

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Martin Dekan

Autoreferát dizertačnej práce

Autonómna navigácia mobilného robota

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Automatizácia a riadenie

Miesto a dátum: Bratislava, 15. 10. 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Martin Dekan**
FEI STU Bratislava ÚRK

Školiteľ: **prof. Ing. Anton Vitko, PhD.**
FEI STU Bratislava ÚRK

Oponenti: **prof. Ing. Boris Rohal'-Ilkiv, CSc.**
UAMAI Sjf STU Bratislava
doc. Ing. Rudolf Ravas, PhD.
UE FEI STU Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU

Obsah

1	Úvod	4
2	Ciele dizertačnej práce	4
2.1	<i>Tézy dizertačnej práce</i>	4
3	Teoretický úvod	5
3.1	<i>Laserový diaľkomer</i>	5
4	Určenie parametrov laserového diaľkomera	6
4.1	<i>Pravdepodobnostný model laserového diaľkomera</i>	6
5	Predspracovanie	13
5.1	<i>Filter falošných meraní</i>	13
5.2	<i>Filter šumu</i>	15
6	Segmentácia laserového merania	17
6.1	<i>Prahovanie</i>	18
6.2	<i>Zjednodušenie objektov vzniknutých segmentáciou</i>	20
6.3	<i>Význačné body objektu</i>	23
7	Dynamické prekážky	27
7.1	<i>Poloha mobilného robota</i>	27
7.1.1	<i>Laserová odometria</i>	28
7.2	<i>Hľadanie zhody objektov</i>	29
7.2.1	<i>Reprezentácia priestoru pomocou objektov</i>	29
7.2.2	<i>Hľadanie najbližšieho objektu</i>	30
7.3	<i>Vyhodnotenie pohyblivých objektov</i>	31
8	Záver	33
8.1	<i>Zhodnotenie výsledkov a prínosy dizertačnej práce</i>	33
1.1	<i>Budúce ciele</i>	34
9	Literatúra	34
10	Publikované práce autora	35
10.1	<i>ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch</i>	35
10.2	<i>ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch</i>	35
10.3	<i>ADM</i>	36
10.4	<i>AED Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách</i>	36
10.5	<i>AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách</i>	36
10.6	<i>AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách</i>	36
10.7	<i>BDF Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch</i>	37
10.8	<i>GII Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií</i>	37

1 Úvod

Mobilná robotika postupne zasahuje do čoraz väčšej sféry nášho života. Opúšťa uzavreté priestory fabrik a skladov a prechádza medzi ľuďmi. Už dávno neplatí fakt, že roboty pracujú ako samostatné jednotky, ktoré interagujú len s inými strojmi. Toto umožňujú stále dokonalejšie snímače a výkonnosť počítačov. Prechod mobilných robotov do týchto vysoko dynamických priestorov však so sebou prináša mnohé problémy. Vo fabrikách a skladoch je možné presne vymedziť pracovný priestor robota, v ktorom sa pohybujú len poučení pracovníci. V dynamických prostrediach, ako sú výstaviská, parky, prípadne kancelárske priestory, tieto podmienky nie je možné dosiahnuť. Mobilný robot sa nedokáže bez vývoja nových metód riadenia v takýchto prostrediach pohybovať efektívne. Avšak nato, aby nové prístupy riadenia mohli fungovať, je potrebné vedieť tieto dynamické prostredia snímať. V súčasnosti je najrozšírenejším aktívnym snímačom prostredia používaným v mobilnej robotike laserový diaľkomer. Napriek tomu, že vývoj diaľkometerov siaha do konca 60-tych rokov predchádzajúceho storočia, ich hromadné nasadenie umožnil až príchod rýchlych integrovaných obvodov. Vďaka neustále klesajúcej cene sa laserové diaľkomery postupne dostávajú do hobby projektov ako aj servisných robotov určených pre domácnosť [1]. Vývoj snímačov sa v súčasnosti zameriava na 3D snímanie priestoru. Na trhu sa objavujú prvé RGBD kamery, ktoré však zatiaľ nedosahujú dostatočné parametre nato, aby ich bolo možné použiť pri navigácii robotov v dynamickom prostredí. V prípade 3D laserových diaľkometerov je momentálne najviac limitujúca cena, ktorá neumožňuje ich nasadenie v mnohých aplikáciách. 3D laserový diaľkometer je možné získať aj rotáciou 2D laserového diaľkomera okolo jednej osi, avšak takéto riešenie je na navigáciu robota pomalé a využíva sa hlavne na mapovanie prostredia v statických stavoch robota [2]. Z týchto dôvodov sa na navigáciu robota v dynamických prostrediach používajú hlavne 2D laserové diaľkomery.

2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je návrh algoritmov spracovania údajov z 2D laserového diaľkomera tak, aby ich výstup bol použiteľný pre navigáciu mobilného robota v dynamickom prostredí. Tieto algoritmy je možné rozdeliť na viacero stupňov spracovania údajov. Prvým stupňom je analýza merania laserovým diaľkometerom Hokuyo UTM-30LX. Táto časť je zameraná na určenie parametrov ako sú opakovateľnosť a rozlíšenie. Výstup tejto kapitoly je ďalej použitý ako základ pre návrh predspracovania, ktorého cieľom je potlačiť nedostatky snímania. Cieľom ďalšej skupiny algoritmov je rozdelenie tohto merania na časti, ktoré zodpovedajú rovnakým častiam snímaného prostredia. Úlohou tejto časti je aj zjednodušenie merania za účelom zníženia pamäťovej a výpočtovej náročnosti. Posledným stupňom spracovania sú metódy umožňujúce identifikáciou pohyblivých objektov v priestore. Tieto algoritmy okrem samotnej identifikácie dynamických objektov v sebe zahŕňajú aj metódy zlepšenia informácie o polohe mobilného robota, pretože bez informácie o polohe nie je možné dynamické objekty správne určiť.

Práca vznikla s podporou projektov VEGA 1/0177/11 , KEGA 003STU-4/2014 a ITMS 26240220033

2.1 Tézy dizertačnej práce

Základné tézy dizertačnej práce sú:

- Vytvoriť filter, ktorý minimálne poškodzuje prechody medzi objektmi.
- Navrhnuť segmentáciu schopnú rozdeliť meranie na časti korešpondujúce s objektmi.
- Navrhnuť párovanie objektov medzi jednotlivými meraniami.
- Navrhnuť reprezentáciu získaných objektov tak, aby bola ľahko využiteľná pri navigácii mobilného robota.
- Detekcia dynamických objektov.

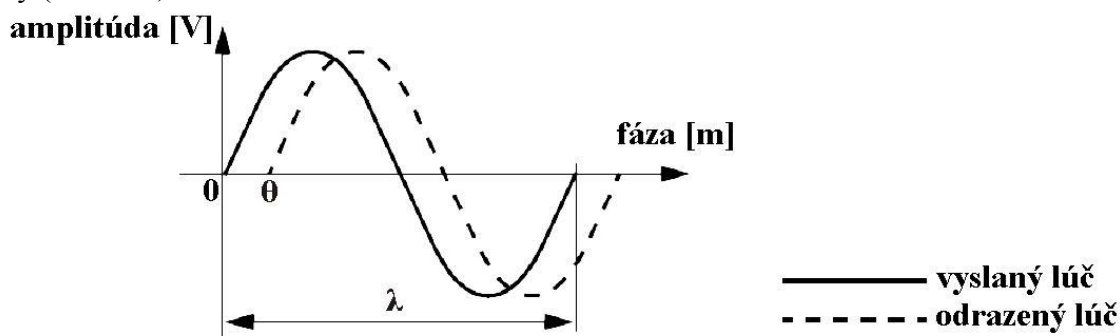
Členenie práce je nasledovné: prvá časť obsiahnutá v kapitole 3 sa venuje analýze fungovania laserových diaľkometerov a existujúcich metód spracovania. Kapitoly 5 až 7 sú venované komplexnej analýze problematiky ako aj návrhu a implementácii metód spracovania.

3 Teoretický úvod

Cieľom nasledujúcej kapitoly je poskytnúť čitateľovi prehľad o fungovaní laserových diaľkometerov používaných v mobilnej robotike. Zároveň sú tu uvedené aj existujúce metódy z oblasti spracovania údajov získaných meraním. Tento sumár je z dôvodu prehľadnosti limitovaný len na tie oblasti metód, ktoré sú aplikované v praktickej časti dizertačnej práce.

3.1 Laserový diaľkometer

Laserový diaľkometer je zariadenie, ktoré pomocou vysielaného laserového lúča meria vzdialenosť k okolitým objektom. Laserový diaľkometer Hokuyo, použitý v práci funguje na princípe amplitúdovej modulácie kontinuálne vysielaného laserového lúča. [3] Odrazený signál je oproti vyslanému fázovo posunutý (Obr. 3.1).



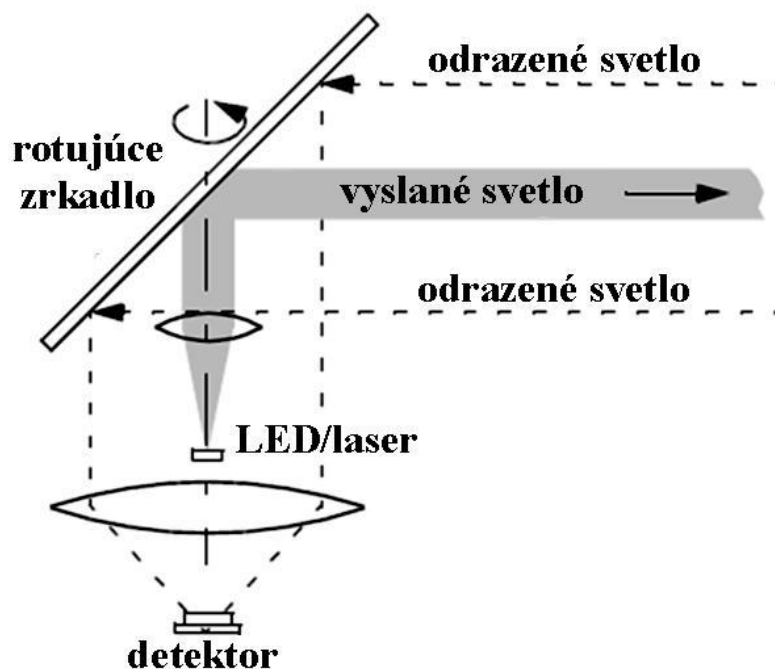
Obr. 3.1 Princíp vyhodnotenia prejdenej vzdialenosti na základe amplitúdovo modulovaného signálu [5]

A vzdialenosť meraného objektu je možné určiť na základe rovnice:

$$d = \frac{c}{4\pi f} \theta \quad (3.1)$$

Kde f predstavuje modulovanú frekvenciu a θ fázový rozdiel medzi vyslaným a prijatým lúčom z intervalu $\langle 0, 2\pi \rangle$.

Aby bolo možné merať týmto diaľkometerom v rovine, je vysielaný lúč postupne smerovaný pomocou rotačného zrkadla (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Princíp laserového diaľkomera s rotačným zrkadlom [4]

4 Určenie parametrov laserového diaľkomera

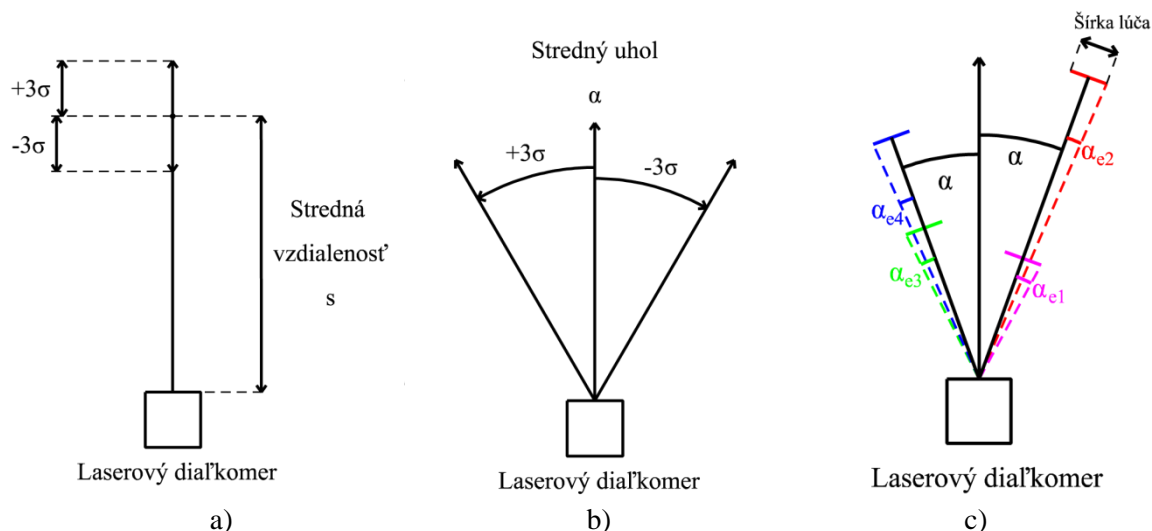
Meranie laserovým diaľkomerom je ako každé meranie zaťažené chybou. Pre ďalšie spracovanie údajov získaných z diaľkomera je nutné čo najpresnejšie určiť typ a veľkosť chyby, ktorá pôsobí na meranie. Pri určovaní danej chyby je vhodné vychádzať z parametrov diaľkomera, ktoré určil výrobca. Tieto parametre sú ale výrobcom zadané pre konkrétne podmienky, ktoré je nutné dodržať, aby bolo možné dosiahnuť rovnaké výsledky. V prípade mobilnej robotiky však nie je možné zabezpečiť, aby laserový diaľkomer snímal objekty vždy za týchto podmienok. Preto je potrebné vykonať merania, na základe ktorých sa určia parametre diaľkomera tak, aby čo najvernejšie opisovali získané údaje, bez ohľadu na to, za akých podmienok bolo meranie vykonané. Parametre zadané výrobcom sú v Tab. 4-1

Merací rozsah	Garantovaný rozsah 0,1 ~30 m (pre biely papier) Maximálny rozsah 0,1 ~60 m (pre biely papier)
Detekovateľný objekt	Minimálna šírka pre vzdialenosť 10 m : 130mm
Presnosť	Pri osvetlení 3000lx :±30 mm Pri osvetlení 10000lx :±50 mm
Rozlíšenie	1 mm
Opakovateľnosť	0,1 ~ 10 m: $\sigma < 10$ mm 10 ~ 30 m: $\sigma < 30$ mm
Meraný uhol	270°
Uhlové rozlíšenie	0,25°
Rýchlosť snímania	25 ms

Tab. 4-1 Parametre laserového diaľkomera Hokuyo

4.1 Pravdepodobnostný model laserového diaľkomera

Tvorba pravdepodobnostného modelu laserového diaľkomera bola zameraná na tri parametre diaľkomera. Prvý určovaný parameter je opakovateľnosť merania t. j. stabilita získanej vzdialenosti pri opakovaní merania bez zmeny podmienok. Druhým parametrom je opakovateľnosť merania vzhľadom na otočenie laserového lúča v priestore. Tretím parametrom vstupujúcim do pravdepodobnostného modelu je vplyv šírky lúča na meranie. Napriek tomu, že hovoríme o šírke lúča, nejedná sa o fyzickú veľkosť, ale o fiktívnu veľkosť, ktorá ovplyvňuje meranie. Význam parametrov vzhľadom na ich prislúchajúce osi sú zobrazené na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Parametre laserového diaľkometra použité pri tvorbe prvého pravdepodobnostného modelu. Rozptyl meranej vzdialenosti a) a rozmedzie v akom sa môže objekt v rámci merania nachádzať b).

Na určenie opakovateľnosti merania vzhľadom na meranú vzdialenosť boli vykonané merania rôznych typov materiálov pod uhlom 90° a 45°. Pre každý povrch a otočenie bolo vykonaných 20 meraní v rôznych vzdialenostiach, ktoré boli opakované 500-krát.

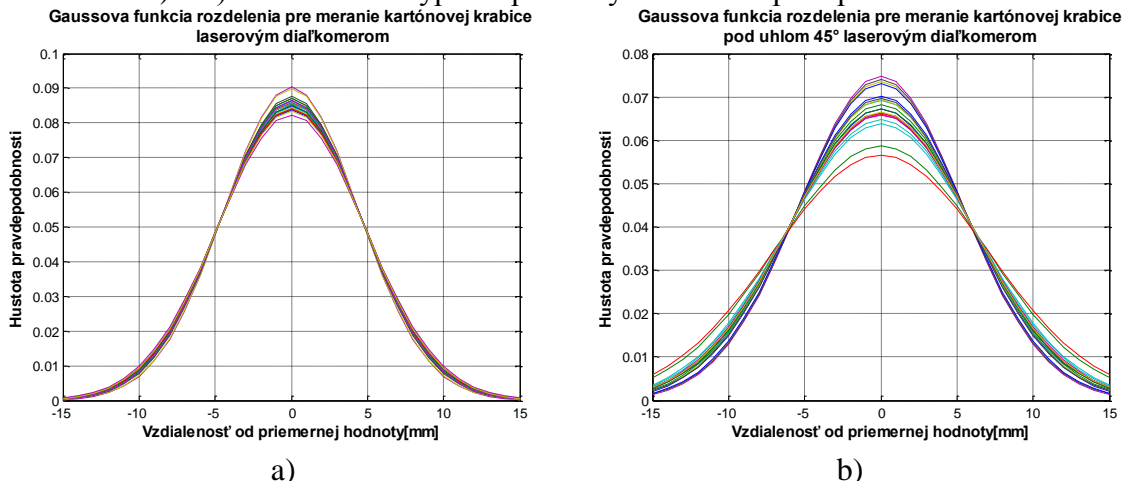
Na základe údajov získaných z merania bol ako najvhodnejší pravdepodobnostný model vybraný model normálneho rozdelenia opísaný gaussovou funkciou pravdepodobnosti podľa vzťahu (4.1)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Kde μ je stredná hodnota meranej hodnoty a σ je smerodajná odchýlka vypočítaná podľa vzťahu (4.2)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

Na Obr. 4.2 a) a b) sú zobrazené typické priebehy rozdelenia pre opakované merania.



Obr. 4.2 Gaussove rozdelenie pravdepodobnosti pre meranie vzdialenosti kartónovej krabice pomocou laserového diaľkometra pre kolmé meranie a) a meranie pod uhlom 45° b)

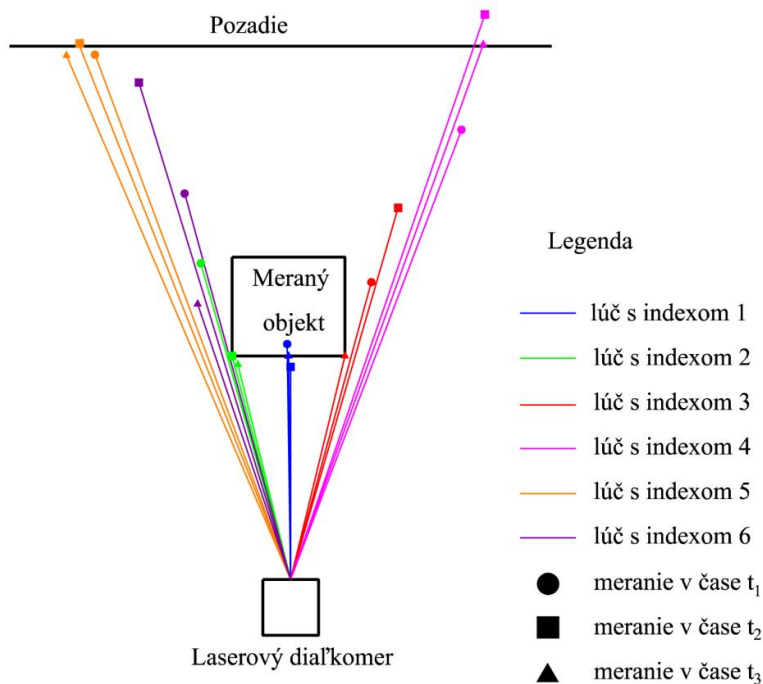
Merania pre všetky povrchy sú zobrazené v Tab. 4-2. Pre oba typy meraní sú zvýraznené dosiahnuté najnižšie a najvyššie hodnoty.

Typ povrchu	σ [mm] pre kolmé meranie	σ [mm] pre meranie pod uhlom 45°
Kartónová krabica	4,6533	5,9321

Prútený plastový povrch	5,4172	5,6927
Látka	4,9352	6,1049
Biely papier	5,3914	6,2753
Lesklý biely povrch	5,0832	5,8775
Lesklý čierny kov	4,7402	8,6743

Tab. 4-2 Smerodajné odchýlky pre rôzne povrchy.

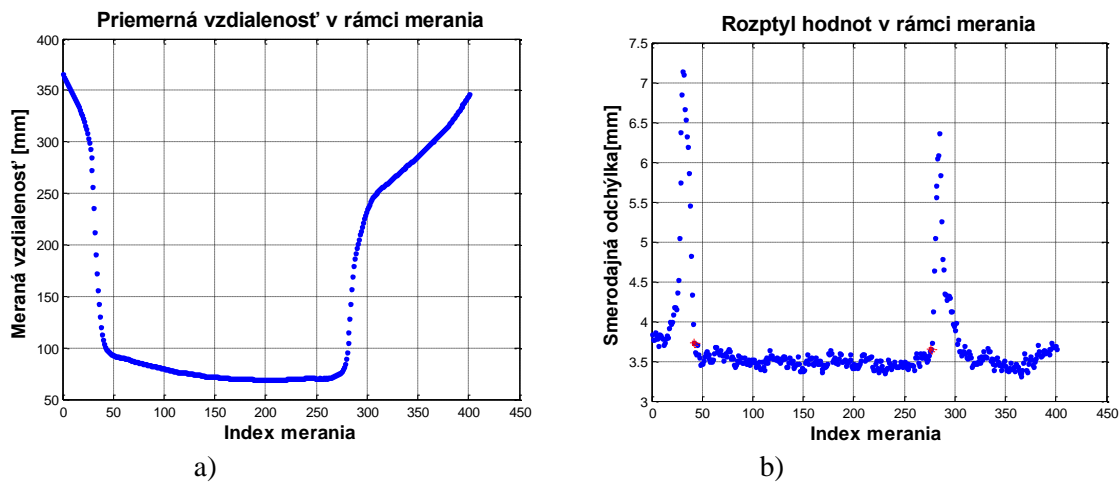
Meranie, na základe ktorého bol určený druhý a tretí parameter pozostávalo z objektu umiestneného pred laserový diaľkomer v dostatočnej vzdialenosti od pozadia tak, aby bola jednoznačná poloha v rámci meraných dát. Ako je na Obr. 4.4 a) a ilustračnom Obr. 4.3 vidieť, vznikajú medzi dvomi objektmi merania nesprávnej vzdialenosti, takzvané falošné merania. Falošné merania sú také merania, ktorých odmeraná vzdialenosť nekorešponduje so skutočnými vzdialenosťami k žiadnemu existujúcemu objektu v priestore. Typicky sa táto vzdialenosť nachádza medzi vzdialenosťou objektu a pozadia. Na Obr. 4.3 sú zobrazené 3 opakované merania pre 6 rôznych pozícií (index 1 až 6). Lúče s indexom 1 a 5 vyjadrujú meranie nachádzajúce sa mimo rozhrania dvoch objektov a ich vzdialenosť má pri opakovanom meraní minimálny rozptyl. Lúče s ostatnými indexmi znázorňujú rôzne pozície, pri ktorých dochádza k nepresnému meraniu na rozhraní dvoch objektov. Opakované meranie dosahuje väčší rozptyl ako aj hodnoty vzdialenosti, ktoré nie je možné priradiť žiadnemu objektu - falošné merania.



Obr. 4.3 Ilustračné zobrazenie meranej vzdialenosti pre rôzne pozície laserového lúča pri opakovanom meraní

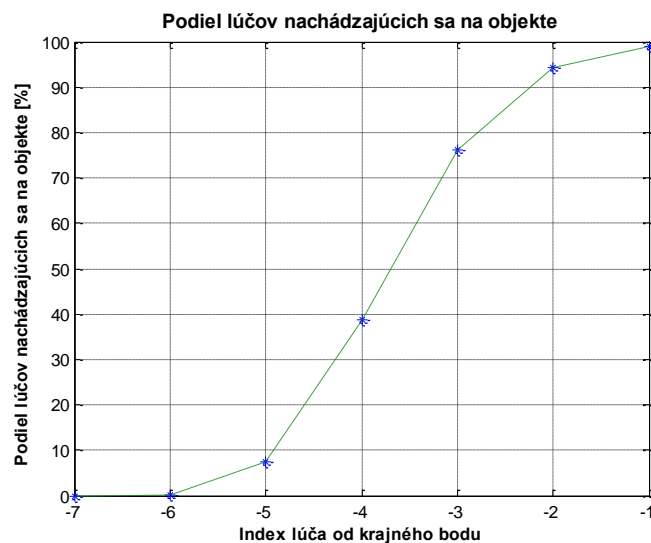
Keďže vzdialenosť získaná z týchto falošných meraní dosahuje oveľa väčší rozptyl (Obr. 4.4), je možné ich využiť pri identifikácii uhlového rozptylu laserového diaľkomera.

Prvým krokom určenia uhlového rozptylu je nájdenie krajných bodov objektu. Za krajné body považujeme také, ktorých nameraná vzdialenosť sa pre všetky opakovania nachádza na danom objekte. Tieto body sú určené na základe prahovania smerodajnej odchýlky bodov medzi hranicami objektu. Takto určené krajné body sú zobrazené na Obr. 4.4b červenou farbou.



Obr. 4.4 Priemerná vzdialenosť meraná laserovým diaľkomerom na danej pozícii opakovaného merania a) a rozptyl meranej vzdialenosti na danej pozícii opakovaného merania b)

V ďalšom kroku sa analyzujú body nachádzajúce sa za krajnými bodmi objektu. Cieľom analýzy je určiť, či sa v danom meraní nachádza bod na objekte alebo na rozhraní medzi objektom a pozadím. Následne sa určí počet bodov, ktoré sa pre konkrétny lúč pri opakovanom meraní nachádzajú na objekte. Graf takýchto početností sa nachádza na Obr. 4.5. Ako vidieť, čím sa stredná poloha lúčov od polohy objektu nachádza ďalej, tým je aj menší počet bodov, ktoré ležia na objekte.



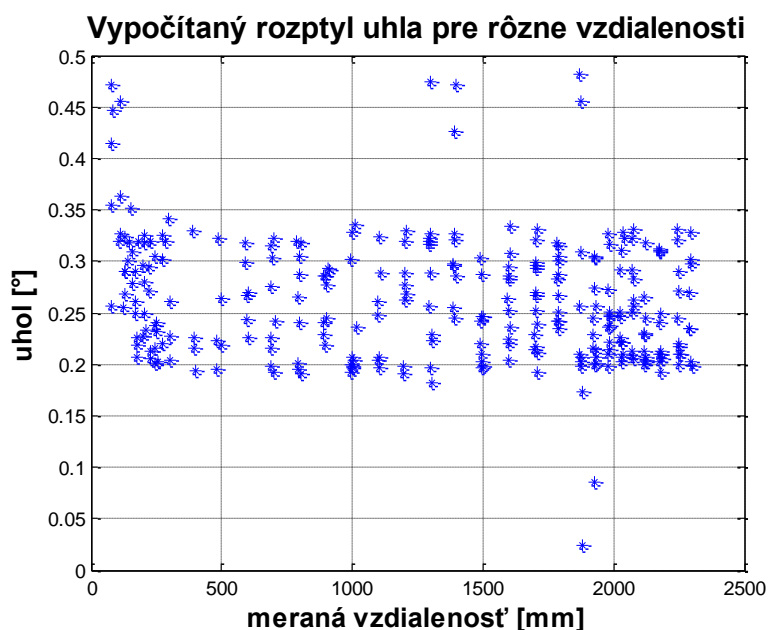
Obr. 4.5 Typický graf podielu výskytu bodu na objekte pre rôzne vzdialené lúče od hrany objektu.

Na základe početností získaných z tejto analýzy sa určí rozptyl natočenia lúča σ_r^2 , ktorý je ďalej použitý v pravdepodobnostnom modeli laserového diaľkometra:

$$\sigma_r = T \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_i I(i)^2} \quad (4.3)$$

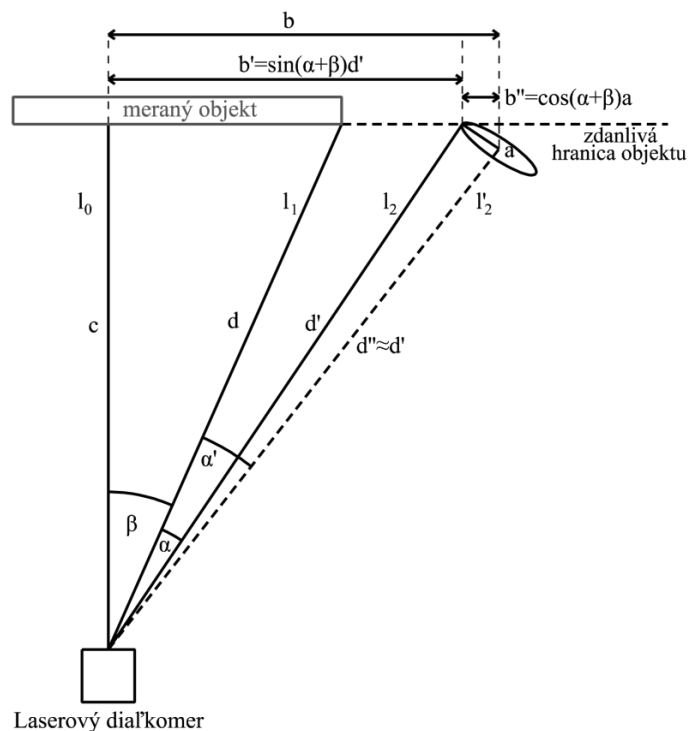
Kde k predstavuje počet bodov na rozhraní objektu, z ktorých sa hodnota σ_r^2 vypočíta. Pri našom experimente bola táto hodnota zvolená ako 14, kde 7 bodov bolo vybraných z pravej strany objektu a 7 bodov z ľavej strany. Hodnota N_i predstavuje počet bodov, ktoré s daným indexom ležali na meranom objekte. A funkcia $I(i)$ predstavuje vzdialenosť indexu od krajného bodu objektu. Koeficient T predstavuje prepočet z hodnoty indexu na hodnoty s rozmerom v uhloch a pre náš laserový diaľkometer má hodnotu $0,25^\circ$.

Ako je vidieť na xx s klesajúcou vzdialenosťou vypočítaný rozptyl lúča rastie. To je spôsobené práve vplyvom šírky lúča, ktorý bol v predchádzajúcej časti zanedbaný. Preto bolo spracovanie merania ďalej rozšírené



Obr. 4.6 Vypočítaný rozptyl polohy lúča pre rôzne vzdialenosti

Cieľom spracovania merania je určenie šírky lúča. Na určenie šírky lúča bol využitý predpoklad zobrazený na Obr. 4.1 c. Podľa ktorého šírka lúča priamo ovplyvňuje výpočet rozptylu polohy lúča a tento vplyv s rastúcou vzdialenosťou klesá. Z tohto dôvodu sa pre určenie šírky lúča použije taká časť merania, v ktorej je tento vplyv dostatočne veľký nato, aby ho bolo možné určiť. Na Obr. 4.7 je zobrazený vplyv šírky lúča a na dĺžku b a z nej vypočítaný rozptyl uhla α . Ako je vidieť, vplyv veľkosti lúča na vypočítaný rozptyl uhla nie je len funkciou vzdialenosti, ale závisí aj od vzájomnej polohy laserového diaľkomeru a snímaného objektu. Toto je vyjadrené uhlom β , ktorý predstavuje uhol medzi lúčom kolmým na meraný objekt l_0 a lúčom, ktorý zaznamenal hranicu objektu l_1 . Avšak, táto hranica môže byť zaznamenaná aj nasledujúcim lúčom l_2 (zdanlivá hranica objektu) v prípade, ak je natočený voči svojej predpokladanej polohe. Tento uhol je v obrázku vyjadrený pomocou α a α' . Rozdiel medzi α a α' je v tom, že pri uhle α je zanedbaný vplyv veľkosti lúča na meranie.



Obr. 4.7 Vplyv určenia šírky lúča na výpočet rozptylu polohy lúča

Tento vplyv je možné vyjadriť vzťahom

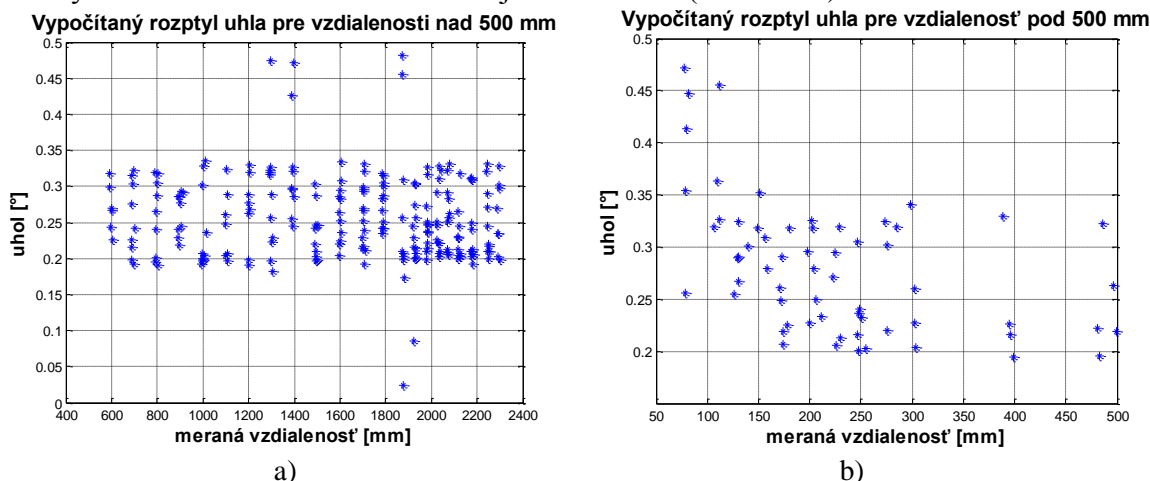
$$b = b' + b'' \quad (4.4)$$

Kde po dosadení dostaneme rovnicu v tvare:

$$\sin(\alpha' + \beta) = \sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta) \frac{a}{d'} \quad (4.5)$$

Kde α' vyjadruje uhol získaný z výpočtu, ktorý je zaťažený chybou spôsobenou vplyvom šírky lúča a α vyjadruje taký uhol, pri ktorom by bola šírka lúča rovná 0, strany a a d' vyjadrujú šírku lúča a nameranú vzdialenosť.

V rovnici (4.5) okrem neznámej šírky lúča a vystupuje aj neznámy uhol α . Keďže vplyv šírky lúča s rastúcou vzdialenosťou klesá, je možné tento uhol určiť z merania takej vzdialenosti, kedy je tento vplyv zanedbateľný. Z tohto dôvodu boli uhlové rozptyly, ktoré boli získané z merania zobrazeného na Obr. 4.6 rozdelené na dva súbory. Prvý obsahoval merania so vzdialenosťou viac ako 500 mm (Obr. 4.8 a) a druhý merania so vzdialenosťou menej ako 500 mm (Obr. 4.8 b).



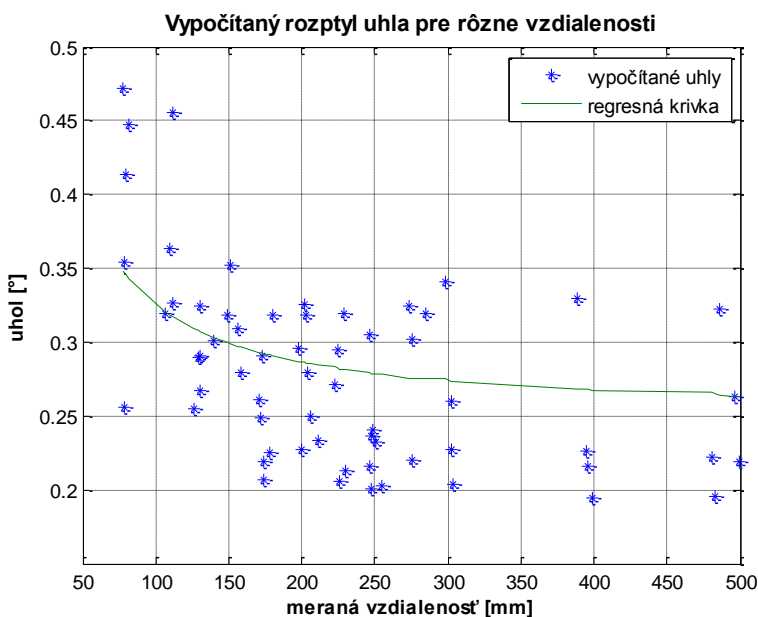
Obr. 4.8 Rozptyl lúča pre vzdialenosti viac ako 500 mm a) a menej ako 500mm b)

Na základe súboru dát obsahujúcich merania zo vzdialenosti viac ako 500mm bol určený uhol $\alpha = 0,2473^\circ$. Z veľkosti rozptylu smerovania lúča sa môže zdať, že za určitých podmienok si dva po sebe idúce lúče môžu vymeniť svoju vzájomnú polohu. V experimentoch sme sa s týmto javom nestretli, a preto je predpoklad, že sa tento rozptyl skladá z dvoch častí. Prvá časť je rozptyl natočenia celého merania a druhá časť je rozptyl natočenia jednotlivých lúčov v meraní. Podľa tohto predpokladu rozptyl smerovania lúčov v jednom meraní nedosahuje takú hodnotu, aby sa vzájomná poloha dvoch po sebe idúcich lúčov mohla zmeniť.

Na určenie neznámej šírky lúča a bola použitá regresná krivka určená metódou najmenších štvorcov podľa rovnice:

$$MNŠ = \left[\sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta) \frac{a}{d'} - \sin(\alpha' + \beta) \right]^2 \quad (4.6)$$

Metóda najmenších štvorcov dosahuje minimum pre hodnotu šírky lúča $a = 0,135$ mm a výsledná regresná krivka je zobrazená na Obr. 4.9.



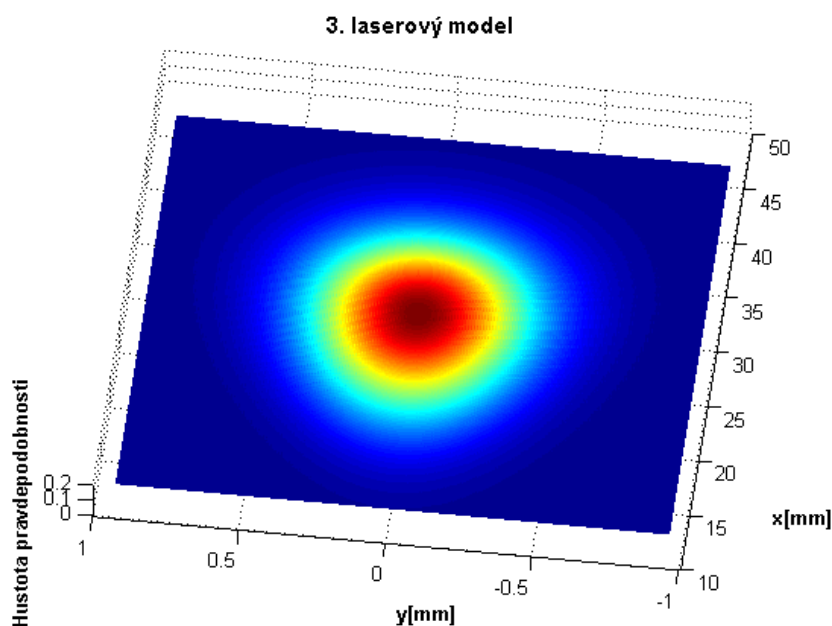
Obr. 4.9 Regresná krivka vyjadrujúca vplyv šírky lúča na výpočet rozptylu polohy lúča s vypočítaným rozptylom polohy lúča na základe merania v rôznych vzdialenostiach

Výsledný pravdepodobnostný model laserového diaľkomera vznikne, podobne ako pri druhom pravdepodobnostnom modeli, na základe rovníc:

$$\sigma_y = a + \tan(\sigma_r) x \quad (4.7)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} e^{-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right)} \quad (4.8)$$

Kde a predstavuje šírku lúča a σ_r smerodajnú odchýlku pre polohu lúča s hodnotami $a = 0,135$ mm a $\sigma_r = 0,2473^\circ$. Hodnota σ_x je smerodajná odchýlka v smere merania s hodnotu 5,6894 mm. Výsledný model pre rôzne vzdialenosti je zobrazený na Obr. 4.10



Obr. 4.10 Výsledný tretí pravdepodobnostný model prepočítaný do karteziánskych súradníc pre vzdialenosti 30mm

Podobne ako druhý pravdepodobnostný laserový model, tretí pravdepodobnostný laserový model lepšie korešponduje s vlastnosťami laserového diaľkometra ako prvý pravdepodobnostný laserový model. Výhoda tretieho pravdepodobnostného modelu je v rozsahu meranej vzdialenosti, v ktorej je schopný presne reprezentovať rozloženie pravdepodobnosti polohy meraného objektu v priestore. A to z dôvodu, že parametre tretieho pravdepodobnostného modelu boli určené pre väčší rozsah vzdialenosti, čím boli eliminované poruchové vplyvy ako napríklad šírka laserového lúča.

5 Predspracovanie

Pomocou použitia Bayesovho pravidla s mriežkou obsadenia je možné efektívne potláčať nedostatky snímačov ako napríklad šum alebo chybné meranie. Na využitie týchto vlastností danej aplikácie je však potrebných viacero údajov. V mnohých prípadoch ale nie je možné meranie zopakovať a mriežka obsadenia sa teda nedá na túto činnosť použiť. V takýchto prípadoch je vhodné na merania aplikovať rôzne filtre. Nasledujúca kapitola sa venuje návrhu takých filtrov, ktoré potláčajú nedostatky merania pre laserový diaľkometer analyzovaný v predchádzajúcich kapitolách.

5.1 Filter falošných meraní

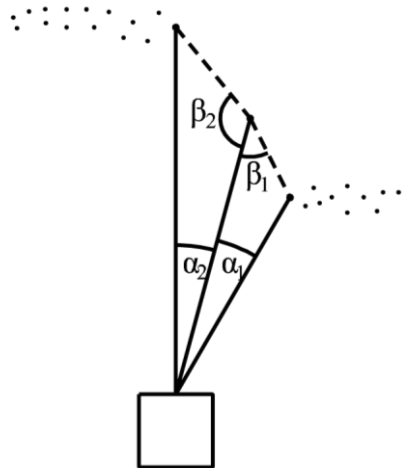
Pri meraní laserovým diaľkometerom Hokuyo vznikajú na rozhraní dvoch objektov, t. j. platných údajov, falošné merania. Tieto falošné údaje sú pre navigáciu mobilného robota ako aj mapovanie prostredia nežiaduce, pretože by mohli spôsobiť vo vytvorenej mape uzatvorenie voľných priechodov. Táto kapitola sa venuje návrhu takého filtra, ktorý tieto falošné merania odstraňuje, a tým zlepšuje navigáciu mobilného robota ako aj mapovanie prostredia.

Základný princíp navrhnutého algoritmu vychádza z týchto predpokladov :

- Pred falošným meraním sa vždy nachádza platný údaj.
- Za falošným meraním nasleduje platný údaj alebo ďalšie falošné meranie.
- Medzi platným údajom a falošným meraním je dostatočne veľký rozdiel v určených vzdialenostiach.
- Medzi dvoma falošnými meraniami je dostatočne veľký rozdiel v určených vzdialenostiach.

Napriek tomu, že prvý predpoklad budí dojem, že filter falošných meraní odstráni len prvé takéto meranie, nie je tomu tak. Tieto predpoklady vychádzajú z postupného spracovania merania. Čiže v prípade spracovania nasledujúceho falošného merania je už prvé falošné meranie odstránené, a teda pred druhým falošným meraním sa už nachádza platný údaj.

Dôležitým faktorom navrhnutého filtra je spôsob vyhodnotenia, na základe ktorého sa určí, či je rozdiel vzdialeností medzi dvoma údajmi dostatočný. Jeden z údajov je na základe tohto vyhodnotenia označený ako falošné meranie.



Laserový diaľkometer

Obr. 5.1 Ilustračná ukážka spôsobu vyhodnotenia falošného merania

Ako spôsob vyhodnotenia, či je údaj označený ako falošné meranie, bol zvolený uhol, ktorý zvierá meranie so svojimi susednými bodmi (Obr. 5.1). Tieto uhly je možné vypočítať podľa rovníc:

$$\beta_1 = \arccos \left(\frac{l_i - l_{i-1} \cos(\alpha_i)}{\sqrt{l_i^2 + l_{i-1}^2 - 2l_i l_{i-1} \cos(\alpha_i)}} \right) \quad (5.1)$$

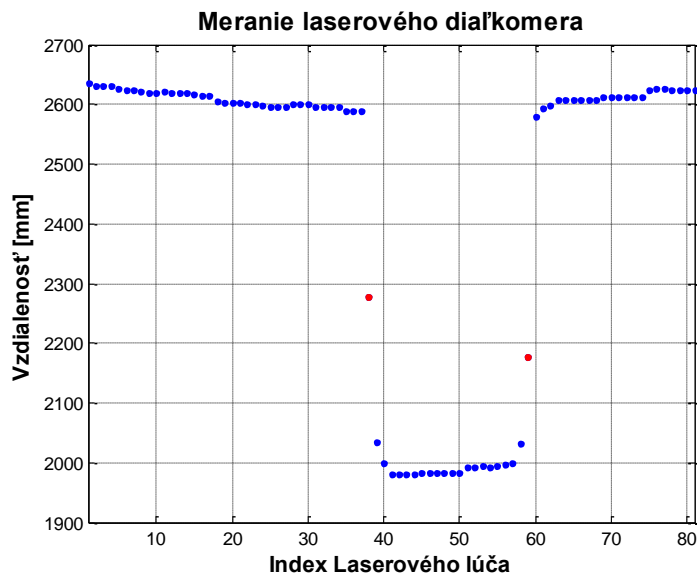
$$\beta_2 = \arccos \left(\frac{l_i - l_{i+1} \cos(\alpha_{i+1})}{\sqrt{l_i^2 + l_{i+1}^2 - 2l_i l_{i+1} \cos(\alpha_{i+1})}} \right) \quad (5.2)$$

Kde uhly β_1 a β_2 sú z intervalu $(0^\circ, 180^\circ)$. Uhol α_i predstavuje hodnotu $l_i^\alpha - l_{i-1}^\alpha$. Funkcia $F(l_i)$, na základe ktorej je vyhodnotené, či sa jedná o falošné meranie, má potom tvar:

$$F(l_i) = (\beta_1 \leq \beta_{min} \wedge \beta_2 \geq \beta_{Max}) \vee (\beta_1 \geq \beta_{Max} \wedge \beta_2 \leq \beta_{min}) \quad (5.3)$$

Kde β_{min} a β_{Max} sú spodná a horná hranica, pri prekročení ktorej sa považujú dva po sebe idúce údaje za možný výskyt falošného merania. Hranice β_{min} a β_{Max} boli určené experimentálne na hodnotu 8° a 172° . Funkcia $F(l_i)$ nadobúda hodnotu 1, v prípade ak je lúč l_i označený ako falošné meranie a hodnotu 0, v prípade ak lúč l_i je označený ako platný údaj. V prípade, ak je meranie vyhodnotené ako falošné, je v nasledujúcom kroku označené za neplatné meranie a pri ďalšom spracovaní sa s ním neuvažuje.

Porovnanie merania pred a po aplikácii filtra falošných meraní na vzorke laserového merania je na Obr. 5.2. Falošné meranie je zobrazené červenou farbou.



Obr. 5.2 Identifikované falošné merania (body červenou farbou)

Takto navrhnutý filter odstraňuje falošné meranie (Obr. 5.2 body červenou farbou). V prípade, ak by sa medzi dvoma údajmi nachádzalo neplatné meranie, vo výpočte podľa rovnice (5.1), respektíve (5.2), by sa táto skutočnosť zohľadnila zmenou uhla α_i . Nevýhodou navrhnutého filtra falošných meraní je možnosť odstránenia platných údajov. Toto by mohlo nastať v prípade, ak by bola hrana snímaného objektu voči laserovému diaľkomeru otočená o menej ako β_{min} alebo viac ako β_{MAX} . V takomto prípade sa zo statického merania nedá rozhodnúť, či sa jedná o takýto objekt alebo falošné meranie. V prípade mobilného robota však ten nedostatok nehrá dôležitú rolu. Mobilný robot sníma počas svojho pohybu priestorom objekty pod rôznym uhlom, ktoré sú následne zaznačené do mapy. V prípade, ak by bol nejaký objekt na základe filtra odstránený z merania, z predchádzajúcich alebo nasledujúcich meraní bude snímaný pod takým uhlom, kedy k jeho odstráneniu nedôjde. A teda vo výslednej mape sa daný objekt objaví.

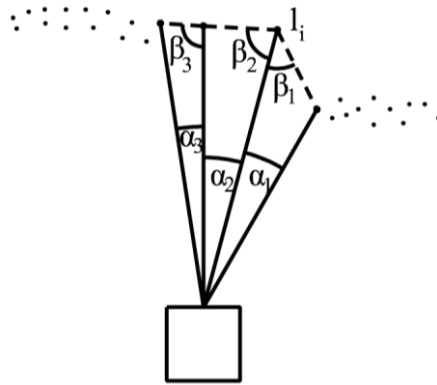
5.2 Filter šumu

Na meranie laserovým diaľkomerom pôsobí šum, ktorý spôsobuje nesprávne určenie vzdialenosti od objektov v priestore. V kapitole 4.1 bolo ukázané, že tento šum má charakter Gaussovej krivky. V prípade statického merania v statickom prostredí je možné meranie opakovať a tento šum odstrániť napríklad priemerovaním nameraných hodnôt v danej pozícii. V prípade, ak by bolo možné meranie opakovať len v malom počte, existujú rôzne modifikácie priemerovania, ktoré efektívne takýto typ šumu potláčajú. Mobilný robot však v mnohých prípadoch nemá možnosť opakovať meranie z dôvodu svojho pohybu, prípadne pohybu objektov v priestore. Preto je nutné tento šum odstrániť len na základe údajov z aktuálneho merania. Ako najjednoduchší spôsob takéhoto filtrovania je možné použiť vážený plávajúci priemer, kde sa výsledná hodnota vypočíta ako priemer hodnôt v okolí daného merania.

Cieľom ďalšej úpravy je modifikovať vážený plávajúci priemer tak, aby neporušoval ostré prechody medzi dvoma objektmi. Hlavnou ideou tejto modifikácie je aplikovať plávajúci priemer len na tie časti merania, ktoré spolu súvisia. Takýmito súvisiacimi celkami sú práve také merania, v ktorých nedochádza k trvalejšej prudkej zmene určenej vzdialenosti. Podmienka, na základe ktorej sa určí, či došlo v meraní ku ukončeniu súvislej časti, má tvar:

$$F_d(l_i) = (\beta_1 \leq \beta_{min} \wedge \beta_2 \leq \beta_{Max} \wedge \beta_3 \leq \beta_{Max}) \vee (\beta_1 \geq \beta_{Max} \wedge \beta_2 \geq \beta_{min} \wedge \beta_3 \geq \beta_{min}) \quad (5.4)$$

Kde jednotlivé uhly sú zobrazené na Obr. 5.3 a sú počítané rovnako ako v rovniciach (5.1) a (5.2). Hodnoty β_{min} a β_{Max} majú rovnaký význam a veľkosť ako v rovnici (5.3).

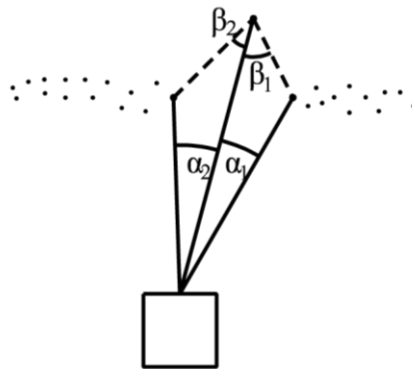


Laserový diaľkomer

Obr. 5.3 Ilustračná ukážka spôsobu vyhodnotenia či sa jedná o súvisiace celky

V rámci takto určených súvisiacich celkov je na meranie aplikovaný vážený plávajúci priemer. Pri tomto type filtra nezanikajú ostré prechody na rozhraní dvoch objektov a zároveň sú hodnoty meraní vo vnútri súvisiacich celkov vyhladené. Navrhnutý filter potláča vplyv gaussovho šumu a je teda vhodný na použitie s laserovým diaľkomerom Hokuyo. V prípade, ak by sa však v meraní nachádzal aj impulzný šum, takto navrhnutý filter nie je vhodné použiť. Impulzný šum sa v meraní môže nachádzať hlavne z dôvodu nehomogénosti prostredia. Takýmto povrchom môže byť perforovaný plech, ktorého niektoré časti prepustia laserový lúč, ktorý sa následne odrazí od povrchu nachádzajúcom sa za týmto plechom. Keďže nevieme vylúčiť, či sa nejaký takýto povrch v priestore nachádza, navrhnutý filter je vhodné modifikovať tak, aby dokázal aj takýto šum eliminovať.

V praxi sa na potlačenie impulzného šumu používa mediánový filter. Mediánový filter je však oproti plávajúcemu priemeru výpočtovo náročnejší. Zároveň mediánový filter potláča šum len čiastočne. Preto je vhodné mediánový filter použiť len na tie časti merania, v ktorých je to žiaduce. Identifikácia impulzného šumu je založená na porovnávaní uhlov podľa Obr. 5.4.



Laserový diaľkomer

Obr. 5.4 Ilustračná ukážka spôsobu vyhodnotenia či sa jedná o impulzný šum

Podmienka, na základe ktorej sa určí, či sa jedná o impulzný šum, má tvar podľa rovnice:

$$F_m(l_i) = (\beta_1 \leq \beta_{min} \wedge \beta_2 \leq \beta_{min}) \vee (\beta_1 \geq \beta_{Max} \wedge \beta_2 \geq \beta_{Max}) \quad (5.5)$$

Kde jednotlivé uhly sú počítané rovnako ako v rovniciach (5.1) a (5.2). Hodnoty β_{min} a β_{Max} majú rovnaký význam a veľkosť ako v rovnici (5.3).

Výsledný filter má potom tvar:

$$l_i = \begin{cases} \sum_{k=i-P/2}^{i+P/2} \frac{W_k l_k}{\sum W}, & \text{ak } F_m(l_{i+2}) = 0 \\ l_{i+2} = m(O(l_{i+2})), & \text{ak } F_m(l_{i+2}) = 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

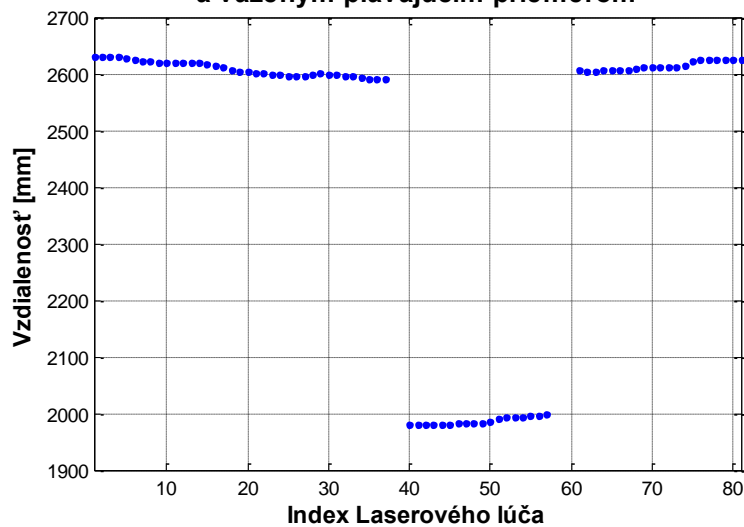
Kde $m()$ predstavuje funkciu medián, $O(l_{i+2})$ predstavuje okolie bodu l_{i+2} a má tvar:

$$O(l_{i+2}) = [l_i, l_{i+1}, l_{i+2}, l_{i+3}, l_{i+4}] \quad (5.7)$$

Podobne ako predchádzajúca verzia je aj tento filter aplikovaný len na časti, ktoré spolu súvisia.

Výsledok navrhnutého filtra aplikovaného na meranie zobrazenom Obr. 5.2 a) je na obrázku Obr. 5.5.

**Meranie laserového diaľkomera
s aplikovaným podmieneným mediánom
a váženým plávajúcim priemerom**

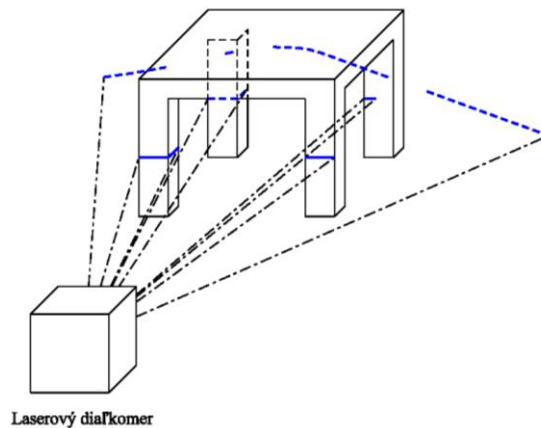


Obr. 5.5 Príklad aplikácie podmieneného mediánu a váženého plávajúceho priemeru na súvisiace celky merania z Obr. 5.2b)

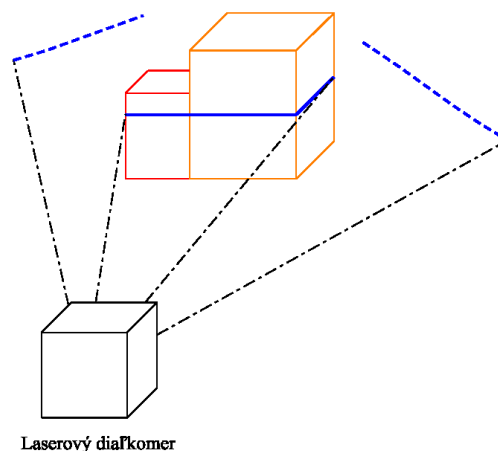
Ako je vidieť, filter efektívne potláča impulzný a Gaussov šum a zároveň nenaruša ostré prechody na rozhraní objektov. Toto je zabezpečené vďaka použitej rozhodovacej logike, ktorá rozhoduje, kedy a ktorú časť filtra aplikovať na meranie. Z dôvodu rozhodovacích podmienok je však tento filter výpočtovo náročnejší ako štandardné filtre používané v praxi.

6 Segmentácia laserového merania

Úlohou segmentácie pri spracovaní merania je rozdeliť toto meranie na časti, ktoré majú silnú koreláciu s konkrétnymi vlastnosťami prostredia. V prípade merania laserovým diaľkomerom je touto vlastnosťou objekt v priestore, ku ktorému vzdialenosť meriame. Segmentácia merania laserovým diaľkomerom môže byť úplná alebo čiastočná. Pri úplnej segmentácii jednému reálnemu objektu v prostredí zodpovedá jeden segment laserového merania. Pri čiastočnej segmentácii môže jednému objektu zodpovedať viac segmentov (napríklad nohy stoličky na Obr. 6.1), prípadne jeden segment môže zodpovedať viacerým objektom (napríklad krabice položené vedľa seba na Obr. 6.2). Pretože laserový diaľkomer meria vzdialenosť len v rovine, nie je bez dodatočných informácií možné určiť, či sú v priestore objekty spĺňajúce opis z Obr. 6.1 alebo Obr. 6.2. Z tohto dôvodu bude v nasledujúcej kapitole navrhnutá čiastočná segmentácia.



Obr. 6.1 Snímanie objektu laserovým diaľkomerom, ktoré sa v meraní zobrazí ako viacero objektov



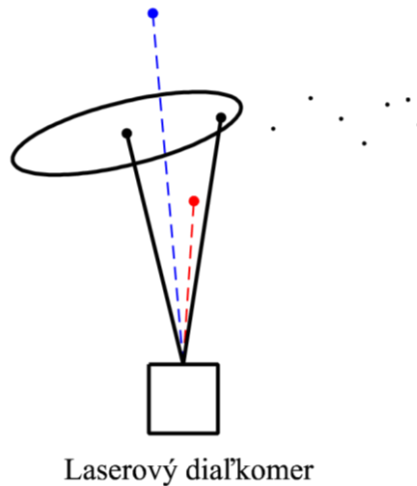
Obr. 6.2 Snímanie dvoch objektov laserovým diaľkomerom, ktoré sa v meraní zobrazia ako jeden objekt

6.1 Prahovanie

K najjednoduchším algoritmom segmentácie patrí prahovanie. Prahovanie sa rozsiahlo využíva hlavne pri spracovaní obrazu, kde jeho najčastejšou úlohou je oddeliť popredie od pozadia. Existujú mnohé modifikácie prahovania vylepšujúce jeho použitie pre zložitejšie úlohy. Cieľom prahovania pri segmentácii dát laserového diaľkometra je oddeliť od seba jednotlivé objekty na základe vzdialenosti. Princíp algoritmu spočíva v postupnom prechádzaní laserového merania, kde sa jednotlivým bodom merania prideliť označenie, ktorému segmentu patria. V prípade, ak rozdiel vzdialeností presiahne zadaný prah, aktuálny segment je ukončený a nasledujúcim bodom sa prideliť označenie ďalšieho segmentu. V mnohých prípadoch sú veľké segmenty (napríklad steny) prerušené krátkymi úsekmi (napríklad nohy stola) a vzniká tak väčší počet segmentov ako je objektov v priestore. Za malý úsek sa považuje taký, ktorý sa neskladá z viac ako 3 bodov merania. Takto malé úseky sa nepovažujú za objekty v priestore a preto nie sú ako segmenty označené. Preto bolo navrhnuté rozšírenie algoritmu prahovania.

V prípade, ak bol segment prerušený malým nesegmentovaným úsekom, je možné v predchádzajúcom segmente pokračovať. Nato, aby sa segment považoval za prerušený, musia dva hraničné body prerušenia (bod pred a po malom nesegmentovanom úseku) splniť tieto podmienky:

- Rozdiel meranej vzdialenosti hraničných bodov nesmie prekročiť prah
- Hraničný bod pred prerušením sa musí nachádzať v okolí hraničného bodu po prerušení (Obr. 6.3).

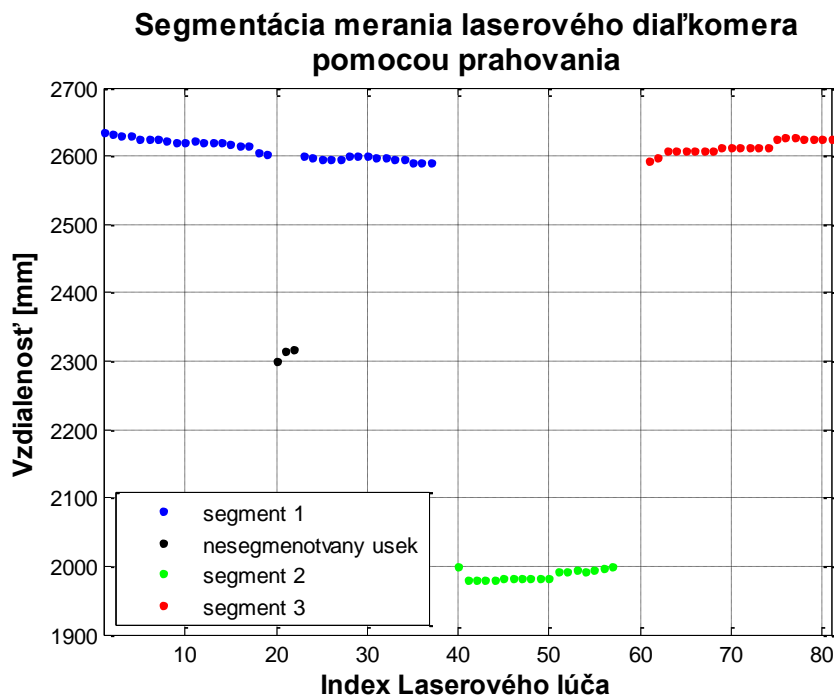


Obr. 6.3 Podmienka pre pokračovanie segmentu po prerušení malým segmentom

Okolie hraničného bodu v našom prípade vychádza z parametrov pravdepodobnostného modelu laserového diaľkomera navrhnutého v kapitole 4. Bod sa nachádza v okolí hraničného bodu, len ak sa jeho súradnice (x_b, y_b) nachádzajú vo vnútri elipsy vytvorenej okolo hraničného bodu so súradnicami (x_c, y_c) s polosami s veľkosťami $a = 1,5\sigma_y$ a $b = 1,5\sigma_x$. To znamená že musí splniť rovnicu:

$$\frac{x_b - x_c}{a} + \frac{y_b - y_c}{b} < 1 \quad (6.1)$$

Výstup takto rozšíreného prahovania je zobrazený na Obr. 6.4, ako je vidieť, segment 1 (modrá farba) pokračuje po prerušení segmentom 2 (čierna farba).



Obr. 6.4 Príklad segmentácie pomocou modifikovaného prahovania. Kde segment 1 pokračuje po prerušení segmentom 2.

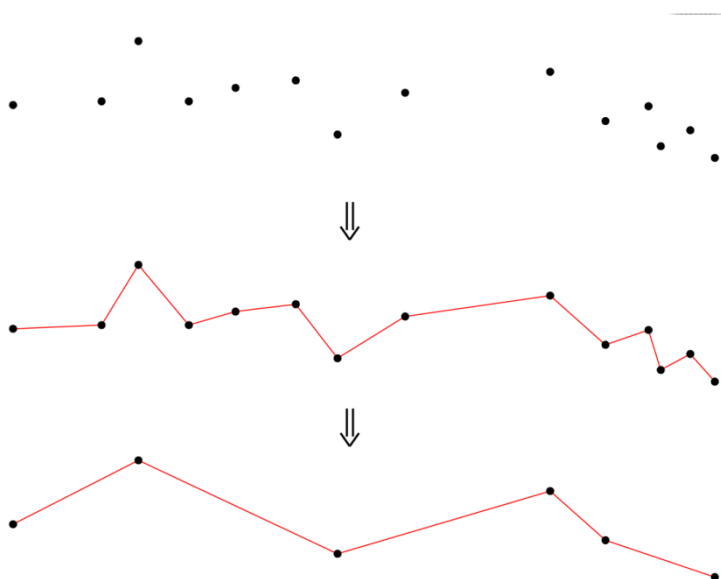
Prahovanie poskytuje výpočtovo nenáročný spôsob segmentácie, ktorý napriek svojej jednoduchosti pomerne efektívne rozdeľuje meranie na objekty popredia a objekty pozadia. Nevýhodou takto navrhnutého prahovania je, že v prípade, ak sa v popredí nachádzajú nejaké objekty, dochádza k rozdeleniu objektov pozadia do viacerých segmentov. Tento nedostatok je možné čiastočne potlačiť navrhnutou modifikáciou. Avšak tá funguje len v prípade, ak sú prerušenia pozadia malé. V prípade, ak

je objekt v popredí väčší ako nami stanovená hranica (segment 2 na Obr. 6.4, ktorý zodpovedá krabici), nedochádza k spojeniu segmentov patriacich tomu istému objektu pozadia (segment 1 a segment 3 na Obr. 6.4 zodpovedajú stene).

6.2 Zjednodušenie objektov vzniknutých segmentáciou

Objekty vzniknuté segmentáciou navrhnutou v predchádzajúcej kapitole pozostávajú z jednotlivých bodov merania. V mnohých prípadoch by bolo možné objekty v priestore popísať menším počtom údajov. Ako príklad je možné uviesť krabicu, ktorej meranie bolo použité v predchádzajúcich kapitolách. Táto krabica je po segmentácii navrhutej v kapitole 6.1 reprezentovaná 22 bodmi. Avšak, keďže sa krabica skladá z pomerne rovných plôch, bolo by možné ju reprezentovať malým počtom úsečiek-hrán. Zmenšenie počtu údajov potrebných na reprezentáciu objektov zjednodušuje ich ďalšie spracovanie ako aj nároky na pamäť. Cieľom nasledujúcej kapitoly je navrhnúť taký algoritmus, ktorý reprezentáciu objektov jednotlivými bodmi nahrádza reprezentáciou pomocou úsečiek.

Základná myšlienka algoritmu vychádza z predpokladu, že akýkoľvek tvar je možné opísať súborom úsečiek. Počet a dĺžka týchto úsečiek je úmerná tomu, ako zložitý je daný tvar a akú presnosť reprezentácie chceme pri zjednodušení dosiahnuť. Keďže cieľom algoritmu je zjednodušiť prácu s objektmi, je vhodné, aby bez ohľadu na presnosť zjednodušenia obsahoval popis objektu nanajvýš toľko údajov ako objekt pred zjednodušením. Z pohľadu analytickej geometrie je úsečku možné vyjadriť rôznymi formami zápisu. Z pohľadu práce s objektmi je zápis úsečky pomocou súradníc koncových bodov najbližší k spôsobu, kde je objekt reprezentovaný bodmi merania. V takomto prípade je možné úsečky vyjadriť ako sekvenciu bodov, kde koncový bod jednej úsečky je začiatčným bodom nasledujúcej. Zároveň sa dá na nezjednodušený objekt pozostávajúci z n bodov pozerieť ako na objekt pozostávajúci z $n - 1$ úsečiek. Z toho vyplýva, že algoritmus zjednodušenia objektu určuje, ktoré body merania vynechať bez toho, aby objekt zmenil s ohľadom na želanú presnosť svoj tvar. Princíp a cieľ algoritmu je znázornený na Obr. 6.5.



Obr. 6.5 Princíp fungovania algoritmu na zjednodušenie reprezentácie objektov

Ako miera, či je možné bod z reprezentácie objektu vynechať, bol zvolený uhol, ktorý medzi sebou jednotlivé body zvierajú. Uhol $\beta_{i,j}$ medzi bodom l_i a l_j je vypočítaný podľa rovnice:

$$\beta_{i,j} = \arccos \left(\frac{l_j - l_i \cos(\alpha_{(j-i)})}{\sqrt{l_i^2 + l_j^2 - 2l_i l_j \cos(\alpha_{(j-i)})}} \right) \quad (6.2)$$

Kde $\alpha_{(j-i)}$ predstavuje uhol, o ktorý sú medzi sebou natočené lúče merajúce body l_i a l_j .

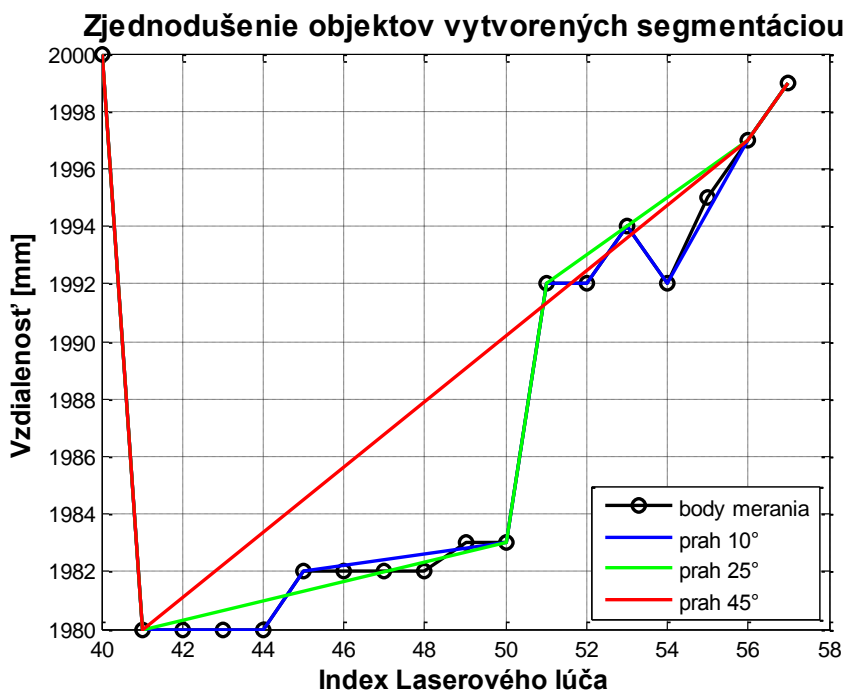
Ako bolo v predchádzajúcich kapitolách ukázané, na meranie vplýva šum. Toto spôsobuje, že body merania nekopírujú dokonale tvar objektu, ktorý reprezentujú. Preto bol pri návrhu algoritmu zavedený prah, v rámci ktorého sa určuje, či sa daný bod môže nachádzať v úsečke reprezentujúcej danú časť objektu, alebo sa jedná o novú úsečku objektu. Tento prah je možné meniť, a tým meniť presnosť reprezentácie. Podmienka, ktorá určuje, či je možné bod vynechať je vo vzťahu:

$$F_v(l_i) = (|\beta_{i-1-k,i} - \beta_{i,i+1}|) < p \quad (6.3)$$

Kde p predstavuje spomínaný prah, k predstavuje koeficient posledného bodu, ktorý je považovaný za bod reprezentujúci objekt. $\beta_{i-1-k,i}$ predstavuje uhol prislúchajúci k bodu l_{i-1-k} a $\beta_{i,i+1}$ uhol prislúchajúci k bodu l_i .

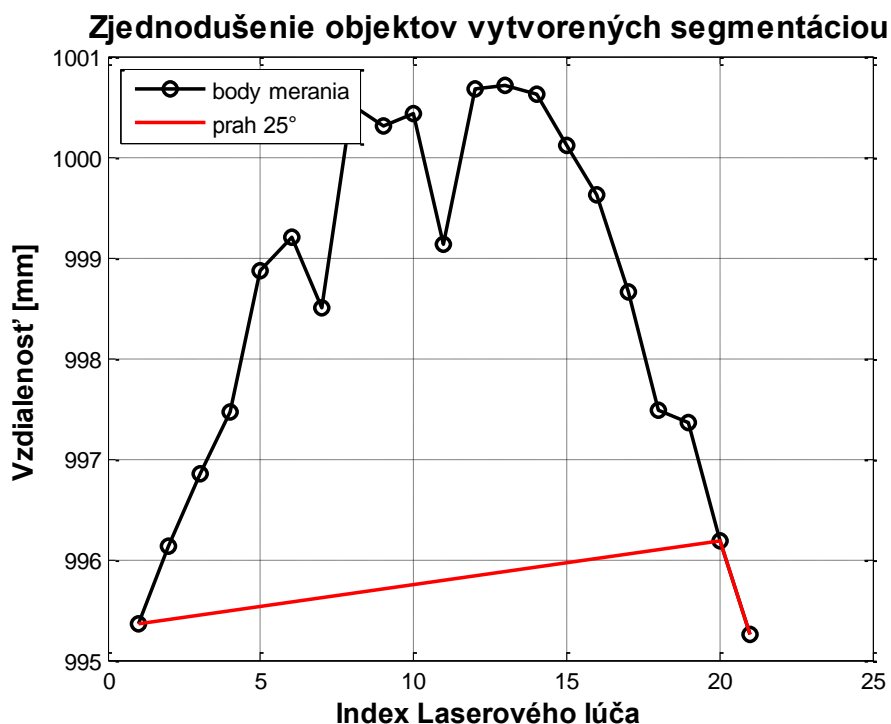
V prípade, ak bod l_i splní túto podmienku, je vyradený z reprezentácie objektu, hodnota k je zväčšená o 1 a vyhodnotí sa nasledujúci bod l_{i+1} . V prípade, ak bod l_i podmienku nespĺní, je považovaný za koncový bod úsečky a hodnota k je nastavená na 0. Zároveň je v takom prípade považovaný za počiatkový bod novej úsečky, od ktorého sa začína vyhodnocovanie podľa podmienky (6.3).

Takto navrhnutý algoritmus bol aplikovaný na segmentáciu pomocou modifikovaného prahovania (Obr. 6.4) navrhnutou v kapitole 6.1. Veľkosť prahu výrazne vplýva na presnosť s akou zjednodušený objekt kopíruje priebeh pôvodnej reprezentácie a zároveň priamo vplýva na počet vynechaných bodov. Na objekt vyjadrený segmentom 2 z Obr. 6.4 bol aplikovaný algoritmus zjednodušenia s rôznymi hodnotami prahu. Výsledok je zobrazený na Obr. 6.6.



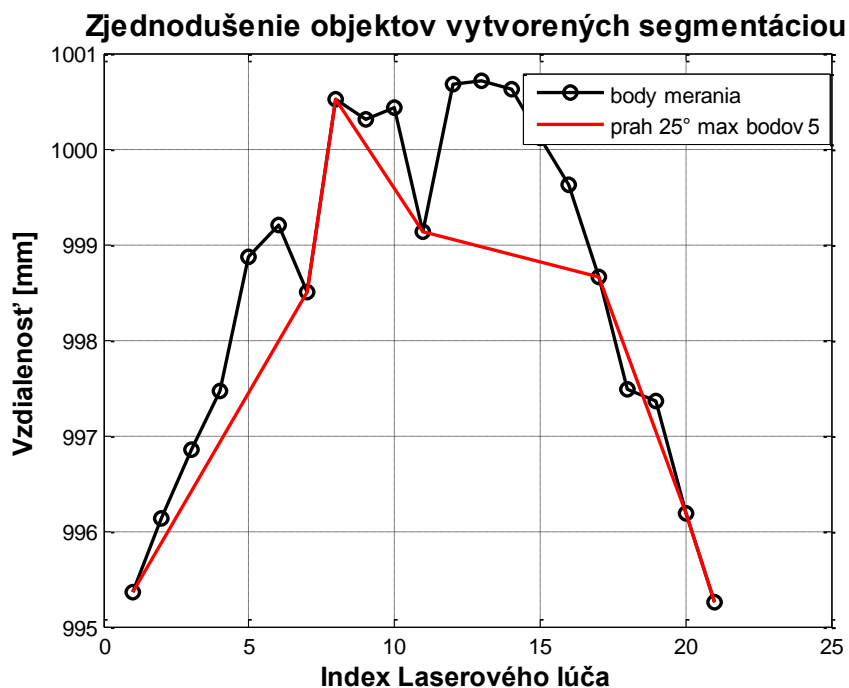
Obr. 6.6 Porovnanie výsledkov algoritmu na zjednodušenie objektov získaných laserovým meraním pre rôzne nastavenia prahu

Existujú tvary objektov, ktoré by medzi bodmi merania nepresiahli hranicu prahu, ale celková zmena uhlu môže byť výrazne väčšia. Príkladom takéhoto tvaru sú objekty s oblými hranami. Navrhnutý algoritmus by pre tieto objekty nereprezentoval tvar správne (Obr. 6.7).



Obr. 6.7 Meranie objektu s oblým tvarom a výstup algoritmu zjednodušujúci meranie pre prah 25°

Z tohto dôvodu boli zavedené dva parametre dopĺňujúce presnosť reprezentácie tvaru objektu. Prvým parametrom je maximálny počet bodov, ktoré je možné za sebou vynechať. Druhým parametrom je počet bodov, z ktorých sa počíta uhol $\beta_{i,j}$. Kým účelom prvého parametru je zlepšiť reprezentáciu tvaru objektu, cieľom druhého parametru je zvýšiť počet vynechaných bodov. Ako je vidieť na Obr. 6.8, pri obmedzení maximálneho počtu po sebe vynechaných bodov na 5, algoritmus zjednodušenia segmentu lepšie kopíruje tvar objektu v porovnaní s výsledkom zobrazeným na Obr. 6.7.



Obr. 6.8 Meranie objektu s oblým tvarom a výstup algoritmu zjednodušujúci meranie pre prah 25° a obmedzením maximálneho počtu po sebe idúcich vynechaných bodov

Výsledný algoritmus na základe, ktorého sa určí, či bod bude z reprezentácie objektu vynechaný má tvar:

$$F(l_i) = \begin{cases} 0, k = k + 1 & \text{pre } ((|\beta'_{i-(1+k)m,i} - \beta'_{i,i+m}| < p) \vee (k < M)) \wedge (i \bmod m) \neq 0 \\ 1, k = 0 & \text{pre } ((|\beta'_{i-(1+k)m,i} - \beta'_{i,i+m}| \geq p) \wedge (k \geq M)) \vee (i \bmod m) = 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

Kde M predstavuje maximálny počet bodov, ktoré je možné po sebe vynechať, m predstavuje počet bodov, z ktorých sa počíta uhol $\beta'_{i,j}$ a p predstavuje prah, na základe ktorého sa určí, či bod l_i je možné vynechať. Uhol $\beta'_{i,j}$ vychádza z uhlu určeného podľa rovnice (6.2), ale zahŕňa v sebe uhol medzi viacerými bodmi a má tvar:

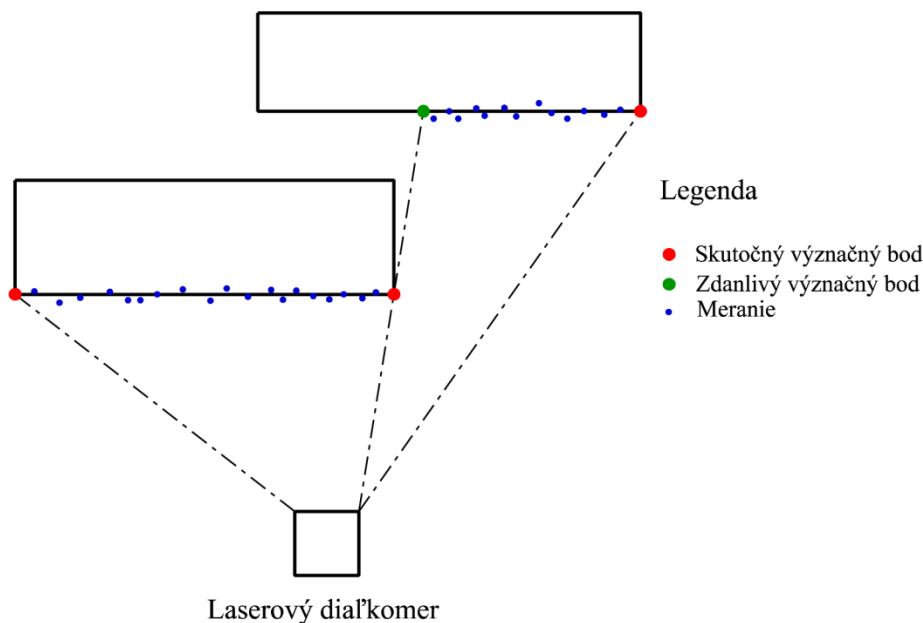
$$\beta'_{i,j} = \frac{1}{j-i} \sum_{h=0}^{j-i-1} \beta_{i+h,i+1+h} \quad (6.5)$$

$F(l_i)$ nadobúda hodnotu 0 pre bod, ktorý je z reprezentácie objektu vynechaný a hodnotu 1 pre bod, ktorý v reprezentácii ostáva.

Navrhnutý algoritmus umožňuje znížiť počet bodov, ktoré reprezentujú objekt v priestore. To umožňuje znížiť nároky na pamäť ako aj na výpočtový výkon pre ďalšie spracovanie. Algoritmus je postavený na porovnávaní uhlov, ktorý medzi sebou zvierajú body so svojim susedom a laserovým diaľkomerom. Mieru zjednodušenia reprezentácie objektu je možné nastaviť viacerými parametrami. Nevýhodou algoritmu je, že pri opakovanom meraní, spracovaní a následnom zjednodušení objektu bude výsledné zjednodušenie mierne odlišné. Nedá sa teda povedať, že výstup algoritmu zjednodušenia jednoznačne opisuje objekt v priestore.

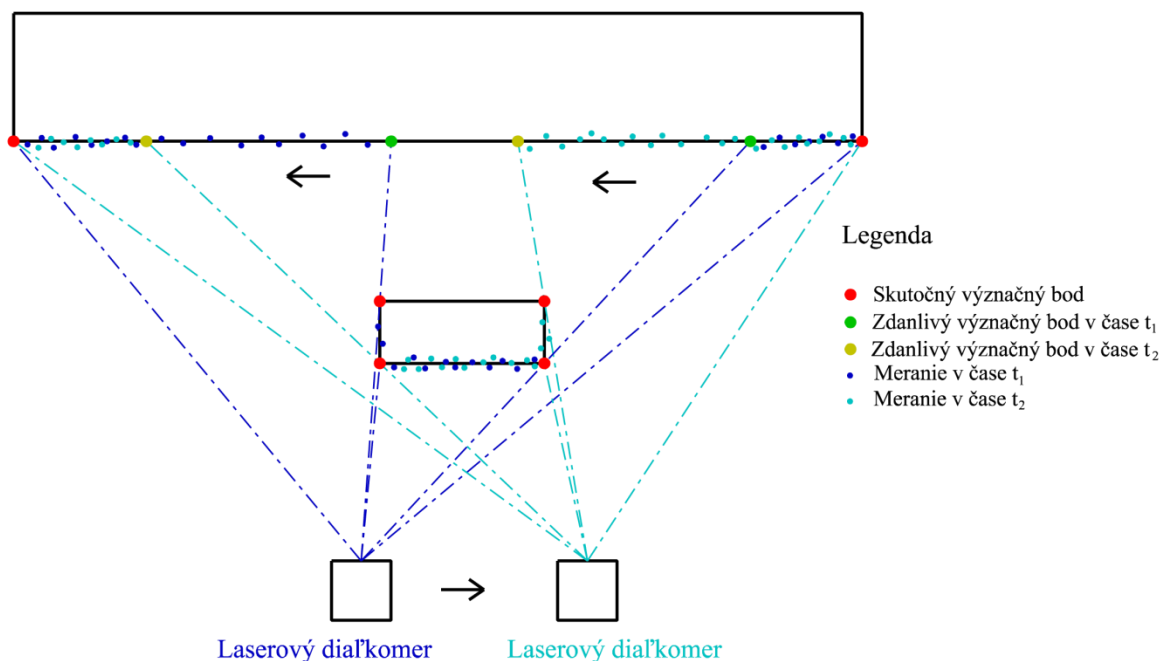
6.3 Význačné body objektu

Zjednodušenie reprezentácie objektu navrhnuté v predchádzajúcej kapitole výrazne znižuje počet bodov potrebných na opis tvaru objektu. Tento opis sa ale pri opakovanom meraní môže meniť, a preto sa nedajú dva objekty jednoznačne porovnať. Cieľom tejto kapitoly je navrhnúť taký opis objektu, ktorý je bez ohľadu na opakovanie merania pre daný objekt rovnaký. Takýto opis by výrazne zjednodušil porovnanie dvoch objektov. Keďže laserový diaľkomer meria vzdialenosť k objektom pomocou množiny bodov v jednej rovine, aj ich jednoznačný opis musí vychádzať z týchto bodov. Z množiny bodov merania objektu budú vybrané len tie body, ktoré jednoznačne tento objekt charakterizujú. Takýmito význačnými bodmi sú napríklad rohy, prípadne prerušenia na hranách. Tieto body predstavujú extrémny (minimá, respektíve maximá) v meraní. Keďže meranie laserového diaľkomera vychádza z jedného bodu, dochádza k prekrytiu medzi jednotlivými objektmi, a tým pádom k strate význačných bodov. Ďalším dôsledkom týchto prekrytí je aj vznik zdanlivých význačných bodov – tzv. falošných extrémov. Tie vznikajú v prípade, ak objekt v popredí prekryje objekt za ním pred jeho ukončením, čo sa ale v meraní prejaví ako koniec tohto objektu (Obr. 6.9).



Obr. 6.9 Vznik zdanlivých význačných bodov z dôvodu prekrytia dvoch objektov

Falošné extrémny nie sú v čase stabilné, pretože môže dôjsť k posunu objektu na popredí, prípadne k presunu samotného laserového diaľkometra. Tým dôjde aj k posunu falošného extrémnu (Obr. 6.10). Preto je nutné pri spracovaní odlišovať, či sa jedná o zdanlivý alebo skutočný význačný bod.



Obr. 6.10 Zmena polohy falošných extrémnu pri pohybe laserového diaľkometra

Navrhovaný algoritmus pracuje so zjednodušenými objektmi získanými pomocou algoritmu navrhnutom v predchádzajúcej kapitole. Cieľom algoritmu je nájsť skutočné ako aj zdanlivé význačné body daných objektov. Každý objekt má minimálne dva význačné body, ktorými sú jeho krajné body. Okrem svojich krajných bodov objekt môže mať vo svojom vnútri ľubovoľný počet význačných bodov. Z definície zdanlivého význačného bodu vyplýva, že takýto bod musí byť zároveň aj krajným bodom objektu. Prvým krokom algoritmu je teda určenie, či sú krajné body skutočný význačný bod. Či je krajný bod zdanlivý význačný bod sa určí na základe podmienky:

$$F_z(l_i) = \begin{cases} 1 & ak \forall l \in H(l_i); l > l_i \\ 0 & ak \exists l \in H(l_i); l < l_i \end{cases} \quad (6.6)$$

Kde funkcia $H(l_i)$ predstavuje množinu bodov l v okolí krajného bodu l_i . Keďže sa z jednej strany krajného bodu vždy nachádza objekt, je množina pre prvý a druhý krajný bod rôzna. Pre prvý krajný bod má množina $H(l_i)$ prvky:

$$H(l_i) = [l_{i-5}, l_{i-4}, l_{i-3}, l_{i-2}, l_{i-1}] \quad (6.7)$$

A pre druhý krajný bod má prvky:

$$H(l_i) = [l_{i+1}, l_{i+2}, l_{i+3}, l_{i+4}, l_{i+5}] \quad (6.8)$$

Podmienka $F_z(l_i)$ nadobúda hodnotu 1 v prípade, ak sa jedná o skutočný význačný bod a 0, ak sa jedná o zdanlivý význačný bod. Ako z podmienky vyplýva, krajný bod je zdanlivý význačný bod, iba ak sa v jeho okolí nachádza bod bližšie k laserovému diaľkomeru, a teda je pravdepodobné, že skutočný krajný bod objektu je prekrytý iným objektom, ktorému daný bod patrí.

Ďalším krokom algoritmu je nájsť význačné body prostredia vo vnútornej časti objektov. Význačné body vo vnútornej časti objektu môžu byť len skutočné a sú to body, v ktorých dochádza k výraznej zmene tvaru objektu. Či dochádza k výraznej zmene tvaru je vyhodnotené na základe vzájomnej polohy úsečiek získaných pomocou zjednodušenia z predchádzajúcej kapitoly. Vyhodnotenie funguje na podobnom princípe ako algoritmus z predchádzajúcej kapitoly a má tvar:

$$F_t(l_i, k) == \begin{cases} 0, k = 0 & ak \|l_i - l_{i-1}\| < mLen \\ 0, k = 0 & ak \|l_i - l_{i-1}\| > mLen \wedge \|l_i - l_j\| > mLen \wedge \gamma_{i,j} \notin \langle \delta_m, \delta_M \rangle \\ F_t(l_i, k = k + 1) & ak \|l_i - l_{i-1}\| > mLen \wedge \|l_i - l_j\| < mLen \\ 1, k = 0 & ak \|l_i - l_{i-1}\| > mLen \wedge \|l_i - l_j\| > mLen \wedge \gamma_{i,j} \in \langle \delta_m, \delta_M \rangle \end{cases} \quad (6.9)$$

Kde

$$j = i + 1 + k \quad (6.10)$$

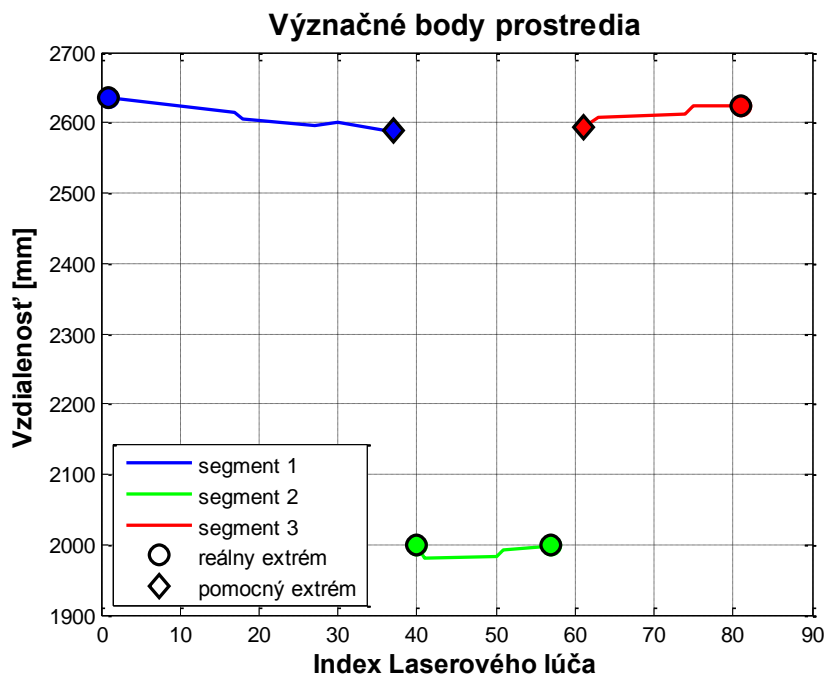
a

$$\gamma_{i,j} = 180^\circ - (\beta_{i-1,i} + \alpha_i) + \beta_{i,j} \quad (6.11)$$

Kde $\| \|$ predstavuje Euklidovskú vzdialenosť bodov, $mLen$ predstavuje minimálnu vzdialenosť bodov, δ_m a δ_M predstavujú dolnú a hornú hranicu uhla. $\gamma_{i,j}$ predstavuje uhol, ktorý medzi sebou zvierajú úsečky zjednodušenia a $\beta_{i,j}$ je uhol, ktorý medzi sebou zvierajú body l_i a l_j a je vypočítaný podľa rovnice (6.2).

Ako je v rovnici (6.9) vidieť, algoritmus porovnáva uhly medzi úsečkami s dĺžkou väčšou ako je medzná dĺžka $mLen$. V prípade, ak je bod l_i príliš blízko predchádzajúcemu bodu zjednodušenia, nebude vyhodnotený ako význačný bod prostredia. Rovnako, ak nie je uhol $\gamma_{i,j}$ v rozmedzí zvolených uhlov, nebude l_i vyhodnotený ako význačný bod. Ako význačný bod bude l_i vyhodnotený iba v prípade, ak bude predchádzajúci ako aj nasledujúci bod zjednodušenia dostatočne ďaleko a uhol, ktorý tieto úsečky zvierajú bude vo zvolenom intervale uhlov. Špeciálny prípad nastáva v prípade, ak

prvý bod síce spĺňa podmienku vzdialenosti, ale druhý bod naopak túto podmienku nespĺňa. V takom prípade sa vyhodnotenie pre bod l_i zopakuje, ale s nasledujúcim bodom. Výstup algoritmu aplikovaný na zjednodušené objekty je zobrazený na Obr. 6.11.



Obr. 6.11 Význačné body prostredia po aplikovaní algoritmu na meranie

Ako je vidieť, navrhnutý algoritmus nachádza význačné body na objektoch, ktoré majú výraznú zmenu vo svojom tvare. V priestore však môžu existovať objekty, ktorých zmena nie je medzi jednotlivými bodmi zjednodušenia výrazná, ale napriek tomu z celkového pohľadu výraznou je. Podobne ako v predchádzajúcej kapitole to môžu byť objekty s oblými hranami Preto bol algoritmus rozšírený o ďalší krok. Týmto krokom je kontrola excentrickosti objektu, pre ktorý algoritmus určil ako význačné body len jeho krajné body. V prípade, ak objekt nemá vo svojom vnútri žiaden význačný bod, určí sa bod objektu, ktorý má od spojnice jeho krajných bodov najväčšiu vzdialenosť. V prípade, ak táto vzdialenosť prekročí zvolený prah, tento najexcentrickejší bod bude označený ako význačný bod daného objektu. Vzdialenosť bodu od spojnice krajných bodov je vypočítaná pomocou rovnice:

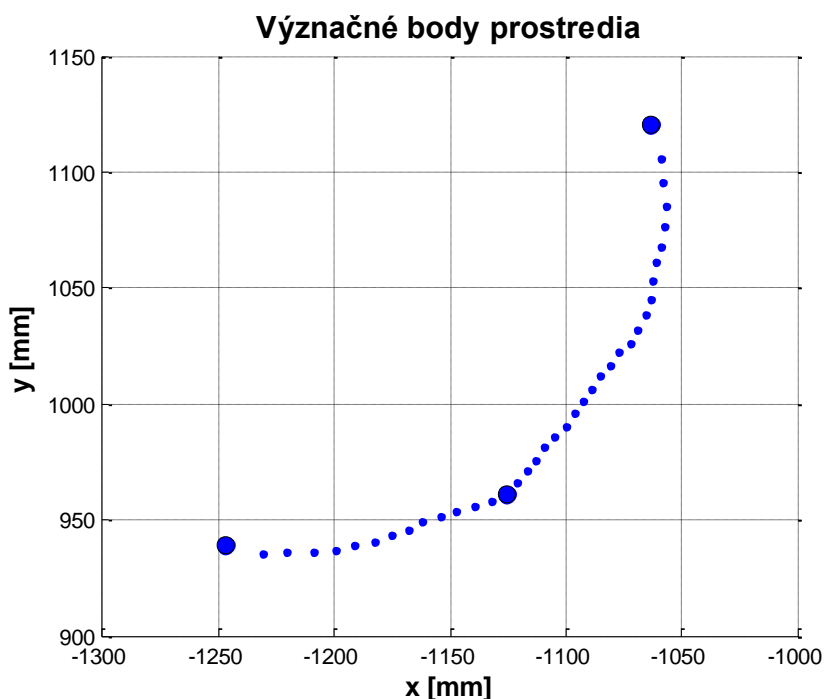
$$dst(l_l, l_r, l_i) = \frac{(l_{ry} - l_{ly})l_{ix} + (l_{rx} - l_{lx})l_{iy} + (-(l_{rx} - l_{lx})l_{ly} + (l_{ry} - l_{ly})l_{lx})}{\sqrt{(l_{rx} - l_{lx})^2 + (l_{ry} - l_{ly})^2}} \quad (6.12)$$

Kde l_l a l_r predstavujú krajné body objektu a l_i je bod, ktorého vzdialenosť od krajných bodov chceme vypočítať. l_x a l_y predstavujú x a y súradnicu bodu l . A podmienka, ktorá musí byť splnená, aby bol objektu pridaný význačný bod má tvar:

$$dst\left(l_l, l_r, \underset{x \in (l, r)}{\operatorname{arg\,max}}(dst(l_l, l_r, l_x))\right) > p \quad (6.13)$$

Kde $\operatorname{arg\,max}$ predstavuje funkciu, ktorá má ako návratovú hodnotu index bodu, ktorý dosiahol najväčšiu vzdialenosť od spojnice krajných bodov. Ako prah p bola zvolená 1/5 vzdialenosti krajných bodov.

Na Obr. 6.12 je zobrazený výstup rozšíreného algoritmu aplikovaného na oblý objekt. Ako je vidieť, takto rozšírený algoritmus pridáva význačný bod aj objektom, ktorých zmena tvaru je pomalá, ale výrazná.



Obr. 6.12 Príklad význačných bodov prostredia po aplikovaní rozšíreného algoritmu na meranie oblého objektu

Navrhnutý algoritmus umožňuje opis objektov pomocou ich význačných bodov. Algoritmus vychádza zo zjednodušeného objektu, ktorého princíp tvorby bol navrhnutý v predchádzajúcej podkapitole. Výstup algoritmu je možné nastavovať viacerými prahmi ako je minimálna vzdialenosť bodov zjednodušenia, minimálny ako aj maximálny uhol, ktorý body medzi sebou majú zvierat' a miera excentricity objektu. K dôležitým vlastnostiam algoritmu patrí rozlišovanie medzi skutočnými a zdanlivými význačnými bodmi. To umožní pri ďalšom spracovaní lepšie chápať, čo laserový diaľkomer sníma. Takýto opis výrazne znižuje nároky na pamäť bez výraznej straty dôležitej informácie. Opis objektov pomocou ich význačných bodov je možné ďalej využiť v mnohých oblastiach mobilnej robotiky ako napríklad mapovanie, lokalizácia a navigácia.

7 Dynamické prekážky

Vývoj v mobilnej robotike prešiel mnohými štádiami. V súčasnej dobe sa mobilné roboty nasadzujú do zložitých prostredí, v ktorých sa môžu pohybovať ľudia ako aj iné roboty. Cieľom nasledujúcej kapitoly je navrhnuť algoritmus identifikácie pohyblivej prekážky, ktorý vychádza z predspracovania a segmentácie objektov navrhnutých v predchádzajúcich kapitolách.

Laserový diaľkomer Hokuyo neposkytuje také meranie, z ktorého by bolo možné priamo povedať, či sa v priestore nachádza pohyblivá prekážka. Aby určenie pohyblivých prekážok bolo možné, je potrebné vykonať viacero meraní. Následne sa pohyblivé prekážky určia z rozdielov medzi jednotlivými meraniami. Keďže aplikovaním algoritmov navrhnutých v predchádzajúcich kapitolách na meranie získame priestor segmentovaný na jednotlivé zjednodušené objekty, bude aj algoritmus navrhnutý v nasledujúcej kapitole vychádzať z týchto objektov. Fungovanie algoritmu je možné rozdeliť na tieto základné kroky

1. Určenie polohy mobilného robota.
2. Hľadanie zhodných objektov.
3. Vyhodnotenie dynamických objektov.

7.1 Poloha mobilného robota

Pre algoritmus hľadania pohyblivých prekážok je potrebná aspoň čiastočná znalosť o polohe robota v čase merania laserovým diaľkomerom. Inak by mohlo dôjsť k situáciám, kedy by sa v dôsledku pohybu mobilného robota javia všetky objekty ako pohyblivé. Polohu mobilného robota je možné určiť mnohými spôsobmi. K rozšíreným a zároveň lacným spôsobom patrí odometria. Pri tejto metóde sa

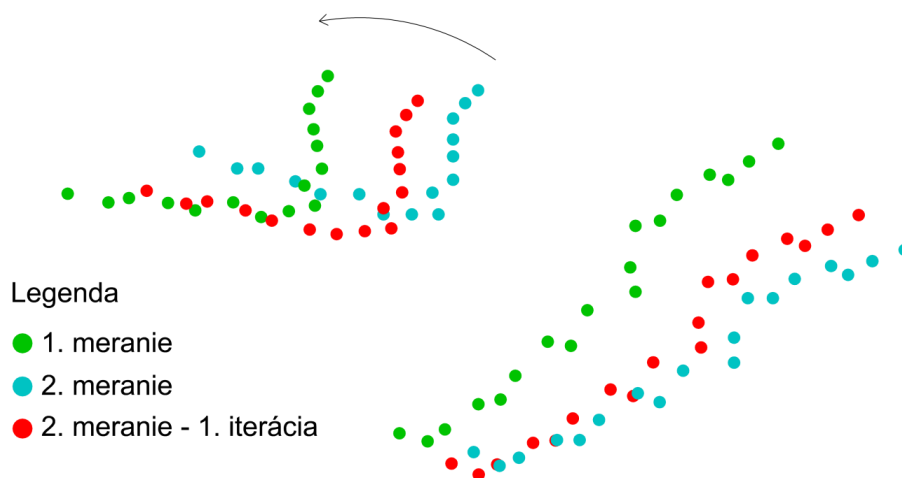
pomocou snímačov určuje relatívny posun robota medzi jednotlivými krokmi. Pre kolesové mobilné roboty je najznámejšia odometria založená na inkrementálnych snímačoch otočenia umiestnených na kolesách. Preto sa pod pojmom odometria všeobecne rozumie práve tento typ určenia polohy. Pri určení polohy pomocou inkrementálnych snímačov sa využíva znalosť kinematiky mobilného robota. Hlavnou nevýhodou takéhoto prístupu k polohe je akumulácia chýb. A teda postupnou činnosťou robota sa odhad jeho polohy vzdáľuje od skutočnosti. Jednou z možností ako potlačiť chyby odometrie je pridanie ďalších snímačov. Na potlačenie chyby otočenia je napríklad možné použiť gyroskop. V takom prípade hovoríme o gyroodometrii. Ďalšou možnosťou ako zlepšiť informáciu o polohe robota je kombinácia informácie z rôznych spôsobov určenia polohy robota v priestore.

7.1.1 Laserová odometria

Ako vyplýva už z názvu, laserová odometria využíva na určenie posunutia mobilného robota laserový diaľkomer. V tejto práci bola aplikovaná metóda ICP (z angl. Iterative Closest Point). Pri takomto prístupe sa porovnávajú dve po sebe idúce merania s cieľom otočiť a posunúť jedno meranie tak, aby rozdiel, definovaný rovnicou (7.1), bol medzi nimi minimálny.

$$E^2 = \sum_{i=1}^n \|p'_i - (Rp_i + T)\|^2 \quad (7.1)$$

Kde p'_i a p_i predstavujú páry bodov z oboch meraní, R je rotačná matica a T je vektor posunutia. Na tento účel je možné použiť buď všetky body merania alebo len niektoré časti. V prípade, ak by existovala informácia o tom, ktorý bod v jednom meraní zodpovedá, ktorému bodu v druhom, bolo by možné otočenie a posunutie nájsť v jednom kroku pomocou SVD (z angl. singular value decomposition) rozkladu. [46] K tomuto účelu je rovnica (7.1) upravená na tvar:



Obr. 7.1 Ilustračný obrázok znázorňujúci princíp fungovania iteratívneho algoritmu nájdenia posunutia

Výber najbližších bodov p'_i a p_i je možné získať viacerými spôsobmi. V tejto práci bol na tento účel implementovaný algoritmus hľadania najbližšieho bodu pomocou kd-stromov. Oproti algoritmu ICP ako bol navrhnutý v [5], boli pre každý bod druhého merania určené až dva najbližšie body v prvom meraní. Z týchto bodov bude na základe váhovania vybraná množina korešpondujúcich bodov tak, aby bol každý bod v tejto množine najviac jedenkrát. A teda algoritmus je možné popísať týmito krokmi:

1. Určenie korešpondenčných bodov.
2. Nastavenie váh pre korešpondenčné body.
3. Určenie otočenia a posunutia dvoch meraní.
4. Určenie chyby pre otočenie a posunutie podľa (7.1).
5. Ak chyba splnila ukončovaciu podmienku, tak koniec, inak späť na krok 1.

Ukončovacia podmienka pre navrhnutý algoritmus spomínaná v 5. bode môže byť zložená z viacerých podmienok. V tejto práci boli použité tieto 3:

1. Algoritmus presiahol stanovený počet krokov.

2. Chyba podľa rovnice (7.1) je menšia ako stanovený prah.
3. Riešenie prestalo konvergovať.

7.2 Hľadanie zhody objektov

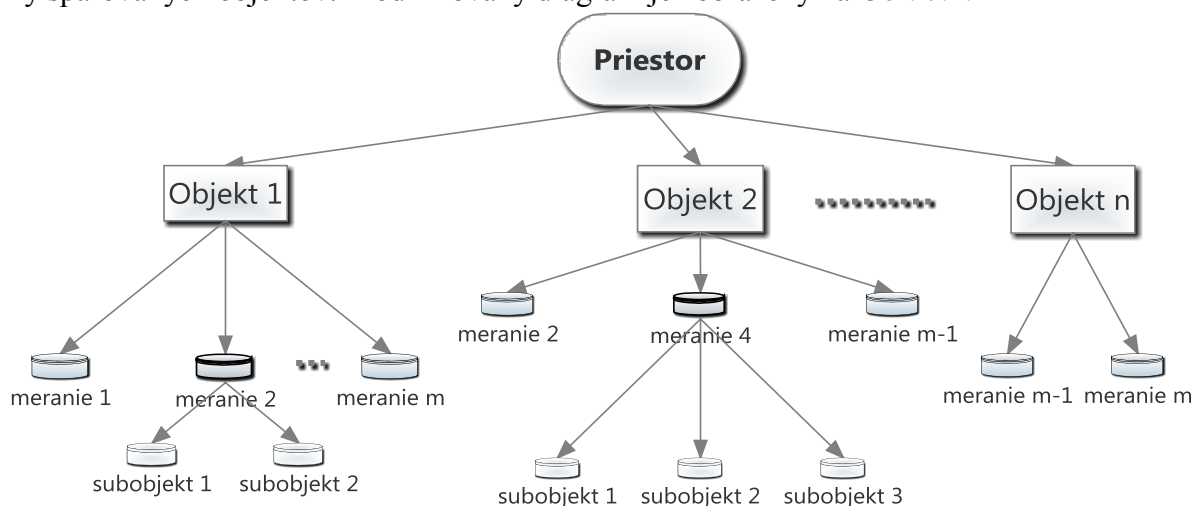
Keďže je predpoklad, že medzi dvoma po sebe idúcimi meraniami nedochádza k výrazným zmenám, objekty, ktoré k sebe korešpondujú v jednotlivých meraniach, by sa mali nachádzať blízko pri sebe. Meranie laserovým diaľkomerom Hokuyo neposkytuje 100% pokrytie snímaného prostredia, preto nie je zaručené nájdenie páru pre každý objekt vo všetkých po sebe idúcich meraniach. V prípade, ak by sa hľadali zhodné objekty len v po sebe idúcich meraniach, mohlo by dôjsť k strate nájdeného dynamického objektu. Preto sa budú zhodné objekty hľadať medzi aktuálnym meraním a množinou objektov reprezentujúcich celé prostredie.

7.2.1 Reprezentácia priestoru pomocou objektov

Cieľom tejto kapitoly je navrhnúť reprezentáciu priestoru pomocou objektov tak, aby bolo možné efektívne hľadanie zhodných objektov a zároveň aby bolo možné nájsť páry pre objekty, ktoré neboli zaznamenané v predchádzajúcom meraní. Reprezentácia priestoru by mala poskytovať najaktuálnejší tvar objektu, aby sa zaručila najväčšia podobnosť s aktuálnym meraním. Zároveň by mala uchovávať aspoň základné informácie o objekte z predchádzajúcich meraní tak, aby bolo možné určiť posun objektu. Reprezentácia by taktiež nemala obsahovať objekty, ktoré nereprezentujú skutočný objekt, ale vznikli pri segmentáciou vplyvom šumu. Ako vyplýva z podmienok stanovených pre reprezentáciu priestoru, okrem samotných objektov musí reprezentácia poskytovať viaceré funkcie :

1. Pridanie nového objektu.
2. Rozšírenie existujúceho objektu o nové meranie.
3. Odstránenie objektu pre prípad, že bude označený ako neexistujúci.

Drobné zmeny, ktoré vznikajú pri opakovanom meraní, môžu spôsobiť rozdelenie objektu pri segmentácii na dve časti a následne pri hľadaní korešpondencií budú tieto časti priradené tomu istému objektu, prípadne môže byť jeden objekt priradený k dvoma objektom v reprezentácii prostredia. V takom prípade by mali byť takéto objekty spojené do jedného. A teda objekt môže byť reprezentovaný dvoma, prípadne viacerými subobjektmi. Kde každý subobjekt predstavuje jeden zo skupiny spárovaných objektov. Modifikovaný diagram je zobrazený na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Ilustračný diagram rozšírenej reprezentácie priestoru pomocou objektov

Takto upravená štruktúra zároveň rozširuje funkcie, ktoré reprezentácia poskytuje:

4. Spojenie dvoch objektov.

Je predpoklad, že algoritmus hľadania dynamických prekážok bude pre svoju prácu používať informácie o polohe mobilného robota. Mnohé metódy polohovania sú zaťažené kumulatívnou chybou, a teda určená poloha robota sa časom od skutočnej polohy robota vzdaluje. V prípade použitia takéhoto typu polohovania nie je vhodné, aby sa páry pre aktuálne meranie hľadali medzi objektmi,

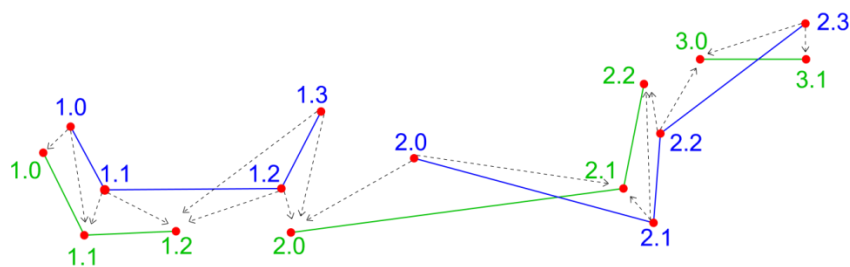
ktorých posledné meranie bolo vykonané príliš dávno. Preto je reprezentácia objektu rozšírená o funkciu:

5. Odstránenie starého merania objektu.

7.2.2 Hľadanie najbližšieho objektu

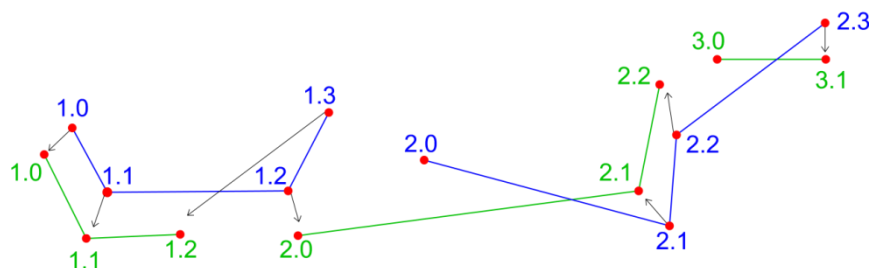
Ako bolo spomínané, pri kontinuálnom meraní pomocou laserového diaľkomera Hokuyo nedochádza medzi dvomi meraniami, prípadne medzi novým meraním a predchádzajúcou reprezentáciou prostredia, k výrazným zmenám. Z tohto predpokladu vyplýva, že objekt nájdený v jednom meraní, resp. v reprezentácii, sa bude v nasledujúcom meraní nachádzať približne na rovnakej pozícii. A teda hľadanie najvhodnejšieho objektu pre daný objekt je zároveň úlohou hľadania najbližšieho suseda. Keďže je predpoklad, že sa význačné body pre konkrétny objekt nemenia a zároveň je možné ho týmito význačnými bodmi jednoznačne reprezentovať, budú na určenie najbližších objektov použité práve význačné body objektov.

Ako efektívny spôsob hľadania najbližšieho význačného bodu merania v reprezentácii prostredia bolo zvolené prehľadávanie pomocou kd-stromov. Kde kd-strom je zostavený z význačných bodov objektov z aktuálnej reprezentácie prostredia. Pre každý význačný bod aktuálneho merania, sú nájdené dva najbližšie význačné body reprezentácie prostredia. Ako príklad uvádzame Obr. 7.3, kde pre význačné body objektov merania (modrá farba) sú čiernymi šípkami zobrazené najbližšie význačné body reprezentácie prostredia (zelená farba).



Obr. 7.3 Ilustračný obrázok zobrazujúci najbližšie význačné body reprezentácie prostredia pre všetky význačné body aktuálneho merania

Z danej množiny najbližších význačných bodov sú vybrané dvojice bodov, a to tak, aby sa žiaden bod v danej množine nenachádzal viac ako raz. Ako rozhodovacie pravidlo, ktoré páry z množiny vybrať, bolo zvolené kritérium najkratšej vzdialenosti. Z toho vyplýva, že niektoré význačné body nemusia mať žiaden pár. Pre príklad z Obr. 7.3 je takáto množina vybraných bodov zobrazená na Obr. 7.4.



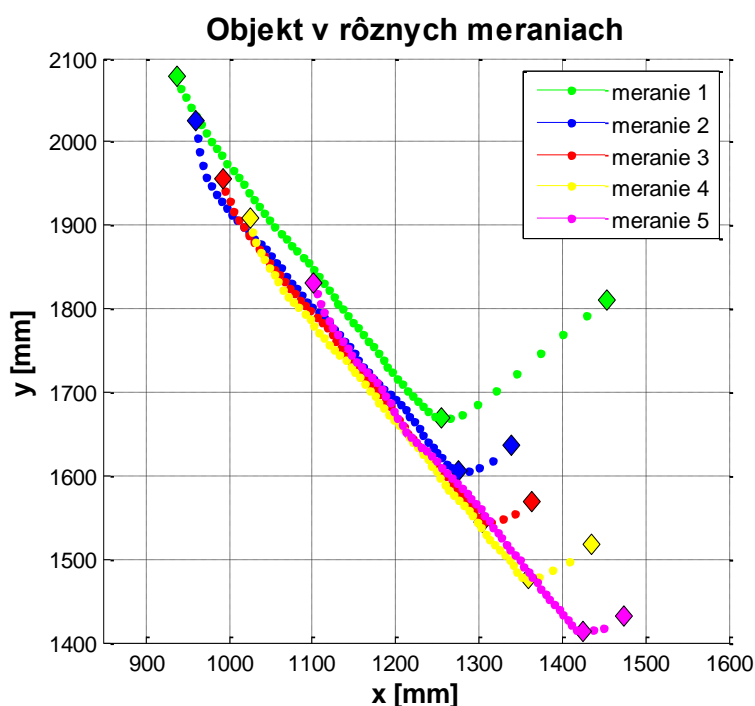
Obr. 7.4 Vybrané páry najbližších bodov merania a reprezentácie prostredia

Výstupom takto zostaveného algoritmu sú dvojice význačných bodov, avšak každý význačný bod patrí niektorému z objektov, a preto je možné zostaviť, ktoré objekty boli medzi sebou spárované. Keďže má každý objekt viacero význačných bodov, môže nastať viacero možností:

1. Význačné body objektu nemajú žiaden pár v reprezentácii prostredia.
2. Význačné body objektu sú spárované s význačnými bodmi jedného objektu v reprezentácii prostredia a žiadny iný objekt merania nie je s týmto objektom spárovaný.

3. Význačné body objektu sú spárované s význačnými bodmi jedného objektu v reprezentácii prostredia, ale k tomuto objektu je spárovaný aj iný objekt merania.
4. Význačné body objektu sú spárované s význačnými bodmi rôznych objektov v reprezentácii prostredia a k týmto objektom nie je spárovaný iný objekt merania.
5. Význačné body objektu sú spárované s význačnými bodmi rôznych objektov v reprezentácii prostredia a zároveň je k týmto objektom spárovaný aj iný objekt merania.

V prípade, ak nastane 1. situácia, je treba objekt pridať do reprezentácie prostredia ako nový prvok. V prípade situácií 2 a 3 je objekt reprezentácie rozšírený o nové meranie. V prípade 2. situácie je nové meranie zložené len z jedného subobjektu, kým pri 3. situácii má týchto subobjektov viacero. V prípade 4. a 5. situácie je nutné objekty reprezentácie zlúčiť dokopy a objekt merania pridať ako nové meranie tohto zlúčeného objektu, v prípade 5. situácie je toto meranie zložené z viacerých subobjektov. Dôležitou informáciou o funkčnosti algoritmu je, či je schopný medzi sebou párovať aj objekty, ktoré sa pohybujú. Preto bol algoritmus otestovaný na pohyblivej prekážke. Výsledok je zobrazený na Obr. 7.5.



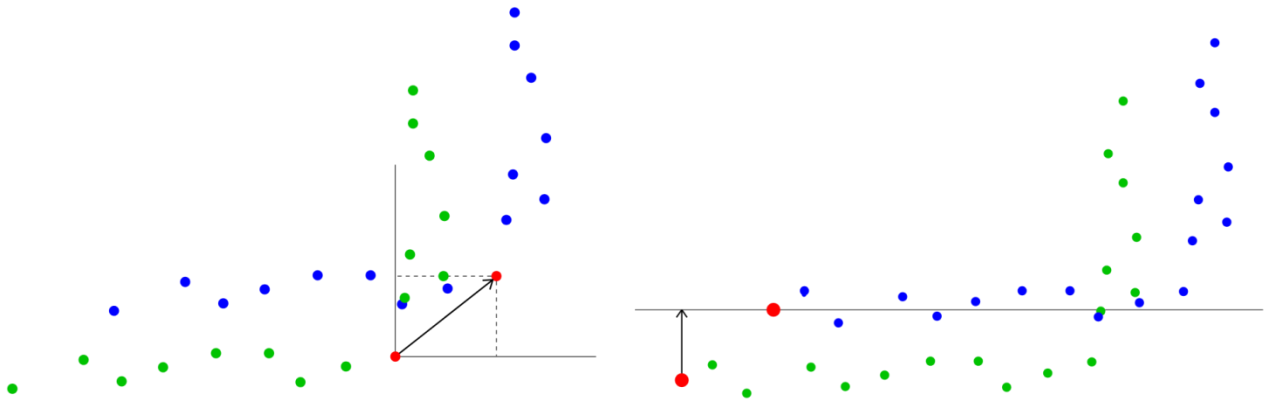
Obr. 7.5 Príklad párovania dynamického objektu pohybujúceho sa rýchlosťou približne 1 m/s

Schopnosť vyhodnotiť, ktoré objekty medzi jednotlivými meraniami predstavujú ten istý objekt, má široké uplatnenie v mobilnej robotike. Jednou z týchto možností je aj nami navrhovaný problém identifikácie dynamických prekážok. Ako je vidieť v tejto kapitole, navrhnutý algoritmus je schopný párovať medzi meraniami zhodné objekty, či už statické ako aj dynamické. Algoritmus je schopný ale aj spojiť objekt, ktorý bol v dôsledku nepresnosti merania vyhodnotený segmentáciou ako dva objekty. Táto schopnosť ďalej zlepšuje chápanie snímaného prostredia, čo umožňuje efektívnejšie správanie sa mobilného robota.

7.3 Vyhodnotenie pohyblivých objektov

Algoritmus vychádza z predpokladu, že v prípade, ak sa objekt pohybuje, pohybujú sa rovnako aj jeho význačné body. A teda, aby sme určili, ktorým smerom a o akú vzdialenosť sa objekt presunul, potrebujeme určiť, ako sa presunuli jeho význačné body. Ako bolo spomínané v kapitole 6.3, rozlišujeme medzi skutočným význačným bodom a zdanlivým význačným bodom objektu. Hlavným dôvodom pre toto rozlíšenie je fakt, že zdanlivý význačný bod sa môže hýbať aj v prípade, ak samotný objekt stojí.

Prvým krokom algoritmu je nájsť páry význačných bodov z dvoch po sebe idúcich meraní, ktoré zodpovedajú tomu istému význačnému bodu objektu. Keďže predpokladáme, že medzi meraniami nedochádza k výraznej zmene tvaru objektu, bude tento krok podobný s postupom navrhnutým v kapitole 7.2.2. V prípade, ak sú oba význačné body v páre skutočné, určí sa posunutie bodu v osiach x a y ako rozdiel súradníc týchto bodov (Obr. 7.6 vľavo).



Obr. 7.6 Princíp určenia posunutia skutočného význačného bodu (vľavo) a zdanlivého význačného bodu (vpravo)

A teda posunutie význačného bodu $P[x, y]$ má tvar:

$$P[x, y] = P[v_2^x - v_1^x, v_2^y - v_1^y] \quad (7.2)$$

Kde v_1, v_2 predstavujú význačné body páru a horný index x a y predstavujú súradnice týchto bodov. V prípade, ak je aspoň jeden z bodov v páre zdanlivý význačný bod, posunutie sa určí ako rozdiel súradníc zdanlivého bodu a jeho kolmého priemetu na priamku, ktorá prechádza druhým význačným bodom páru a jeho susedným význačným bodom (Obr. 7.6 vpravo).

V tomto prípade má posunutie význačného bodu $P[x, y]$ tvar:

$$P[x, y] = \begin{cases} P[v_2^x - o^x, v_2^y - o^y] & \text{ak } v_2 \text{ je zdanlivý význačný bod} \\ P[o^x - v_1^x, o^y - v_1^y] & \text{ak } v_1 \text{ je zdanlivý význačný bod} \end{cases} \quad (7.3)$$

Kde o predstavuje bod nachádzajúci sa na priamke prechádzajúcej druhým význačným bodom páru a jeho susedným význačným bodom a je pre prípad, ak je zdanlivý význačný bod v_1 vypočítaný podľa rovnice:

$$o_x = v_1^x + (v_2^y - v_p^y)s \quad (7.4)$$

$$o_y = v_1^y + (v_p^x - v_2^x)s$$

Kde v_p predstavuje susedný význačný bod. A s má tvar:

$$s = \frac{v_2^x - v_1^x + (v_p^x - v_2^x) \frac{(v_2^y - v_p^y)(v_1^y - v_2^y) + (v_p^x - v_2^x)(v_2^x - v_1^x)}{(v_p^y - v_2^y)(v_2^y - v_p^y) - (v_p^x - v_2^x)^2}}{(v_2^y - v_p^y)} \quad (7.5)$$

Výsledné posunutie objektu $T[x, y]$ sa potom určí ako priemer zo všetkých posunutí význačných bodov pre daný objekt.

$$T[x, y] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i[x, y] \quad (7.6)$$

Kde n predstavuje počet význačných bodov.

Pre potreby mobilnej robotiky je dôležité detegovať dynamické prekážky, ktoré sa pohybujú rádo podobnou rýchlosťou ako robot. Rýchlosť mobilného robota môžeme predpokladať v okolí hodnoty 1 m/s. Laserový diaľkomer Hokuyo umožňuje snímať prostredie s frekvenciou 20 Hz. Čo pre danú rýchlosť predstavuje posun medzi dvoma meraniami o 50 mm. Avšak vzhľadom na rozptyl merania laserovým diaľkomerom je možné takýto posun určiť aj pre objekt, ktorý je statický. A preto nie je možné z dvoch po sebe idúcich meraní určiť, či sa jedná o statickú alebo dynamickú prekážku.

Z tohto dôvodu bude pohyblivosť prekážky určená zo sekvencie po sebe idúcich meraní ako súčet posunutí medzi jednotlivými meraniami. V prípade statickej prekážky by vzhľadom na nulovú strednú hodnotu rozptylu merania mal vyjsť tento súčet blízky 0. Avšak v prípade dynamickej prekážky by mala hodnota tohto súčtu časom narastať. V prípade, ak je posun objektu určený z viacerých meraní, je možné jednoznačne určiť, či sa jedná o statický alebo dynamický objekt. Podmienka, podľa ktorej sa určí, či sa jedná o dynamický objekt $F(O)$ má tvar:

$$F(O) = \begin{cases} 0 & \text{ak } \dim(O) < 5 \\ 0 & \text{ak } \dim(O) \geq 5 \wedge \|T[x, y]\| < t \\ 1 & \text{ak } \dim(O) \geq 5 \wedge \|T[x, y]\| > t \end{cases} \quad (7.7)$$

Kde $\dim(O)$ predstavuje rozmer objektu O , teda koľkokrát bol daný objekt meraný. Hodnota $\|T[x, y]\|$ predstavuje celkový posun objektu. Prah t predstavuje hranicu posunutia objektu, po ktorej presiahnutí je objekt považovaný za pohyblivý. Experimentálne bol prah t zvolený ako 200 mm. Keďže je výsledný posun vypočítaný ako súčet jednotlivých posunov medzi jednotlivými meraniami, mohlo by sa stať, že zlý výpočet posunu objektu v jednom meraní znehodnotí výsledný posun pre všetky výpočty posunu pre daný objekt. Preto bol stanovený maximálny počet po sebe idúcich meraní, z ktorých sa výsledný posun objektu určuje. Počet týchto meraní bol zvolený na hodnotu 10.

Algoritmus navrhnutý v tejto kapitole je schopný vyhodnotiť, či meraný objekt je statický alebo pohyblivý. Funguje pomocou význačných bodov objektov, ktorým hľadá zodpovedajúce body v nasledujúcich meraniach. Posunutie objektu je potom vypočítané ako priemerné posunutie týchto význačných bodov. Keďže posunutie objektu medzi dvoma po sebe idúcimi meraniami je zaťažené chybou, ktorá je rádo rovnaká ako posunutie samotného objektu, je tento výpočet aplikovaný na sekvenciu meraní.

8 Záver

V tejto dizertačnej práci sme predstavili komplexný návrh spracovania údajov z laserového diaľkomera. V práci bol navrhnutý postup identifikácie vlastností merania, ktorý bol experimentálne overený a spracovaný. Na základe týchto parametrov bol navrhnutý pravdepodobnostný model, ktorého možné použitie bolo naznačené v práci. Na základe pravdepodobnostného modelu boli v ďalšej časti práce navrhnuté filtračné algoritmy, ktoré jednak eliminujú chyby merania ako aj potláčajú nepresnosti spôsobené šumom. V práci bol taktiež navrhnutý algoritmus segmentácie, ktorý bol rozšírený o zjednodušenie vzniknutých segmentov. Na takto zjednodušených segmentoch bol postavený algoritmus hľadania význačných bodov. V početných experimentoch bola overená funkčnosť týchto algoritmov.

V ďalšej časti práce boli navrhnuté algoritmy zamerané špeciálne na použitie v mobilnej robotike. Hlavným cieľom bola identifikácia dynamických objektov. Na tento účel bol navrhnutý algoritmus na hľadanie korešpondencií medzi objektmi založený na význačných bodoch. Pre všetky nájdené korešpondenčné objekty bol určený ich posun. Ako bolo ukázané, presnosť tohto určenia je závislá od presnosti určenia polohy mobilného robota. Z tohto dôvodu bol implementovaný algoritmus ICP. Komplexná funkčnosť všetkých algoritmov bola experimentmi overená na reálnom robotickom zariadení. Tieto experimenty sú k práci priložené vo forme videa.

8.1 Zhodnotenie výsledkov a prínosy dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce bol návrh algoritmov spracovania údajov z laserového diaľkomera.

V kapitole 5 bol navrhnutý filter, ktorý potláča chyby merania a zároveň nepoškodzuje prechody medzi

objektmi. V kapitole 6 bola navrhnutá čiastočná segmentácia laserového merania, ktorá bola v kapitole 7.2 ďalej rozšírená tak, aby výsledné segmenty lepšie korešpondovali s existujúcimi objektmi v priestore. V rámci kapitol 6.3 a 7.2 bol navrhnutý spôsob reprezentácie získaných objektov ako aj algoritmus hľadania zhodných objektov medzi rôznymi meraniami. Identifikácia pohyblivých objektov bola navrhnutá v kapitole 7.3. Na základe dosiahnutých výsledkov je možné povedať, že všetky stanovené ciele dizertačnej práce sa podarilo splniť.

Za prínosy práce je možné považovať návrh algoritmov založených na rovnakých princípoch. Jeden z týchto princípov je použitie vzájomných uhlov medzi bodmi merania a laserovým diaľkomerom.

Tento princíp bol použitý ako

- filter falošných meraní,
- rozhodovacia podmienka pre určenie súvisiacich celkov v meraní,
- identifikácia impulzného šumu,
- spôsob zjednodušenia segmentov,
- čiastočne pri určovaní význačných bodov.

Výhodou takéhoto jednotného prístupu pri riešení viacerých problémov je možnosť vytvoriť pole vzájomných uhlov len raz, čo výrazne zmenší výpočtovú náročnosť navrhovaných algoritmov.

Ako prínos je možné považovať aj tvorbu pravdepodobnostného modelu laserového diaľkomera, kde bol okrem samotného modelu navrhnutý unikátny spôsob identifikácie rozptylu smerovania laserového lúča založený na falošných meraniach. Zároveň bol identifikovaný parameter, ktorý vplýva na odmeranú polohu - v práci označovaný ako „vplyv šírky lúča“.

V dizertačnej práci sa nachádzajú aj drobné modifikácie existujúcich algoritmov, ktoré je možné považovať za čiastkové prínosy. Takýmto prínosom je kombinácia váženého plávajúceho priemeru s plávajúcim mediánovým filtrom. Za čiastkový prínos je možné považovať rozšírenie segmentácie o podmienku, kedy nebude segment prerušený, aj keď sa medzi bodmi nachádza meranie výrazne inej vzdialenosti. Za čiastkový prínos je možné považovať aj rozšírenie hľadania korešpondenčných bodoch algoritmu ICP na dva najbližšie body, z ktorých sa na základe váhovania vyberie výsledný korešpondenčný bod. Na rovnakom princípe je založené aj hľadanie korešpondenčných objektov, ktoré bolo použité pri identifikácii dynamických objektov.

1.1 Budúce ciele

Napriek tomu, že navrhnutý systém spracovania poskytuje použiteľné výsledky sa nedá povedať, že je jeho vývoj ukončený. V budúcnosti by sme sa preto chceli venovať jeho ďalším vylepšeniam. V prvom rade je potrebná optimalizácia zdrojových kódov, aby sa zabezpečilo čo najmenšie plytvanie výpočtového výkonu. Mnoho častí je výpočtovo náročných, preto by sme tieto časti chceli implementovať na zariadeniach FPGA a DSP. Zároveň by sme chceli v budúcnosti vylepšiť výpočet pohybu dynamických objektov, aby sa čo najviac eliminovali nesprávne výsledky.

Ako bolo spomínané v úvode dizertačnej práce, v súčasnosti sa vo vývoji kladie dôraz na 3D snímače prostredia. Napriek tomu, že je zatiaľ ich použitie v dynamických priestoroch obmedzené, je predpoklad, že v budúcnosti budú pre mobilné roboty tieto snímače hlavným zdrojom informácií. Preto by sme chceli navrhnuté algoritmy rozšíriť tak, aby ich bolo možné využiť pri takýchto typoch snímačov.

9 Literatúra

- [1] K. Konolige a a. kol., „A low-cost laser distance sensor,“ rev. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, 2008.
- [2] H. Surmann a a. kol., „A 3D laser range finder for autonomous mobile robots,“ rev. *Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics)*, 2001.
- [3] P. P. Smith, *Active sensors for local planning in mobile robotics*, Londýn: World Scientific Publishing Co.

Pte. Ltd., 2001.

- [4] F. Duchoň, Snímače v mobilnej robotike., Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012.
- [5] P. Besl a H. McKay, „A method for registration of 3-D shapes,“ *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, zv. 14, %1. vyd.2, pp. 239-256, 1992.

10 Publikované práce autora

10.1 ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- Babinec, Andrej - Vitko, Anton - Duchoň, František - Dekan, Martin: **Navigation of Robot Using VFH+ Algorithm.** In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation.* - ISSN 2159-5275. - ISSN 2159-5283. - Vol. 3, Iss. 5 (2013), s. 303-310
- Dekan, Martin - Duchoň, František - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton - Babinec, Andrej: **iRobot Create Used in Education.** In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation.* - ISSN 2159-5275. - ISSN 2159-5283. - Vol. 3, Iss. 4 (2013), s. 197-202
- Dekan, Martin - Duchoň, František - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton: **Probabilistic Model of Laser Rangefinder.** In: *AD ALTA : Journal of Interdisciplinary Research.* - ISSN 1804-7890. - Vol. 1, Iss. 2 (2011), s. 151- 155
- Duchoň, František - Pászto, Peter - Dekan, Martin - Tölgyessy, Michal - Foltin, Martin: **Automatizovaná inšpekcia chýbajúcich skrutiek na montážnej linke pomocou vizuálneho systému.** In: *Automa.* - ISSN 1210-9592. - Roč. 20, č. 5 (2014), s. 2-7
- Duchoň, František - Dekan, Martin - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton: **Some Applications of Laser Rangefinder in Mobile Robotics.** In: *Journal of Control Engineering and Applied Informatics.* - ISSN 1454-8658. - Vol. 14, No. 2 (2012), s. 50-57
- Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Kaštan, Dušan - Kľúčik, Marian: **Navigation and Diagnosis of Walking Robot.** In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation.* - ISSN 2159-5275. - ISSN 2159-5283. - Vol. 2, Iss. 9 (2012), s. 568-572

10.2 ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- Dekan, Martin - Duchoň, František - Vitko, Anton: **Global Metric Map for Mobile Robotics.** In: *ATP Journal plus.* - ISSN 1336-5010. - č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s. 65-68
- Dekan, Martin - Vitko, Anton - Tölgyessy, Michal - Babinec, Andrej: **Globálna navigácia pre mobilný robot.** In: *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie.* - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 4 (2012), s. 28-29
- Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Dekan, Martin: **Dynamic Obstacle Avoidance in Mobile Robotics.** In: *ATP Journal plus.* - ISSN 1336-5010. - č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s. 69-73
- Kľúčik, Marian - Duchoň, František - Babinec, Andrej - Vitko, Anton - Dekan, Martin: **Hľadanie optimálnych trajektórií zvracieho horáka s využitím genetických algoritmov.** In: *Zvárač.* - ISSN 1336-5045. - Roč. 10, č. 1 (2013), s. 3-6
- Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Hanzel, Jaroslav - Kľúčik, Marian - Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Kaštan, Dušan: **Advanced Control of a Waking Platform.** In: *ATP Journal plus.* - ISSN 1336-5010. - č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s. 61-64
- Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Kľúčik, Marian: **Detekcia, identifikácia a klasifikácia porúch servisného robota : Časť I - poruchy kladenia nôh 6-nohého robota.** In: *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie.* - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 4 (2012), s. 30-32

10.3 ADM

Duchoň, František - Dekan, Martin - Babinec, Andrej - Chovanec, Luboš - Vitko, Anton: **Detection of Welds in Automated Welding**. In: Applied Mechanics and Materials. - ISSN 1660-9336. - Vol. 611 (2014), s. 519-528

10.4 AED Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

Rebour, Yann - Virk, S. Gurvinder - Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Kardoš, Ján - Duchoň, František - Klúčik, Marian - Babinec, Andrej - Dekan, Martin: **Robot Navigation**. In: Selected Topics in Modelling and Control. Vol. 7. - Bratislava : Slovak University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-227-3597-1. - S. 79-86

Virk, S. Gurvinder - Rebour, Yann - Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Kardoš, Ján - Duchoň, František - Klúčik, Marian - Babinec, Andrej - Dekan, Martin: **Current Issues in Mobile Robotics**. In: Selected Topics in Modelling and Control. Vol. 7. - Bratislava : Slovak University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-227-3597-1. - S. 87-94

10.5 AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Dekan, Martin - Duchoň, František - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton: **Probabilistic Model of Laser Rangefinder**. In: Technológia Europea 2011 : Sborník príspevků mezinárodní vědecké konference k problematice technologických a inovačních procesů. Hradec Králové, Česká Republika 23.-28.5.2011. - Hradec Králové : Magnanimitas, 2011. - ISBN 978-80-904877-4-1. - S. 38-47

Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Kaštan, Dušan - Klúčik, Marian - Bachratý, Michal: **Simultaneous Navigation and Fault Detection of Legged Robot**. In: Robotics in Education 2011 : 2nd International Conference. Vienna, Austria, 15-16 August 2011. - Vienna : INNOC, 2011. - ISBN 978-3-200-02273-7. - S. 91-94

Vondráček, Martin - Dekan, Martin - Duchoň, František - Števo, Stanislav: **Multi-robot system for mapping of the unknown environment**. In: Applied Mechanics and Materials. - ISSN 1660-9336. - Vol. 511-512 : 2013 International Conference on Sensors, Mechatronics and Automation, ICSMA 2013. Shenzhen; China; 24-25 December 2013 (2014), s. 827-833

10.6 AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Babinec, Andrej - Vitko, Anton - Duchoň, František - Dekan, Martin: **Reactive Navigation of Mobile Robot Using Vector Field Histogram+**. In: Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. MMaMS 2011 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 4th International Conference. Herľany, Slovakia. 20.- 22. Sept. 2011. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2011. - ISBN 978-80-553-0731-2. - CD-Rom

Dekan, Martin - Duchoň, František: **Navigation of Autonomous Mobile Robot Using Ultrasonic and Infrared Sensors**. In: Robotics in Education 2010 : Proceedings of the 1st International Conference. Bratislava, 16.-17. 9. 2010. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2010. - ISBN 978-80-227-3353-3. - S. 193-196

Dekan, Martin - Duchoň, František - Jurišica, Ladislav - Vitko, Anton: **Platform iRobot Create for Educational Purposes**. In: Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. MMaMS 2011 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 4th International Conference. Herľany, Slovakia. 20.- 22. Sept. 2011. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2011. - ISBN 978-80-553-0731-2. - CD-Rom

Duchoň, František - Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav: **Reaktívna navigácia ako prostriedok bezkolízneho správania sa mobilného robota**. In: ROBTEP 2011. Automatizácia / Robotika v teórii a praxi : Zborník príspevkov z 11. medzin.konferencie. Košice, 16.12. 2011. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2011. - ISBN 978-80-553-0846-3. - S. 59-66

Kľúčik, Marian - Duchoň, František - Vitko, Anton - Babinec, Andrej - Dekan, Martin: **Hľadanie optimálnych trajektórií zvracieho nástroja použitím evolučných výpočtov**. In: Technológia zvrárania 2012 [elektronický zdroj] : Vedecký seminár "Týždňa vedy a techniky na Slovensku 2012", Bratislava, 7.11.2012. - Trnava : AlumniPress, 2012. - ISBN 978-80-8096-177-0. - CD-ROM [6]

Vitko, Anton - Jurišica, Ladislav - Duchoň, František - Kľúčik, Marian - Babinec, Andrej - Dekan, Martin: **Neural Tuning of Fuzzy Rules (with Application to Robot Navigation)**. In: Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. MMaMS 2011 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 4th International Conference. Herľany, Slovakia. 20.- 22. Sept. 2011. - Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2011. - ISBN 978-80-553-0731-2. - CD-Rom

Babinec, Andrej - Dekan, Martin - Duchoň, František - Vitko, Anton: **Modifications of VFH Navigation Methods for Mobile Robots**. In: Procedia Engineering. - ISSN 1877-7058. - Vol. 48 : Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems. 5th International Conference. Zemplínska Šírava, Slovakia, November 6- 8, 2012 (2012), s. 10-14

Dekan, Martin - Chovanec, Ľuboš - Babinec, Andrej - Vitko, Anton: **New Modules for the iRobot Create Platform**. In: Procedia Engineering. - ISSN 1877-7058. - Vol. 48 : Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems. 5th International Conference. Zemplínska Šírava, Slovakia, November 6- 8, 2012 (2012), s. 65-72

Duchoň, František - Huňady, Dominik - Dekan, Martin - Babinec, Andrej: **Optimal Navigation for Mobile Robot in Known Environment**. In: Applied Mechanics and Materials. - ISSN 1660-9336. - Vol. 282 : 11th International Conference Industrial, Service and Humanoid Robotics, ROBTEP 2012; Strbske Pleso, High Tatras;14-16 November 2012 (2013), s. 33-38

10.7 BDF Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch

Duchoň, František - Kľúčik, Marian - Dekan, Martin: **Prieskumné a záchranárske roboty**. (<http://www.posterus.sk/?p=11934>) In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 10 (2011), web-page

Duchoň, František - Dekan, Martin - Kľúčik, Marian: **Servisná robotika pre domácnosti**. (<http://www.posterus.sk/?p=12020>) In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 11 (2011), web-page

10.8 GII Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií

Duchoň, František - Dekan, Martin - Chovanec, Ľuboš: **Spolupráca medzi FEI a FA STU**. In: Spektrum. - ISSN 1336-2593. - Roč. 19, č. 6 (2013), s. 10

