku produkují hloubkovou mapu zachycované scény. Hloubková mapa je snímek podobný



tomu, co získáme z klasické kamery, avšak namísto světelné intenzity představují hodnoty pixelů vzdálenost od kamery. Příklad snímku vyprodukovaného hloubkovou kamerou je vidět na obrázku 4.4. Vzdálenost jednotlivých bodů je znázorněna pomocí odstínů šedi.

Existují různé způsoby, jak 3D kamery získávají informaci o hloubce. Dva základní přístupy jsou triangulace a TOF (Time-of-Flight). Triangulace získává hloubku obrazu na základě pozorování scény z více než jedné perspektivy. Metody, které využívají triangulace můžeme dále rozdělit na stereoskopii a strukturované světlo (*structured-light*). Senzory typu TOF patří mezi aktivní senzory. Informaci o vzdálenosti získávají tak, že počítají čas mezi vysláním signálu a přijetím jeho odrazu, viz kapitolu 4.1.

Lineární model kamery, který je popsán v kapitole 4.2.1 se vztahuje nejen na klasické kamery, ale také na všechny 3D kamery.



Obrázek 4.4: Nalevo klasická kamera, napravo 3D kamera [22]

### 4.3.1 Stereokamera

Stereokamera je zařízení, které využívá technologie zvané stereoskopie. Stereoskopie je inspirována schopností lidského mozku odhadovat vzdálenost objektu na základě obrazu ze dvou očí. Stereokamera získává vzdálenost objektu díky rozdílnostem mezi obrazy pořízenými dvěma kamerami, které zachycují stejnou scénu, ale z jiného úhlu pohledu.

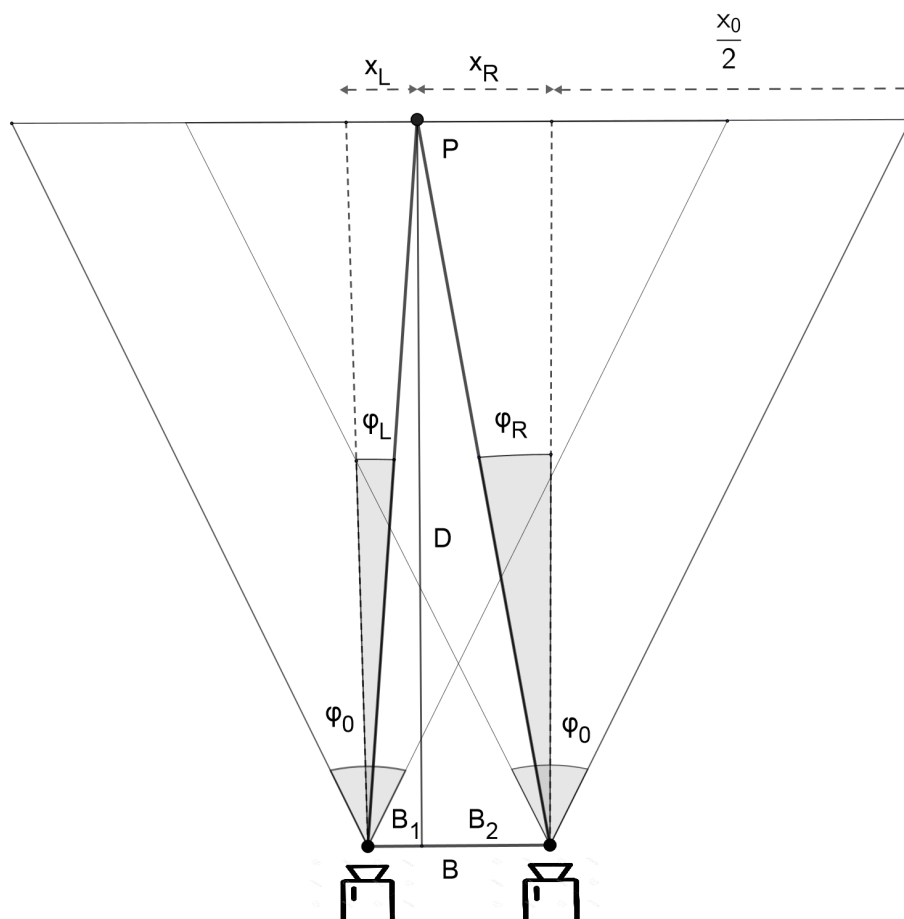
Největším problémem při používání stereokamery je spárovat pixely příslušející jednomu bodu v prostoru na snímcích obou kamer. Algoritmů na toto „párování“ existuje mnoho, ale dělí se do dvou základních kategorií: *Feature-based matching* (FBM) a *Correlation-based matching* (CBM).

FBM je algoritmus, který hledá v obou snímcích dobře rozlišitelné klíčové body, jako jsou hrany a rohy. Poté porovná rozložení těchto bodů mezi oběma snímky a na základě různých podobností se snaží body spárovat. Hlavní výhodou FBM je výpočetní nenáročnost a robustnost vůči rozdílům světelné intenzity mezi snímky. Na druhou stranu poskytuje většinou jen velmi málo bodů a tím pádem řídkou hloubkovou mapu. [14]

CBM je založen na hledání korelace mezi jednotlivými pixely obou snímků. Ve srovnání s FBM je mnohem více výpočetně náročný a citlivý na rozdíly

intenzity mezi snímky, avšak výsledkem bývá hustší hloubková mapa. [14]

### ■ Odhad vzdálenosti pomocí stereokamery



**Obrázek 4.5:** Jednoduchý model stereoskopické kamery

Obrázek 4.5 představuje zjednodušený model stereoskopické kamery. Dvě kamery, které jsou umístěny paralelně vedle sebe ve vzdálenosti  $B$ , jsou namířeny na bod  $P$  ve vzdálenosti  $D$ . Vzdálenost  $B$  můžeme vyjádřit jako součet vzdáleností  $B_1$  a  $B_2$ :

$$B = B_1 + B_2 = D \tan(\varphi_L) + D \tan(\varphi_R), \quad (4.16)$$

kde  $\varphi_L$  a  $\varphi_R$  jsou úhly mezi optickou osou čočky kamer a bodem  $P$ . Z rovnice 4.16 vyjádříme vzdálenost  $D$ :

$$D = \frac{B}{\tan(\varphi_L) + \tan(\varphi_R)} \quad (4.17)$$

Dále s použitím základní trigonometrie můžeme odvodit, že:

$$\frac{x_L}{\frac{x_0}{2}} = \frac{\tan(\varphi_L)}{\tan(\frac{\varphi_0}{2})} \quad \frac{-x_R}{\frac{x_0}{2}} = \frac{\tan(\varphi_R)}{\tan(\frac{\varphi_0}{2})}, \quad (4.18)$$

kde  $x_0$  je horizontální rozlišení (počet pixelů),  $\varphi_0$  je horizontální obrazový úhel obou kamer,  $x_L$  a  $x_R$  jsou vzdálenosti (v pixelech) bodu  $P$  od optických os kamer. Nyní pokud dosadíme 4.18 do 4.17, dostaneme výraz:

$$D = \frac{Bx_0}{2 \tan(\frac{\varphi_0}{2})(x_L - x_R)} = \frac{Bf}{(x_L - x_R)} = \frac{Bf}{d}, \quad (4.19)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost čoček v obou kamerách.  $d$  představuje rozdíl  $x_L - x_R$  a v literatuře se často nazývá *disparity*. Pokud zderivujeme vzdálenost bodu  $D$  podle disparity  $d$  dostaneme:

$$\partial D = \frac{D^2}{Bf} \partial d \quad (4.20)$$

Z rovnice 4.20 můžeme vidět, že chyba  $\partial D$  roste kvadraticky se vzdáleností  $D$ . Z tohoto důvodu se streokamery používají k měření vzdáleností maximálně v řádu desítek až stovek metrů. [19]

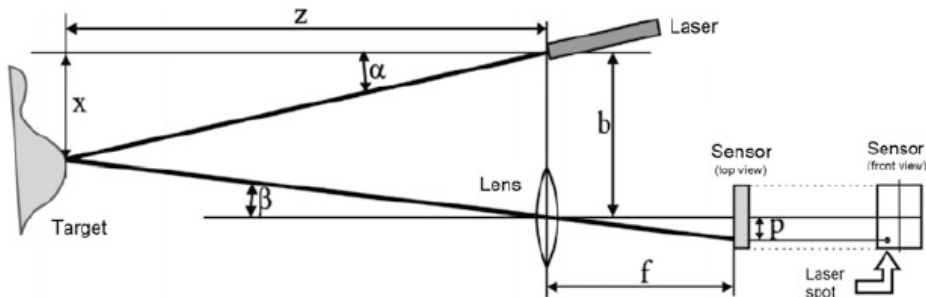
### 4.3.2 Strukturované světlo

Jedná se o aktivní metodu triangulace, kdy je na snímáný objekt promítán geometrický vzor (tzv. strukturované světlo). Na místo triangulace pomocí dvou kamer je jedna kamera nahrazena laserovým projektorem. Ten promítá na objekt vzor, který vnáší do snímku tolik struktury, aby bylo možné získat dostatečně hustou hloubkovou mapu.

Zjednodušený model systému založeného na principu strukturovaného světla je na obrázku 4.6. Laserový paprsek je namířen na sledovaný objekt. Kamera najde na snímku odraz paprsku a spočítá polohu a vzdálenost sledovaného místa podle rovnic 4.21 a 4.22. [14]

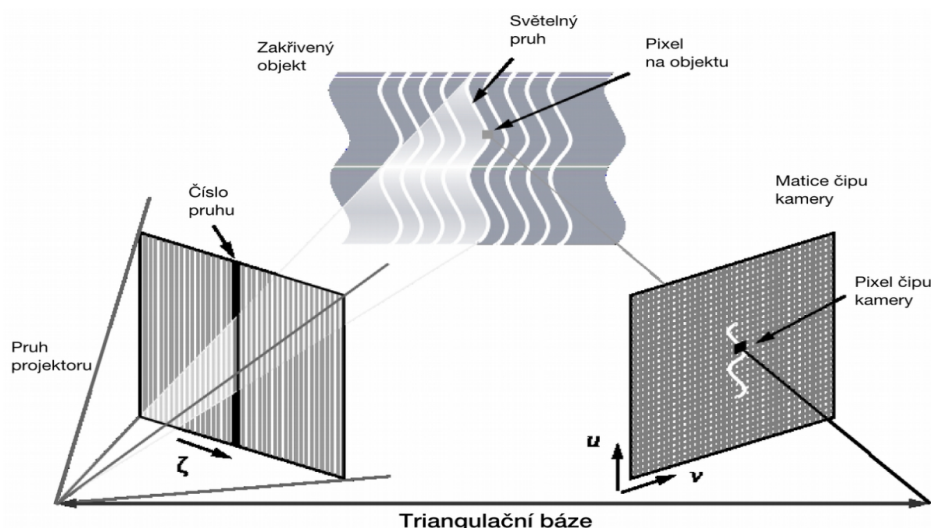
$$z = \frac{b}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \quad (4.21)$$

$$x = z \tan(\alpha) \quad (4.22)$$



**Obrázek 4.6:** Jednoduchý model kamery založené na metodě strukturovaného světla [14]

Tato metoda může být vylepšena, pokud nahradíme jediný paprsek za dvourozměrné obrazce, například pruhy viz obrázek 4.7. Z úhlu pod kterým je kamera namířena na objekt budou pruhy zkreslené, avšak počítač, který zpracovává snímky, zná původní obrazec a proto je schopen namapovat jednotlivé pixely kamerového snímku na pixely projektoru a poté pro každou dvojici spočítat vzdálenost podle rovnic 4.21 a 4.22. [14]



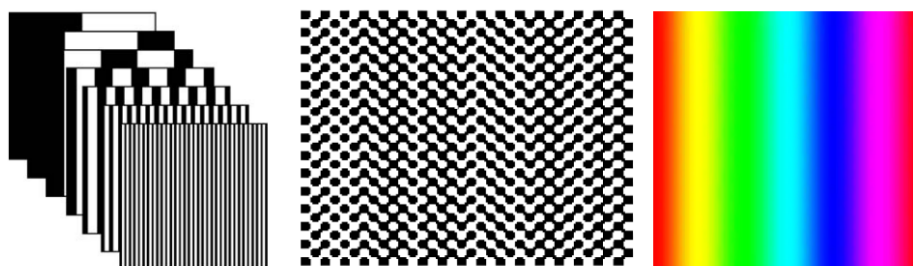
Obrázek 4.7: Zkreslení strukturovaného vzoru [21]

V praxi se používá celá řada různých vzorů. Tyto vzory jsou navrženy tak, aby každému pixelu byl přiřazen unikátní kód. Pomocí tohoto kódu je možné snadno a rychle získat k pixelu snímku odpovídající pixel vzoru. Podle způsobu kódování můžeme structured-light kamery rozdělit na *time-multiplexing*, *spatial neighborhood* a *direct coding*, viz obrázek 4.8.

*Time-multiplexing* (časový multiplex) je jedno z nejčastěji využívaných kódování. Na scénu je postupně promítnuto několik jednoduchých vzorů. Kódové slovo pro daný pixel je většinou vytvořeno sekvencí hodnot jasu pro tento pixel napříč promítanými vzory. [20]

*Spatial neighborhood* kódování využívá vzorů, pro které platí, že každý jejich bod má unikátní okolí. Kódové slovo, které označuje určitý pixel vzoru, se získá z okolních pixelů. Tato technika umožňuje rychlejší zpracování než časový multiplex, ale potýká se s problémem, že čím větší rozlišení je použito, tím větší okolí bodu je potřeba k jeho jednoznačnému určení. Struktura scény však může způsobit, že okolí tohoto bodu je zkreslené a tím vznikne chyba v odhadu vzdálenosti. [20]

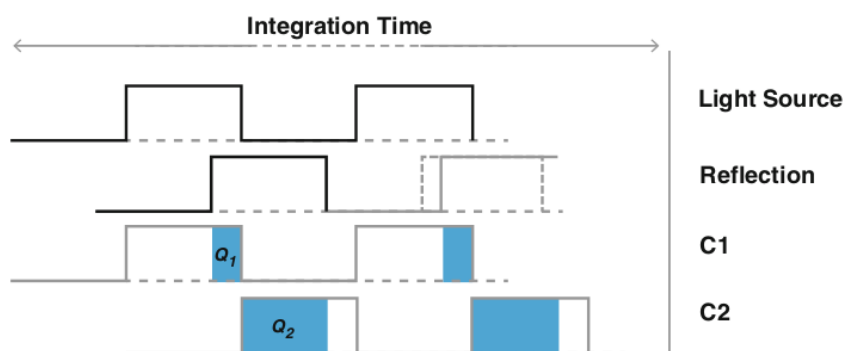
*Direct coding* (přímé kódování) je technika, kdy umístění každého pixelu je zakódováno do jeho hodnoty. Celé kódové slovo se tak musí vejít do informace reprezentované tímto pixelem. K dosažení takového kódování je nutné použít velký rozsah hodnot barev. Tato metoda umožňuje získat velice přesné měření, avšak je také nejcitlivější na vnější vlivy jako je barva skenovaného objektu. Z tohoto důvodu se používá pouze na statické scény. [20]



**Obrázek 4.8:** Strukturované vzory: time-multiplexing vlevo, spatial neighborhood uprostřed, direct coding vpravo [20]

### 4.3.3 Time-of-Flight kamera

*Time-of-flight* kamery, zkráceně TOF kamery, využívají principu měření „doby letu“. TOF kamery se skládají z vysílače a snímače elektromagnetického signálu. Vysílač, většinou infračervená LED dioda, osvítlí scénu signálem. Odražené infračervené záření je poté měřeno na maticovém senzoru, přičemž pro každý pixel je změřena doba  $t$  mezi odeslaným a přijatým signálem a na základě toho je dopočítána vzdálenost  $d$ , viz kapitolu 4.1. Jelikož jeden milimetr vzdálenosti odpovídá 6.6 pikosekundám, je zapotřebí velmi rychlá elektronika.



**Obrázek 4.9:** Měření času mezi odesláním a přijetím pulzního signálu [22]

Světelný zdroj vysílá buď jednotlivé pulzy a nebo spojitou vlnu, anglicky *continuous-wave* (CW), modulovanou čtvercovým signálem. Způsob jakým je odměřován čas u pulzního zdroje je vidět na obrázku 4.9. Světelný zdroj svítí po dobu  $\Delta t$ . Řídící obvod kamery vytváří kontrolní signály C1 a C2, které trvají také  $\Delta t$  a mají opačnou fázi. Elektrické náboje nahromaděné na fotodiodách snímače během těchto kontrolních signálů,  $Q_1$  a  $Q_2$ , jsou použity k výpočtu podle rovnice:

$$d = \frac{\Delta t c}{2} \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (4.23)$$

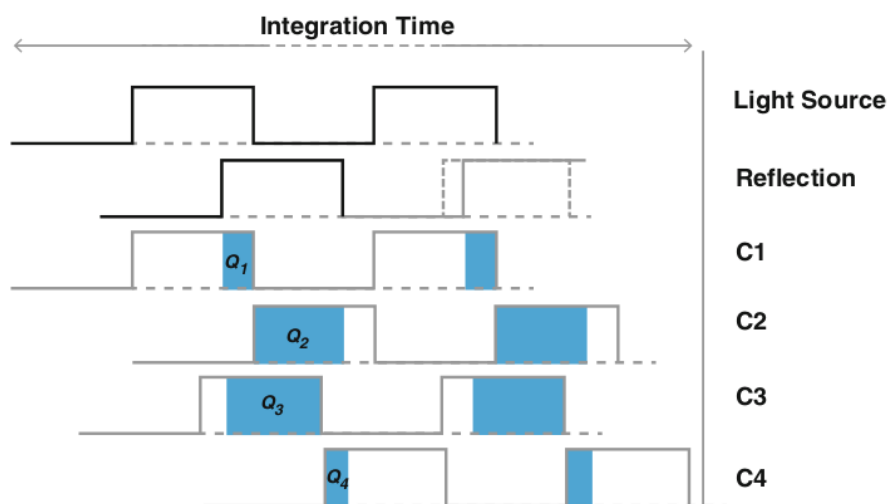
TOF kamery s CW signály neměří vzdálenost na základě měření času, ale

fázového posunu. Na rozdíl od pulzní kamery používá 4 kontrolní signály, které jsou fázově posunuty o 90 stupňů, viz obrázek 4.10. Pomocí hodnot nábojů  $Q_1$  až  $Q_4$  můžeme dopočítat fázový posuv a vzdálenost podle vztahů 4.24 a 4.25. [22]

$$\Phi = \arctan \frac{Q_3 - Q_4}{Q_1 - Q_2} \quad (4.24)$$

$$d = \frac{c}{4\pi f} \Phi \quad (4.25)$$

Tento způsob měření má oproti pulzním kamerám několik výhod. Rozdíly  $Q_3 - Q_4$  a  $Q_1 - Q_2$  odstraní konstantní offset odraženého signálu. Tento offset je způsobený například vměšováním okolního světla do odraženého signálu. Dále při výpočtu dojde k normalizaci amplitud. Tím, že je výpočet fáze nezávislý na offsetu a útlumu amplitud je mnohem robustnější než u pulzní kamery. Na druhou stranu CW kamera je omezena maximálním fázovým posunem  $2\pi$ , kterému odpovídá maximální vzdálenost  $d_{max} = c/2f$ . Z tohoto důvodu se většinou používají multispektrální světelné zdroje. [22]



Obrázek 4.10: Měření fázového rozdílu mezi odeslaným a přijatým signálem [22]

#### ■ Gated TOF kamera

Za ideálního počasí je světelný signál vyzářený z TOF kamery odražen téměř výhradně od snímaného objektu, avšak pokud umístíme kameru do místa se sníženou viditelností způsobenou například mlhou, dojde k předčasnému odražení světelného signálu od částic vody obsažených v mlze. To způsobí, že výsledný snímek se jeví poněkud rozmazaný a obsahuje mnoho nepřesností.

Řešením tohoto problému jsou *Gated TOF* kamery. Jde o speciální druh TOF kamery vybavený velice rychlou závěrkou. Pomocí této závěrky je možné získávat jen určité řezy celkové scény. Uživatel může například nastavit kameru aby zachycovala pouze odrazy, které jsou dále než 1km. Po vyzáření světelného

signálu zůstává závěrka zavřená, aby zamezila zachycení předčasně odražených fotonů a po uplynutí dostatečně dlouhé doby se závěrka otevře a snímač začne zachycovat fotony. Obrázek představuje 4.11 rozdíl mezi snímkem z klasické a gated kamery. [23]



**Obrázek 4.11:** Snímek klasickou kamerou vlevo, Snímek gated kamerou vpravo [23]

### 4.3.4 Využití hloubkových kamer

Hloubkové kamery našly svou nezastupitelnou roli na poli rekonstrukce 3D objektů. Pod tímto pojmem se skrývá celá řada aplikací, jako rozpoznávání gest, měření velikosti objektů, navigace robotů, rozpoznávání objektů, design 3D objektů nebo při diagnostice v medicíně. Hloubkové kamery se často ve spojení s dalšími senzory využívají také u autonomních vozidel pro detekování překážek na cestě.

S možností rekonstrukce 3D objektu s přesností v řádu mikrometrů vznikly první 3D tiskárny, které mají také funkci vytváření kopií reálných objektů. [22] Takovéto přesnosti dosahují především kamery na principu strukturovaného světla.

Hloubkové kamery speciálně navržené pro lidské tělo se stávají více a více dostupné. To umožňuje získávat data s vysokým rozlišením se schopností vytvářet přesné digitální modely těla. 3D model se používá pro návrh protéz a zubních náhrad, v plastické chirurgii a dermatologii. [22]

Rozpoznávání gest se využívá například v herním průmyslu. Nejznámějším senzorem na rozpoznávání gest je jednoznačně Kinect od Microsoftu, vyvinutý pro Xbox.

## 4.4 Infračervený senzor

Infračervené (IR) senzory jsou zařízení, které měří intenzitu infračerveného elektromagnetického záření. Infračervené záření má vlnovou délkou v rozmezí  $0.7 - 1000 \mu m$ . Jde o skupinu senzorů, která se částečně překrývá s jinými senzory uvedenými v této práci. Jde především o lidary, které někdy využívají k měření infračervený laser a TOF kamery, které k nasvícení scény často používají infračervenou LED diodu. V rámci této kapitoly se lidarům a kamerám nebudu věnovat.

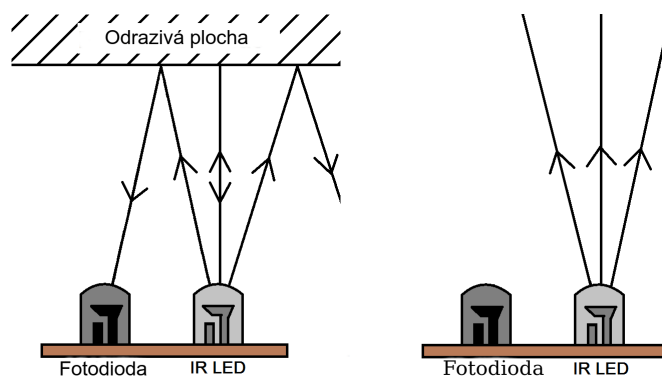
#### 4.4.1 Aktivní a pasivní IR senzory

Infračervené senzory se dělí na aktivní a pasivní. Pasivní infračervené senzory (PIR) se používají k detekci infračerveného záření, které je vyprodukováno okolím. Sami žádné záření neprodukují. K realizaci nejjednoduššího PIR senzoru stačí pouze jediná součástka - fotodioda nebo fototranzistor. Většinou se však sdružují do maticového senzoru. Využívají se například k měření teploty nebo detekci pohybu.

Aktivní infračervené senzory obsahují také emitor infračerveného záření. Díky tomu jsou schopné aktivně skenovat své okolí. Do této kategorie patří právě výše zmíněné IR lidary a TOF kamery. Patří sem ale také další senzory, jako třeba optické závory nebo senzory vzdálenosti, které měří vzdálenost na základě intenzity odraženého světla.

#### 4.4.2 Měření vzdálenosti IR senzorem

K měření vzdálenosti pomocí infračerveného světla se používají především aktivní senzory. Vzdálenost se pomocí IR senzorů měří dvěma způsoby: Na principu *Time-of-flight* a měřením intenzity odraženého světla. Metodu TOF využívají lidary a TOF kamery a je podrobně rozebrána v kapitole 4.1.

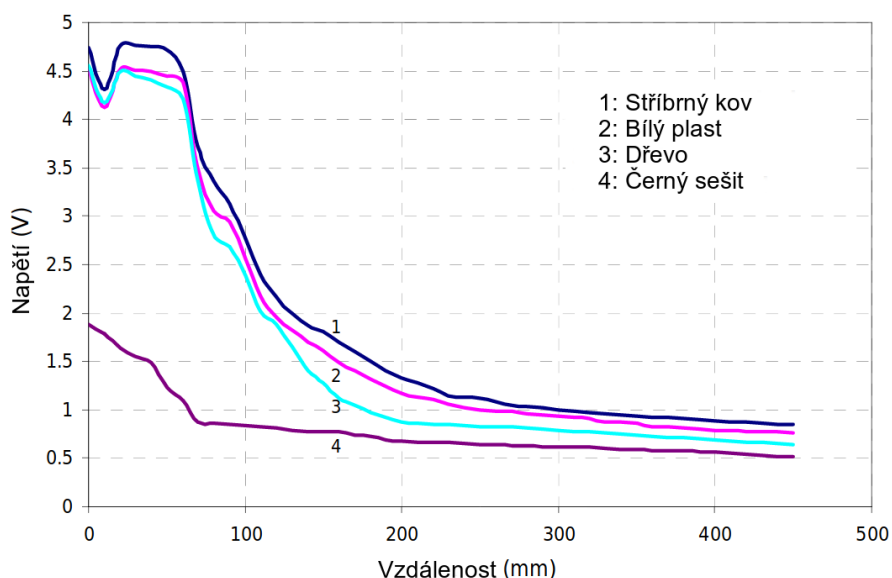


Obrázek 4.12: Jednoduchý aktivní infračervený senzor [24]

K počítání vzdálenosti na základě intenzity odraženého světla se používají daleko jednodušší senzory než u TOF. Většinou jde o jednu LED diodu a jeden fototranzistor namířené stejným směrem, viz obrázek 4.12, avšak jelikož intenzita světla klesá s kvadrátem vzdálenosti, není výstup těchto senzorů lineární vzhledem ke vzdálenosti. Navíc je intenzita odraženého světla ovlivněná barvou odrazové plochy. Obzvláště pokud jde o černou barvu, tak je výstupní charakteristika senzoru silně ovlivněna, viz obrázek 4.13. Další problém představuje všudypřítomné okolní infračervené záření, které má na charakteristiku senzoru také vliv.

Převodní charakteristika je specifická pro vybraný druh senzoru a jelikož mají infračervené senzory dosah v desítkách centimetrů, je jednoduché si





**Obrázek 4.13:** Napětí na infračerveném senzoru v závislosti na vzdálenosti a barvě odrazové plochy. [25]

jí naměřit a použít pro výpočet. Existují také analytické metody výpočtu vzdálenosti, například [25] nebo [26].

#### 4.4.3 Využití IR senzorů

Infračervené senzory jsou díky své nízké ceně zastoupeny běžně v konzumní elektronice. Například televizní ovladače mají IR LED diodu, přes kterou posílají signál televizi, která je vybavená pasivním senzorem. Tímto způsobem je možné ovládat televizi i některými chytrými telefony.

Každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření, které je úměrné absolutní teplotě tohoto tělesa. [27] Jelikož teploty, které se běžně vyskytují na zemi odpovídají infračervenému záření, používají se pasivní infračervené senzory k bezkontaktnímu měření teploty. Někdy se senzory teploty sdružují do maticových senzorů podobných kamerám. Tyto senzory pořizují dvourozměrné snímky teploty okolí. Na tomto principu funguje například noční vidění.

PIR senzory se používají také k detekci pohybu. Nejčastěji se takovými senzory setkáte u automatických dveří nebo u automatického osvětlení. Tyto senzory jsou však schopné detekovat pouze objekty, které jsou teplejší než jejich okolí. Dále se IR senzory používají jako takzvané senzory blízkosti (proximity sensor). Jde o aktivní senzory, popisované v předchozí kapitole. Detekce překážek pouze na základě těchto senzorů není příliš běžná vzhledem k poměrně nízkým dosahům a nízké přesnosti. Většinou se používají ve spojení s nějakým jiným senzorem, například ultrazvukovým. [28]

## 4.5 Sonar

Sonar je zkratka pro „sound navigation and ranging“. Jde o technologii, která využívá zvukových vln k měření vzdálenosti. Frekvence používané sonarem se pohybují od infrazvukových, používaných především v seismologii, po ultrazvukové, používané například k navigaci autonomních robotů.

Podobně jako radar a lidar využívá sonar principu *Time-of-flight*. Narozdíl od nich však využívá k měření zvukových vln, které se šíří daleko pomaleji než elektromagnetické vlny, a proto k jeho realizaci stačí méně přesná elektronika. Z tohoto důvodu bývají sonarové senzory nejlevnější z těchto tří.

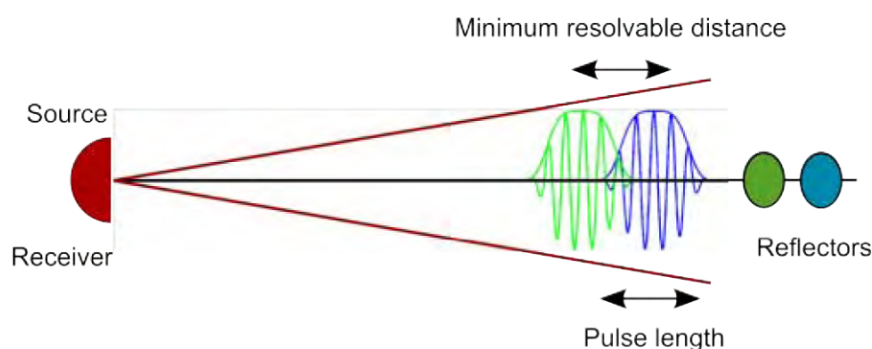
### 4.5.1 Aktivní a pasivní sonary

Sonary se dělí na pasivní a aktivní. Pasivní sonary se používají k detekování objektů, které produkují zvukové vlny. Nejčastěji jde o lodě a ponorky vybavené aktivním sonarem a nebo například seismické vlny během zemětřesení. Na rozdíl od aktivních sonarů nevysílají vlastní zvukové vlny a nemohou být použity k odhalování překážek nebo měření vzdálenosti.

Aktivní sonary jsou vybaveny jak přijímačem, tak vysílačem zvukových vln. Vysílače produkují zvukové pulzy nebo vlny, které se odrazí od vzdáleného objektu a vrátí se zpátky k přijímači.

### 4.5.2 Jak sonar funguje

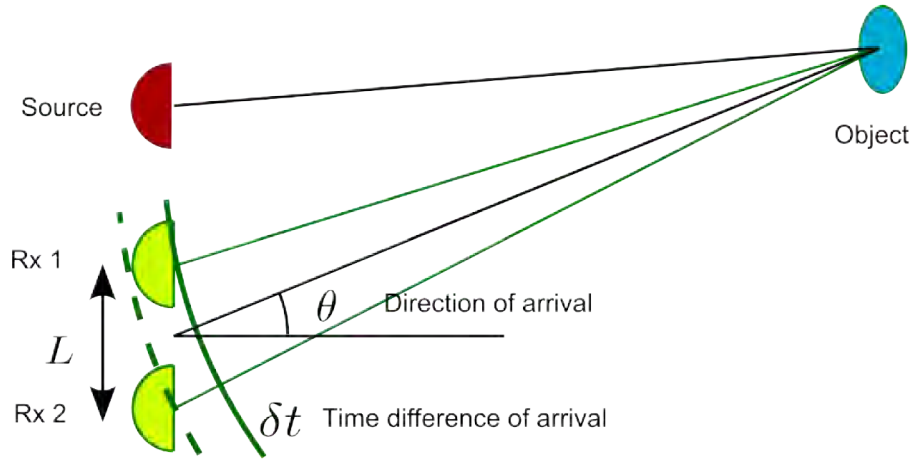
Stejně jako všechny TOF senzory i sonar měří vzdálenost podle rovnice 4.1, kde  $c$  je rychlost zvuku v příslušném médiu. Ve vodě a vzduchu se tato hodnota výrazně liší. Z tohoto důvodu má sonar ve vodě mnohem větší dosah. Rozlišení  $\partial d$  měřené vzdálenosti je dáno vztahem 4.26, kde  $T_p$  je délka jednoho pulzu.



Obrázek 4.14: Rozlišení měřené vzdálenosti sonaru [29]

$$\partial d = \frac{1}{2}cT_p \quad (4.26)$$

Rozlišení  $\partial d$  také udává jaká je minimální vzdálenost mezi jednotlivými pulzy tak, aby byly stále rozeznatelné, viz obrázek 4.14. Platí, že čím kratší pulzy, tím lepší rozlišení, ale také klesá přenášená energie a s ní i maximální dosah. [29]



**Obrázek 4.15:** Odhadování směru na základě časového rozdílu [29]

V odhadování směru, ze kterého se odrazil sonarový puls, hrají roli dvě věci: Rozměry vysílače a použití více než jednoho přijímače. Vysílač je směrový, pokud jsou jeho rozměry výrazně větší než vlnová délka signálu. Šířka měřicího úhlu  $\beta$  je přímo úměrná vlnové délce  $\lambda$  a nepřímo úměrná průměru vysílače  $D$ . To znamená, že čím vyšší frekvence, tím užší je zorné pole. Z tohoto důvodu se pro většinu aplikací sonaru používá ultrazvuk. Pokud zapojíme několik přijímačů vedle sebe, můžeme směr, ze kterého se odrazil signál, aproximovat pomocí časového rozdílu  $\Delta t$  mezi přijetím totožného pulzu dvěma různými přijímači ve vzdálenosti  $L$ . Situace je nastíněna na obrázku 4.15. Směr signálu  $\Theta$  pak můžeme spočítat jako [29]:

$$\Theta = \arcsin \frac{c\Delta t}{L} \quad (4.27)$$

### ■ 4.5.3 Využití sonaru

Jak jsem se již zmínil, sonar má ve vodě mnohem větší dosah než na vzduchu. Z tohoto důvodu je většina aplikací zaměřená na použití pod vodou. Není to však pravidlem a najde se i mnoho pozemních aplikací.

### ■ Batymetrie

Asi nejčastější využití sonaru je v batymetrii, tedy při skenování reliéfu mořského dna. Americká vládní organizace NOAA (National Oceanic and atmospheric organisation) nabízí na svých stránkách sonarové snímky amerického pobřeží. [30]

## ■ Námořnictvo

Velice často se také sonar využívá v armádě, především v námořnictvu. Pomocí sonaru je možné odhalovat ponorky a nebo třeba vodní miny. Našel zde uplatnění dokonce i pasivní sonar, pomocí kterého je možné nenápadně odposlouchávat plavidla s aktivním sonarem.

## ■ Rybolov

Jelikož je možné sonarem nahlížet pod vodní hladinu, našel svoji nezastupitelnou roli i v rybolovu. Zvukové vlny se od ryb odrazí dříve než od mořského dna a tím jsou sonarem snadno odhalitelné. K odrazu dochází především díky vzduchu, který mají ve svém měchýři. [31]

## ■ Navigace autonomních robotů

Detekce překážek je základní problém, který je třeba vyřešit pro realizaci autonomních robotů. Velice užitečné se v tomto ohledu prokázaly ultrazvukové sonary. [32] [33]

## ■ 4.6 Radar

Radar je zkratka pro „radio detection and ranging“. Jde o TOF senzor, který měří vzdálenost na základě časového intervalu mezi vyzářením a zachycením odrazu elektromagnetické vlny v rádiovém a mikrovlnném spektru ( $\lambda > 1mm$ ).

Radary se skládají z alespoň čtyř základních bloků: Vysílače, přijímače, antény a procesoru na zpracování signálu. Vysílač generuje elektrický signál. Anténa převádí elektrický signál na elektromagnetické vlny, které se po odrazu od měřeného objektu vrátí zpátky k anténě. Odražené elektromagnetické vlny se na anténě znovu přemění na elektrický signál, který je zpracován a interpretován pomocí procesoru.

### ■ 4.6.1 Typy radaru

Radary se dělí na monostatické a bistatické. U monostatických radarů jsou vysílač a přijímač na stejném místě, často také sdílejí jednu anténu. Bistatické radary mají vysílač a přijímač oddělené. U některých aplikací jsou od sebe dokonce ve vzdálenosti srovnatelné s měřenou vzdáleností.

Podle tvaru vysílaného signálu se radary dělí na pulzní a spojitě. Spojité radary vysílají nepřetržitě signál. Vysílač i přijímač jsou po celou dobu měření aktivní ve stejnou chvíli. Na druhou stranu pulzní radary vysílají jednotlivé pulzy, během nichž je zapnutý pouze vysílač, které jsou následovány časovým úsekem, kdy je vysílač vypnutý a spustí se přijímač.

Dále se radary dělí na koherentní a nekoherentní. Nekoherentní radar detekuje pouze amplitudu přijatého signálu, zatímco koherentní radar se schopný kromě amplitudy měřit taky fázi.

#### 4.6.2 Jak radar funguje

Radary se používají především k mapování vzdušného prostoru. K tomu se používá radar se směrovou anténou na otočné plošině. Aby bylo možné získat polohu v trojrozměrném prostoru, je zapotřebí 3 souřadnic. V případě radaru se většinou používají sférické souřadnice. Vzdálenost se změří jako u všech TOF senzorů, viz kapitola 4.1. Zbylé dvě úhlové souřadnice jsou shodné s natočením plošiny, na které je umístěná anténa.

V některých aplikacích se nám hodí zkoumat nejen za jak dlouho se signál vrátí, ale také v jakém tvaru. To nám pomůže získat více informací o sledovaném objektu, například jeho velikost, nebo při odhadování maximálního dosahu radaru.

Předpokládejme, že máme radar s všesměrovou anténou. Rádiový signál ve vzdálenosti  $x$  od antény bude mít výkon  $P_x$ , který je roven výkonu vysílaného signálu  $P_v$  vyděleným povrchem koule o poloměru  $x$ :

$$P_x = \frac{P_v}{4\pi x^2} \quad (4.28)$$

Radary však v naprosté většině mají směrovou anténu, která celý výkon přeměruje do úzkého paprsku, který má šířku i výšku v řádu několika stupňů. Tato skutečnost se vyjadřuje parametrem  $G_v$ , který udává poměr výkonu mezi všesměrovou a skutečnou směrovou anténou.

$$P_x = \frac{P_v G_v}{4\pi x^2} \quad (4.29)$$

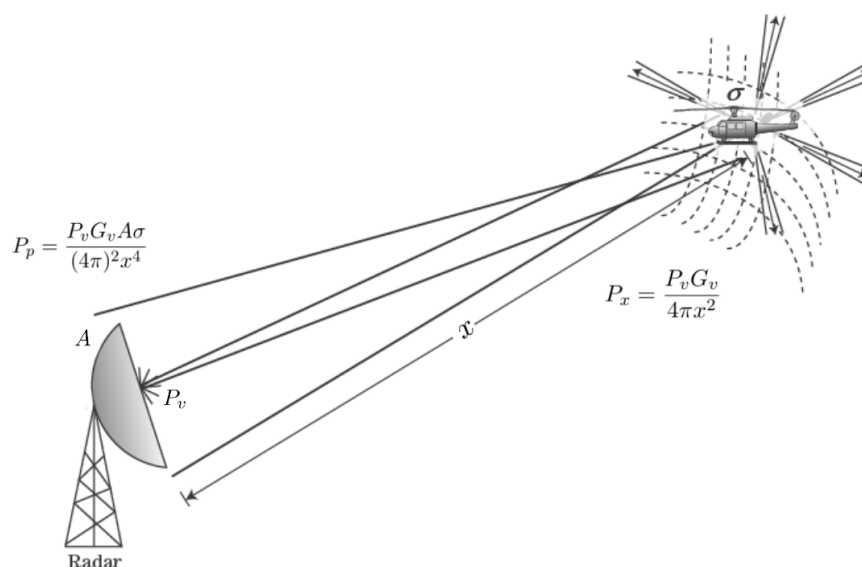
Dále předpokládejme, že ve vzdálenosti  $x$  je objekt, od kterého se tento signál odrazí různými směry, viz obrázek 4.16. Část tohoto signálu se ale odrazí zpět směrem k radaru. Výkon signálu odraženého zpět k radaru je vyjádřen jako  $P_o = P_x \sigma$ . Odrazivé vlastnosti objektu se nazývají radarový průřez  $\sigma$  nebo anglicky *Radar cross section*. Čím větší je hodnota  $\sigma$ , tím snadněji je objekt detekovatelný. Odražený signál putuje zpět k radaru, který je ve vzdálenosti  $x$ , takže výkon signálu  $P_p$ , který dorazí k anténě přijímače je roven [34]:

$$P_p = \frac{P_o}{4\pi x^2} = \frac{P_v G_v \sigma}{(4\pi)^2 x^4} \quad (4.30)$$

Posledním krokem je přidat do rovnice 4.30 proměnnou, která vyjadřuje efektivní plochu antény přijímače  $A$ . Výkon přijatého signálu nyní můžeme zapsat ve tvaru:

$$P_p = \frac{P_v G_v A \sigma}{(4\pi)^2 x^4} \quad (4.31)$$

Rovnice 4.31 obsahuje ve jmenovateli vzdálenost  $x$  ve čtvrté mocnině. To znamená, že pokud zdvojnásobíme vzdálenost, výkon přijatého signálu bude



**Obrázek 4.16:** Výpočet výkonu přijatého radiového signálu [34]

šestnáctkrát nižší. Z tohoto důvodu se pro aplikace na velkou vzdálenost používají velice výkoné vysílače (v řádu megawattů) a velmi citlivé přijímače (v řádu mili- až nanowatt). Aby nedocházelo k rušení přijímače, musí být velmi dobře izolován od vysílače. Z tohoto důvodu se na velké vzdálenosti používají buď monostatické pulzní radary, které k oddělení přijímače a vysílače používají časový multiplexing, a nebo bistatické. Monostatické spojitě radary jsou omezeny krátkým dosahem. [34]

### ■ 4.6.3 Využití radaru

Existuje celá řada radarů s velice odlišnými vlastnostmi, od radarů, jejichž signál dokáže proniknout pár metrů pod zemský povrch, po radary, které dokáží detekovat cíl vzdálený tisíce kilometrů. V následujícím textu uvádím jen pár příkladů, aby si čtenář mohl udělat obrázek o tom, jak se radar běžně používá.

#### ■ Meteorologie

Pomocí radaru je možné sledovat a předpovídat počasí. Moderní radary jsou schopny měřit nejen oblačnost a srážky, ale také rychlost větru s využitím Dopplerova jevu, viz kapitola 4.1.2. [34]

#### ■ Kontrola letového provozu

Radary se používají k bezpečnostní kontrole letového provozu v okolí každého moderního letiště. Používají se velmi přesné radary, pomocí kterých

jsou letadla navigována k úspěšnému přistání i v nepříznivých podnebních podmínkách. [35]

### ■ Lodní navigace

V lodní dopravě našly radary své uplatnění pro skenování svého okolí a odhalování případných překážek. Většinou se používají ve spojení se sonarem. Radar skenuje vzdušný prostor, zatímco sonar podvodní.

### ■ Dopravní radary

Policejní radary jsou jednoduché radary, které dokáží měřit Dopplerův posuv a tím pádem rychlost vozidel, viz kapitola 4.1.2. Policejní radary většinou nemají příliš velký dosah, ale za to mají malé rozměry a je možné je držet v ruce. [34]

## ■ 4.7 Lidar

Lidar je zkratka pro „light detection and ranging“. Jde o technologii, která měří vzdálenost na základě časového intervalu mezi vyzářením a zachycením odrazu laserového signálu. Lidar je aktivní senzor, který k měření vzdálenosti může využívat nejen elektromagnetické záření viditelného spektra (400 – 700nm), ale také ultrafialového (225 – 400nm) a nebo infračerveného (0.7 – 12mm). Každý lidar obsahuje 5 základních součástí: Laserový vysílač, optiku vysílače, přijímač, optiku přijímače a elektronický systém, který sbírá a vyhodnocuje data nasbíraná na přijímači. Sensory mohou obsahovat ještě i další komponenty, které jsou specifické pro daný typ lidarů a jeho použití. Mohou to být například další lasery, nebo další přijímače, filtry, spektrometry a tak dále. [36]

Optika vysílače slouží jednak k rozšíření poloměru vyzařovaného paprsku a jednak snižuje jeho rozptyl. Optika přijímače zachycuje odražené světlo a usměrňuje ho na detektor. Příslušná elektronika se poté postará o zpracování přijatého signálu na měřenou fyzikální veličinu. Nemusí se jednat vždy o vzdálenost. Lidar se často používá na měření různých fyzikálních nebo chemických vlastností atmosféry, jako je vlhkost a nebo výskyt různých částic ve vzduchu. [37] Dále je součástí většiny lidarů také elektromotor, který celým zařízením otáčí, aby mohl senzor skenovat své okolí ve větším rozsahu.

### ■ 4.7.1 Typy lidarů

Lidary můžeme rozdělit podle vlnové délky jejich laseru, která mění jejich odrazivé vlastnosti a tím pádem se pro různé aplikace hodí lasery o různé vlnové délce. Lasery s vlnovou délkou v ultrafialovém spektru se nejčastěji používají v meteorologii, zelené lasery se zase používají k měření hloubky

oceánů, protože zelené světlo dobře proniká vodní hladinou, téměř infračervené (near-infrared) lasery se používají nejčastěji v leteckých systémech na skenování zemského povrchu. Někdy se používají také multispektrální lasery, které obsahují více zdrojů světla o různých vlnových délkách. [37]

Podle formátu výstupních dat můžeme také lidary rozdělit na 1D, 2D a 3D. 1D lidary se také nazývají laserové dálkoměry a jsou schopné měřit pouze vzdálenost od objektu v jednom směru. 2D lidary obsahují elektromotor, který otáčí senzorem, a tím jsou schopné získat informaci o svém okolí v rovině otáčení. Tyto lidary jsou často používány u jednoduchých pozemních autonomních robotů, kteří si pomocí tohoto senzoru vytváří mapu svého okolí a můžou se díky tomu vyhýbat překážkám. 1D a 2D lidary zpravidla obsahují jednu dvojici vysílač-přijímač. 3D lidary buď obsahují jeden senzor, kterým je možné otáčet ve dvou různých směrech a nebo obsahují několik řad vysílačů a přijímačů. Tím, že otáčí celou řadou, jsme poté pomocí těchto senzorů schopni vytvořit 3D mapu jejich okolí.

Dále můžeme lidary dělit podle principu měření vzdálenosti na TOF a triangulační. Lidary, které používají triangulaci bývají většinou levnější a mají menší dosah. Na krátké vzdálenosti je však možné pomocí triangulace dosáhnout většího rozlišení než u TOF.

#### 4.7.2 Jak lidar funguje

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, lidary měří vzdálenost buď pomocí principu TOF, který je popsán v kapitole 4.1 a nebo pomocí triangulace, která je popsána v rámci hloubkových kamer. Jde v podstatě o strukturované světlo, kde vzorem je pouze jediný bod, viz kapitola 4.3.2.

V některých aplikacích se nám hodí zkoumat nejen za jak dlouho se signál vrátí, ale také v jakém tvaru. To se nám hodí například když neměříme vzdálenost, ale nějaké vlastnosti média, do kterého laser vysíláme. Výkon zachyceného signálu  $P_r$  není závislý jen na vlastnostech lidaru a vzdálenosti, ale také na vlastnostech média, kterým se laser šíří. Při průchodu médii se může signál odrážet, pohlcovat, depolarizovat a nebo měnit svou vlnovou délku. Parametry, které vyjadřují tuto skutečnost se nazývají extinkční koeficient  $\alpha$  a koeficient zpětného odrazu  $\beta$ . [37]

Extinkční koeficient  $\alpha(x, \lambda)$  udává míru útlumu intenzity laserového paprsku o vlnové délce  $\lambda$  při průchodu médii ve vzdálenosti  $x$ . Koeficient zpětného odrazu  $\beta(x, \lambda)$  vyjadřuje kolik světla se odrazí ve vzdálenosti  $x$  do prostorového úhlu  $A/x^2$ , kde  $A$  je obsah detektoru. Výkon zachyceného signálu  $P_r$ , který je odrazem impulzu o průměrném výkonu  $P_t$  a délce  $\tau$  lze vyjádřit pomocí rovnice 4.32

$$P_r = \frac{c\tau}{2} P_t \frac{A\eta(\lambda)}{x^2} \beta(x, \lambda, \lambda_0) e^{\int_0^x -\alpha(\lambda, \xi) d\xi} e^{\int_0^x -\alpha(\lambda_0, \xi) d\xi}, \quad (4.32)$$

kde  $\eta$  je koeficient, který udává efektivitu detektoru, ztráty na zrcadlech a filtrech,  $\lambda$  je vlnová délka odeslaného signálu a  $\lambda_0$  je vlnová délka po odrazu signálu. V praxi se snažíme výpočet co nejvíce zjednodušovat, a proto bývá rovnice 4.32 často upravována. Za předpokladu, že  $\lambda = \lambda_0$  a



pokud považujeme extinkční koeficient prostředí za konstantní, můžeme obě exponenciály nahradit konstantou  $\gamma$ . Ve výsledku pak dostaneme výraz 4.33 který se již daleko lépe počítá numericky. [37]

$$P_r = \frac{c\tau}{2} P_t \frac{A\eta}{x^2} \beta \gamma^2, \quad (4.33)$$

### 4.7.3 Využití lidarů

Aplikací lidarů existuje celá řada ve všech možných odvětvích. V následující, textu uvádím jen pár příkladů, aby si čtenář mohl udělat obrázek o tom, jak se lidar běžně používá.

#### Astronomie

V astronomii se lidar využívá již od šedesátých let k měření vzdálenosti Měsíce. V roce 2009 vyšla studie stanovující vzdálenost měsíce s milimetrovou přesností. [39] Na přelomu tisíciletí vyslala NASA kolem Marsu umělou družici MOLA, která pomocí lidarového senzoru pomohla k vytvoření přesné topografické mapy Marsu.[40]

#### Autonomní vozidla

Autonomní vozidla používají lidar k tomu, aby včas detekovali překážku na trase a bezpečně s jí vyhnula nebo zastavila. K tomu používají 3D lidary většinou ve spojení ještě s nějakým jiným senzorem, například radarem a nebo kamerou.

#### Letecké snímky

Data získaná pomocí lidarů mohou být použita k vytvoření digitálního modelu zemského povrchu. Toho se využívá především při výrobě přesných digitálních map. Pomocí snímků z lidarů je možné získat nejen výškový profil zemského povrchu, ale také například výšku lesního porostu. [41] Dále našel lidar uplatnění při skenování mořského dna. Touto metodou je možné skenovat mořské dno do hloubky až cca 60m velmi rychle v porovnání se skenováním pomocí sonaru. [42]

#### Meteorologie

V meteorologii našly lidary své uplatnění například při zkoumání profilu mraků, měření teploty, rychlosti větru nebo při zjišťování obsahu různých plynů nebo aerosolů v atmosféře. Jedním ze zajímavých příkladů je měření emisí oxidu siřičitého do atmosféry ze sopek Etna, Stromboli a Vulcano.[43] Měření rychlosti větru lidarem našlo své uplatnění nejen v meteorologii, ale hodí se také například k optimalizaci výkonu větrných elektráren. [44]

### ■ Zemědělství

Poněkud překvapivě našly lidary své uplatnění i v zemědělství. Zde můžou například pomoci rozhodnout, v jakých částech zemědělské plochy je třeba použít více či méně hnojiva. Pomocí leteckých snímků z lidaru se pořídí přesná topografická mapa pole a pomocí ní se zjistí, na které části méně svítí slunce a je zde tedy potřeba více hnojiva. [45]

## Kapitola 5

### Testování lidarů

#### 5.1 Cíl měření

Cílem této práce je otestovat zda-li je lidar jako technologie vhodná pro odhalování překážek na trase nevidomých. V kapitole 2.4 jsem popsal, jaké překážky jsou pro nevidomé obzvláště nebezpečné, protože nejsou detekovatelné bílou holí. Jelikož se bílá hůl používá zpravidla těsně nad zemí, není možné s ní detekovat překážky ve vzduchu. Proto jsem se pro měření snažil vybírat překážky zasahující do cesty nad zemí.

Cílem mého měření je zjistit, jestli je možné z lidarových snímků spolehlivě odhalit takovéto překážky a to z dostatečné vzdálenosti, aby na ně bylo možné včas zareagovat. Průměrná reakční doba mladého člověka na zvukový signál je  $230ms$  [46] a průměrná rychlost chůze zdravého člověka je  $1.4m/s$  [47]. Aby měl uživatel dostatek času na zareagování, stanovil jsem vzdálenost, ze které musí lidar nejpozději odhalit překážku, na 1.5 metru.

#### 5.2 RPLIDAR A1M8

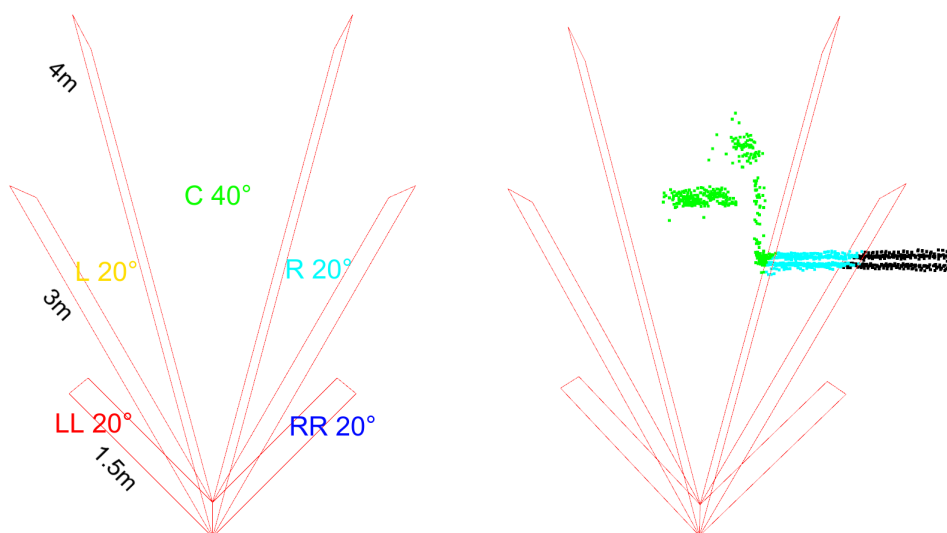
Pro účely této práce mi byl katedrou telekomunikačních technologií poskytnut lidar RPLIDAR A1M8. Jde o 2D lidar, který k měření vzdálenosti využívá triangulace laserového paprsku. Laser je umístěn na plošince, která se během měření otáčí. Díky tomu je možné vytvářet 2D mapu okolního prostředí. RPLIDAR A1M8 je schopný skenovat své okolí až do vzdálenosti 12m s frekvencí 2-10Hz. Tato frekvence značí kolikrát za vteřinu se provede měření celého okolí. Úhlové rozlišení je jeden stupeň a relativní chyba měření vzdálenosti je 1%. [48]

#### 5.3 Postup měření

Pro měření jsem vybral pět typických překážek. Jedna dopravní značka, jedna otevřená telefonní budka v metru, jedna poštovní schránka a dvakrát větve okolní vegetace zasahující do cesty. U každé překážky jsem postavil lidar na stativ ve vzdálenosti 1.5, 2.5 a 3.5 metru od překážky podél vodící linie. Fotografie všech překážek naleznete v příloze A.

Abych simuloval data z 3D lidarů, který by byl na reálnou aplikaci vhodnější, nastavoval jsem výšku lidarů v rozmezí 1-2m a pro každou výšku provedl skenování. Krok mezi jednotlivými výškami byl 5cm. Měření v jednotlivých výškách jsem poté spojil do jednoho snímku pomocí python knihovny open3d.

RPLIDAR A1M8 skenuje okolní prostředí ve všech směrech. Nevidomý ale potřebuje být upozorněn pouze na překážky, které se nachází před ním. Proto jsem zorné pole lidarů omezil na 120°. Navíc například na překážku, která se nachází přímo před ním, by měl být upozorněn z větší vzdálenosti, než u překážek nacházejících se po stranách. Z tohoto důvodu jsem rozdělil zorné pole na pět oblastí (LL, L, C, R, RR). Každé oblasti je přidělena unikátní barva a je ohraničena maximální vzdáleností a úhlem, viz obrázek 5.1. Pokud se překážka vyskytuje v některé z oblastí je obarvena příslušnou barvou. Pokud nespadá do žádné oblasti je obarvena černě. Rozdělení pomůže například při vyhodnocování výsledků nebo při převádění vstupních dat na zvukové a nebo hmatové signály pro nevidomé.



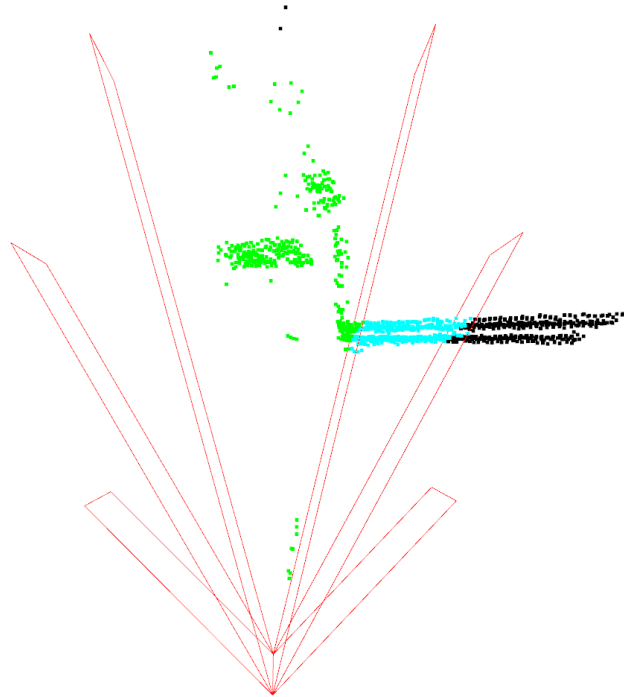
**Obrázek 5.1:** Vlevo rozdělení zorného pole lidarů do 5 oblastí. Vpravo lidarový snímek telefonní budky v metru vykreslený pomocí knihovny open3d.

## 5.4 Výsledky měření

U jednotlivých snímků jsem vyhodnocoval, zda-li je v příslušné oblasti zorného pole překážka a pokud ano, tak v jaké vzdálenosti. Celé snímky jednotlivých měření naleznete v příloze A. U překážky „Poštovní schránka“ nebylo měření provedeno ze vzdálenosti 3.5m, protože bych při měření zasahoval do silnice. Za správný výsledek považuji, že v některé z oblastí je nalezena překážka v odpovídající vzdálenosti.

Jako překážku považuji shluk alespoň 5 bodů, které jsou maximálně 20cm daleko od sebe. Shluky obsahující méně než 5 bodů nepovažuji za překážku,

protože může jít například o náhodné odrazy od malých částic poletujících ve vzduchu. Navíc při měření proti skleněným překážkám docházelo k větší chybě odhadu vzdálenosti, což způsobilo že se na snímku objevovaly izolované špatně naměřené body. Na obrázku 5.2 je znovu snímek z obrázku 5.1, ale tentokrát nejsou odfiltrovány izolované body.



**Obrázek 5.2:** Lidarový snímek prosklené telefonní budky bez odfiltrovaných izolovaných bodů.

V tabulce 5.1 jsou zapsány výsledky všech měření. Tučně jsou v tabulce zaneseny vzdálenosti, které byly naměřeny se sledovanou překážkou. Ostatní vzdálenosti náleží jiným překážkám, které se v okolí vyskytovaly. Symbolem „-“ je označené, že nebyla žádná překážka detekovaná.

Z tabulky je vidět, že až na překážku „Větve 2“ byly všechny překážky detekovány ve vzdálenosti odpovídající skutečné vzdálenosti  $\pm 30\text{cm}$ . Vlastnosti použitého lidarů zaručují daleko větší přesnost. Chyba je způsobená metodou určování vzdálenosti, kdy jako vzdálenost překážky počítám vzdálenost nejbližšího bodu v dané oblasti, která ale může příslušet jiné překážce. Například stačí jedna větvička, která zasahuje do snímku blíže než sledovaná překážka a odhad vzdálenosti to výrazně ovlivní.

Překážka	Skutečná vzdálenost [m]	Naměřená vzdálenost překážky podle oblasti zorného pole [m]				
		LL	L	C	R	RR
Dopravní značka	1.5	-	<b>1.7</b>	-	-	-
Dopravní značka	2.5	0.9	<b>2.7</b>	<b>2.6</b>	-	-
Dopravní značka	3.5	1.4	1.5	<b>3.8</b>	-	-
Otevřená telefonní budka	1.5	-	-	<b>1.5</b>	1.1	1.1
Otevřená telefonní budka	2.5	-	-	<b>2.1</b>	2.0	-
Otevřená telefonní budka	3.5	-	-	<b>3.1</b>	-	-
Poštovní schránka	1.5	-	1.9	<b>1.4</b>	-	-
Poštovní schránka	2.5	-	-	<b>2.5</b>	-	-
Větve 1	1.5	1.3	1.2	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>	-
Větve 1	2.5	1.4	1.4	<b>2.5</b>	-	-
Větve 1	3.5	-	1.7	<b>3.2</b>	-	-
Větve 2	1.5	-	-	<b>1.1</b>	1.0	1.1
Větve 2	2.5	-	-	<b>2.1</b>	2.0	-
Větve 2	3.5	-	-	<b>2.9</b>	2.6	-

**Tabulka 5.1:** Výsledky měření s lidarem. Tučně jsou zaneseny vzdálenosti, které byly naměřeny od sledované překážky. Ostatní vzdálenosti náležejí jiným překážkám, které se v okolí vyskytovaly. Symbolem „-“ je označené, že nebyla žádná překážka detekovaná. Snímky všech překážek naleznete v příloze A.

## Kapitola 6

### Diskuze

V předchozí kapitole bylo ukázáno, že lidar bez větších problémů detekuje překážky, se kterými by se mohl setkat těžce zrakově postižený uživatel ve městě. Menší přesnost dosahuje lidar při měření proti sklu, což by mohl být problém například na zastávkách městské hromadné dopravy. Pro účely asistenční pomůcky pro nevidomé však nepotřebujeme získávat přesné hloubkové mapy, ale stačí omezit se na informaci, zda-li se v některé oblasti zorného pole vyskytuje překážka a jak daleko. Pro tento účel byl RPLIDAR A1M8 více než dostatečně přesný.

Problém při orientaci v prostoru za pomoci testovaného lidaru nastane pokud se na trase vyskytnou například neoznačené výkopy stavby nebo třeba schody (směrem dolů). V takovémto případě totiž lidar nedetekuje žádnou překážku a pokud by zrakově postižený člověk nepoužíval bílou hůl, mohl by přijít k úrazu. Řešením by bylo použití 3D lidaru, který by měl dostatečně velký vertikální úhel obrazu a byl by schopný detekovat nejen překážky ve výšce hlavy, ale také zem před ním.

Dalším problémem spojeným s lidarem je jeho cena. 3D lidary vhodné pro teoretickou asistenční pomůcku se pohybují v cenách startujících na 500 dolarech. Většinou se však ceny pohybují daleko výše[49][50]. Navíc tyto lidary váží kolem 500 – 1000g, což nás přivádí k otázce: Jak se případná pomůcka bude nosit?

Podle mého názoru připadají v úvahu pouze dvě možnosti a to, že bude lidar připevněný buď na vestě a nebo na přilbě. Hlavu člověk během chůze často různě natáčí a naklání a instrukce by se tak mohli měnit příliš skokově. Navíc většina těžce zrakově postižených se snaží stále dbát na to, aby dobře vypadali [51]. Z těchto důvodů bych upřednostnil umístění na vestě, které je daleko více stabilní a nezakrývá obličej a vlasy.

Největší otázkou zůstává, jak přeložit data získaná lidarem do instrukcí pro nevidomého. Na výběr máme mezi zvukovými a hmatovými signály. Ani jedním způsobem však není možné zahrnout veškerá získaná data. I z tohoto důvodu jsem v kapitole 5.3 rozdělil zorné pole do 5 oblastí.

Jedna z možností je například jít po vzoru [11] a použít 5 vibračních elektromotorů a připojit je ke speciálnímu držátku. Každý elektromotor by se držel jedním prstem a odpovídal by jedné z oblastí, přičemž vibrace by značily, že v dané oblasti se nachází překážka. Intenzita vibrací by pak mohla

značit vzdálenost překážky.

Další možností je využití zvukových instrukcí. Zde máme ještě na výběr mezi předáváním informací o okolí v podobě hlasových instrukcí a nebo echolokací. Různé studie ukazují, že jsou lidé schopni orientace pomocí echolokace, avšak v omezené míře oproti jiným savcům, kteří jsou schopni slyšet ultrazvuk [52][53]. Existuje dokonce práce pojednávající přímo o odhadování polohy překážek echolokací na základě dat z 2D lidarů. V uvedené studii však bylo provedeno testování pouze v jednoduchých laboratorních podmínkách, kdy nebylo bráno v úvahu složitější městské prostředí. Čím více překážek bylo detekováno, tím větší problém měli uživatelé s určením jejich polohy [54].

Hlasové instrukce se dají použít k přesnějšimu popisu scény, avšak samotný popis okolí trvá nějakou dobu, a tak je potřeba se během chůze omezit jen na nejdůležitější informace typu: „Napravo je překážka ve vzdálenosti xyz.“ Dále by bylo možné přidat do systému ještě kameru, jako je tomu například u [13] a propojit data z lidarů a kamery s *object recognition* algoritmem. Tímto způsobem by bylo možné zahrnout do instrukcí i jaký objekt se před nevidomým nachází. Z hlediska uživatelské přívětivosti mi přijde tato metoda nejlepší, avšak je z uvedených možností nejsložitější na provedení.

Porovnáním všech senzorů na detekci překážek dojdeme k závěru, že lidar z nich poskytuje nejpřesnější prostorovou informaci, avšak jeho cena činí jeho použitelnost na vývoj asistenční pomůcky diskutabilní. V tomto ohledu jsou daleko více vhodné kamera a ultrazvukový senzor, avšak kamera neposkytuje informaci o hloubce a ultrazvuk měří vzdálenost pouze v jednom směru. Aby bylo možné na základě ultrazvukového senzoru vytvořit trojrozměrné hloubkové mapy, je třeba jich použít větší množství a ideálně ve spojení s kamerou [13].

Další zajímavou možností by bylo použít hloubkovou kameru, například ZED Stereo Camera, která je ve srovnání s lidarem o poznání levnější (\$350), avšak stále poskytuje dostatečně přesné prostorové informace.

Naprosto nepoužitelný pro asistenční pomůcku se mi jeví radar, který poskytuje podobná data jako ultrazvukový senzor. Na rozdíl od ultrazvuku má sice větší dosah, ale za cenu větších rozměrů a ceny. Podobně je na tom infračervený senzor, u kterého není problém velikost a cena, ale má malý maximální dosah a přesnost.



## Kapitola 7

### Závěr

Tato práce se zaměřuje na možnosti navigace a orientace těžce zrakově postižených. Jsou zde představeny překážky, které dělají těžce zrakově postiženým největší problémy. Jelikož nevidomí operují s bílou holí těsně nad zemí, nedokáží s ní detekovat překážky, které zasahují do cesty až od pasu výše. Jde například o větve stromů a křovin rostoucích podél cesty a nebo špatně umístěné billboardy.

Pozornost je také věnována jak klasickým kompenzačním pomůckám, jako je bílá hůl, tak i moderním pomůckám, které využívají různých elektrických senzorů k detekci překážek. I přes to, že tyto moderní pomůcky doplňují nedostatky klasických kompenzačních pomůcek, žádná z nich zatím není dostatečně spolehlivá a uživatelsky přívětivá, aby se stala běžně používanou pomůckou nebo dokonce nahradila bílou hůl.

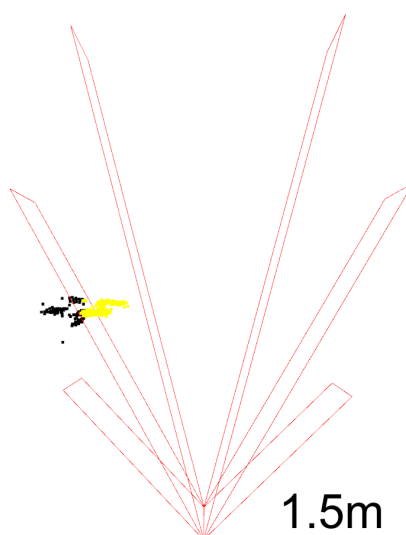
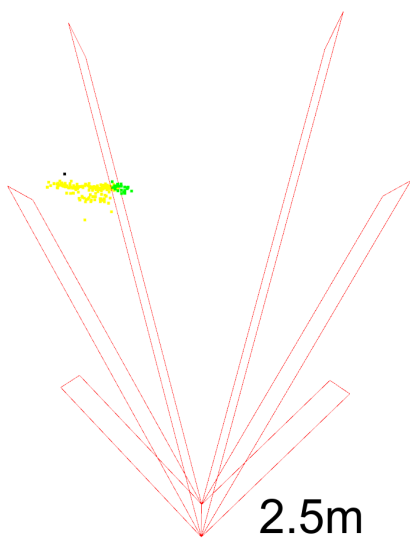
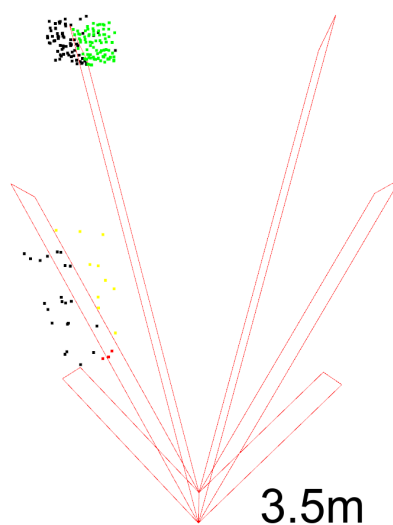
Mezi senzory používané k detekci překážek se řadí: kamera, hloubková kamera, infračervený senzor, sonar, radar a lidar. Všechny výše zmíněné senzory jsou podrobně popsány a je u nich vysvětlen princip detekce překážek.

Dále byl testován lidar RPLIDAR A1M8, zda-li dokáže odhalit některé typicky problémové překážky. Měření ukázalo, že lidar bez větších problémů detekuje překážky, se kterými by se mohl setkat těžce zrakově postižený uživatel ve městě. 3D lidary obecně poskytují ze zmíněných senzorů v daném rozsahu nejpřesnější hloubkové mapy, avšak využití lidarů jako asistenční pomůcky zůstává diskutabilní, neboť ceny 3D lidarů jsou ve srovnání s ostatními senzory poměrně vysoké.

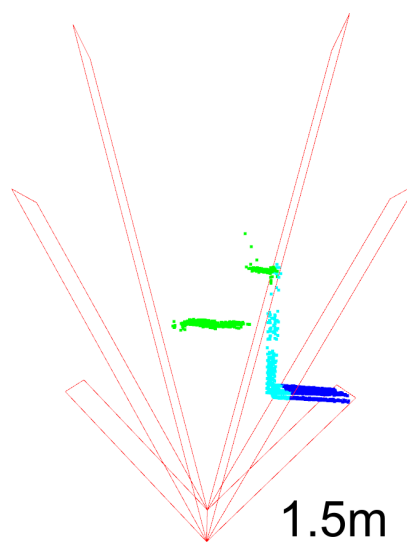
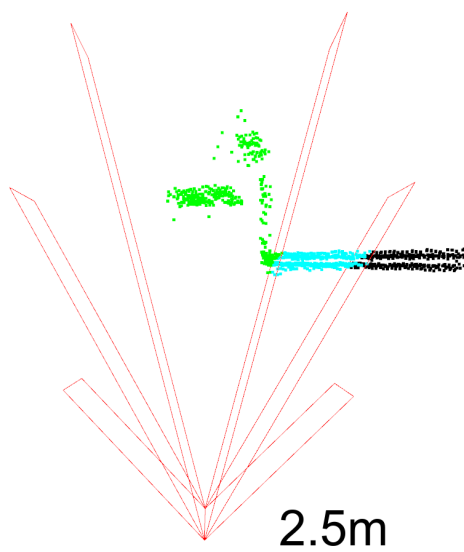
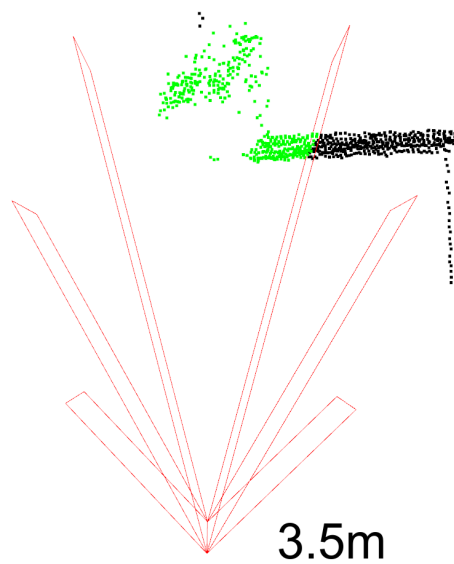


# Příloha A

## Snímky překážek



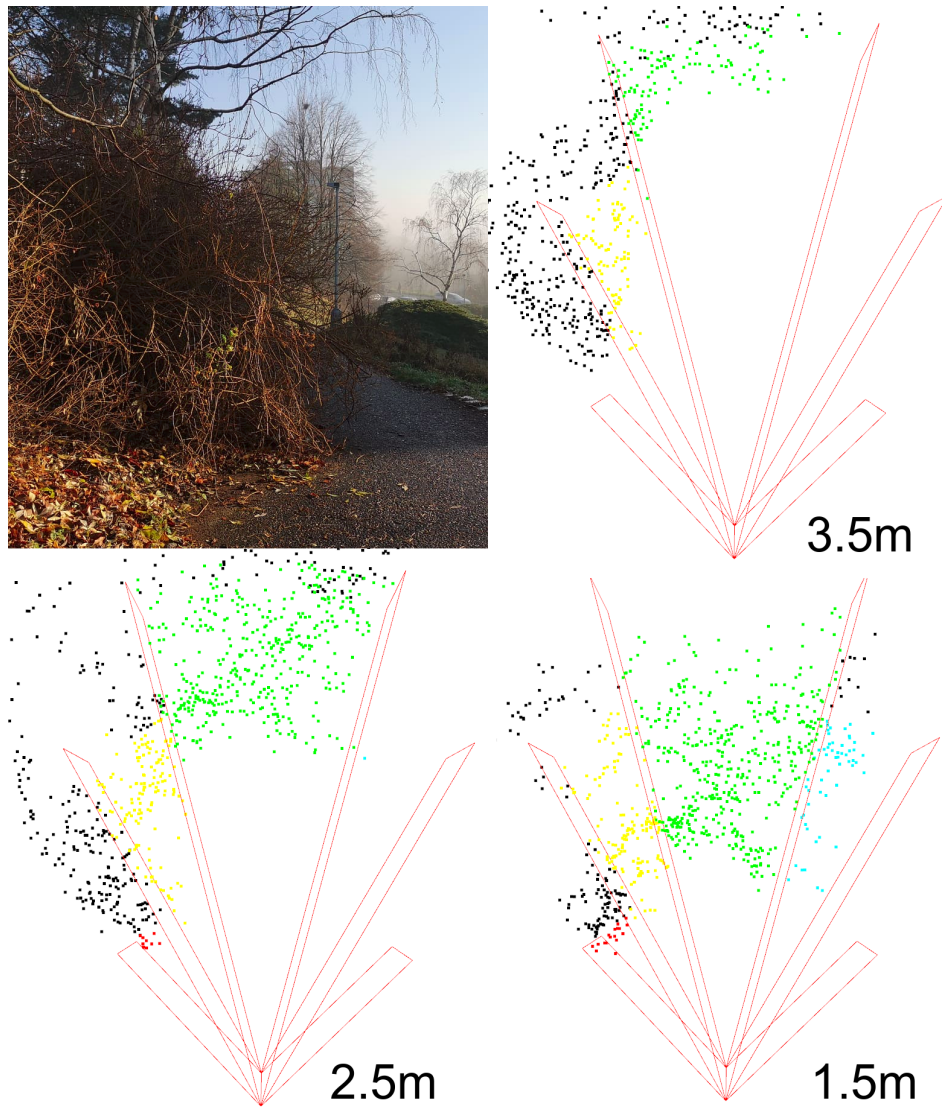
Obrázek A.1: Dopravní značka



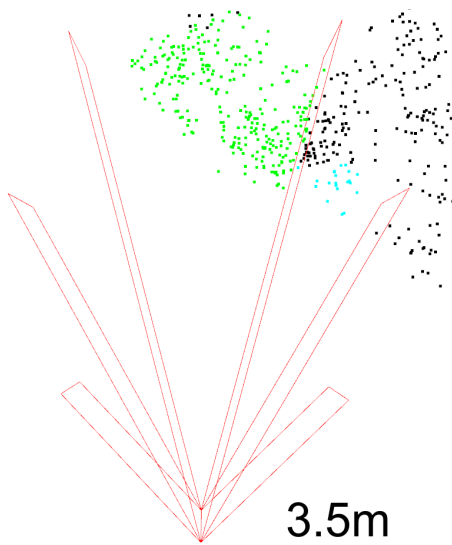
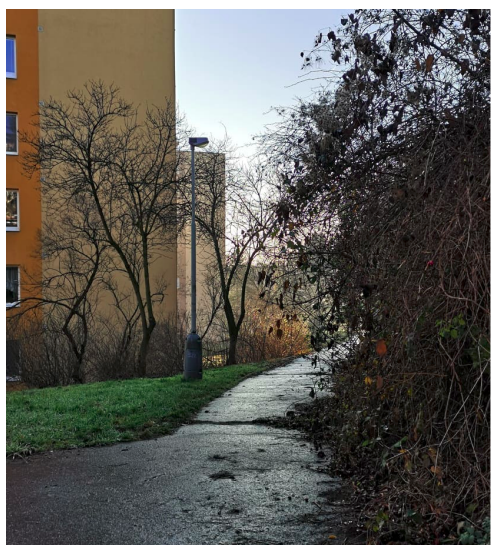
Obrázek A.2: Otevřená telefonní budka



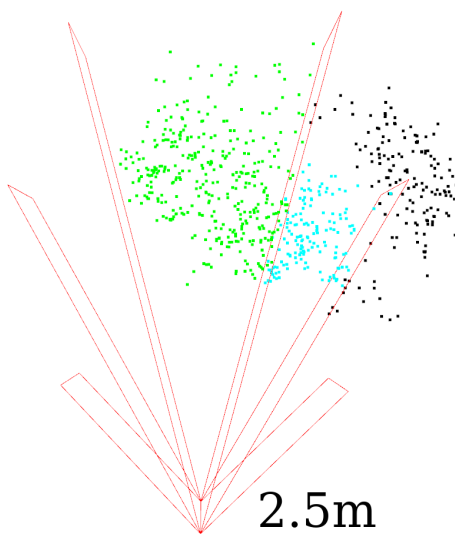
Obrázek A.3: Poštovní schránka



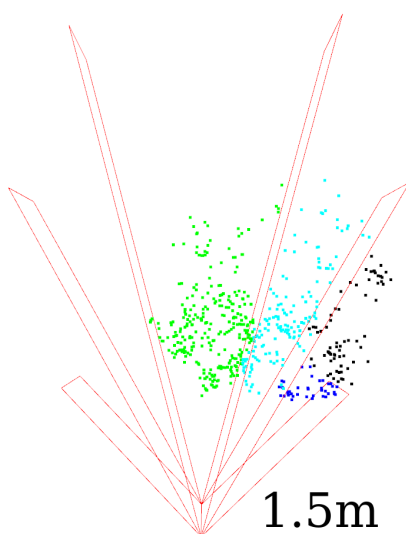
Obrázek A.4: Větve 1



3.5m



2.5m



1.5m

Obrázek A.5: Větve 2





## Příloha B

### Literatura

- [1] MARIOTTI, Silvio. P. Global data on visual impairment. Global data on visual impairment [online]. Switzerland: World Health Organization, 2010 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.who.int/blindness/publications/globaldata/en/>
- [2] Poslepu [online]. 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://poslepu.cz/tag/zrakove-postizeni/>
- [3] ČÁKIOVÁ, Julie, KOMŮRKOVÁ, Tereza, ed. Klasifikace zrakového postižení. Národní informační centrum pro mládež [online]. 2014 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.nicm.cz/klasifikace-zrakoveho-postizeni>
- [4] MKN-10: mezinárodní statistická klasifikace nemocí a přidružených zdravotních problémů : desátá revize : obsahová aktualizace k 1.1. 2018. Praha: Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, 2018. ISBN 978-80-7472-168-7.
- [5] Psychologie pro praxi. Nakladatelství Karolinum, 2014, 2014. ISSN 1803-8670.
- [6] WHITE, Robert W.; GRANT, P. M. Designing a visible city for visually impaired users. In Proceedings of the 2009 International Conference on Inclusive Design, INCLUDE 2009. Royal College of Art, London.
- [7] Manduchi, Roberto and Kurniawan, Sri. (2011). Mobility-related accidents experienced by people with visual impairment. Insight: Research and Practice in Visual Impairment and Blindness. 4.
- [8] BUBENÍČKOVÁ, Hana, Petr KARÁSEK a Radek PAVLÍČEK. Kompenzační pomůcky pro uživatele se zrakovým postižením. Brno: TyfloCentrum Brno, 2012. ISBN 978-80-260-1538-3.
- [9] HELEBRANTOVÁ, Petra. Vliv vodícího psa na psychiku nevidomého. Nám. J. Palacha 2, 116 38, Praha 1, 2010. Kvantitativní výzkum. Univerzita Karlova v Praze, Filozofická fakulta, katedra psychologie.
- [10] GARCÍA, A. R.; FONSECA, R.; DURÁN, A. Electronic long cane for locomotion improving on visual impaired people. A case study. In: 2011 Pan American health care exchanges. IEEE, 2011. p. 58-61.



- [23] Gated Imaging [online]. In: . [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://new-imaging-technologies.com/wp-content/uploads/2019/07/Gated-imaging-application-note.pdf>
- [24] Ir proximity sensor [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <http://stbrunoparish.org/post/ir-proximity-sensor>
- [25] MOHAMMAD, Tarek. Using ultrasonic and infrared sensors for distance measurement. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 51: 293-299.
- [26] BENET, Gines, et al. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. Robotics and autonomous systems, 2002, 40.4: 255-266.
- [27] Planck's law [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Planck's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck's_law)
- [28] AMDITIS, Angelos, et al. Multiple sensor collision avoidance system for automotive applications using an IMM approach for obstacle tracking. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion; Volume II. 2002. p. 812-817.
- [29] Introduction to sonar [online]. In: HANSEN, Roy Edgar. University of Oslo, 2012 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: [https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF-GEO4310/h12/undervisningsmateriale/sonar\\_introduction\\_2012\\_compressed.pdf](https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF-GEO4310/h12/undervisningsmateriale/sonar_introduction_2012_compressed.pdf)
- [30] Acoustic Bathymetry [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/data/acousticbathy.html>
- [31] How is sound used to locate fish? [online]. [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://dosits.org/people-and-sound/fishing/how-is-sound-used-to-locate-fish/>
- [32] LEWINGER, William, Michael WATSON a Roger QUINN. Obstacle Avoidance Behavior for a Biologically-inspired Mobile Robot Using Binaural Ultrasonic Sensors. In: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 5769-5774 [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.1109/IROS.2006.282461. ISBN 1-4244-0258-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4059353/>
- [33] BORENSTEIN Johann a Yoram KOREN. "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots." IEEE Trans. Robotics and Automation 7 (1991): 278-288.
- [34] RICHARDS, M. A., Jim SCHEER, William A. HOLM a William L. MELVIN. Principles of Modern Radar: Basic principles [online]. In: . 2010-01-01 [cit. 2019-12-08]. DOI: 10.1049/SBRA021E.
- [35] BHATTA, Niraj a M. GEETHAPRIYA. RADAR and its Applications [online]. In: . 2016 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/317427496\\_RADAR\\_and\\_its\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/317427496_RADAR_and_its_Applications)



- [45] COMIS, Don. ARS Study Helps Farmers Make Best Use of Fertilizers. Agricultural Research Service [online]. June 9, 2010 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.ars.usda.gov/news-events/news/research-news/2010/ars-study-helps-farmers-make-best-use-of-fertilizers/>
- [46] JAIN, Aditya, et al. A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students. *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, 2015, 5.2: 124.
- [47] Walking. Wikipedia [online]. [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Walking>
- [48] RPLIDAR A1 [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <http://www.slamtec.com/en/Lidar/A1>
- [49] Luminar [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.luminartech.com/technology>
- [50] This Lidar Is So Cheap It Could Make Self-Driving a Reality [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.luminartech.com/technologyhttps://www.wired.com/story/lidar-cheap-make-self-driving-reality/>
- [51] HAMMER, Gili. Blind women's appearance management: Negotiating normalcy between discipline and pleasure. *Gender and Society*, 2012, 26.3: 406-432.
- [52] KOLARIK, Andrew J., et al. A summary of research investigating echolocation abilities of blind and sighted humans. *Hearing research*, 2014, 310: 60-68.
- [53] THALER, Lore; GOODALE, Melvyn A. Echolocation in humans: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2016, 7.6: 382-393.
- [54] TON, Carolyn, et al. LIDAR Assist spatial sensing for the visually impaired and performance analysis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, 26.9: 1727-1734.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrazdára** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466181**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zpřesnění určení polohy překážek na trase pro nevidomé – část II - LIDAR**

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši o možnostech navigace nevidomých obecně v prostoru s tím, že se zaměřte nikoliv na samotnou navigaci, ale na detekci nečekaných (nebezpečných) překážek na trase. Diskutujte možnosti jejich detekce – LIDAR, ultrazvuk, hloubková kamera, atd. Navrhněte konkrétní řešení pro LIDAR a otestujte jeho základní bloky. Současně diskutujte i možnosti včasné signalizace překážky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Podklady z projektů pro nevidomé. Dostupné na <https://comtel.fel.cvut.cz/> [on-line]
- [2] Materiály dostupné na <https://www.crcpress.com/LiDAR-Remote-Sensing-and-Applications/Dong-Chen/p/book/9781138747241> [on-line]
- [3] Materiály dostupné na <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-91761-0> [on-line]
- [4] Materiály dostupné na <https://bookshout.com/ebooks/automotive-lidar-third-edition> [on-line]
- [5] Materiály dostupné na <https://www.amazon.com/Laser-Thats-Changing-World-Self-Driving/dp/163388466X> [on-line]

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc., katedra telekomunikační techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **22.10.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta