

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



DORUČOVANIE NÁKLADU VO VONKAJŠOM PROSTREDÍ

Diplomová práca

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



# DORUČOVANIE NÁKLADU VO VONKAJŠOM PROSTREDÍ

Diplomová práca

Študijný program: Aplikovaná informatika  
Študijný odbor: 2511 Aplikovaná informatika  
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej informatiky  
Školiteľ: Mgr. Pavel Petrovič, PhD.

Bratislava, 2022

Bc. Martin Slimák



Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Bc. Martin Slimák  
**Študijný program:** aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** informatika  
**Typ záverečnej práce:** diplomová  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický

**Názov:** Doručovanie nákladu vo vonkajšom prostredí  
*Cargo delivery in outdoor environment*

**Anotácia:** Robot Smelý Zajko sa pravidelne zúčastňuje na súťaži RoboTour - Outdoor delivery contest. Využívajúc laserové senzory, kameru, GPS, kompas, otáčkové senzory, globálnu a lokálnu mapu, neurónvú sieť, výpočtový systém Nvidia Jetson TX2 plní doručovacie úlohy v prostredí parku. Práca nadväzuje na predchádzajúce 5 diplomových prác, pričom úlohou diplomanta bude najmä využitie rozpoznania scény za účelom najlepšieho prejdania križovatkami a zaintegrovanie 3D videnia. Predpokladá sa aktívna účasť na súťaži RoboTour.

**Cieľ:** Preskúmať, navrhnúť, implementovať a experimentálne overiť algoritmus prepojenia lokálnej a globálnej mapy v úlohe doručovania nákladu. Vylepšiť algoritmus zvolenia trajektórie v lokálnej mape. Rozšíriť informácie v lokálnej mape, ktoré zatiaľ tvorí výstup z lidar a kamery o informácie z 3D kamery, aby sa robot lepšie vedel vyhýbať prekážkam a rozpoznával nerovnosti terénu.

**Literatúra:** 1. Duchoň, Jurišica: Globálna navigácia mobilných robotov na báze geometrickej mapy, ATP Journal 2/2011; 2. Duchoň: Lokalizácia a navigácia mobilných robotov do vnútorného prostredia, STU, 2012; 3. Beňo: RGBD kamery v mobilnom robotickom mapovaní, dizertačná práca, STU 2018; 4. Mac a kol.: Heuristic approaches in robot path planning: A survey, Robotics and Autonomous Systems 86 (2016) 13–28; 5. Choset a kol.: Principles of Robot Motion, MIT Press, 2005.

**Kľúčové slová:** robotické mapy, navigácia, 3D kamera, Robotour

**Vedúci:** Mgr. Pavel Petrovič, PhD.  
**Katedra:** FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky  
**Vedúci katedry:** prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.

**Dátum zadania:** 26.09.2018

Čestne prehlasujem, že túto diplomovú prácu som  
vypracoval samostatne len s použitím uvedenej literatúry  
a za pomoci konzultácií u môjho školiteľa.

Bratislava, 2022

.....

Bc. Martin Slimák

# Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel v prvom rade poďakovať môjmu školiteľovi Mgr. Pavlovi Petrovičovi, PhD. za jeho cenné rady a usmernenia, ktoré mi veľmi pomohli pri riešení tejto diplomovej práce.

# Abstrakt

Robotizácia v dnešnom svete hrá veľkú úlohu a vidíme ju na každom kroku. K robotom neodmysliteľne patria aj senzory a plánovanie na dosiahnutie požadovaných cieľov čo býva častokrát veľkým problémom lebo svet okolo robota nie je nikdy rovnaký a už vobec nie dokonalý. Každý robot má cieľ ale cesta k cieľu je vždy jedinečná a algoritmy plánovania musia počítat s veľkým množstvom premenných.

Kľúčové slová: robotické mapy, navigácia, 3D kamera, Robotour

# Abstract

Robotization plays a big role in today's world and we see it every step of the way. Robots and planning to achieve the desired goals are also an integral part of robots, which is often a big problem because the world around the robot is never the same and not perfect at all. Every robot has a goal, but the path to the goal is always unique and planning algorithms have to take into account a large number of variables.

Keywords: robot maps, navigation, 3D camera, Robotour

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teória</b>	<b>3</b>
1.1 Robotour . . . . .	3
1.1.1 Konkurencia v robotour . . . . .	4
1.2 Robot Smelý zajko . . . . .	4
1.2.1 Konštrukčné riešenie robota a komponenty . . . . .	5
1.2.2 Lokalizácia . . . . .	6
1.3 Problematika na súťaži . . . . .	11
1.3.1 Hľadanie cesty . . . . .	11
1.3.2 Klasické algoritmy . . . . .	12
1.3.3 Heuristické algoritmy . . . . .	13
<b>2 Súčasný stav</b>	<b>16</b>
2.1 Predchádzajúce riešenia . . . . .	16
2.1.1 Lokálna mapa . . . . .	16
2.1.2 Navigácia v globálnej mape . . . . .	17
2.1.3 Hľadanie cesty v lokálnej mape . . . . .	18
2.1.4 Miesta na zlepšenie . . . . .	18



<b>3</b>	<b>Ciel a metodika práce</b>	<b>20</b>
3.1	Ciel práce . . . . .	20
3.1.1	Algoritmus na hľadanie najlepšej cesty . . . . .	20
3.1.2	Implementácia stereokamery do lokálnej mapy . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Návrh riešenia</b>	<b>22</b>
4.1	Stereokamera . . . . .	22
4.1.1	Potrebné úpravy konštrukcie . . . . .	22
4.2	Algoritmus hľadania cesty . . . . .	23
4.2.1	Generovanie dát . . . . .	23
4.2.2	Kostra grafu a hľadanie v grafe . . . . .	23
4.2.3	Optimalizácia . . . . .	24
4.3	Vizualizácia a metódy testovania . . . . .	24
4.3.1	Vykresľovanie . . . . .	25
4.3.2	Spôsob testovania . . . . .	26
4.4	Ďalšia úprava kódu . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Implementácia</b>	<b>27</b>
5.1	Stereo kamera . . . . .	27
5.1.1	Stereo kamera . . . . .	27
5.2	Algoritmus hľadania cesty . . . . .	27
5.2.1	Generovanie priamok . . . . .	28
5.2.2	Hľadanie vhodných bodov cez ktoré sa da prejsť . . . . .	28
5.2.3	Kostra grafu a hľadanie v grafe . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>29</b>
6.1	Testovanie . . . . .	29
6.2	porovnanie . . . . .	29

# Úvod

V posledných rokoch vzrástol záujem o výskum a implementáciu autonómnych robotov, ktoré sa môžu samostatne navigovať v neznámom prostredí. Táto expanzia v oblasti autonómnej robotiky otvorila nové možnosti v priemysle, preskúmaním priestorov ale aj v doručovaní nákladu. Jedným z najdôležitejších aspektov týchto robotov je vierohodne zaznamenať okolité prostredie pomocou rôznorodých senzorov. Pomocou zaznamenaných dát sa následne vie robot lokalizovať a navigovať v danom prostredí.

Táto diplomová práca sa zameriava na robota Smelý zajko ktorý bol zostrojený ako autonómny robot ktorý sa každý rok zúčastňuje súťaže Robotour. V súťaži Robotour je hlavným cieľom robota dostať sa zo štartovacej pozície na miesto kde rozhodca naloží náklad čo je v tomto prípade 5 litrový súdok piva a previesť ho na miesto vykládky kde ho rozhodca vyloží a následne sa robot má presunúť na tretiu pozíciu a to do cieľa. Všetky tieto kroky musí prejsť celkom autonómne bez zásahov človeka inak bude robot diskvalifikovaný. V prípade nárazu do prekážky bude navyše robot ešte penalizovaný. V tejto diplomovej práci sa budem zaoberať algoritmom ktorý hľadá najvýhodnejšiu trasu pre robota z lokálnej mapy ktorá pozostáva z informácií získaných z rôznych senzorov ako je napríklad kamera s neurónovou sieťou na rozpoznávanie chodníku alebo lidarom na detekciu prekážok. Druhým cieľom mojej práce je integrovať aj tretí senzor a to je stereo kamera

ktorá bude poskytovať robotovi hĺbkovú mapu prostredia a tá bude dopĺňať dáta do lokálnej mapy. Cieľom tejto diplomovej práce je zaistiť vyššiu presnosť a lepšiu navigáciu v prostredí a zamedziť tak chybám.

V nasledujúcich kapitolách tejto práce bude spomenuté ako funguje robot Smelý zajko a jeho aktuálne využívané algoritmy, základne algoritmy používané v autonómnej robotike, a prečo mnou vybraný algoritmus vhodne rieši aktuálne problémy na ktoré narážame na súťaži.

# Kapitola 1

## Teória

V tejto kapitole vysvetlím čo je súťaž Robotour a aké má pravidlá, priblížim ako vyzerá a funguje robot Smelý zajko po konštrukčnej, hardwarovej aj softwarovej stránke. Vysvetlím ako funguje doterajšie riešenie na lokalizáciu a plánovanie trasy. Vysvetlíme aké algoritmy sa najčastejšie využívajú na vývoj autonómnych robotov. Detailne sa pozrieme aj na druhy senzorov ktoré využíva robot Smelý zajko. Ukážeme ako funguje na robotovi jeho lokálna mapa a aj to ako funguje globálna mapa a zapisovanie údajov zo senzorov.

### 1.1 Robotour

Robotour je súťaž v ktorej sa zúčastňujú tímy zo strednej Európy. Účastníkov tejto súťaže tvoria prevažne univerzitné tímy a nadšenci ktorí to berú ako voľnočasovú aktivitu. Robotour sa väčšinou odohráva na inej lokalite ktorú tvoria parky a rekreačné oblasti s množstvom chodníkov. Cieľom súťaže je skonštruovať robota ktorý na sebe má namontované senzory rôznych druhov vďaka ktorým sa vie orientovať v prostredí. Každému robotovi je na začiatku na štartovnej pozícii ukázaný QR kód ktorý obsahuje správu vo forme textu

v tvare „geo:48.151019,17.070120“ ktorá obsahuje súradnice bodu na ktorý má robot prísť. Na navigáciu v globálnej mape smie robot využívať len dáta z Open Street Maps. Robot musí jazdiť autonómne bez zásahu ľudí. Robot musí počas cesty vždy jazdiť aspoň jedným kolesom po chodníku aj keby zvyšne kolesá jazdili po tráve. Ako náhle sa robot dostane všetkými kolesami mimo cesty je diskvalifikovaný. Ak sa robot úspešne dostane až na miesto ktoré mu určili súradnice tak tam zastane a dá signál rozhodcovi ktorý mu naloží náklad. Náklad je tvorený 5 litrovým sudom piva aby sa otestovala aj nosnosť robota. Robot musí byť vybavený senzorom ktorý deteguje naložený sud a má si vypýtať ďalší QR kód od rozhodcu na ktorom budú ďalšie súradnice v rovnakom formáte. Následne robot pokračuje ďalej a snaží sa dostať na miesto vykládky kde zastane a vydá signál aby mu rozhodca vyložil náklad. Po vyložení nákladu sa robot môže rozhodnúť či chce robot opakovať nakládku a vykládku alebo sa vrátiť na štart. Použitie lokalizácie na základe vopred natrénovaných dát pomocou význačných bodov je zakázané.

### 1.1.1 Konkurencia v robotour

Súťaže Robotour sa zúčastňuje niekoľko ďalších robotov. Najúspešnejšie roboty patria do teamu Istrobotics a ARBot.

## 1.2 Robot Smelý zajko

Robot Smelý zajko je ambiciózny projekt ktorý vznikol v roku 2011 ako diplomová práca ktorá mala za cieľ zúčastniť sa s robotom na súťaži Robotour. Na robotovi od tej doby pokračovalo mnoho študentov s ďalšími diplomovými prácami ktoré robota vylepšovali. Robot má za sebou niekoľko úspešných ročníkov počas ktorých získal zlatú aj striebornú medailu. Aj napriek jeho

úspechom je tu mnoho miesta pre ďalšie vylepšenia vďaka rýchlo sa rozvíjajúcemu odvetviu autonómnej dopravy a čoraz náročnejším situáciám s ktorými si musí robot poradiť.

### 1.2.1 Konštrukčné riešenie robota a komponenty

Robot s dvoma hnacími kolesami v prednej časti a jedným všesmerovým v zadnej časti predstavuje ideálne konštrukčné riešenie umožňujúce mu pohybovať sa s maximálnou manévrovateľnosťou. Jeho kolieska sú dostatočne veľké aby robot vedel prejsť cez nerovný terén chodníkov a ciest. Robot Smelý zajko je vyrobený z hliníka, vďaka čomu je ľahký a pevný čo je veľkou výhodou vzhľadom na potrebný výkon motorov. Nízka hmotnosť je výhodou aj na prenášanie robota z miesta na miesto keď je treba robota presunúť na štart. Robot na sebe nesie notebook ktorý slúži ako komunikačne rozhranie vďaka displeju a reproduktorom. Reprodukory slúžia na dorozumievanie sa s rozhodcami a vydávanie signálov na nakladanie a vykladanie nákladu. Veľký displej slúži na diagnostické účely počas súťaže aby bolo vidieť ako sa zachová v náročných situáciách. Notebook slúži aj ako úložisko na záznam dát z jázd. Väčší výpočtový výkon vďaka notebooku dodáva robotovi možnosť využiť výpočtovo náročnejšie algoritmy. Robota poháňajú 2 jednosmerné motory so zabudovaným otáčkovým senzorom napájané 12 voltovým akumulátorovým zdrojom s kapacitou 9Ah ktorá napája aj zvyšok elektroniky ako sú senzory, Arduino, lidar. Jetson TX2 je poháňaný lítiovo-polymérovou batériou ktorá ma 12V voltov. Zariadenia ako je GPS a IMU sú poháňané priamo z notebooku. Robot na sebe má tlačidlo núdzového odpojenia energie od motorov pre prípad že by hrozila kolízia alebo iný typ ohrozenia. 5 litrový sud piva ktorý predstavuje náklad je umiestnený v prednej časti robota nad hnacími kolesami aby bola zabezpečená väčšia trakcia kolies.



Obr. 1.1: Robot Smelý zajko.!!!treba ešte odfotiť v akcii!!!

### 1.2.2 Lokalizácia

Základ ktoréhokoľvek autonómneho robota je schopnosť lokalizovať sa v priestore a práve vďaka nutnosti poznania svojho okolia ma každý robot množstvo senzorov. Robot Smelý zajko ma k dispozícii niekoľko senzorov ktoré využíva nie len na jeho lokalizáciu ale aj na bezpečnosť v okolí robota. Dáta zo senzorov sa niekoľkokrát za sekundu vysielajú do robota ktorý ich následne spracúva v reálnom čase aby bola reakčná doba robota na novo objavené prekážky čo najkratšia. Sensory pomáhajú robotovi aby nedošlo k poškodeniu či už robota alebo jeho okolia prípadne k zraneniu niekoho v jeho blízkosti. Jedným z najdôležitejších senzorov ktoré robot doteraz používal je lidar a kamera. Prehľad senzorov na robotovi:

- Ultrazvukový senzor
- Lidar
- Kamera
- Otáčkové senzory
- Stereokamera
- GNSS



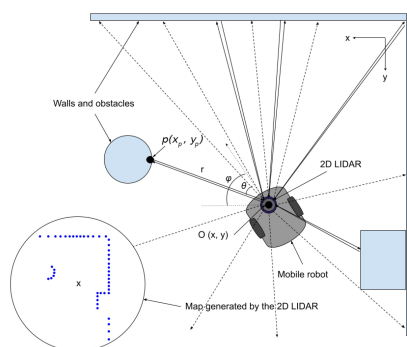
Obr. 1.2: Na obrázku je ultrazvukový senzor na meranie vzdialenosti.

- IMU

### **Senzor na meranie vzdialenosti**

Ultrazvukový senzor je neoceniteľným prvkom v robotike. Je to lacná a dostupná možnosť získavania vzdialenosti objektov od senzora. Pracuje na princípe vysielania ultrazvukových vln, ktoré sa odrazia od predmetov ktoré sa nachádzajú pred senzorom. Senzor meria čas od momentu vyslania zvukových vln až po ich návrat. Na základe odmeraného času a rýchlosti zvuku vypočíta vzdialenosť od prekážky. Táto vlastnosť má svoje nevýhody a to že ultrazvukové meranie vzdialenosti je pomalé. Senzor je limitovaný rýchlosťou zvuku. Ďalšia nevýhoda spočíva v ozvene a falošných odrazoch. Rezonancia komponentov robota ktorú spôsobujú zvukové vlny zo senzora môžu spôsobiť zvukový šum ktorý je reprezentovaný ako prekážka pred senzorom. Ultrazvukové senzory sú najvhodnejšie na kontrolu vzdialenosti ak nie je vyžadovaná presnosť nameraných údajov. Na robotovi Smelý zajko je ultrazvuk HC-SR04 používaný na kontrolu či je náklad v úložnom priestore. Ďalšie ultrazvukové senzory HC-SR04 sú použité ako kontrola počas cúvania robota aby do ničoho nenarazil a taktiež pri jazde dopredu sú použité SRF-08 ako posledná ochrana pred nárazom.





Obr. 1.3: Príklad ako mapuje robot prekážky v miestnosti.

## Lidar

Lidar je druh svetelného senzora ktorý má mechanické časti ktoré rotujú okolo stredovej osi umiestnenej v horizontálnej rovine robota. Počas jeho rotovania vysiela laserové lúče s určitou vlnovou dĺžkou ktoré sa následne odrážajú od prekážok a sú zachytené lidarom. Technológia lidarů umožňuje robotom získavať informácie o jeho okolí vo vysokej presnosti a do veľkej vzdialenosti. ďalšou výhodou lidarů je že laserové lúče cestujú rýchlosťou svetla čo umožňuje rýchle snímanie. Lidar je jedným z najrozšírenejších senzorov ktoré sa používajú v robotike na mapovanie prostredia. Vďaka jeho presnosti a spoľahlivosti aj v nepriaznivých svetelných podmienkach. Dáta z lidarů sú jeden z hlavných prvkov lokálnej mapy podľa ktorej sa robot riadi. Na robotovi Smelý zajko je namontovaný lidar Hokuyo UST-10LX. Lidar má nevýhodu že funguje len ako 2d senzor a chodník stúpajúci do kopca robotovi dáva informáciu že je pred prekážkou aj keď je to len mierne stúpanie chodníka.

## Kamera

Kamera je ďalším často používaným senzorom v robotike. Je to senzor ktorý vie poskytnúť pre robota dáta ktoré vyžadujú náročnejšie spracovanie. Používajú sa hlavne na robotoch ktorý majú na to dostatočný výpočtový výkon.

V robotovi smelý zajko je použitá kamera mobilného telefónu pretože má vysoké rozlíšenie, kvalitný obraz aj za nepriaznivých svetelných podmienok vďaka vstavaným filtrom a digitálnemu spracovaniu obrazu. Kamera v mobilnom telefóne disponuje aj digitálnej stabilizácii obrazu vďaka čomu sú dáta z kamery menej rozmazane. Dáta z kamery sa používajú na rozpoznávanie chodníka a trávniky pomocou neurónovej siete. Tato neurónová sieť vznikla ako diplomová práca Adriána Matejova ktorý dosiahol vysokú úspešnosť rozpoznávania chodníkov. Získane dáta sú zakreslené do lokálnej mapy.

### **Otáčkové senzory**

Otáčkové senzory sú mechanicky senzor ktorý kontroluje koľko krát sa otočila os hriadeľa. Princíp otáčkových senzorov je v senzore a ten sníma kruh ktorý je pripevnený na os motora. Tento kruh má v sebe na správnych miestach diery. Tie sníma senzor a podľa počtu koľko dier vidí vie senzor vypočítať na ktorej polohe sa os nachádza. Otáčkové senzory majú vysokú presnosť a v priemysle sa využívajú a majú všestranne použitie zatiaľ čo v robotoch ktorí sa používajú vo vonkajšom prostredí nie sú vhodným riešením z dôvodu nerovnosti terénu. Nerovnosti terénu spôsobujú že dĺžka prejdenej cesty pod jedným kolesom je iná ako pod druhým kolesom. Kolieska na prašnej ceste môžu presmykovať a to spôsobuje odchýlku. Robot postupne stráca informáciu o tom koľko sa pohol v globálnej mape.

### **Stereo kamera ZED Mini**

Stereo kamera je vylepšená verzia klasickej kamery a skladá sa z dvoch kamier ktoré sú presne umiestnené v priestore. Obe kamery snímajú obraz pred sebou a na každom obrázku z kamery sú príznaky objektov a hrany objektov na inej pozícii. Čím viac sa líšia dané príznaky v horizontálnej osi na



Obr. 1.4: Stereo kamera ZED mini.

tých dvoch obrázkoch tým je objekt bližšie ku stereo kamere. Kamera ktorú používame v diplomovej práci je ZED Mini a disponuje dvoma kamerami s farebným spektrom. Maximálne rozlíšenie ktoré používa kamera je 4416x1242 pixelov a je pripojená na zariadenie NVidia Jetson TX2 vďaka ktorému vie vygenerovať hĺbkovú mapu vo frekvencii 15 snímok za sekundu. Kamera vygeneruje sieť bodov v priestore ktoré reprezentujú hĺbkovú mapu priestoru pred kamerou. Táto hĺbková mapa následne môže byť použitá na detegovanie prekážok na chodníku a okrajov kde začína tráva. Kamera ZED Mini v sebe ma zabudovanú funkciu na výpočet jej polohy v priestore s vysokou presnosťou pomocou porovnávania za sebou idúcich snímok z kamery a vďaka tomu je vynikajúcou alternatívou ku konvenčným otáčkovým senzorom. Doterajšie využitie na robotovi Smelý zajko bolo neúspešné.

## GNSS

GNSS je skratka pre Global Navigation Satellite System a je to senzor na určovanie polohy pomocou satelitov a vracia dáta reprezentujúce zemepisnú šírku a dĺžka. Senzor ma v sebe často zabúdaný akcelerometer, kompas a predstavuje výborný nástroj na sledovanie polohy, natočenia a orientácie. Tento multifunkčný senzor kombinuje tri kľúčové technológie, umožňujúce presné monitorovanie pohybu a pozície. Orientáciu robota zabezpečuje kompas ktorý vracia hodnotu natočenia voči severu. Na robotovi smelý zajko je model ktorý obsahuje aj akcelerometer. Ten poskytuje dáta o zmene rýchlosti

ktorou sa akcelerometer pohybuje. Táto kombinácia senzorov umožňuje robotovi presné určovanie svojej polohy v reálnom čase a sledovanie pohybov v rôznych smeroch. Využitie týchto senzorov má široké uplatnenie v navigácii, lokalizácii a monitorovaní pohybu robotov a iných autonómnych systémoch. Ich spoľahlivosť a presnosť sú kľúčovými faktormi v zabezpečení efektívneho fungovania v rôznych prostrediach a podmienkach. GNSS senzor namontovaný na robotovi smelý zajko má presnosť približne 5 metrov. Tato chyba je príliš veľká na to aby sa na tie dáta robot vedel spoľahnúť pretože chodník kam má zatočiť je niekedy len jeden meter široký a robot má problém určiť kedy môže zatočiť. Táto nevýhoda spôsobuje že v križovatke nezatočí na správnom mieste a pokračuje ďalej v pôvodnom smere.

## IMU

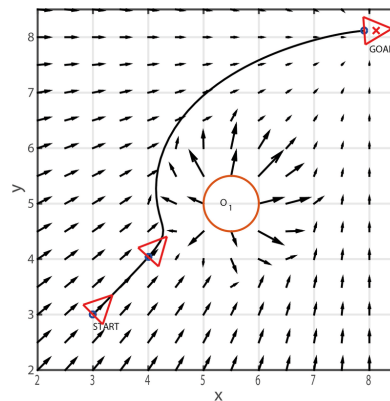
tu treba napísať o IMU.

## 1.3 Problematika na súťaži

### 1.3.1 Hľadanie cesty

Druhou významnou časťou robotiky je plánovanie cesty robota. Je to algoritmus ktorý zohľadňuje dáta nazbierané pomocou lokalizácie vďaka senzorom a ich následnému spracovaniu. Úlohou týchto algoritmov je naplánovať trasu pre robota tak aby robot išiel čo najefektívnejšie bez kolízie až do cieľa. Existujú dva druhy akými algoritmami sa dajú plánovať cesty.

1. Klasické algoritmy
2. Heuristické algoritmy



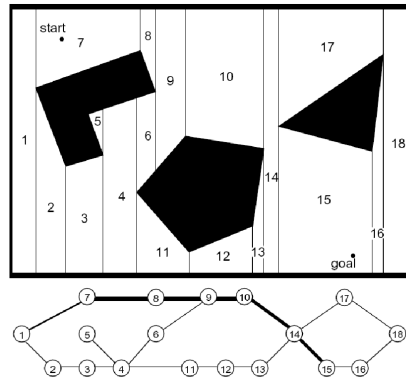
Obr. 1.5: Na obrázku vidíme znázornenie ako pôsobia sily na stavy v mape.

### 1.3.2 Klasické algoritmy

Klasické algoritmy využívajú na nájdenie najlepšej cesty výpočtovo zložité algoritmy ktoré prepočítajú všetky parametre a vypočítajú najlepšiu cestu alebo smer pre robota ktorou sa má navigovať. Najčastejšie používané sú dva algoritmy a to Artificial potential fields a cell decomposition. Ich výhoda spočíva v nájdení optimálnej cesty.

#### Artificial potential fields

Je to algoritmus, ktorý sa používa na plánovanie ciest a funguje na princípe vytvárania poli v priestore okolia robota. Tieto polia predstavujú príťažlivé a odpudivé sily ktoré pôsobia na robota a upravujú tak jeho smer. Na všetky body v priestore okolo robota pôsobia tieto sily a závisia najmä na vzdialenosti bodu od objektu. Robot sa pohybuje k cieľu po bodoch na ktoré pôsobí najmenšia sila. Je to jednoduchý a overený algoritmus ktorý sa dá aplikovať na jednoduché prostredia. Nevýhodou je že robot môže uviaznuť v lokálnom minime z ktorého už nevie dostať von.



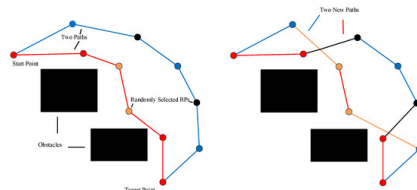
Obr. 1.6: Rozdelenie mapy na zjazdne a nezjazdne bunky.

### Cell decomposition

Algoritmus cell decomposition je metóda plánovania ciest pre robotov, ktorá funguje na princípe rozdelenia priestoru okolo robota na bunky. Bunky, ktoré sú obsadené prekážkami, sa označia ako neprístupné. Bunky, ktoré sú voľné, sa označia ako prístupné. Robot sa potom môže pohybovať len v prístupných bunkách. Ak sa robot stretne s prekážkou, musí nájsť novú cestu, ktorá ho obchádza. priestor spolu s prekážkami sa rozdelí na menšie bunky. Bunky s prekážkami sú označene ako nezjazdne a ostatne bunky ako zjazdne. Následne sa robot môže pohybovať cez zjazdne bunky smerom k cieľu. Ak robot narazí na novú prekážku tak ju označí a hľadá novú cestu. Tento algoritmus je efektívny pre prostredie s malým počtom prekážok. Nevýhodou je že potrebuje dopredu nemapovať prostredie aby vedel plánovať cestu.

### 1.3.3 Heuristické algoritmy

Heuristické algoritmy sú založene na jednoduchých pravidlách ktoré robota dovedú k dobrému riešeniu problému ale nie vždy je to to najoptimálnejšie riešenie. Robot pritom využíva poznatky ktoré nadobudol z prostredia a intuíciu. Výhody heuristických algoritmov sú, že sú relatívne jednoduché



Obr. 1.7: Ukážka hry Červík. Červík je znázornený červenou farbou, voľné políčka sivou, jedlo zelenou a steny čiernou.

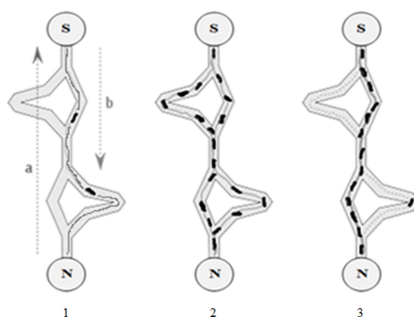
na implementáciu a môžu byť účinné na riešenie komplexných problémov, ktoré nemožno riešiť konvenčnými metódami. Hlavnou nevýhodou je že neposkytnú robotovi optimálnu cestu a pri riešení jednoduchých úloh sú neefektívne oproti klasickým metódam. V posledných rokoch dominujú nad klasickými metódami. Medzi najznámejšie heuristické algoritmy podľa publikácii patri genetický algoritmus a ant colony optimization.

### Genetic algorithm

Genetický algoritmus je inšpirovaný prírodou a jej evolučným procesom. Metóda na začiatku vygeneruje veľké množstvo jedincov ktoré reprezentujú cestu k cieľu. Následne z nich vyberieme tie najlepšie cesty a pomocou vybraných jedincov kombinujeme cesty a generujeme tak nové varianty ciest. Niektoré cesty upravujeme pomocou mutácie a meníme náhodne jej časti. Tento proces opakujeme až do momentu kedy nájdeme dostatočne dobrú cestu do cieľa. Je to v súčasnosti najrozšírenejší algoritmus na plánovanie ciest pre mobilne autonómne roboty. Je vhodný na riešenie komplexných úloh ktoré sú veľmi komplexne a nedajú sa riešiť konvenčnými metódami.

### Ant colony optimization

Táto metóda je inšpirovaná správaním mravcov. Algoritmus začína s jedným mravcom hľadať cestu náhodne a vždy keď prejde z aktuálnej pozície do



Obr. 1.8: Ukážka hry Červík. Červík je znázornený červenou farbou, voľné políčka sivou, jedlo zelenou a steny čiernou.

ďalšej pozície ktorá je lepšia ako predchádzajúca pozícia tak zvýši pravdepodobnosť že si daný stav výberu nasledujúce mravce. Tento proces sa opakuje až pokiaľ mravec nenájde cestu k cieľu. Výhodou tohto algoritmu je že generovaním dostatočného počtu mravcov zabezpečí nájdenie optimálnej cesty do cieľa.



# Kapitola 2

## Súčasný stav

### 2.1 Predchádzajúce riešenia

Robot smelý zajko je výsledkom mnohých diplomových prac. Poslednou diplomovou pracou ktorá ovplyvnila riadenie robota smelý zajko bola diplomová práca Michala Fikára. Robot dostal k dispozícii lokálnu mapu do ktorej sa zaznamenávajú všetky prekážky ktoré zachytili jeho senzory. Následne sa spustia 2 algoritmy na zistenie najlepšieho smeru pre robota.

#### 2.1.1 Lokálna mapa

Úlohou lokálnej mapy je zachytávať len blízke okolie robota a nie situáciu vo väčšej vzdialenosti ako je rozmer lokálnej mapy. Lokálnu mapu robota tvoria 2 dvojrozmerné polia ktoré obsahujú číselné hodnoty jednotlivých bodov. Robot disponuje jedným dvojrozmerným polom kde sa zaznamenávajú dáta z lidar a druhým ktoré reprezentuje dáta z neurónovej siete. Opačné okraje týchto polí na seba nadväzujú čím sa zo štvorca stáva povrch toroidu po ktorom sa robot pohybuje. Mierka tejto mapy je 1:10 a teda jeden bod v lokálnej mape zodpovedá desiatim centimetrom v skutočnosti. Lokálna mapa



Obr. 2.1: Lokálna mapa z robota obsahujúca dáta z kamery a lidar

je rozmeru 120 x 120 čo predstavuje plochu 12 x 12 metrov. Obe polia spoločne tak vytvárajú mapu okolia kde robot vidí zjazdnosť terénu okolo jeho pozície aby vedel rozlíšiť chodník a trávnu a prekážky. Dvojmerné polia v ktorých sú dáta uložené zostávajú pri pohybe robota nemenné a mení sa len pozícia robota voči lokálnej mape. Tieto súradnice sa pohybom robota menia. Vykresľovanie dát sa následne deje vzhľadom na pozíciu robota ktorý je vždy zobrazený v strede lokálnej mapy. Pri pohybe robota po toroide sa okraje mapy vymazávajú aby dáta ktoré zmizli z viditeľnosti lokálnej mapy cyklicky nevstupovali z druhej strany.

### 2.1.2 Navigácia v globálnej mape

Na navigáciu v globálnej mape využíva robot dáta z Open Street Maps kvôli pravidlám súťaže. Pri štarte programu sa načíta XML súbor ktorý je vyexportovaný pre obdĺžnikový výrez lokality súťaže z Open street map. Súťaž sa odohráva vždy len v parkoch ktoré majú označené chodníky pomocou špeciálnych atribútov. Po načítaní QR kódu robot nájde najbližší uzol k danej zemepisnej pozícii z GNSS senzora zistí najbližší uzol k momentálnej pozícii a pomocou grafového algoritmu A\* naplánuje najkratšiu cestu. Jednotlivé

segmenty naplánovanej trajektórie určujú požadovaný azimut počas navigácie robota. Problematickým je riešenie odbočovania v križovatkách a aj za tým účelom bola vytvorená lokálna mapa. Výsledný smer robota sa zobrazí na displeji aby bolo jasné ktorým smerom naplánoval trasu.

### 2.1.3 Hľadanie cesty v lokálnej mape

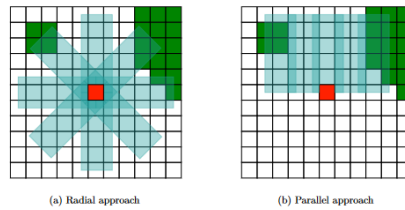
Hľadanie najlepšieho smeru v lokálnej mape bola zabezpečená dvoma navzájom závislými algoritmami. Prvým bol algoritmus ktorý tvoril obdĺžnikové koridory v radiálnom smere okolo robota. Každý koridor bol ohodnotený váhou vzhľadom na uhol ktorý zvieral s cieľom. Následne sa porovnávali vypočítané hodnoty koridorov. Tieto hodnoty koridorov ovplyvňoval výskyt nezjazdných častí a vzdialenosť tých výskytov od robota aby robot uprednostňoval prekážky ktoré sú od neho ďalej a vyhýbal sa tak prekážkam ktoré sú pred ním. Druhý algoritmus tiež hľadá koridory zjazdnosti ako prvý ale koridory boli tvorené vedľa seba v smere ktorý bol zvolený prvým algoritmom vďaka čomu robot našiel najvhodnejšiu cestu zvoleným smerom ktorá je zjazdná s dorazom na šírku robota.

### 2.1.4 Miesta na zlepšenie

Robot smelý zajko dosiahol nejeden úspech na súťaži. Napriek tomu má aktuálne riešenie niekoľko nedostatkov ktoré by som chcel spomenúť. Tieto nedostatky sú dôvodom prečo treba robota smelý zajko vylepšiť.

#### Lokálne minimá

Veľa jázd dopadlo neúspešne z dôvodu že sa robot dostal do slepej uličky v podobe rohu parkoviska. dáta v lokálnej mape obsahujú veľa šumu ktorý



Obr. 2.2: Algoritmus hľadajúci najvýhodnejšiu trasu pre robota v lokálnej mape

ovplyvňuje priebeh algoritmu.

### riesenie slepej ulicky

Aktuálny algoritmus ktorý berie do úvahy dáta z lokálnej mapy vyhodnocuje najlepšiu cestu medzi prekážkami. Za určitých okolností môžu nastať situácie pri ktorých nie je dostupná žiadna zjazdová cesta a v tom prípade sa robot rozhodol ísť tou najviac zjazdovou cestou aj keď to bolo po tráve. Tento nedostatok spôsobuje penalizáciu na súťaži.

### prepojenie lokálnej a globalnej mapy

Prepojenie lokálnej a globálnej mapy v doteraz používanom algoritme nebolo dostatočné a robot nezískal dostatok informácií o križovatkách cez ktoré prechádzal.

### rozhodovanie sa pre širšiu cestu

Hlavným nedostatkom toho algoritmu je že aj keď robot vidí 2 cesty z čoho je jedna správna tak si vyberie tú zjazdnejšiu cestu čo je po väčšine tá širšia aj keď je to zlý smer.

# Kapitola 3

## Ciel a metodika práce

### 3.1 Ciel práce

Cieľom tejto diplomovej práce je vylepšiť robota smelý zajko. Hlavné časti budú tvoriť’:

- Algoritmus na hľadanie najlepšej cesty
- Zahrnutie stereokamery do lokálnej mapy

#### 3.1.1 Algoritmus na hľadanie najlepšej cesty

Prvým cieľom tejto práce bude tvoriť algoritmus na hľadanie najlepšej cesty. Tento algoritmus bude prepájať globálnu a lokálnu mapu a bude hľadať zjazdnu cestu v dátach z lokálnej mapy tak aby sa vyhýbal prekážkam a hľadal náznaky odbočiek v nepresných dátach. Algoritmus bude využívať náhodnosť aby sa zamedzilo lokálnym minimám. Budeme ho testovať porovnaním s aktuálnym algoritmom. Tento algoritmus by mal vyriešiť aktuálne nedostatky robota navigovať sa po parku. Zároveň by mal lepšie vykresľovať

stav v ktorom sa robot nachádza a čo ho pri tom ovplyvňuje na lepšiu analýzu nedostatkov v budúcnosti. Za týmto účelom budeme mať na robotovi funkcionality na vykresľovanie lokálnej mapy a všetkých krokov algoritmu.

### 3.1.2 Implementácia stereokamery do lokálnej mapy

Hlavnú časť bude tvoriť spomínaná stereokamera ktorú na robota pripevníme a zahrnieme dáta z nej do lokálnej mapy. Dôvod potreby stereokamery Zed mini je ten že dáta z lidarů sú len z horizontálnej roviny 12 centimetrov nad zemou a nezachytáva nástrahy ako sú zábradlia, okraje chodníka zakončene obrubníkom a cestou položenou nižšie a lavičkami ktoré pod sebou majú chodník ktorý neurónová sieť vyhodnotí ako zjazdnú cestu a hrozí tam potom kolízia. mala by taktiež pomôcť so zachytením hranice medzi chodníkom a trávnikom. Aby senzor fungoval správne tak bude umiestnený v horizontálnej polohe kolmo na smer jazdy robota vo výške 30 centimetrov nad zemou v prednej časti robota za použitia špeciálne navrhnutého držáka ktorý bude chrániť senzor pred poveternostnými vplyvmi a nárazmi do objektov. Tento držák bude navrhnutý v 3D modelovacom softvéri a následne vytlačený na 3D tlačiarňi.

# Kapitola 4

## Návrh riešenia

### 4.1 Stereokamera

Na to aby som mohol aplikovať dáta zo stereo kamery ju potrebujem pripojiť do zariadenia NVidia Jetson TX2 pomocou ktorého sa vygeneruje hĺbková mapa a pozícia v priestore vďaka porovnávaniu po sebe idúcich snímok. Tieto dáta budú následne posielane pomocou sieťového kábla do notebooku kde je spustený hlavný program. Ten dáta bude zaznamenávať a vypočítavať z nich zmenu výšky aby sa postupne meniaci výška stúpajúceho chodníka nebrala za prekážku ale obrubník s náhlou zmenou výšky bude považovaný za prekážku. Následne sa dáta zapíšu do lokálnej mapy do nového dvojrozmerného poľa s názvom `matrixdepth`. Tieto hodnoty bude využívať len mnou navrhnutý algoritmus z dôvodu odlišných hodnôt ktoré budú v mape zaznamenané.

#### 4.1.1 Potrebne úpravy konštrukcie

Senzor bude umiestnený v prednej časti robota na 2 hliníkové profily ktoré slúžia na udržanie nákladu na mieste. Vytlačený držiak bude musieť byť

prispôsobený rozmerom stereo kamery a aby som zamedzil vrtaniu a oslabovaniu konštrukcie tak sa bude montovať nasunutím z hora na hliníkové profily. Vďaka tomu viem zaručiť kolmosť na smer jazdy a výšku senzora od zeme.

## 4.2 Algoritmus hľadania cesty

### 4.2.1 Generovanie dát

Algoritmus hľadania najlepšej cesty bude kombinovať dáta z lokálnej mapy a bude v nej hľadať cestu tak aby čo najlepšie zodpovedala globálnej ceste ktorú má robot naplánovanú. Algoritmus bude fungovať tak že na lokálnej mape vygeneruje n priamok. Priamky budú tvorené pomocou dvoch bodov ležiacich na rôznych okrajoch lokálnej mapy. Tieto priamky bude generovať buď náhodne alebo pravidelne. Generovanie náhodných priamok by malo zabezpečiť že prejazdové body budú vždy na inom mieste a robot by mal byť schopný dostať sa z náročných úsekov. Body ktoré pretne každá z vygenerovaných priamok budeme testovať či sú zjazdne alebo nezjazdne a vďaka tomu na priamke budem mať zaznačené body na hranici zjazdnosti ktoré priamka pretla. Dvojice týchto bodov tvoria úsečky ktorých stred by mal reprezentovať stred časti mapy ktorý je zjazdny.

### 4.2.2 Kostra grafu a hľadanie v grafe

Tieto nové stredové body vnesiem do grafu a kontrolujem vzdialenosti medzi stredovými bodmi a všetky body ktoré sú od seba vzdialene maximálne určitú vzdialenosť spojím v grafe. Ďalej do grafu pridám štartovaciu a cieľovú pozíciu. Vo výslednom grafe vytvorím kosť grafu aby boli všetky body





Obr. 4.1: Robot smelý zajko.!!!treba este odfoťiť v akcii!!!

prepojené. V takto vytvorenom grafe ktorý obsahuje všetky zjazdne body nájdeme cestu pomocou dijkstrového algoritmu a robot má tak naplánovanú trasu v lokálnej mape. Ak sa robot nemá kam pohnúť a uviazne na mieste tak sa začne otáčať na mieste aby sa mu do lokálnej mapy zaznačili nové dáta a vďaka tomu by mal naplánovať novú trasu.

### 4.2.3 Optimalizácia

Aby algoritmus fungoval optimálnejšie tak používa viacero parametrov ktoré sa dajú nastavovať. Parametre budú pozostávať zo šírky zjazdnej úsečky aby to vylúčilo úsečky generované v zašumených okrajoch zjazdných častiach. Maximálna vzdialenosť medzi stredovými bodmi ktoré môžu byť spojené do výsledného grafu. Ten parameter by mal zamedziť tomu aby sa body spájali na veľkú vzdialenosť. Ďalším parametrom je saferange ktorý kontroluje vzdialenosť novo vytvorených stredových bodov od okrajov zjazdnej časti čo eliminuje body veľmi blízke ku okrajom zjazdnej časti.

## 4.3 Vizualizácia a metódy testovania

Robot by mal disponovať aj novou formou vizualizácie ktorá bude vykresľovať jednotlivé kroky algoritmu vďaka čomu sa bude dať počas jazdy lepšie



Obr. 4.2: Robot smelý zajko.!!!treba este odfoťit v akcii!!!



Obr. 4.3: Robot smelý zajko.!!!treba este odfoťit v akcii!!!

sledovať a následne analyzovať priebeh v problémových situáciách.

### 4.3.1 Vykresľovanie

Program na vykresľovanie bude vykresľovať všetky 3 dvojrozmerné polia ktoré má robot k dispozícii. Okrem dát zo senzorov bude vizualizovať každý krok algoritmu cez jednoduchý parameter vo forme stringu v podobe "11111111". Znaky reťazca budú tvorené pomocou "0" a "1" a reprezentujú false, true hodnoty. Každá pozícia bude vykresľovať jednotlivý krok algoritmu. napríklad prvá jednotka hovorí že sa do obrázku budú vykresľovať všetky náhodne body vygenerované v lokálnej mape.

### 4.3.2 Spôsob testovania

Algoritmus budeme testovať porovnávaním s pôvodným riešením situácií v problémových miestach. ďalej budeme testovať ako sa vie algoritmus adaptovať na pohybujúce sa prekážky v prostredí.

## 4.4 Ďalšia úprava kódu

Ďalšie úpravy ktoré budem robiť na robotovi smelý zajko:

1. úprava premazávania lokálnej mapy,
2. ...,
3. ...

# Kapitola 5

## Implementacia

### 5.1 Stereo kamera

V tejto časti detailne popíšem ako implementujem stereo kameru do lokálnej mapy

#### 5.1.1 Stereo kamera

V tejto časti popíšem čo, prečo, ako robím s dátami získanými zo stereo kamery.

### 5.2 Algoritmus hľadania cesty

V tejto časti popíšem ako presne hľadám cestu.

### 5.2.1 Generovanie priamok

Náhodné priamky

Pravidelné priamky

### 5.2.2 Hľadanie vhodných bodov cez ktoré sa da prejsť

nieco

### 5.2.3 Kostra grafu a hľadanie v grafe

# Kapitola 6

## Výsledky

### 6.1 Testovanie

V tejto časti popíšeme ako prebieha testovanie robota a nového algoritmu.

### 6.2 porovnanie

V tejto časti budeme porovnávať starý a nový algoritmus.

- Problémové miesta v parku
- Prínos stereo kamery

f) interpretácia výsledkov, diskusia kedy Vaša metóda funguje a kedy nefunguje, g) krátky manuál vo forme txt na médiu alebo v práci 1 strana.

# Literatúra

- [FD11] Ladislav Jurišica František Duchoň. Globálna navigácia mobilných robotov na báze geometrickej mapy. *ATP journal*, 1(1):1–8, 2011.
- [IFD12] PhD. Ing. František Duchoň. *Lokalizácia a navigácia mobilných robotov do vnútorného prostredia*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2012.
- [ros] ROS. <http://www.ros.org/>. Navštívené: 2. máj 2021.

# Zoznam obrázkov

1.1	Ukážka robota Smelý zajko . . . . .	6
1.2	Ultrazvukový senzor . . . . .	7
1.3	Lidar . . . . .	8
1.4	Stereo kamera . . . . .	10
1.5	Artificial potential fields . . . . .	12
1.6	Cell decomposition . . . . .	13
1.7	Ukážka hry Červík . . . . .	14
1.8	Ukážka hry Červík . . . . .	15
2.1	Lokálna mapa . . . . .	17
2.2	Koridory . . . . .	19
4.1	Ukážka robota Smelý zajko . . . . .	24
4.2	Ukážka robota Smelý zajko . . . . .	25
4.3	Ukážka robota Smely zajko . . . . .	25