

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Andrej Babinec

Autoreferát dizertačnej práce

ZVÝŠENIE NAVIGAČNÝCH SCHOPNOSTÍ ROBOTICKÉHO AGENTA

na získanie akademického titulu
philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava, 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Andrej Babinec
 Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Slovenská technická univerzita v Bratislave

Školiteľ: prof. Ing. Anton Vitko, PhD.
 Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Slovenská technická univerzita v Bratislave

Oponenti: prof. Ing. Juraj Spalek, PhD. EF, ŽU v Žiline
 doc. Ing. Michal Kelemen, PhD. SjF, TU v Košiciach

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h

v

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

Zvýšení navigačních schopností robotického agenta

Abstrakt

Keďže mobilné roboty intenzívne prenikajú nielen do špeciálnych aplikačných sfér, do priemyslu, ale aj do domácností medzi bežných ľudí, problematika bezkolíznej navigácie je veľmi aktuálna. Navyše dochádza k zlepšovaniu senzorického vybavenia, preto je nevyhnutné, aby aj navigačné metódy dokázali naplno využiť ich vlastnosti. Táto dizertačná práca sa venuje analýze a revízii existujúcich lokálnych navigačných metód postavených najmä na princípe metódy VFH. Ťažiskom práce je návrh nových modifikácií histogramových algoritmov, ktoré vo všeobecnosti zlepšujú vlastnosti metód a navyše umožňujú využiť potenciál moderných snímačov, akým je napríklad laserový skener. Okrem toho sú predstavené aj modifikácie, ktoré zabezpečia bezkolíznu navigáciu v prostredí s pohyblivými prekážkami. Všetky nové úpravy sú podrobené analýze a experimentálnemu overeniu. Rovnako sú aj porovnané výsledky získané použitím klasických a modifikovaných metód. Experimenty dokazujú opodstatnenosť i technickú realizovateľnosť navrhnutých metód.

Kľúčové slová: Mobilný robot, navigácia, VFH, laserový skener, pohyblivé prekážky

Improvements of navigation capabilities of a robotic agent

Abstract

Since mobile robots intensively penetrate not only into special application domains, industry, but also into homes of ordinary people, the issue of collision-free navigation is very timely. In addition, there is improvement of sensory equipment therefore it is essential that the navigation methods could make full use of their potential. This thesis is devoted to the analysis and revision of existing local navigation methods mainly built on the principles of VFH. The focus of this work is design of new modifications of VFH algorithms, which generally improve the properties of the methods and allow use the potential of advanced sensors such as laser scanners. In addition, modifications providing collision-free navigation in environments with moving obstacles are introduced. All new changes are analyzed and experimentally verified. The results obtained using conventional and modified methods have been compared. Experiments have demonstrated the validity and the technical feasibility of the proposed methods.

Keywords: Mobile robot, navigation, VFH, laser rangefinder, moving obstacles

1 ÚVOD

Donedávna bolo možné vidieť mobilné roboty len na univerzitách ako objekty výskumu, prípadne ako súčasť vesmírneho programu alebo v experimentoch silových či záchranných zložiek rôznych štátov. Boli to väčšinou aplikácie vzdialenej bežným ľuďom [1]. Postupne sa však rodili projekty, ktoré dostávali mobilnú robotiku aj do iných oblastí. Napríklad do zdravotníckych centier, kde prebiehali pokusy s automatizovaným rozdávaním liekov jednotlivým pacientom [2] [3]. V súčasnosti sme však svedkami masívneho rozmachu mobilnej robotiky (robotické vysávače, kosačky, čističe bazénov). Dá sa povedať, že servisná robotika prenikla už aj medzi bežných ľudí. Konkurenčný boj jednotlivých spoločností ako aj dopyt po vyššej kvalite, bude tlačiť na postupné zdokonaľovanie týchto zariadení. Pri tom je už možné postrehnúť, že mobilné zariadenia používané armádou alebo políciou, sú dnes už oveľa dokonalejšie a ich využívanie sa stalo bežnou praxou [4].

Existuje však ešte jedna oblasť, ktorá je dôležitá z pohľadu budúcnosti mobilnej robotiky, a tou je priemysel [5]. Dôkazom, že sa vývoj hýbe dopredu aj v tejto sfére, bola mnichovská výstava Automatica 2012 [6]. Spoločnosti vyrábajúce priemyselné roboty sa tiež začínajú orientovať na mobilné manipulátory. Zásadným poznatkom je, že tieto mobilné platformy sa pri svojom pohybe orientujú najmä pomocou laserových skenerov.

Schopnosť navigácie mobilného robota závisí od použitého senzorickeho vybavenia, od spôsobov interpretácie nameraných údajov, od algoritmov pre spracovanie týchto údajov, ale aj od prostredia, v ktorom sa má pohybovať. Používanie laserového skenera je v súčasnosti moderným a efektívnym prístupom ako určovať rozloženie, tvar a vzdialenosti rôznych objektov v okolí robota [7]. V mnohých prípadoch postačuje, keď je prostredie skúmané len v jednej rovine. Ušetrí sa tým množstvo výpočtového výkonu, pretože na základné spracovanie takýchto dát postačia jednoduché filtre, ktoré vylúčia chybné merania. Mnohé súčasné navigačné metódy predpokladajú pohyb robota v jednej rovine a rovnako im postačujú rovinné vstupné dáta z okolia robota.

Prehľad navigačných metód

Navigačné algoritmy sa všeobecne delia na dve hlavné skupiny, globálne a lokálne metódy. Aby sa dosiahol čo najlepší výsledok, metódy z jednotlivých skupín sa často vzájomne kombinujú [8] [9].

Globálna navigácia sa využíva vtedy, keď je k dispozícii globálna mapa prostredia. V tejto mape sa (pred samotným pohybom robota) naplánuje optimálna cesta k cieľu. Základné typy reprezentácií prostredia robota a príslušné najznámejšie metódy hľadajúce optimálnu cestu sú:

- Topologické mapy
 - Dijkstrov algoritmus
 - Algoritmus A* [10]
- Geometrické mapy
 - Graf viditeľnosti [11]
 - Voronoiov diagram [11]
 - Tangenciálny graf [12]
 - Globálna metóda potenciálových polí [13]
- Mriežkové mapy
 - Wavefront algoritmus [11]

- Brushfire [11]
- Algoritmus D*

Lokálne metódy sú určené na lokálnu navigáciu, to znamená bezkolízny prechod medzi dvoma blízkymi bodmi v priestore, ktoré sú najčastejšie určené globálnym plánovačom. Klasické lokálne algoritmy sa dajú rozdeliť do skupín, v ktorých jednotlivé metódy majú určité spoločné vlastnosti alebo používajú spoločný základný princíp. Z nich najznámejšie sú:

- Algoritmus chrobáka [14] [15]:
 - Bug 1
 - Bug 1+2
 - Tangent Bug
- Potenciálové metódy [11] [15]:
 - Lokálna metóda umelého potenciálového poľa
 - Rozšírené potenciálové pole [14]
 - Metóda poľa virtuálnych síl [16]
- Histogramové metódy [16] [17] [18]:
 - Základná metóda VFH [16] (vector field histogram).
 - VFH+ [19]
 - VFH* [20]
- Rýchlostné metódy [21]:
 - DWA [22] (technika dynamického okna)
 - CVM [23] (oblúkovo-rýchlostná metóda)
 - Nearness diagram [24]

Histogramové metódy umožňujú eliminovať kmitavý charakter pohybu robota a využitím aktívneho okna sú menej náchylné na uviaznutie v takzvanom lokálnom minime. Ďalšou výhodou tohto prístupu je, že je veľmi dobre modifikovateľný. Existuje totiž veľa obmien, ktoré tejto skupine metód pridávajú ďalšie a ďalšie výhody. Z dnešného pohľadu však obsahujú aj mnoho nedostatkov a obmedzení, ktoré je potrebné odstrániť.

Ciele dizertačnej práce

Je zrejmé, že súčasným trendom je rozširovať pole pôsobností mobilných robotov aj v iných prostrediach a nasadzovať novšie a presnejšie snímače ako je napríklad laserový skener. Hlavnými cieľmi tejto dizertačnej práce preto sú:

- Analýza histogramových navigačných metód s cieľom vyriešenia ich nedostatkov a obmedzení.
- Výskum v oblasti histogramových metód, orientovaný na plynulosť pohybov robota a jeho vyvážených reakcií na prekážky.
- Návrh modifikácie metód zameranej na použitie laserového skenera ako primárneho senzora pre mapovanie a lokálnu navigáciu.
- Návrh modifikácií, ktoré umožnia nasadenie mobilného robota aj do prostredia s pohyblivými prekážkami.
- Experimentálne overenie navrhnutých riešení.

2 ANALÝZA VLASTNOSTÍ HISTOGRAMOVÝCH NAVIGAČNÝCH METÓD

VFH

Základom pre všetky histogramové metódy je klasický algoritmus VFH [16]. V súčasnej dobe je však veľmi málo pravdepodobné, že nájde v robotike využitie v takej forme, v akej bol navrhnutý. Jedinou výhodou tohto algoritmu oproti jeho ďalším úpravám je, že je pomerne výpočtovo nenáročný. Tento algoritmus však neberie do úvahy dynamické ani geometrické vlastnosti robota, čo môže byť prekážkou pri voľbe algoritmu, ktorý má spĺňať vysoké nároky na bezpečnosť. Ďalšou nevýhodou môže byť fakt, že niektoré kroky metódy sú podriadené typu senzora, ktorý sa vo veľkej miere používal v dobe, kedy VFH vznikla. Dá sa povedať, že forma vstupných údajov je šitá na mieru ultrazvukovým senzorom. Niektoré novšie modifikácie majú preto snahu tento nedostatok napraviť.

VFH+

Vylepšený algoritmus VFH+ [19] zahŕňa do výpočtu najmä dynamické a geometrické charakteristiky robota. Tým sa zvyšuje aj samotná výpočtová náročnosť. V dnešnej dobe kroky, ktoré boli do algoritmu pridané nepredstavujú žiaden problém, pretože sa výkonnosť procesorov neustále zvyšuje. Úprava zdedila od pôvodnej metódy predpoklad použitia ultrazvukových snímačov, takže táto skutočnosť sa môže pri niektorých aplikáciách prejavovať ako obmedzujúci faktor. Použitím novodobých snímačov ako je napríklad laserový skener, je možné niektoré výpočty zjednodušiť a zároveň vylepšiť výsledný efekt.

VFH*

Metóda VFH* [20] využíva ako základ algoritmus používaný vo VFH+, ale upravuje rozhodovaciu úroveň pre výber nového smeru. Zohľadňuje totiž budúce situácie, do ktorých sa robot môže dostať. Limitujúcim faktorom môže byť skutočnosť, že táto úprava je určená len do statického prostredia a teda pohyblivé prekážky môžu spôsobiť chybné rozhodovanie. Spoločným problémom všetkých troch spomínaných metód je aj tvar aktívneho okna. Robot totiž pri výpočte berie do úvahy blízke okolie štvorcového tvaru, čo môže viesť k nerovnomernej reakcii na prekážku v závislosti od jej umiestnenia.

VPH

Vývoj v oblasti senzorov napokon prispel k vzniku modifikácie zvanej VPH [25], čo je prvá metóda, ktorá ako primárny senzor používa laserový skener. Vďaka tomu bolo možné vstupné údaje natoľko zredukovať, aby primárny histogram bol vytvorený priamo z dát laserového skenera, bez nutnosti aktualizácie histogramovej mriežky. Implementáciou tohto algoritmu však stratíme možnosť využiť histogramovú mriežku ako mapu prostredia. Nie je teda možné dodatočne plánovanie cesty a dokonca nie je možné využiť ani ideu metódy VFH*, pri ktorej sa rozhoduje o novom smere na základe analýzy budúcich pozícií robota v lokálnej mape.

TFH

Iný prístup bol zvolený pri modifikácii označenej TFH [26] [27] [28]. Pri tomto algoritme sa pozornosť takmer výlučne sústreďuje na lokálnu mapu, lepšie povedané terénnu mapu

prostredia. Popri štandardnej histogramovej mriežke je generovaná aj výšková mapa terénu. Kombinácia týchto dvoch máp napokon vstupuje do algoritmu, ktorý sa však veľmi nelíši od pôvodnej verzie VFH. Výhodou tohto prístupu je, že pridáva dodatočnú analýzu priechodnosti terénu, čiže môže byť nasadený na robotoch vo vonkajšom prostredí. Naopak pre roboty pohybujúce sa vo vnútornom prostredí po rovných plochách nemá príliš veľký význam a užitočnejšie je zamerať sa na algoritmy zaručujúce väčšiu bezpečnosť pri pohybe pomedzi prekážky.

Neuro-fuzzy VFH

Modifikácia metódy VFH, ktorá do algoritmu vnáša prvky inteligentných systémov [29], má síce moderný charakter, ale pôvodnú metódu podstatne nevylepší. Namiesto exaktného predpisu ako určiť nový smer, bola použitá neurónová sieť na označenie kandidátskych priechodov a fuzzy inferenčný mechanizmus rozhodol o výbere konkrétneho smeru.

IVFH*

Pri úprave zvanej IVFH* [30] môžeme vidieť už aj snahu rozšíriť pole aplikácií histogramových metód aj do priestorov s pohyblivými prekážkami. Napriek tomu, že jej názov je odvodený od metódy VFH*, nepreberá úplne jej ideu, kedy sa na základe stromu možností rozhoduje len o smere v nasledujúcom kroku, ale robot berie do úvahy celú naplánovanú cestu. V prítomnosti pohyblivej prekážky ju potom dynamicky preplánuje tak, aby vnútorné umelé sily medzi jednotlivými bodmi cesty spĺňali dané podmienky. Algoritmus je predstavený len v teoretickej rovine, takže nie je možné posúdiť jeho klady a zápory. Hlavnou myšlienkou metódy je plánovanie trajektórie robota, ktoré však môže stroskotat' na slabej znalosti prostredia vzdialenejšieho od robota. Preto by bolo výhodnejšie držať sa najmä pôvodnej myšlienky VFH* kedy sa určuje len smer v nasledujúcom kroku.

MSV

V metóde MSV [31] je pre účel obchádzania dynamických prekážok zakomponovaná prepínacia logika. V prípade, že sa robot nachádza v statickom prostredí, používa algoritmus VFH+. Hneď ako deteguje pohyblivú prekážku, zistí či jej pohyb vzhľadom na robot predstavuje nejaké riziko. Ak áno, robot sa zameria na bezpečné obídenie dynamickej prekážky a následne pokračuje v zbiehaní algoritmu VFH+.

Sektorovo orientovaná VFH pre obchádzanie pohyblivých prekážok

Táto metóda [32] nemá implementovanú prepínicu logiku, ale pre každý kandidátsky smer existuje istá hodnota ohrozenia od pohyblivej prekážky a táto je zakomponovaná do výslednej voľby nového smeru. Napriek tomu, že táto metóda prevzala sektorový princíp z histogramových metód, nie je zaručené, že rôzne dynamické a geometrické vlastnosti robota nebudú viesť ku kolíziám. Tieto charakteristiky totiž nie sú do algoritmu zakomponované tak ako je to napríklad v metóde VFH+.

Záver analýzy

Z prehľadu výhod a nevýhod súčasných modifikácií histogramových metód je stále vidieť určité nedostatky v oblasti použitia moderných senzorov ako aj nasadenia algoritmov v dynamických prostrediach. V nasledujúcich častiach práce budú preto predstavené nové

originálne modifikácie algoritmov, zamerané na použitie laserového skenera ako primárneho senzora histogramových metód. Budú uvedené viaceré úpravy, ktoré spejú k plynulosti a rovnomernosti reakcií na prekážky a budú navrhnuté také zmeny v algoritme, ktoré umožnia jeho použitie v prostredí s pohyblivými prekážkami. Modifikácie sa budú dotýkať metód VFH+ a VFH*, preto aj táto problematika je rozdelená na príslušné podkapitoly.

3 VLASTNÉ ORIGINÁLNE MODIFIKÁCIE METÓDY VFH+

Funkcia vplyvu aktívnych buniek

V metóde VFH+ existuje predpis (1), ktorý priraduje každej aktívnej bunke hodnotu magnitudy vektora pôsobiaceho proti robotu. Hodnoty histogramu sa potom počítajú ako suma magnitud $m_{i,j}$ príslušajúcich ku konkrétnym sektorom. Magnitúda je úmerná činiteľu závislého od vzdialenosti bunky $c_{i,j}^*$ od robota. Pre tento činiteľ bol zavedený pojem „funkcia vplyvu aktívnej bunky“ $I_{i,j}$ (2). Výpočet $m_{i,j}$ sa teda dá všeobecne prepísať na tvar (3) [33].

$$m_{i,j} = (c_{i,j}^*)^2 (a - b d_{i,j}) \quad (1)$$

$$I_{i,j} = f(d_{i,j}) \quad (2)$$

$$m_{i,j} = (c_{i,j}^*)^2 \cdot I_{i,j} \quad (3)$$

Ďalej sa na stanovenie hraníc vplyvu zaviedlo, že najvzdialenejšia bunka má na robot najnižší vplyv s hodnotou $I_{i,j} = 0$ a najbližšia bunka najväčší vplyv $I_{i,j} = 1$. Označenie najvzdialenejšej bunky podľa Obr. 1 bolo prevzaté z pôvodnej metódy. Vzdialenosť najbližšej bunky bola v tejto verzii stanovená na hodnotu r_{r+s} .

Pre podmnožinu definičného oboru $D'(I_{i,j}) = \langle r_{r+s}, d_{MAX} \rangle$ je potom možné vytvoriť funkciu $I_{i,j}$ požadovaného tvaru, napr. (5), (6), (7), pre ktorú platí (4).

$$I_{i,j}(d_{MAX}) = 0 \quad (4)$$

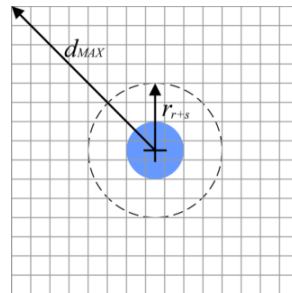
$$I_{i,j}(r_{r+s}) = 1$$

$$I_{i,j} = \frac{d_{MAX}^2 - d_{i,j}^2}{d_{MAX}^2 - r_{r+s}^2} \quad (5)$$

$$I_{i,j} = \frac{d_{MAX} - d_{i,j}}{d_{MAX} - r_{r+s}} \quad (6)$$

$$I_{i,j} = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\left(d_{i,j} - \frac{d_{MAX} + r_{r+s}}{2}\right) \cdot \frac{S_{int}}{d_{MAX} - r_{r+s}}}} \quad (7)$$

Interval základnej sigmoidy v (7) je stanovený na hodnotu $S_{int} = 12$.



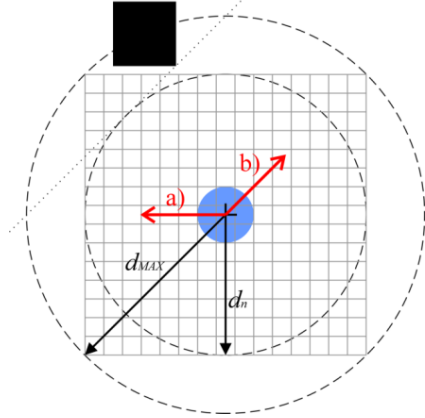
Obr. 1 Robot s aktívnym oknom.

Kruhový tvar aktívneho okna

Používanie štvorcového aktívneho okna, môže spôsobovať nerovnomernú reakciu robota na vzdialenejšie prekážky v závislosti od smeru pohybu robota. Ide o prekážky, ktoré sa nachádzajú v pásme medzi d_{MAX} a d_n na Obr. 2. Obrázok zároveň ilustruje situácie, do ktorých sa môže robot dostať: a) Smer pohybu robota, kedy prekážka (čierny štvorec) neovplyvní výpočet nového smeru, b) smer pohybu robota, kedy je výpočet ovplyvnený prekážkou.

Ak robot míňa prekážku v rovnakých vzdialenostiach, jeho reakcia by nemala závisieť od smeru pohybu. Preto bola navrhnutá modifikácia, ktorá upravuje takúto nerovnomerné správanie. Riešením je použitie kruhového aktívneho okna. Nejde však o doslovnú zmenu tvaru aktívneho okna, ktorá by komplikovala výber hodnôt z histogramovej mriežky. Rovnaký efekt je totiž možné dosiahnuť vhodnou úpravou funkcie vplyvu [33].

Pre stanovenie hraníc vplyvu (8) sa za najväčšiu vzdialenosť považuje d_n podľa Obr. 2. Túto zmenu musia rešpektovať aj funkcie definované v (5), (6), (7). Potom sa funkcia vplyvu môže dodefinovať na zložený tvar takzvanej kruhovej funkcie vplyvu (9).



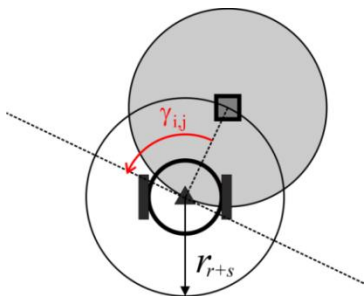
Obr. 2 Pohyb robota so štvorcovým aktívnym oknom.

$$\begin{aligned} I_{i,j}(d_n) &= 0 \\ I_{i,j}(r_{r+s}) &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

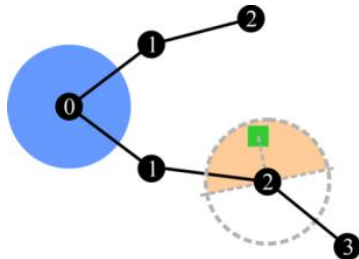
$$I_{i,j}^o = \begin{cases} 1 & ak & d_{i,j} \leq r_{r+s} \\ I_{i,j}(d_{i,j}) & ak & r_{r+s} < d_{i,j} \leq d_n \\ 0 & ak & d_n < d_{i,j} \end{cases} \quad (9)$$

Modifikácia výpočtu zväčšovacieho uhla $\gamma_{i,j}$

Jednotlivé aktívne bunky sú rozšírené na kruh s polomerom r_{r+s} , čo predstavuje polomer robota zväčšený o jeho bezpečnostnú zónu. Aby sa pri výpočte zohľadňovali rozmery robota, jednotlivé bunky patria nie do jedného, ale viacerých sektorov. Príslušnosť bunky $c_{i,j}^*$ k sektorom je daná aj zväčšovacím uhlom $\gamma_{i,j}$. Jeho klasická definícia nezohľadňuje situácie, kedy aktívna bunka zasiahne do bezpečnostného pásma alebo do priestoru projekcie robota. Teda platí len pre $d_{i,j} \geq r_{r+s}$ (Obr. 3). Hodnotu $\gamma_{i,j}$ je potrebné dodefinovať nie len pre bezpečnostnú oblasť, ale aj pre $d_{i,j} \leq r_{r+s}$ podľa vzťahu (10). Bez tejto definície by pri kolízii projekcie robota s prekážkou nedošlo k uzavretiu príslušného uzla stromu metódy VFH* a robot by mal blokovanú iba časť smerov (oranžová farba v Obr. 4). To znamená že by algoritmus mohol chybné určiť optimálnu vetvu a robot doviest' ku kolízii s prekážkou (najmä v prípade pohyblivej prekážky).



Obr. 3 Aktívna bunka na hranici bezpečnostnej zóny r_{r+s} .

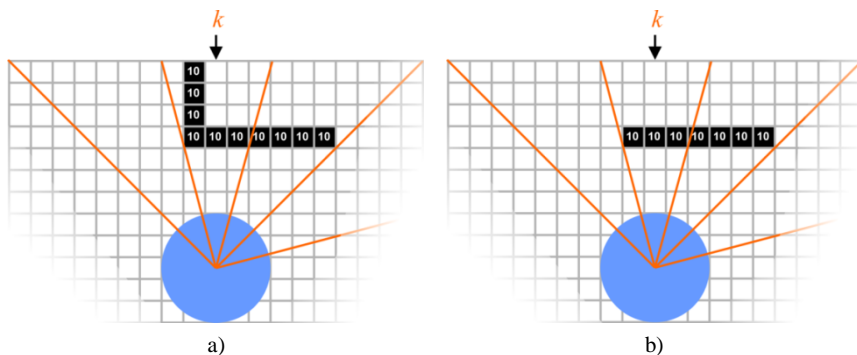


Obr. 4 Aktívna bunka v kolízii s projekciou telesa robota.

$$\gamma_{i,j} = \begin{cases} \arcsin \frac{r_{r+s}}{d_{i,j}} & \text{ak } d_{i,j} \geq r_{r+s} \\ \frac{\pi}{2} & \text{ak } r_r < d_{i,j} < r_{r+s} \\ \pi & \text{ak } d_{i,j} \leq r_r \end{cases} \quad (10)$$

Výpočet primárneho histogramu pri použití laserového skenera

V pôvodnej metóde je výpočet konkrétnych histogramových hodnôt realizovaný sumou magnítud buniek v sektore. Za predpokladu, že robot pri svojom pohybe v určitom smere laserovým skenerom zmapuje prekážku a neskôr sa k nej blíži z iného smeru, môže nastať situácia, kedy by sa pri sume magnítud buniek brali do úvahy aj tie prekážkové bunky, ktoré v danej chvíli nemajú pre výber smeru žiaden význam. Situácie na Obr. 5a), b) majú byť pre robot identické, ale použitím pôvodnej metódy sú histogramové hodnoty v sektore k rozdielne.



Obr. 5 Robot s naznačenými sektormi v aktívnom okne so zmapovanou prekážkou.

Aby sa do úvahy brali len relevantné bunky, bol zavedený pojem najnebezpečnejšej bunky v sektore. Takáto bunka je určená maximom magnítud buniek v sektore a teda aj histogramová hodnota pre daný sektor sa vypočíta podľa vzťahu (11) použitím (12) a (13).

$$H_k^p = \max_{i,j \in C^*} (m_{i,j} \cdot h'_{i,j}) \quad (11)$$

$$m_{i,j} = (c_{i,j}^*)^2 \cdot I_{i,j}^O \quad (12)$$

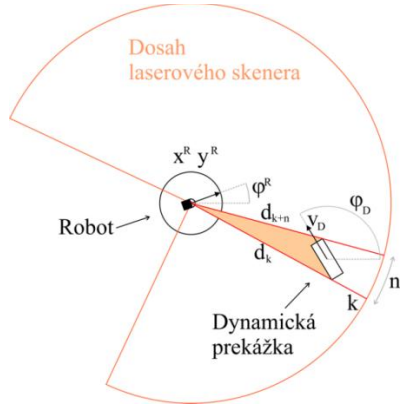
$$\begin{aligned} h'_{i,j} &= 1 & \text{ak } k \in \langle \beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j} \rangle \\ h'_{i,j} &= 0 & \text{inak} \end{aligned} \quad (13)$$

4 VLASTNÉ ORIGINÁLNE MODIFIKÁCIE METÓDY VFH*

Detekcia a reprezentácia pohyblivých prekážok

Z pohľadu použitia dát pre reaktívnu navigáciu, je dôležitý najmä spôsob reprezentácie pohyblivej prekážky. Táto práca sa metódam detekcie pohyblivej prekážky venuje iba okrajovo, pretože na overenie navrhnutých riešení je použitá virtuálna pohyblivá prekážka.

Vzhľadom na to, že sa pracuje s laserovým skenerom a histogramovými algoritmi, na reprezentáciu pohyblivých prekážok je užitočné použiť priamo dáta laserového skenera. Takáto reprezentácia dynamickej prekážky bola zvolená preto, lebo umožňuje zachovanie pôvodného tvaru objektu, resp. tvaru časti objektu viditeľnej z miesta detekcie. Histogramová mriežka sa použije až pri výpočte samotného navigačného algoritmu, kedy sa vyžaduje prítomnosť pohyblivej prekážky v mape. Vtedy je objekt otláčený do histogramovej mriežky (aproximovaný bunkami s najvyššou hodnotou). Pohyblivá prekážka je podľa Obr. 6 reprezentovaná množinou (14).



Obr. 6 Reprezentácia pohyblivej prekážky výšekom v laserovej snímke.

$$\{x^R, y^R, \varphi^R, \{d_k, \dots, d_{k+n}\}, k, n, v_D, \varphi_D\} \quad (14)$$

Kde pole $\{d_k, \dots, d_{k+n}\}$ predstavuje výšok laserovej snímky pričom k je najnižší index laserového lúča, ktorý deteguje danú pohyblivú prekážku, n je počet prekážkových bodov (laserových lúčov), ktoré patria danej prekážke.

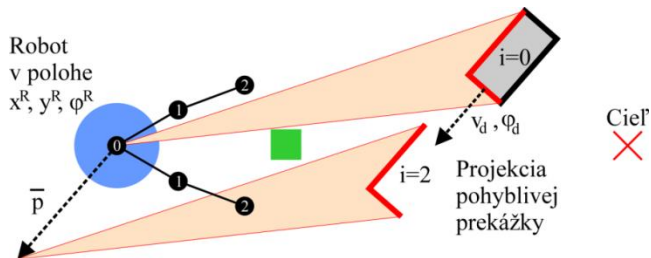
Bezkolízne obchádzanie pohyblivých prekážok

Klasická metóda VFH* si z aktuálnej polohy robota vytvára prehľadávací strom cez uzly projektovaných budúcich polôh robota. V strome sa nájde optimálna vetva ktorá vedie do uzla s najlepším ohodnotením. Výsledkom je, že z primárnych kandidátskych smerov sa zvolí za smer v novom kroku práve ten sektor, ktorý je súčasťou optimálnej vetvy a vedie do optimálneho uzla. Celý rozhodovací proces je vykonaný pre jediný časový okamih s rovnakou mapou prostredia. Ak by jednotlivé mapy mali časové známky, dalo by sa povedať, že výpočet jedného kroku klasického algoritmu VFH* prebieha s mapou, ktorá má rovnakú časovú známku vo všetkých úrovniach. Je preto predurčená len pre statické prostredia.

Aby bolo možné metódu VFH* použiť aj na nestatické prostredia, je potrebné uzlom prehľadávacieho stromu priradiť časovú zmenu Δt_i (15), za ktorú sa robot vie dostať z aktuálnej polohy v čase t (x^R, y^R, φ^R) do konkrétneho uzla po dráhe d_i rýchlosťou v_i .

$$\Delta t_i = \Delta t_{i-1} + \frac{d_i}{v_i} \quad (15)$$

Ďalej je potrebné vykonávať projekciu dynamickej prekážky priamo do mapy aproximáciou bunkami histogramovej mriežky v okamihoch $t+\Delta t_i$. Pre výpočet kandidátskych sektorov príslušného projektovaného uzla je pohyblivá prekážka považovaná za statickú. Na Obr. 7 je znázornený mechanizmus projekcie pohyblivej prekážky pre uzol v hĺbke $i=2$.

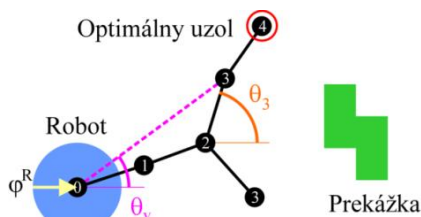


Obr. 7 Projekcia pohyblivej prekážky pre uzol v hĺbke $i=2$.

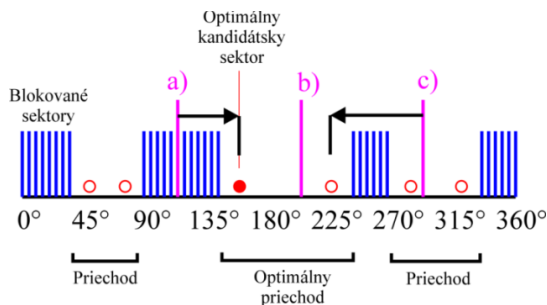
Zavedenie vychýľovacieho smeru

Optimálna vetva predpovedá budúcu zmenu smeru robota. Keďže je táto zmena na konci výpočtu prehľadávacieho stromu známa, je vhodné ju podchytiť a aplikovať na smer robota.

Každý uzol (okrem koreňového uzla) obsahuje jednoznačnú informáciu o tom, ktorý uzol je jeho predchodca ($i-1$). Smer θ_i je uhol, pod ktorým sa projekcia robota dostala z uzla $i-1$ do uzla i . Ak je veľkosť θ_i výrazne odlišná od aktuálneho smeru robota φ^R , čiže zmena δ_i podľa vzťahu (16) je v danej optimálnej vetve maximálna, znamená to, že v uzle $i-1$ bol vplyv nejakej prekážky najvyšší.



Obr. 8 Určenie vychýľovacieho smeru θ_i .



Obr. 9 Obmedzenia vychýľovacieho smeru na príklade maskovaného histogramu.

$$\delta_i = |\varphi^R - \theta_i| \quad (16)$$

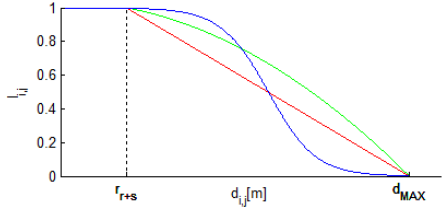
Uzol i s maximálnou hodnotou δ_i je nazvaný vychyľovacím uzlom [33] a smer od koreňového uzla (v pozícii x^R, y^R) po vychyľovací uzol je potom vychyľovacím smerom θ_i , v Obr. 8 označený purpurovou farbou. Vychyľovací smer v koreňovom uzle musí spĺňať obmedzenia od okolitých prekážok. V príklade na Obr. 9, sa vychyľovací smer z pozícií a) a c) upraví v smere šípky. V prípade b) sa θ_i už neupravuje a stáva sa budúcim smerom robota.

5 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE MODIFIKÁCIÍ

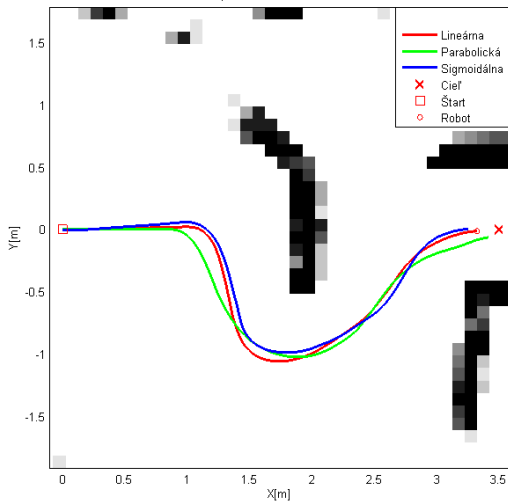
Dopady použitia rôznych funkcií vplyvu aktívnych buniek

Zavedením pojmu funkcie vplyvu, vznikla možnosť použiť rôzne predpisy pre výpočet vplyvu buniek na robota a porovnať tak výsledné tvary trajektórií pohybu (Obr. 11).

Parabolický tvar umožňuje plynulejší pohyb robota, ale nedovolí mu, tesnejšie sa priblížiť ku prekážke. Problém by mohol nastať v prípade, keby cieľ bol umiestnený veľmi blízko prekážky. Sigmoidálny tvar sa blíži k tvaru skokovej zmeny a počas pohybu dochádza k veľmi prudkým zmenám smeru. Lineárny tvar nespôsobuje také prudké zmeny smeru a umožňuje aj dostatočné priblíženie ku prekážke, ale nedokáže tak skoro reagovať na vzdialenejšiu prekážku ako parabolický.



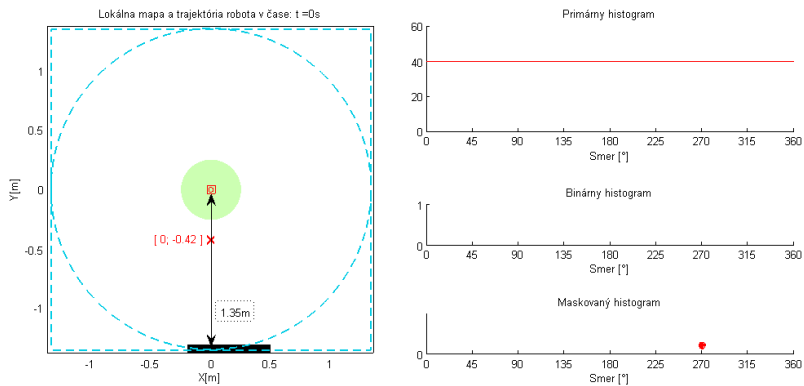
Obr. 10 Priebehy $I_{i,j}$. Zelená (5), červená (6), modrá (7).



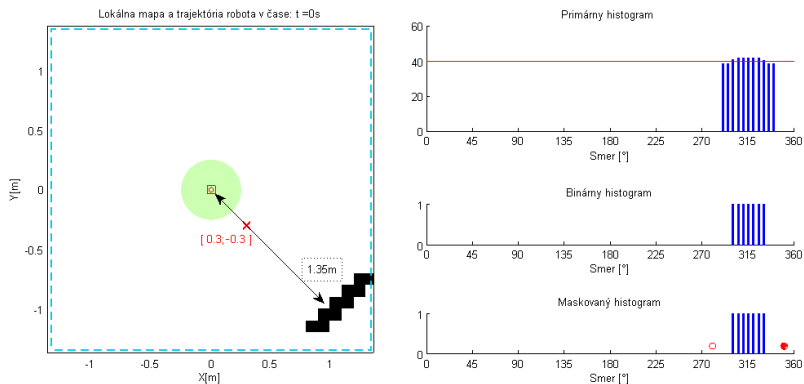
Obr. 11 Trajektórie mobilného robota pre rôzne predpisy $I_{i,j}$. Farby zodpovedajú Obr. 10.

Experimenty dokázali, že voľbou konkrétnej funkcie vieme podľa špecifických požiadaviek ovplyvniť charakter pohybu robota počas obchádzania prekážok.

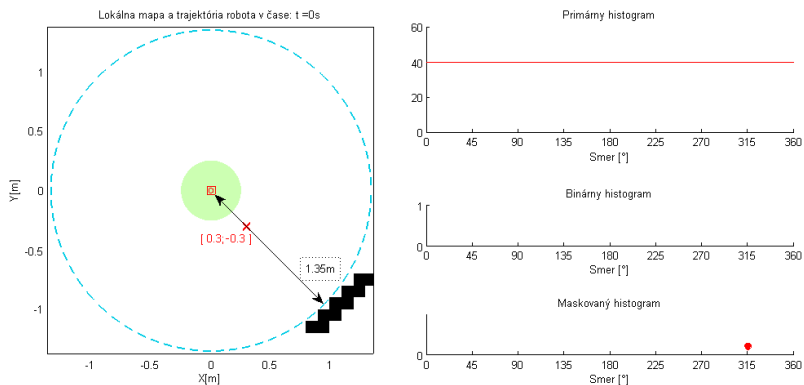
Kruhový tvar aktívneho okna



Obr. 12 Prekážka na okraji štvorcového aj kruhového aktívneho okna.



Obr. 13 Prekážka v štvorcovom aktívnom okne v rovnakej vzdialenosti ako na Obr. 12.

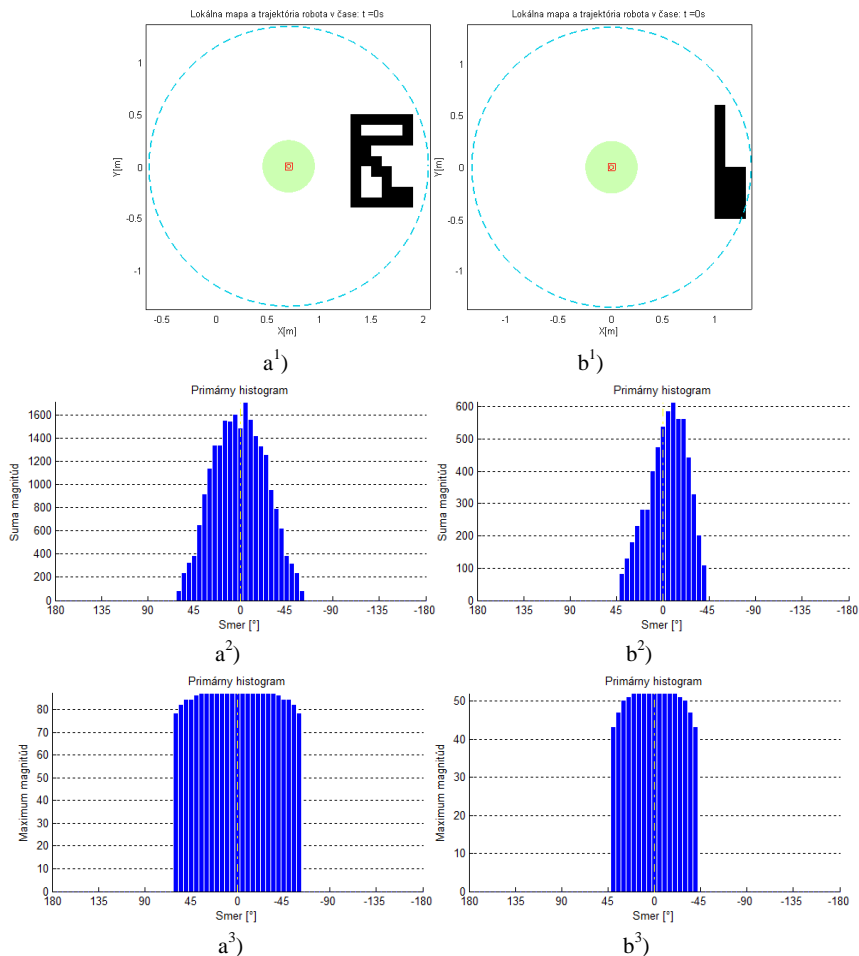


Obr. 14 Prekážka v kruhovom aktívnom okne v rovnakej vzdialenosti ako na Obr. 12.

Experimenty dokázali, že pri štvorcovom aktívnom okne existujú dve rovnaké vzdialenosti v okolí robota Obr. 12 a Obr. 13, ktoré majú rôzny vplyv na jeho pohyb, čo vidieť v histogramoch na pravej strane obrázkov. V prvom prípade je smer k cieľu 270° voľný, v druhom smer 315° blokovany. Ďalej bolo dokázané, že túto nerovnomernú reakciu robota na prekážky v rovnakej vzdialenosti je možné eliminovať použitím kruhového aktívneho okna (Obr. 14), využitím takzvanej kruhovej funkcie vplyvu (9).

Výpočet primárneho histogramu pri použití laserového skenera

Pre účely pokusov boli zmapované dve formácie prekážok a robot bol následne postavený do pozície odkiaľ je v smere 0° rovnako výhodné obísť prekážky sprava aj zľava (Obr. 15).



Obr. 15 Histogramy pre dve rôzne formácie prekážok. a²,b²) Vytvorené pôvodnou metódou (súčet magnítud buniek). a³,b³) Vytvorené novou metódou (maximum magnítud buniek)

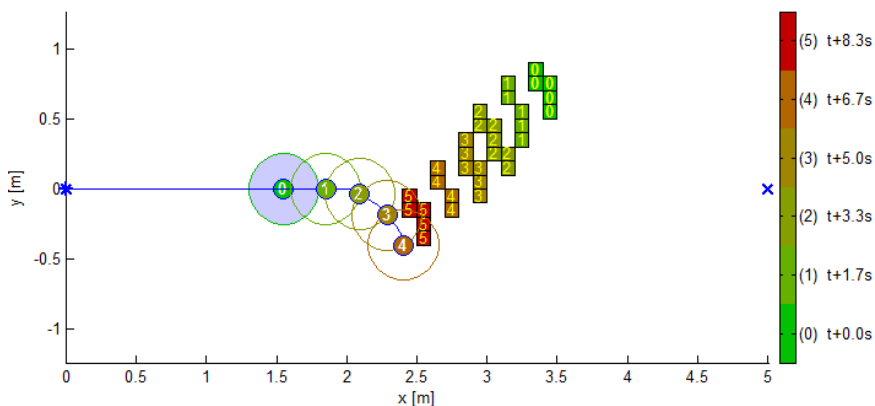
V oboch prípadoch na Obr. 15a²) a b²) vieme nájsť také nastavenie prahovej hodnoty pre tvorbu binárneho histogramu, ktorá by spôsobila, neopodstatnenú preferenciu jednej zo strán pre obídenie prekážky na základe irelevantných prekážkových buniek. Rovnako je potvrdené, že nový predpis v histograme a³) a b³) lepšie reflektuje situáciu v okolí robota, ale môže byť použitý iba ak sa využíva aspoň tak presný snímač prostredia, ako je laserový skener.

Simulačné overenie modifikovanej VFH*

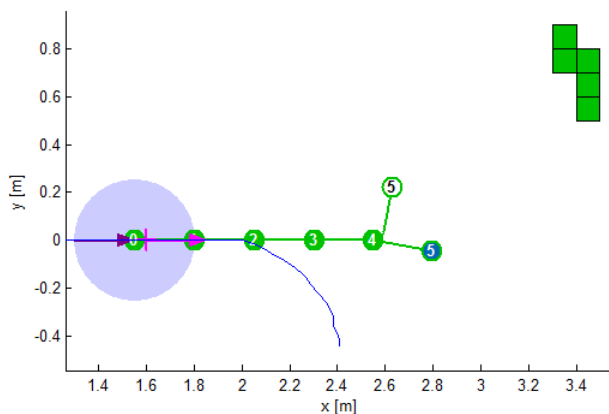
Overenie funkčnosti modifikovanej metódy VFH* prebiehalo na bežne dostupnom stolnom počítači. V prostredí bez statických prekážok bola vytvorená virtuálna prekážka s nasledovnými parametrami podľa (14):

$$\{x^R=0\text{m}, y^R=0\text{m}, \varphi^R=0^\circ, \{d_k=4,6\text{m}, \dots, d_{k+n}=4,6\text{m}\}, k=620, n=20, v_D=0,15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \varphi_D=225^\circ\}$$

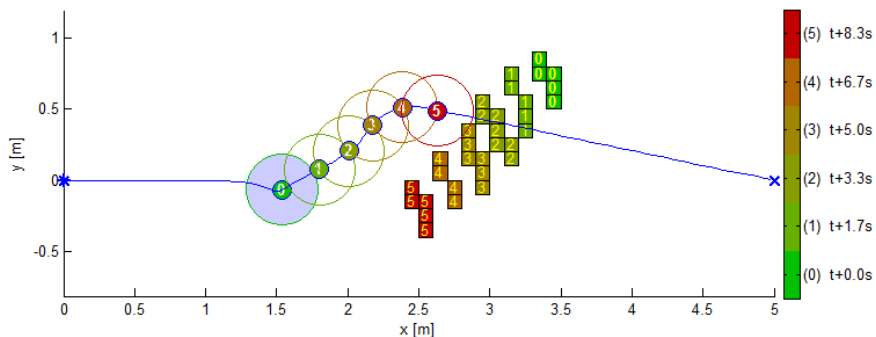
Pre porovnanie výsledkov boli zaznamenané aj výstupy zo zbiehania klasickej metódy VFH* v rovnakom prostredí, ktoré je možné vidieť na Obr. 16 a Obr. 17.



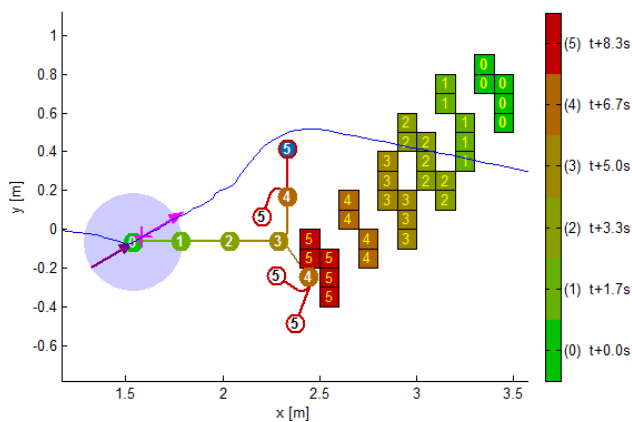
Obr. 16 Pohyb prekážky a trasa robota od času $t=10,3\text{s}$. (Klasická VFH*).



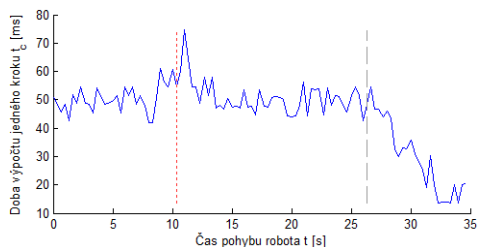
Obr. 17 Rozvoj prehľadavacieho stromu v čase $t = 10,3\text{s}$. (Klasická VFH*).



Obr. 18 Pohyb prekážky a trasa robota od času $t=10,3s$. (Modifikovaná VFH*)



Obr. 19 Rozvoj prehľadávacieho stromu v čase $t = 10,3s$. (Modifikovaná VFH*).

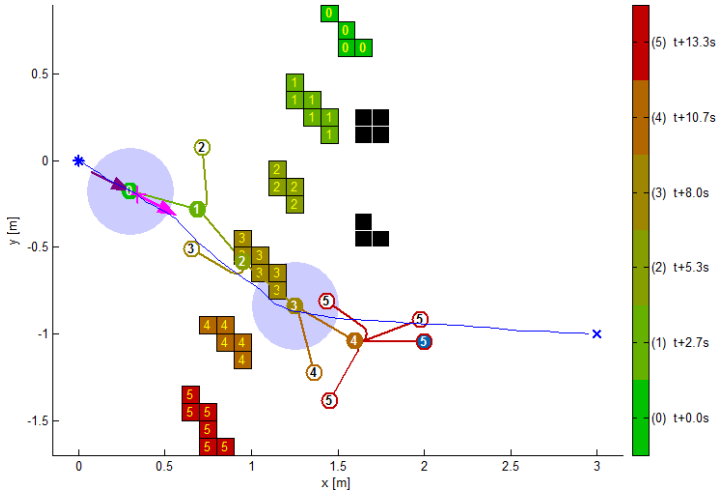


Obr. 20 Priebeh výpočtového času počas pohybu robota zo štartu do cieľa.

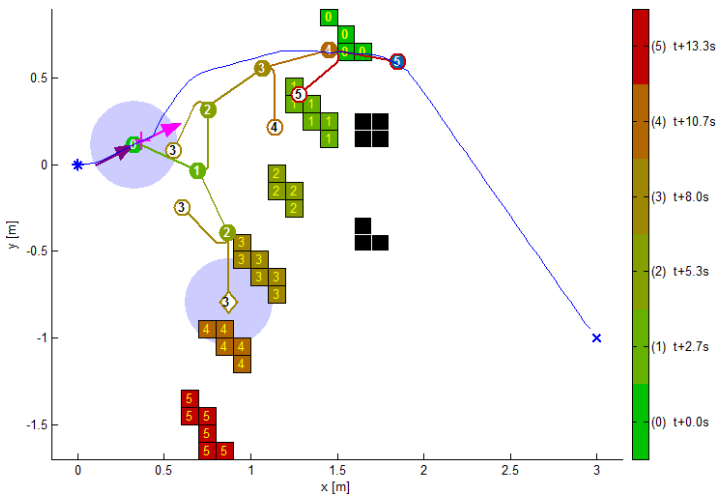
Pre robot s klasickou metódou VFH* bola pripravená situácia nebezpečná, pretože na Obr. 16 je vidieť poslednú nekolíznu situáciu označenú číslom 4. Metóda totiž nezohľadňuje pohyb prekážky pre jednotlivé uzly stromu. Následným vzájomným pohybom robota a prekážky dôjde ku kolízii. Použitím modifikovanej VFH* robot bezkolízne obíde pohyblivú prekážku a dorazí do požadovaného cieľa, čo dokazujú Obr. 18 a Obr. 19. Pri pokuse boli využité všetky modifikácie uvedené v tejto práci. Priebeh výpočtového času na Obr. 20 dokazuje technickú realizovateľnosť metódy pri použití podobného výpočtového výkonu.

Vplyv rozšírenej definície zväčšovacieho uhla $\gamma_{i,j}$

Rozšírená definícia zväčšovacieho uhla $\gamma_{i,j}$ v metóde VFH+ má kľúčovú úlohu pre metódu VFH*. Na Obr. 21 vidieť, že bez dodatočnej definície podľa (10) algoritmus pokračuje v rozvíjaní vetvy stromu aj napriek tomu, že na nej v uzle hĺbky $i=3$ došlo ku kolízii projekcie robota s prekážkou. V experimente na Obr. 22 s rozšírenou definíciou $\gamma_{i,j}$ sa rozvíjanie vetvy stromu vedúcej ku kolízii sa zastavilo v hĺbke $i=3$, pretože prekážka zasiahla do priestoru projekcie robota. Podľa vzťahu (13) saablokovali všetky sektory v okolí robota a uzol bol označený ako uzavretý. Vďaka tomu sa podarilo nájsť inú optimálnu vetvu, ktorá robot dovedie bezpečne do cieľa.



Obr. 21 Pohyb robota bez rozšírenej definície zväčšovacieho uhla.



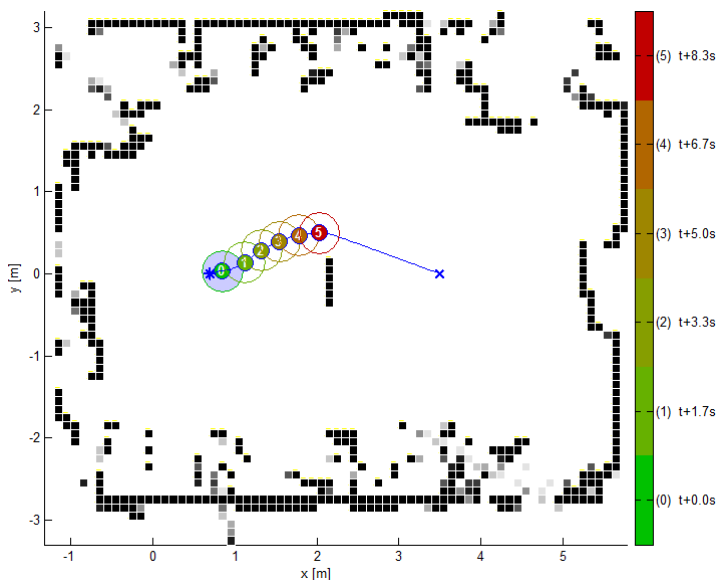
Obr. 22 Pohyb robota s rozšírenou definíciou zväčšovacieho uhla.

Experimenty s modifikovanou VFH* v reálnom prostredí

Experimenty prebiehali na mobilnom robote IndoorRobot v prostredí laboratória, kde bola pripravená scéna (Obr. 23) s asymetricky umiestnenou statickou prekážkou tak, aby ju bolo výhodnejšie obísť zľava než sprava (z pohľadu robota). Tento predpoklad sa naplnil pri spustení algoritmu bez pohyblivej prekážky (Obr. 24).



Obr. 23 Umiestnenie prekážky v prostredí laboratória.



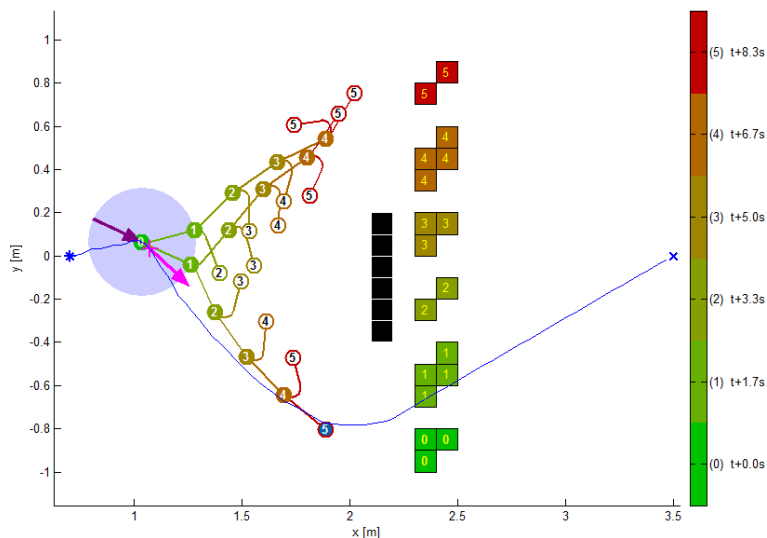
Obr. 24 Trasa robota v prostredí bez pohyblivej prekážky od času $t=1s$.

V ďalšom experimente bol k statickému objektu pridaný aj pohyblivý tak, aby vytváral kolíznú situáciu s robotom na pôvodnej trajektórii. Smer pohybu virtuálnej prekážky je v Obr. 23 znázornený zelenou farbou. Parametre pohyblivého objektu boli nastavené nasledovne:

$$P=\{x^R=0,7m, y^R=0m, \varphi^R=0^\circ, \{d_k=2,0m, \dots, d_{k+n}=2,0m\}, k=360, n=20, v_D=0,20m \cdot s^{-1}, \varphi_D=90^\circ\}$$

Robot bol schopný včas detegovať blížiacu sa hrozbu, preto zmenil smer a statickú prekážku obišiel sprava (Obr. 25). Robot tesne po štarte mieril ku ľavej strane statickej prekážky, čo nasvedčuje tomu, že prehľadávací strom svojimi koncovými uzlami ešte

nedosiahol do takej vzdialenosti, aby projekcia pohyblivej prekážky ovplyvnila výber optimálnej vetvy. Ak by sa použil prehľadavací strom s väčšou hĺbkou, prítomnosť projekcie pohyblivej prekážky by bola určená skôr a robot by bol schopný skorej reagovať.



Obr. 25 Detekcia kolíznej situácie a zmena smeru obchádzania.

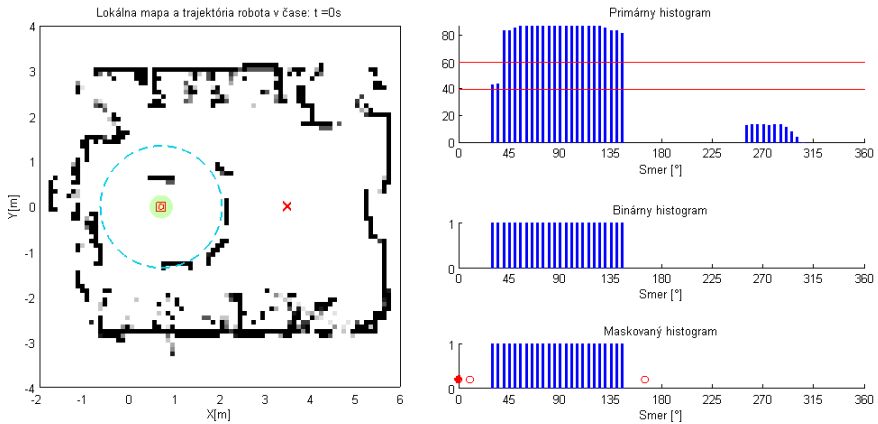
Verifikácia ohraničenia vychýľovacieho smeru

Pre vychýľovací smer boli zavedené obmedzujúce pravidlá podľa Obr. 9, aby robot nebol stromom navedený do priestoru, ktorý je blokovaný z pohľadu koreňového uzla. Na otestovanie spoľahlivosti a funkčnosti týchto obmedzení bola pripravená séria experimentov. Scéna pre jeden z nich je zobrazená na Obr. 26. V prostredí sa nachádzali len statické prekážky, ktoré prinútili robot výrazne sa vytočiť doľava už na začiatku svojho pohybu k cieľu. V počiatočnej pozícii robota boli pre názornosť zaznamenané histogramy (Obr. 27), ktoré vyznačujú blokované sektory ako aj kandidátske sektory v koreňovom uzle.

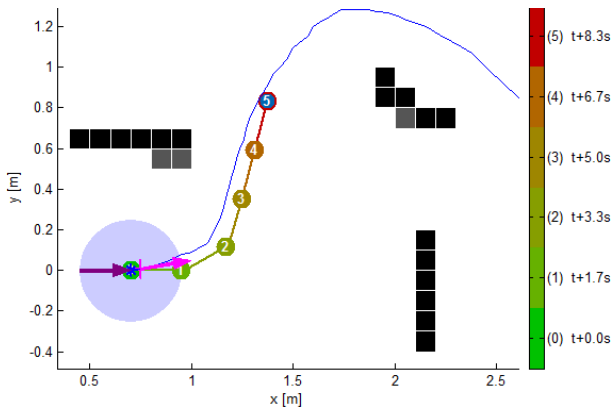
Pri tomto pokuse je na Obr. 28 evidentné, že vychýľovací uzel $i=5$ je pod uhlom 51° od koreňového uzla. Z histogramov na Obr. 27 možno vyčítať, že tento smer je blokovaný a najbližší dovolený smer leží v priestore kandidátskeho sektora pod uhlom 10° . To je dôvod orientácie purpurovej šípky na Obr. 28, ktorá znázorňuje smerovanie robota v ďalšom kroku. Bolo teda dokázané, že napriek umiestneniu prekážky do oblasti, cez ktorú by mal robot po vychýlení prejsť, nedôjde ku kolízii, pretože blokovanie sektorov v smere prekážky je nadradené voči uplatneniu vychýlenia.



Obr. 26 Rozloženie prekážok okolo robota pri testovaní ohraničenia vychýľovania.



Obr. 27 Mapa prostredia získaná po prejdení robota do cieľa. Vyznačená je počiatková poloha robota. V pravej časti sú histogramy vypočítané pre túto polohu.



Obr. 28 Optimálna vetva prehľadávacieho stromu v čase $t = 0s$. Vychýlenie smeru je ohraničené vplyvom blízkej prekážky.

6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Teoretické prínosy

- Výsledky revízie metód, odhaľujúce ich nedostatky a obmedzenia, môžu byť použité ako východiská pre nové úpravy algoritmov zamerané aj na iné oblasti než je táto práca.
- Zavedenie pojmu funkcia vplyvu aktívnej bunky $I_{i,j}$ a ohraničujúcich podmienok pre vytvorenie vlastnej funkcie s požadovaným tvarom. Tá vplyva na charakter pohybu robota.
- Vytvorenie zloženej funkcie $I^o_{i,j}$, ktorá upravuje tvar aktívneho okna na kruhový. Prínosom je, že použitím tejto funkcie robot reaguje zhodne na všetky prekážky v rovnakej vzdialenosti.

- Rozšírenie definície zväčšovacieho uhla $\gamma_{i,j}$, čo umožňuje blokovanie všetkých sektorov v prípade, že projekcia telesa robota zasiahne statickú prekážku alebo projekciu pohyblivej prekážky. Uzol stromu, vytvorený touto projekciou vo VFH* sa uzavrie ako nepriechodný.

- Zavedenie vlastného originálneho výpočtu histogramových hodnôt vo VFH+ ako maximum magnítud buniek v sektore. Výpočet tak nie je ovplyvnený irelevantnými prekážkovými bunkami, zmapovanými laserovým skenerom za viditeľnou časťou prekážky.

- Zavedenie reprezentácie pohyblivej prekážky formou výseku z dát laserového skenera, ktorý sa do histogramovej mriežky mapuje len na okamih projekcie pohyblivej prekážky pre konkrétny uzol prehľadávacieho stromu upravenej metódy VFH*.

- Použitie výpočtu časovej zmeny v jednotlivých uzloch stromu s prislúchajúcou projekciou pohyblivej prekážky do histogramovej mriežky. Je to kľúčová úprava pre využitie metódy VFH* v dynamickom prostredí. Za základ tejto metódy bola použitá upravená metóda VFH+.

- Zavedenie vychýľovacieho smeru θ , spolu s ohraničeniami rešpektujúcimi geometrické a dynamické obmedzenia robota v aktuálnej pozícii. Táto doplnujúca úprava metódy VFH* včas zachytí budúce smerovanie robota dané optimálnou vetvou stromu. Aplikáciou tohto pravidla sa v mnohých prípadoch dosiahne skrátenie dráhy robota pri presune zo štartu do cieľa.

Praktické prínosy

- Výsledky dizertačnej práce sú prakticky využiteľné pri riešení projektu „Inteligentná navigácia servisného robota“ (VEGA 1/0177/11).

- V projekte s názvom „BioMRCS - Biologicky inšpirované metódy pre koordináciu skupinového pohybu mobilných robotov“ (APVV-0261-10) sa výsledky práce prakticky uplatnia pri implementácii základnej lokálnej bezkolíznej navigácie robotických agentov.

- Vzhľadom na využitie laserového skenera a rozšírenie oblasti použitia aj na dynamické prostredia, modifikované metódy je možné použiť aj ako základ bezpečnostných asistenčných systémov v automobiloch [34].

- V neposlednom rade sú modifikované metódy prakticky využiteľné aj v priemyselných mobilných robotoch ako doplnková lokálna navigácia k ich globálne naplánovanej ceste.

7 ZÁVER

Vzhľadom na to, že sa mobilná robotika dostáva do bežnej praxe, zvyšovanie navigačných schopností robotov je veľmi aktuálna téma. V dizertačnej práci sa podarilo navrhnuť mnoho užitočných modifikácií histogramových metód VFH+ a VFH*, ktorých prínos bol overený v experimentoch. Boli realizované úpravy, ktoré vplyvajú na charakter pohybu robota a jeho rovnomernú reakciu na prekážky. Ďalej boli vytvorené modifikácie výpočtu histogramových hodnôt zamerané na použitie moderných snímačov ako je laserový skener. Realizované boli aj úpravy umožňujúce bezkolízny pohyb robota v dynamickom prostredí, čo s pôvodnou metódou nebolo možné. Boli teda splnené všetky ciele práce.

Táto dizertačná práca bola tvorená s podporou projektu VEGA 1/0177/11 s názvom „Inteligentná navigácia servisného robota“ a projektu APVV-0261-10 s názvom „BioMRCS - Biologicky inšpirované metódy pre koordináciu skupinového pohybu mobilných robotov“. Realizácia bola vykonaná na Oddelení robotiky a umelej inteligencie Ústavu riadenia a priemyselnej informatiky, FEI STU v Bratislave.

8 LITERATÚRA

- [1] NOF, S. Y., Handbook of Industrial Robotics, 1999.
- [2] EVANS, J. M., „HelpMate: an autonomous mobile robot courier for hospitals,“ rev. *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94.*, Munich, 1994.
- [3] COSMA, C.; a i., „An autonomous robot for indoor light logistics,“ rev. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on IROS 2004*, Sendai, Japan, 2004.
- [4] KNICHEL, D.G.; BREUMMER, D.J., „From the laboratory to the soldier: providing tactical behaviors for Army robots,“ rev. *Proc. SPIE 6962, Unmanned Systems Technology X*, Orlando, FL, USA, 2008.
- [5] HVILSHOEJ, M.; a i., „Autonomous industrial mobile manipulation (AIMM): past, present and future,“ *Industrial Robot. Vol. 39, no. 2*, pp. 120-135, 2012.
- [6] DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.; KLÚČIK, M., „Výstava Automatica 2012,“ *ATP Journal*, 8 / 2012.
- [7] DUCHOŇ, F., Snímače v mobilnej robotike, Bratislava: STU v Bratislave, 2012. ISBN 978-80-227-3801-9.
- [8] DUCHOŇ, F., Lokalizácia a navigácia mobilných robotov do vnútorného prostredia, Bratislava: STU v Bratislave, 2012. ISBN 978-80-227-3646-6.
- [9] DEKAN, M., „Globálna navigácia pre mobilný robot,“ *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, pp. 28-29, 4 / 2012.
- [10] BRÄUNL, T., „Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems,“ rev. *Embedded Robotics*, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
- [11] CHOSET, H.; a i., Principles of Robot Motion, Boston: MIT Press, 2005.
- [12] LIU, Y.-H.; ARIMOTO, S., „Proposal of Tangent Graph and Extended Tangent Grapg for Path Planning of Mobile Robots,“ rev. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, 1991.
- [13] NIEMULLER, T.; WIDYADHARMA, S., „Artificial Intelligence - An Introduction to Robotics,“ *Proseminar Artificial Intelligence*, 2003.
- [14] SIEGWARD, R.; NOURBAKSH, I. R., Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press, 2004.
- [15] JURÍŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A., „Štandardná smerová reaktívna navigácia mobilných robotov,“ *AT&P Journal*, 8 / 2010.
- [16] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y., „The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots,“ *IEEE Journal of Robotics and Automation*, zv. 7/3, 1991.
- [17] BABINEC, A.; VITKO, A., „Histogramové navigačné algoritmy - vývoj a princíp,“ *Automa*, pp. 26-29, 5/2010.
- [18] JURÍŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A., „Moderné trendy v prístupoch k reaktívnej smerovej navigácii mobilných robotov,“ *ATP Journal*, 2 / 2011.
- [19] ULRICH, I.; BORENSTEIN, J., „VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots,“ rev. *Proceedings of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, 5/1998.
- [20] ULRICH, I.; BORENSTEIN, J., „VFH*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead

- Verification," rev. *Proceedings of the IEEE International Conference of Robotics and Automation*, 4/2000.
- [21] JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A., „Rýchlostné metódy reaktívnej navigácie mobilných robotov," *AT&P Journal*, 9 / 2010.
- [22] FOX, D.; BURGARD, W.; THRUN, S., „The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," *IEEE Robotics and Automation*, zv. 4/1, 1997.
- [23] SIMMONS, R., „The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance," rev. *International Conference on Robotics and Automation*, Pittsburgh, PA, 1996.
- [24] MINGUEZ, J.; MONTANO, L., „Nearness Diagram Navigation (ND) (A New Real Time Collision Avoidance Approach)," rev. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
- [25] AN, D.; WANG, H., „VPH: A New Laser Radar Based Obstacle Avoidance Method for Intelligent Mobile Robots," rev. *IEEE 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, NJ, USA, 2004.
- [26] YE, C., „Navigating a Mobile Robot by a Traversability Field Histogram," rev. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2007.
- [27] YE, C.; BORENSTEIN, J., „T-transformation: Traversability Analysis for Navigation on Rugged Terrain," rev. *Proceedings of the Defense and Security Symposium, Unmanned Ground Vehicle Technology VI*, Orlando, FL, 2004.
- [28] GOLUB, D. H.; LOAN, C. F. Van, *Matrix Computations*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
- [29] HAMAD, A. H.; IBRAHIM, F. B., „Path Planning of Mobile Robot Based on Modification of Vector Field Histogram using Neuro-Fuzzy Algorithm," *International Journal of Advancements in Computing Technology*, zv. 2/3, 2010.
- [30] DONG, J.; MA, X.; PENG, K., „IVFH*: Real-time dynamic obstacle avoidance for mobile robots," rev. *11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 2010.
- [31] YOU, B.; QIU, J.; LI, D., „A Novel Obstacle Avoidance Method for Low-Cost Household Mobile Robot," rev. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China, 2008.
- [32] ZHU, Y.; a i., „A new method for mobile robots to avoid collision with moving obstacle," *Artificial Life and Robotics*, pp. 507-510, 2012.
- [33] BABINEC, A.; a i., „Modifications of VFH Navigation Methods for Mobile Robots," *Procedia Engineering*, Vol. 48, pp. 10-14, 2012.
- [34] DUCHOŇ, F.; a i., „Intelligent Vehicles as the Robotic Applications," *Procedia Engineering*, zv. 48, pp. 105-114, 2012.

Publikované práce autora

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; KAŠTAN, D.; BABINEC, A.: „High Precision GNSS Guidance for Field Mobile Robots“. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 9 (2012), s. 169-178

Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch - indexované

BABINEC, A.; DEKAN, M.; DUCHOŇ, F.; VITKO, A.: „Modifications of VFH navigation methods for mobile robots“. *Procedia Engineering*, ISSN 1877-7058, Vol. 48 (2012), s. 10-14

DEKAN, M.; CHOVANEC, L.; BABINEC, A.; VITKO, A.: „New Modules for the iRobot Create Platform“. *Procedia Engineering*, ISSN 1877-7058, Vol. 48 (2012), s. 65-72

DUCHOŇ, F.; HUBINSKÝ, P.; HANZEL, J.; BABINEC, A.; TÖLGYESSY, M.: „Intelligent Vehicles as the Robotic Applications“. *Procedia Engineering*, ISSN 1877-7058, Vol. 48 (2012), s. 105-114

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.; DEKAN, M.; KAŠTAN, D.; KLÚČIK, M.: „Navigation and Diagnosis of Walking Robot“. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 2 (2012), s. 568-572

DUCHOŇ, F.; HUŇADY, D.; DEKAN, M.; BABINEC, A.: „Optimal navigation for mobile robot in known environment“. *Applied Mechanics and Materials – (v tlači)*.

Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

BABINEC, A.; VITKO, A.: „Histogramové navigačné algoritmy - vývoj a princíp“. *Automa*, ISSN 1210-9592, Roč. 16, č. 5 (2010), s. 26-29

Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

DEKAN, M.; VITKO, A.; TÖLGYESSY, M.; BABINEC, A.: „Globálna navigácia pre mobilný robot“. *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, Roč. 18, č. 4 (2012), s. 28-29

JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.: „Moderné trendy v prístupoch k reaktívnej smerovej navigácii mobilných robotov“. *ATP Journal*, ISSN 1335-2237, Roč. 18, č. 2 (2011), on-line

JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.: „Rýchlostné metódy reaktívnej navigácie mobilných robotov“. *AT&P Journal*, ISSN 1335-2237, Roč. 17, č. 9 (2010), on-line

JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.: „Štandardná smerová reaktívna navigácia mobilných robotov“. *AT&P Journal*, ISSN 1335-2237, Roč. 17, č. 8 (2010), on-line

KLÚČIK, M.; DUCHOŇ, F.; JURIŠICA, L.; VITKO, A.; BABINEC, A.: „Detekcia miest zvaru pre automatizované zvráňanie veľkokapacitných nádrží a potrubí“. *Zvárač*, ISSN 1336-5045, Roč. 8, č. 4 (2011), s. 12-15

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; HANZEL, J.; KLÚČIK, M.; BABINEC, A.; DEKAN, M.; KAŠTAN, D.: „Advanced Control of a Waking Platform“. *ATP Journal plus*, ISSN 1336-5010, č. 1 : Systémy automatického riadenia (2011), s. 61-64

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.; DEKAN, M.; KLÚČIK, M.: „Detekcia, identifikácia a klasifikácia porúch servisného robota : Časť I - poruchy kladenia nôh 6-nohého robota“. *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, Roč. 18, č. 4 (2012), s. 30-32

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; BABINEC, A.; DUCHOŇ, F.; KLÚČIK, M.: „Resolution of Robot Kinematic Redundancy as a Problem of Adaptive Control“. *AT&P Journal Plus*, ISSN 1336-5010, Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), s. 58-61

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; BABINEC, A.; DUCHOŇ, F.; KLÚČIK, M.: „Some Didactic Aspects of Teaching Robotics“. *AT&P Journal Plus*, ISSN 1336-5010, Č. 2. Robotika vo vzdelávaní (2010), s. 109-112

Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

REBOUR, Y.; VIRK, S. G.; VITKO, A.; JURIŠICA, L.; KARDOŠ, J.; DUCHOŇ, F.; KLÚČIK, M.; BABINEC, A.; DEKAN, M.: „Robot Navigation“. *Selected Topics in Modelling and Control*, Vol. 7, Slovak University of Technology in Bratislava, 2011, ISBN 978-80-227-3597-1, S. 79-86

VIRK, S. G.; REBOUR, Y.; VITKO, A.; JURIŠICA, L.; KARDOŠ, J.; DUCHOŇ, F.; KLÚČIK, M.; BABINEC, A.; DEKAN, M.: „Current Issues in Mobile Robotics“. *Selected Topics in Modelling and Control*, Vol. 7, Slovak University of Technology in Bratislava, 2011, ISBN 978-80-227-3597-1, S. 87-94

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; BABINEC, A.: „Generation of Smooth Motion of Reactively Navigated Mobile Robot“. *Selected Topics in Modelling and Control*, Vol. 6, Slovak University of Technology in Bratislava, 2010, ISBN 978-80-227-3318-2, S. 124-128

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

KLÚČIK, M.; PÁSZTÓ, P.; BABINEC, A.; JURIŠICA, L.; HANZEL, J.; RODINA, J.: „The Search for Optimal Trajectories of the Welding Tool in the Automatic Welding Line Using Evolutionary Computation“. *IN-TECH 2012 : Proceedings of International Conference on Innovative Technologies*, Rijeka, Croatia, 26 - 28 September 2012, Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, ISBN 978-953-6326-77-8, S. 229-232

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.; DEKAN, M.; KAŠTAN, D.; KLÚČIK, M.; BACHRATÝ, M.: „Simultaneous Navigation and Fault Detection of Legged Robot“. *Robotics in Education 2011: 2nd International Conference*, Vienna, Austria, 15-16 August 2011, INNOC, 2011, ISBN 978-3-200-02273-7, S. 91-94

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

BABINEC, A.; DUCHOŇ, F.: „Metódy reaktívnej navigácie mobilného robota v neznámom prostredí“. *Nové trendy v kybernetike, automatizácii a informatike*: Odborný seminár, Gabčíkovo, Slovenská republika, 7-9 September 2009, STU v Bratislave FEI, 2009, ISBN 978-80-227-3107-2, CD-Rom

Citované v:

HUBINSKÝ, P.; RODINA, J.: „Hybrid Control of the Mono Axial Vehicle“. *AT&P Journal Plus*, ISSN 1336-5010, Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), Bratislava : HMH, s.r.o., s. 84-88

RODINA, J., HUBINSKÝ, P.: „Mono Axial Vehicle platform for education purposes“. *Proceedings of the 1st International Conference on Robotics in Education*, Bratislava, Slovakia, Sept. 16 - 17, 2010, ISBN 978-80-227-3353-3, s. 139-145

BABINEC, A.; VITKO, A.; DUCHOŇ, F.; DEKAN, M.: „Reactive Navigation of Mobile Robot Using Vector Field Histogram“. Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. MMaMS 2011 [elektronický zdroj] : *Proceedings of the 4th International Conference*, Herľany, Slovakia, 20- 22 September 2011, Technická univerzita v Košiciach, 2011, ISBN 978-80-553-0731-2, CD-Rom

Citované v:

RODINA, J.; HUBINSKÝ, P.: „Advanced control of the mono axial vehicle with variable parameters“. *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-7058, Vol. 48 (2012), s. 592-598

DUCHOŇ, F.; BABINEC, A.; DEKAN, M.; VITKO, A.; JURIŠICA, L.: „Reaktivná navigácia ako prostriedok bezkolízneho správania sa mobilného robota“. ROBTÉP 2011, *Automatizácia / Robotika v teórii a praxi: Zborník príspevkov z 11. medzin.konferencie*, Košice, 16. December 2011, Technická univerzita v Košiciach, 2011, ISBN 978-80-553-0846-3, S. 59-66

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; DUCHOŇ, F.; KEŤČIK, M.; BABINEC, A.; DEKAN, M.: „Neural Tuning of Fuzzy Rules (with Application to Robot Navigation)“. Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems. MMaMS 2011 [elektronický zdroj] : *Proceedings of the 4th International Conference*, Herľany, Slovakia. 20- 22 September 2011, Technická univerzita v Košiciach, 2011, ISBN 978-80-553-0731-2, CD-Rom

VITKO, A.; JURIŠICA, L.; BABINEC, A.; DUCHOŇ, F.; KEŤČIK, M.: „Some Didactic Problems of Teaching Robotics“. *Robotics in Education 2010 : Proceedings of the 1st International Conference*, Bratislava, 16-17 September.2010, Slovak University of Technology in Bratislava, 2010, ISBN 978-80-227-3353-3, S. 27-30

Citované v:

BREDFELD, A.; HOFMANN, A.; STEINBAUER, G.: „Robotics in Education Initiatives in Europe - Status, Shortcomings and Open Questions“. *Proceedings of SIMPAR*, Darmstadt (Germany), Nov. 15-16, 2010, ISBN 978-3-00-032863-3, s. 568-574.

ORTIZ, J.; BUSTOS, R.; RIOS, A.: „System of Indicators and Methodology of Evaluation for the Robotics in Classroom“. *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education*, 2011, s. 63 – 70

KELEMEN, M.; FABIAN, M.; KELEMENOVÁ, T.: „Design and Development of Lift Didactic Model Within Subjects of Mechatronics“. *Procedia Engineering*, ISSN 1877-7058, Vol. 48 (2012), s. 280–286