

# Moderné trendy v prístupoch k reaktívnej smerovej navigácii mobilných robotov

Ladislav Jurišica, František Duchoň, Andrej Babinec

## Abstrakt

Cieľom článku je stručne opísať moderné metódy uplatňujúce sa pri reaktívnej navigácii mobilných robotov. Dôležitou súčasťou výberu metódy reaktívnej navigácie je analýza dostupných snímačov a teda aj voľba odpovedajúcej metódy. Článok sa zaoberá metódami VFH určenými najmä pre ultrazvukové snímače a metódou obstacle-restriction, ktorá je určená pre laserový snímač vzdialenosti.

**Kľúčové slová:** reaktívna navigácia, histogramové metódy, VFH, obstacle-restriction

## Úvod

Metódy reaktívnej navigácie predpisujú také správanie sa mobilnému robotu, ktoré zabezpečuje bezkolízny prechod robota prostredím. Medzi takéto metódy patria histogramové metódy a metóda obstacle-restriction. Histogramové metódy sú navrhnuté najmä pre roboty používajúce nepresné ultrazvukové snímače. Tieto metódy teda zohľadňujú nepresnosť týchto snímačov, ale zahŕňajú v sebe aj obmedzenia od dynamiky a tvaru robota. Obstacle-restriction metóda naopak pracuje s údajmi z presných laserových snímačov. Obe metódy sa zaraďujú medzi moderné reaktívne navigácie mobilných robotov, ktoré robotu predpisujú smer pohybu v ďalšom kroku.

## 1. Histogramové metódy [1]

Na odstránenie nedostatkov metód umelých potenciálových polí navrhli Borenstein a Koren metódu nazvanú "vector field histogram" (VFH). Histogramové metódy oproti iným algoritmom reaktívnej navigácie využívajú aj predchádzajúce údaje zo snímačov, nielen tie aktuálne (t.j. vytvárajú lokálnu metrickú mapu). Metodológia VFH nadväzuje na prístup VFF, avšak využíva celú lokálnu metrickú mapu, nielen zredukované dáta v podobe výslednej odpudivej sily. VFH preto používa tri úrovne reprezentácie dát zo snímačov:

1. Na prvej úrovni sú uložené informácie o okolí robota vo vopred definovanej mriežke, podobne ako pri VFF.
2. Na druhej úrovni sú dáta z prvej úrovne zredukované na jednorozmerný polárny histogram  $H$ . Tento histogram sa skladá z  $n$  uhlových sektorov veľkosti  $\alpha$  a hodnota každého  $k$ -teho sektora predstavuje intenzitu prekážok v tomto sektore -  $h_k$ .
3. Poslednou dátovou úrovňou je výsledok algoritmu, teda určený smer robota v ďalšom kroku vychádzajúci z polárneho histogramu.

### 1.1 VFH [1] [2][3]

Rozdiel medzi jednotlivými histogramovými metódami spočíva v spôsobe vytvorenia histogramu (resp. histogramov) a vyhodnotenia informácie z tohto histogramu. Pri klasickom prístupe VFH metódy sa podobne ako pri VFF uvažuje s mriežkou veľkosti  $w \times w$  a aktívnymi (nenulovými) bunkami  $c_{i,j}$ . Obsah každej bunky je interpretovaný ako vektor smerujúci z pozície danej bunky do ťažiska robota (umiestnenom v strede mriežky) pod uhlom  $\beta_{i,j}$  a s veľkosťou  $m_{i,j}$ . Platí teda:

$$\beta_{i,j} = \arctg \frac{y_{i,j} - y_0}{x_{i,j} - x_0} \quad (1)$$

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

kde  $a$ ,  $b$  sú konštanty slúžiace na nastavenie nulového vplyvu okrajových buniek mriežky,  $c_{i,j}$  sú hodnoty jednotlivých aktívnych buniek,  $d_{i,j}$  sú vzdialenosti buniek od ťažiska robota,  $x_{i,j}$ ,  $y_{i,j}$  sú súradnice aktívnych buniek v mriežke a  $x_0$ ,  $y_0$  sú súradnice ťažiska robota.

Pre vytvorenie histogramu je potrebné zvoliť rozlišovaciu schopnosť  $\alpha$ , teda veľkosť jednotlivých uhlových sektorov:

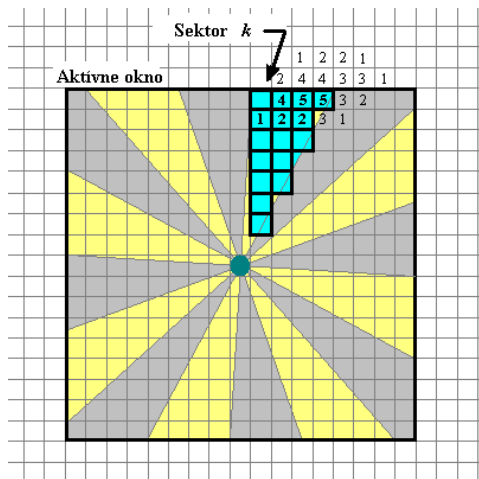
$$n = \frac{360}{\alpha}, \quad (3)$$

kde  $n \in \mathbb{N}$ . Vznikne tak  $n$  uhlových sektorov (Obr. 1). Každý uhlový sektor ma priradený diskretný uhol  $\rho_k$  kvantovaný násobkami  $\alpha$ :

$$\rho_k = k\alpha, \quad (4)$$

kde  $k = 0, 1, \dots, n-1$ . Príslušnosť bunky  $c_{i,j}$  do  $k$ -teho uhlového sektora je daná vzťahom:

$$k = INT\left(\frac{\beta_{i,j}}{\alpha}\right)$$



Obr.1 Rozdelenie mriežky na sektory

Fig.1 Grid division on sectors

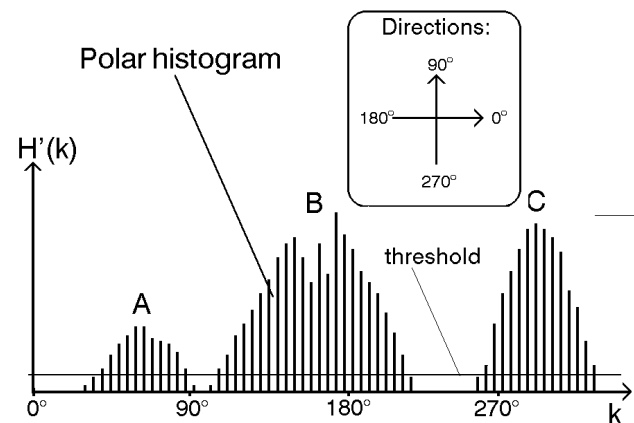
Ku každému sektoru môžu byť priradené intenzity prekážok  $h_k$  podľa vzťahu:

$$h_k = \sum_{i,j} m_{i,j} \quad (6)$$

Na zjemnenie nerovností histogramu je možné použiť vyhladzovaciu funkciu napríklad v tvare dolno-priepustného filtra (Obr. 2):

$$h'_k = \frac{h_{k-l} + 2h_{k-l+1} + \dots + lh_k + \dots + 2h_{k+l-1} + h_{k+l}}{2l+1}, \quad (7)$$

kde  $l$  je počet susedných hodnôt, ktoré sa pri vyhladzovaní uvažujú.



Obr.2 Príklad vyhladeného polárneho histogramu [1]

Fig.2 Example of smoothed polar histogram

Stanovením prahovej intenzity hodnoty prekážok sa definujú sektory s nižšou hodnotou než je daný prah. Tieto sektory sa potom stanú kandidátmi na prechod medzi prekážkami. V nasledujúcom kroku treba vyhodnotiť veľkosť možných prechodov. Prechody sú ohodnotené počtom sektorov s podprahovou hodnotou -  $s$ . Zvolením hranice  $s_{max}$  sa prechody rozdelia na široké ( $s \geq s_{max}$ ) a úzke ( $s < s_{max}$ ). K definovanému cieľu z globálneho systému je možné nájsť okraj prechodu najbližší k smeru do cieľa. Tento sektor označme ako  $k_n$ . Na stanovenie nového smeru robota  $\theta$  je však potrebné určiť aj sektor  $k_f$ , ktorý leží v tom istom

prechode. Jeho určenie závisí od toho, či je prechod úzky alebo široký. Ak je prechod široký:

$$k_f = k_n + s_{max} \quad (8)$$

Ak je prechod úzky  $k_f$  je opačným okrajovým sektorom ku  $k_n$ . Smer robota je potom predpísaný vzťahom:

$$\theta = \frac{k_f + k_n}{2} \quad (9)$$

Aplikáciou takéhoto prístupu vznikne také správanie sa robota, že pri úzkych prechodoch (medzi prekážkami) sa robot drží v strede týchto prechodov, kým pri širokých prechodoch sa robot drží pri prekážke, ktorá je bližšie k cieľu a túto prekážku obíde rovnomerne bez oscilácií.

## 1.2 VFH+ [4]

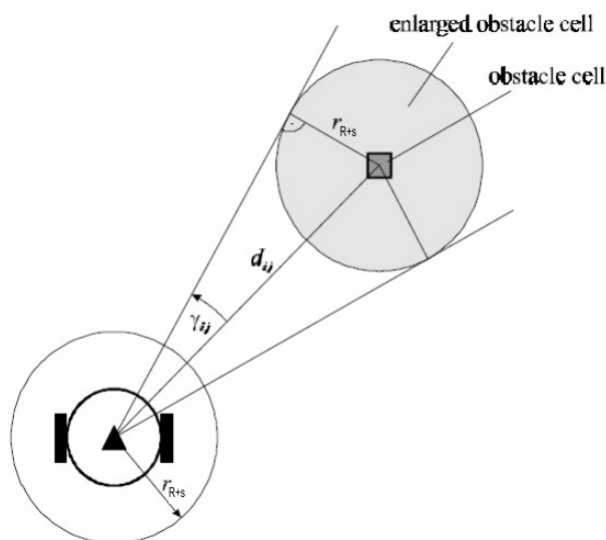
Pôvodná VFH metóda nezohľadňuje dynamiku ani rozmery robota, preto sa môže stať, že použitie tejto metódy predpíše robotu taký smer, na ktorý sa okamžite nedokáže otočiť a z dôvodu, že sa pohybuje určitou rýchlosťou, narazí do prekážky. Metóda VFH+ zohľadňuje dynamiku aj rozmery robota, vyhladzuje histogram bez aplikácie dolnopriepustného filtra a uplatňuje zložitejší princíp určenia nového smeru robota, ktorý umožňuje prispôsobiť správanie robota podľa jeho účelu. Z pôvodnej dvojstupňovej redukcie dát, tak vznikne štvorstupňová redukcia.

1. Primárny histogram  $H^p$  je vytvorený podobne ako pri klasickej metóde VFH s rozšírením, že jednotlivé bunky sa zväčšia na kruh s polomerom  $r_{R+s}$  (Obr. 3):

$$r_{R+s} = r_R + d_s, \quad (10)$$

kde  $r_R$  je polomer robota a  $d_s$  je bezpečná vzdialenosť, ktorú má robot dodržiavať od prekážok. Pre každú bunku tak vznikne zväčšovací uhol  $\gamma_{i,j}$  (Obr. 3):

$$\gamma_{i,j} = \arcsin \frac{r_{R+s}}{d_{i,j}} \quad (11)$$



Obr.3 Zväčšenie aktívnej bunky [4]

Fig.3 Enlargement of active cell

Potom sa hodnoty v jednotlivých sektoroch počítajú podľa vzťahu:

$$H_k^p = \sum_{i,j} m_{i,j} h'_{i,j}, \quad (12)$$

kde

$$h'_{i,j} = 1 \text{ ak } k\alpha \in \langle \beta_{i,j} - \gamma_{i,j}; \beta_{i,j} + \gamma_{i,j} \rangle$$

$$h'_{i,j} = 0 \text{ inak}$$

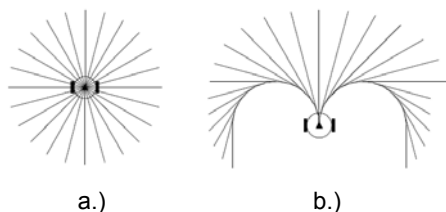
2. Pôvodný algoritmus niekedy osciloval medzi dvoma úzkymi prechodmi, ktoré sa vyskytovali blízko k cieľu, preto bol zavedený binárny polárny histogram  $H^b$ . Táto redukcia dát je založená na použití dvoch prahov  $\tau_{low}$  a  $\tau_{high}$ . Histogram  $H^b$  sa tvorí z histogramu  $H^p$  na základe týchto vzťahov:

$$H_k^b = 1 \text{ ak } H_k^p > \tau_{high}$$

$$H_k^b = 0 \text{ ak } H_k^p < \tau_{low}$$

$$H_k^b = H_{k-1}^b \text{ inak}$$

3. Vytvorenie polárneho histogramu s maskou  $H^m$  počíta s dynamickými obmedzeniami robota. Kým pôvodná verzia VFH počítala, že robot je schopný presunúť sa z pôvodnej pozície do novej po priamke, VFH+ počíta s aproximáciou trajektórie robota kruhovými oblúkmi s krivosťou  $\kappa = \frac{1}{r}$ , ktorá závisí od rýchlosti robota (Obr. 4).

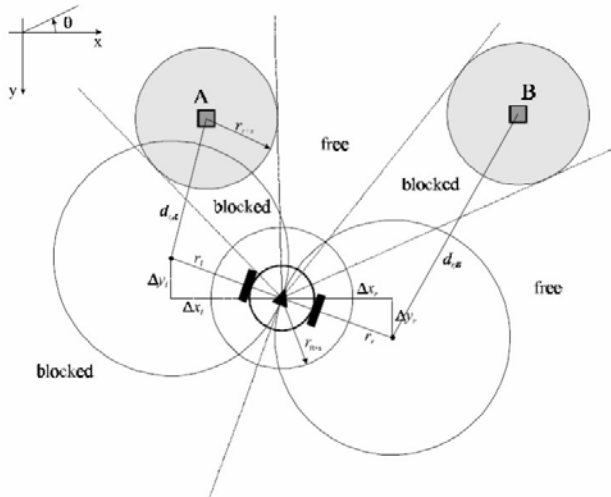


**Obr.4** Predpokladané trajektórie pri a.) VFH b.) VFH+ [4]

**Fig.4** Expected trajectories a.) VFH b.) VFH+

Po stranách robota sa teda vytvoria kružnice, ktorých stredy sú posunuté od ťažiska robota o (Obr. 5):

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= r_r \sin \theta & \Delta x_l &= -r_l \sin \theta \\ \Delta y_r &= r_r \cos \theta & \Delta y_l &= -r_l \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$



**Obr.5** Príklady blokových smerov [4]

**Fig.5** Examples of blocked directions

Histogram  $H^m$  možno vytvoriť porovnaním kružnic trajektórie a kružnic okolo aktívnych buniek. Ak sa pretínajú, všetky sektory, ktoré sa nachádzajú od  $\beta_{i,j}$  naľavo pre ľavú kružnicu a napravo pre pravú kružnicu až po smer, ktorý predstavuje spätný chod robota, sú blokováné. Vzdialenosti aktívnych buniek od stredu kružnic trajektórií sú dané vzťahmi:

$$d_r^2 = (\Delta x_r - \Delta x_j)^2 + (\Delta y_r - \Delta y_j)^2$$

$$d_l^2 = (\Delta x_l - \Delta x_j)^2 + (\Delta y_l - \Delta y_j)^2 \quad (14)$$

Prekážka blokuje smer cesty napravo od nej, ak platí:

$$d_r < (r_r + r_{R+s})$$

Prekážka blokuje smer cesty naľavo od nej, ak platí:

$$d_l < (r_l + r_{R+s})$$

Pre každú stranu možno nájsť limitné uhol  $\varphi_r$ , resp.  $\varphi_l$ , ktoré určujú, aký je maximálny možný dovolený smer vpravo, resp. vľavo. Nech  $\varphi_b$  je smer robota vzad, teda:

$$\varphi_b = \theta + \pi \quad (15)$$

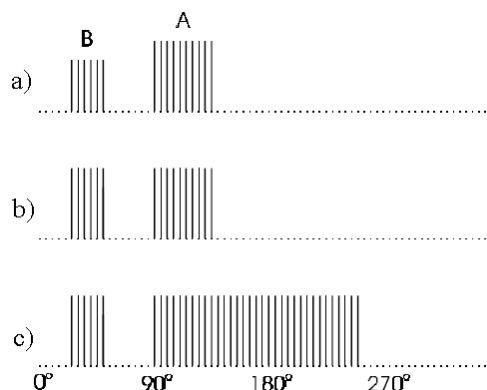
Nech na začiatku platí, že  $\varphi_r = \varphi_l = \varphi_b$ . Potom pre každú aktívnu bunku sa vykonajú tieto kroky:

- Ak je  $\beta_{i,j}$  napravo od  $\theta$  a naľavo od  $\varphi_r$ , potom sa skontroluje podmienka pre  $d_r$ . Ak je podmienka splnená, potom  $\varphi_r = \beta_{i,j}$ .
- Ak je  $\beta_{i,j}$  naľavo od  $\theta$  a napravo od  $\varphi_l$ , potom sa skontroluje podmienka pre  $d_l$ . Ak je podmienka splnená, potom  $\varphi_l = \beta_{i,j}$ .

Po kontrole každej bunky je možné vytvoriť z histogramu  $H^b$  histogram  $H^m$  podľa pravidiel (Obr. 6):

$$H_k^m = 0 \text{ ak } H_k^b = 0 \wedge k\alpha \in \langle \varphi_r, \theta \rangle, \langle \theta, \varphi_l \rangle$$

$$H_k^m = 1 \text{ inak}$$



**Obr.6** Histogram a.)  $H^p$  b.)  $H^b$  c.)  $H^m$  [4]

**Fig.6** Histogram a.)  $H^p$  b.)  $H^b$  c.)  $H^m$

Polárny histogram s maskou vyjadruje, ktoré smery sú pri danej rýchlosti robota povolené. Ak by v ňom boli zablokováné všetky smery, je potrebné znížiť rýchlosť robota a tento histogram vytvoriť nanovo. Ak sú v tomto novom histograme opäť zablokováné všetky smery, robot musí

zastaviť, pretože sa s vysokou pravdepodobnosťou ocitol v mieste, odkiaľ nevie dosiahnuť cieľ.

4. V poslednom kroku je potrebné vybrať nasledujúci smer robota. Nie vždy však musí byť najvhodnejší ten, ktorý je najbližšie k smeru do cieľa. Preto sa v prvom kroku výberu neuvažuje so smerom k cieľu. V histograme  $H^m$  sa rozpoznávajú všetky priechody. V úzkych prechodoch sa ako kandidátske smery označia stredy prechodov. V širokých prechodoch sa nájdu dva potenciálne smery podobne ako pri VFH, avšak pre obe hranice prechodu. Ak sa smer do cieľa nachádza medzi ľavým a pravým kandidátom zo širokého prechodu, medzi kandidátov sa zahrnie aj tento smer. Všetky kandidátske smery potom vstupujú do procesu výberu pomocou funkcie:

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, k_s) + \mu_2 \Delta\left(c, \frac{\theta_s}{\alpha}\right) + \mu_3 \Delta(c, k_{n,s-1}), \quad (16)$$

kde funkcia  $\Delta(a, b)$  vracia najmenší rozdiel uhlov medzi sektormi  $a$  a  $b$ ,  $c$  je kandidátsky sektor,  $k_s$  je sektor, v

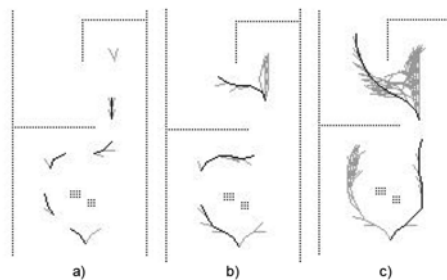
ktorom leží cieľ, index  $\frac{\theta_s}{\alpha}$  predstavuje sektor, do ktorého

sú natočené kolesá v aktuálnom kroku  $s$  a  $k_{n,s-1}$  je sektor, ktorý bol zvolený ako najvhodnejší v predošlom kroku. Prvý sčítanec ohodnocuje funkciu na základe odchýlky kandidátskeho smeru od cieľa, druhý ohodnocuje funkciu na základe potrebného natočenia kolies do kandidátskeho smeru a tretí na základe rozdielu medzi kandidátskym smerom a predošlým smerom. Konštanty  $\mu$  nastavujú charakter správania sa robota. Najlepší smer je potom ten, ktorý ma najmenšiu hodnotu funkcie  $g(c)$ .

### 1.3 VFH\* [5]

Metódy reaktívnej navigácie majú často jeden spoločný nedostatok. Ak sa pred robotom v smere pohybu do cieľa objaví prekážka, robot sa nevie optimálne rozhodnúť, či ju má obísť z pravej alebo ľavej strany. Dôvodom sú obmedzenia vyplývajúce zo snímačov, robot teda vníma len blízke okolie. Nevie teda vyhodnotiť, aká situácia nastane, keď sa pohne jedným alebo druhým smerom. Aplikovaním metódy VFH\* je možné analyzovať aj dôsledky pohybu všetkými prípustnými smermi.

Na základe polárneho histogramu  $H^p$  sa určia kandidátske smery. Pre každý takýto smer sa určí nová poloha a orientácia robota, ktorú by robot mal po prejení dráhy  $d_s$ . Pre tieto plánované pozície sa z lokálnej metrickej mapy prostredia stanoví polárne histogramy, ktorých analýzou vzniknú budúce kandidátske smery pre terajšie kandidátske smery. Opakovaním tohto postupu  $n_\alpha$ -krát je možné zostaviť strom trajektórií s celkovou plánovanou dráhou  $d_i = n_\alpha d_s$ . Výber správneho terajšieho smeru je podmienený najnižšou hodnotou cesty vypočítanej na základe heuristickej funkcie  $h(c)$ , podobnej funkcií  $g(c)$  z VFH+.



Obr.7 Strom trajektórií pre a.)  $n_\alpha = 2$  b.)  $n_\alpha = 5$  c.)

$n_\alpha = 10$ . Tmavé krivky určujú naplánovanú cestu. [5]

Fig.7 Trajectories tree a.)  $n_\alpha = 2$  b.)  $n_\alpha = 5$  c.)

$n_\alpha = 10$ . Dark lines indicate planned path.

Pri aplikovaní metódy VFH\* sa robot vie rozhodnúť účinnšie pre správny smer, čím viac do hĺbky dokáže vytvoriť strom trajektórií. Počet vetvení  $n_\alpha$  je závislý od veľkosti lokálnej metrickej mapy (Obr. 7). Nie je preto vhodné používať  $n_\alpha$  väčšie ako sú možnosti senzorov preskúmať okolie robota.

### 1.4 Scaled VFH [6]

Napriek tomu, že táto úprava nasleduje chronologicky za VFH\*, nie je jej vylepšením, ale obmieňa pôvodnú metódu VFH. Zmena spočíva v spôsobe akým sa vytvára histogram. Do jedného stĺpca histogramu sa totiž nezarávajú len hodnoty z príslušného sektora, ale aj zo susedných sektorov, ktoré sa nachádzajú napravo a naľavo od aktuálneho smeru merania v oblúkovej vzdialenosti menšej ako  $\theta$ .

$$\theta = \frac{k}{r} \quad (17)$$

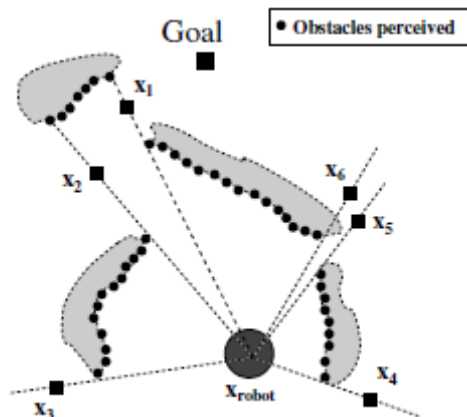
Rozširovací oblúk vplyvu prekážky  $\theta$  je nepriamo úmerný k nameranej vzdialenosti  $r$  v danom smere. Tento vplyv je možné ešte škálovať rozširovacím faktorom  $k$ . Robot sa tak dokáže lepšie vyhnúť v dostatočnom predstihu veľkým prekážkam a nemusí vykonávať razantné manévry pri priblížení sa k takejto prekážke. Scaled VFH zachováva jednoduchosť pôvodnej metódy, pričom do nej vnáša podobný prvok, aký sa nachádza vo VFH+ pri tvorbe histogramu po rozšírení buniek histogramovej mriežky na kruh s polomerom  $r_{R+s}$ .

## 2. Obstacle-restriction [3] [7]

Táto metóda reaktívnej navigácie vychádza z modelu kruhového všesmerového robota a bodovej reprezentácie dát (napríklad údaje z laserového skenera). Samotná metóda spočíva v dvoch krokoch. Prvým je lokálny výber čiastkových cieľov založený na lokálnej metrickej mape a druhým je samotný predpis pohybu robota.

Pri pohybe robota v prostredí môžu nastať situácie, kedy je lepšie vybočiť z priameho smerovania do cieľa, a cieľ tak dosiahnuť neskôr. A práve takéto prípady zohľadňuje táto metóda. Výber alternatívneho čiastkového cieľa spočíva vo výbere všetkých možných alternatívnych cieľov a potom vo výbere najlepšieho kandidáta z nich. Alternatívne ciele sú lokalizované medzi prekážkami alebo na hranách prekážok (Obr. 8):

1. Stred medzi dvoma bodmi prekážok, cez ktoré možno preložiť dotyčnicu a ktorých vzdialenosť je väčšia ako priemer robota ( $x_1$  a  $x_2$ ).
2. V smere hrán prekážok vo vzdialenosti väčšej ako je priemer robota ( $x_3, x_4, x_5$  a  $x_6$ ).

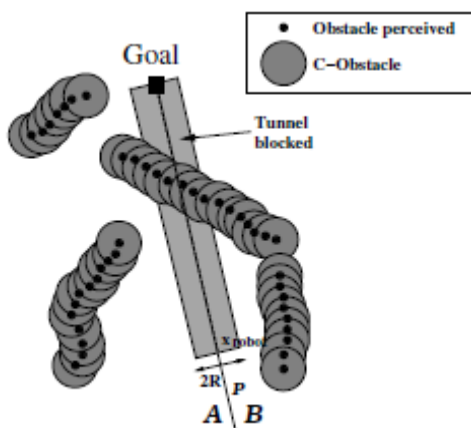


Obr.8 Kandidáti na alternatívne ciele [7]  
Fig.8 Candidates for alternative goals

V ďalšom kroku je potrebné sa rozhodnúť medzi alternatívnym cieľom a priamym smerovaním do cieľa. Nech sú  $x_a$  a  $x_b$  dva body v priestore,  $R$  je polomer robota a  $L$  je zoznam prekážkových bodov  $x_i^L$ . Potom  $L'$  je zoznam bodov z  $L$ , ktoré sa nachádzajú v obdĺžniku s výškou segmentu  $x_a x_b$  a so šírkou  $2R$ . Nech  $A$  a  $B$  sú dve poloviny rozdelené čiarou spájajúcou body  $x_a$  a  $x_b$ . Ak pre všetky body z  $L'$  platí:

$$d(x_j^L, x_k^L) > 2R \wedge x_j^L \in A \wedge x_k^L \in B$$

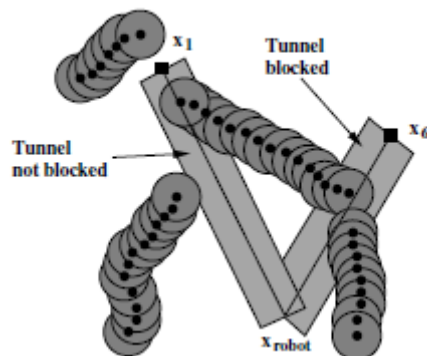
potom vráť kladné ohodnotenie, inak záporné. Tento algoritmus teda vracia kladné ohodnotenie ak existuje priama cesta medzi bodmi  $x_a$  a  $x_b$ . Ak neexistuje priama cesta medzi týmito bodmi vo vytvorenom tuneli šírky  $2R$ , potom je táto cesta blokovaná prekážkou alebo je prechod príliš úzky (Obr. 9). Vytvorený tunel je teda blokovaný, ak existujú C-prekážky (C-prekážka je prekážka rozšírená o polomer robota), ktoré sa pretínajú a každá patrí do inej poloviny z polovín  $A$  a  $B$ .



Obr.9 Blokovaný tunel [7]  
Fig.9 Blocked tunnel

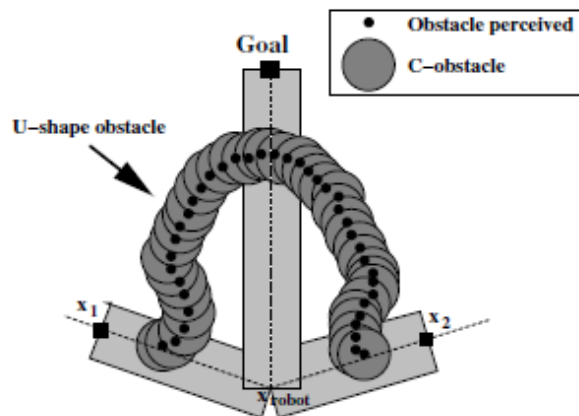
Do algoritmu najskôr vstupuje ako prvý kandidát globálny cieľ. Ak je zamietnutý, teda je vrátená negatívna hodnota, potom sa overuje kandidát na alternatívny cieľ, ktorý je

najbližšie ku skutočnému cieľu. V znázornenom príklade to značí, že je overovaný cieľ  $x_1$  (Obr. 10). Ten je vyhodnotený ako vhodný kandidát, teda algoritmom je vrátená pozitívna hodnota.



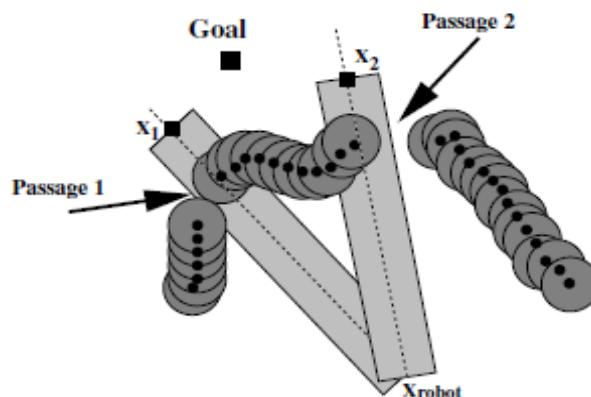
Obr.10 Výber  $x_1$  ako alternatívneho cieľa [7]  
Fig.10 Selection of  $x_1$  as alternative goal

Takto definovaný algoritmus si dokáže poradiť aj s pascovými situáciami. Jednou z nich je prekážka tvaru U (Obr. 11). Treba si všimnúť, že aj keď sú oba alternatívne ciele vyhodnotené pozitívne, robot sa pascovej situácii vyhne a nevojde do tejto prekážky.



Obr.11 Prekážka tvaru U [7]  
Fig.11 Obstacle with shape U

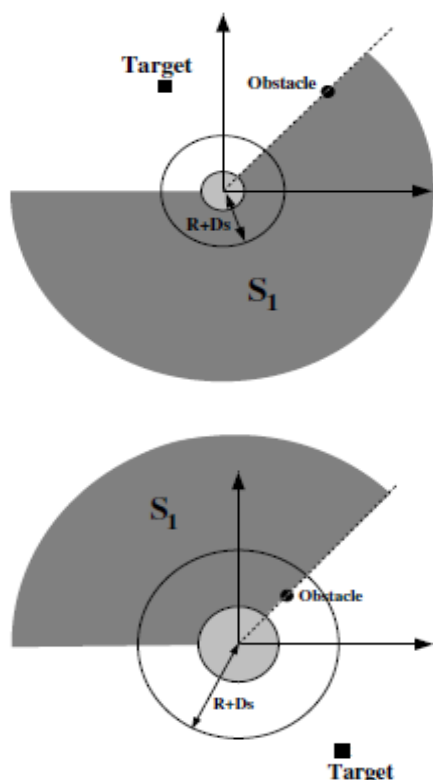
Inou pascovou situáciou môže byť veľmi úzky prechod (Obr. 12). V tomto prípade je alternatívny cieľ  $x_1$  vyhodnotený negatívne a je zvolený cieľ  $x_2$ .



Obr.12 Úzky prechod [7]  
Fig.12 Narrow passage

Druhým krokom tejto metódy po výbere cieľa je predpísanie pohybu robota. Tento krok zahŕňa v sebe dynamické obmedzenia a konečný výber predpísaného pohybu. Nech  $R$  je polomer robota,  $D_s$  bezpečná vzdialenosť okolo hraníc robota a  $\theta_{target}$  je smer k cieľu. Potom je pre každú prekážku určený súbor neželaných pohybov  $S_n \in \langle -\pi; \pi \rangle$ . Tento súbor sa skladá z dvoch podsúborov  $S_1$  a  $S_2$ . Podsúbor  $S_1$  reprezentuje smery nevhodné na obídenie prekážky a  $S_2$  vylúčenú oblasť okolo prekážky. Ak zavedieme vzdialenosť k prekážke  $d_{obs}$  a uhol k prekážke  $\theta_{obs}$ , potom (Obr. 13):

$$S_1 = \begin{cases} (\theta_{obs}, \pi) & \theta_{target} < \theta_{obs} \\ (-\pi, \theta_{obs}) & \text{inak} \end{cases} \quad (18)$$



Obr.13 Definícia súboru  $S_1$  [7]

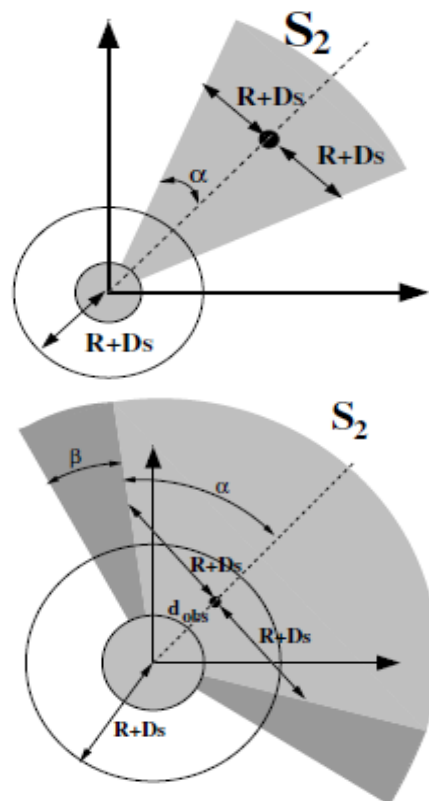
Fig.13 Definition of  $S_1$

Podsúbor  $S_2$  je definovaný ako  $S_2 = [\gamma_L, \gamma_R]$ , kde (Obr. 14):

$$\begin{aligned} \gamma_L &= \max[\theta_{obs} - (\alpha + \beta), -\pi] \\ \gamma_R &= \min[\theta_{obs} + (\alpha + \beta), \pi] \\ \alpha &= \left| \text{atan} \left( \frac{R + D_s}{d_{obs}} \right) \right| \\ \beta &= \begin{cases} (\pi - \alpha) \left( 1 - \frac{d_{obs} - R}{D_s} \right) & d_{obs} < (D_s + R) \\ 0 & \text{inak} \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

Smery vymedzené uhlom  $\theta_{obs} \pm \alpha$  vymedzujú bezpečnostnú zónu (definovanú pomocou  $D_s$ ) v úrovni prekážky. Ak sa bezpečnostná zóna okolo prekážky nachádza v bezpečnostnej zóne robota, je celý súbor  $S_2$  dodefinovaný pomocou

uhla  $\beta$ . Tento uhol sa mení od 0 po  $\pi - \alpha$  a  $\beta = 0$  ak  $d_{obs} \geq D_s + R$ .



Obr.14 Definícia súboru  $S_2$  [7]

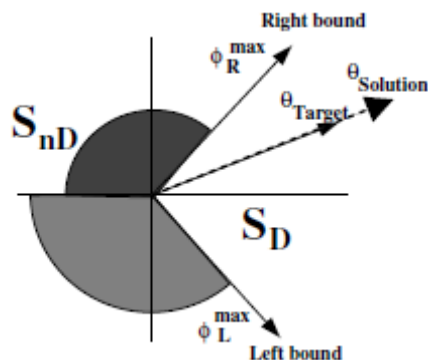
Fig.14 Definition of  $S_2$

Na súbore  $S_n = S_1 \cup S_2$  je možné potom definovať pravú a ľavú hranicu:

$$\begin{aligned} \phi_L &= \max(S_n) \\ \phi_R &= \min(S_n) \end{aligned} \quad (20)$$

Takto bolo dosiahnuté definovanie nežiadanych smerov pre alternatívny cieľ. Súbor žiadanych smerov  $S_d$  je potom definovaný ako doplnok k súboru  $S_n$ . Pri výbere žiadaneho smeru  $\theta_{sol}$  môžu nastať tieto tri prípady:

1. Ak  $S_d \neq \emptyset$  a  $\theta_{target} \in S_d$ , potom  $\theta_{sol} = \theta_{target}$  (Obr. 15).



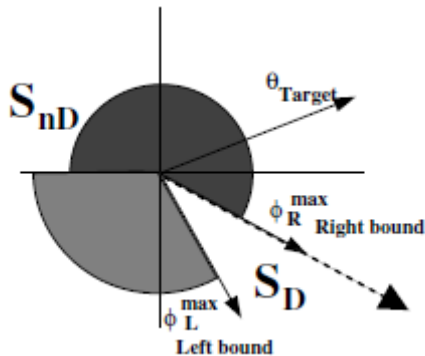
Obr.15 Prvý prípad výberu žiadaneho smeru [7]

Fig.15 First case of selected requested direction

2. Ak  $S_d \neq \emptyset$  a  $\theta_{target} \notin S_d$ , potom (Obr. 16):

$$\theta_{sol} = \begin{cases} \phi_R & |\theta_{target} - \phi_R| < |\theta_{target} - \phi_L| \\ \phi_L & \text{inak} \end{cases} \quad (21)$$

To znamená, že hranica, ktorá je najbližšie k smeru do cieľa je vybraná ako žiadaný smer.



Obr.16 Druhý prípad výberu žiadaného smeru [7]

Fig.16 Second case of selected requested direction

3. Ak  $S_d = 0$ , potom  $\theta_{sol} = \frac{\phi_R + \phi_L}{2}$ .

#### PodĎakovanie

Tento článok vznikol pri riešení projektu VEGA 1/0690/09 a KEGA 3/7307/09.

#### Literatúra

- [1] BORENSTEIN J., KOREN Y.: The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance For Mobile Robots. IEEE Journal of Robotics and Automation Vol 7, No 3, June 1991, pp. 278-288.
- [2] SIEGWART R., NOURBAKHSI I.R.: Introduction to Autonomous Mobile Robots. Massachusetts Institute of Technology, 2004. ISBN-13 978-0-262-19502-7.
- [3] VIKENMARK D.: The Obstacle-Restriction Method (ORM) for Reactive Obstacle Avoidance in Difficult Scenarios

in Three-Dimensional Workspaces. Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden 2006. ISSN-1653-5715.

[4] ULRICH I., BORENSTEIN J.: VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 16-21, 1998, pp. 1572 - 1577.

[5] ULRICH I., BORENSTEIN J.: VFH\*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 24-28, 2000, pp. 2505-2511.

[6] YAMAUCHI B.: The Wayfarer modular navigation payload for intelligent robot infrastructure. Proceedings of SPIE Vol 5804, Bellingham 2005.

[7] MINGUEZ J.: The Obstacle-Restriction Method (ORM) for Robot Obstacle Avoidance in Difficult Environments. Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Dept. de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, Spain, 2003.

#### Abstract

The aim of this paper is to briefly describe modern methods applied in reactive navigation of mobile robots. Important part of reactive navigation method selection is analysis of available sensors, thus selection of appropriate method. Paper deals with VFH methods designed for ultrasonic rangefinders and with obstacle-restriction methods, which is designed for laser rangefinder.

prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.

Ing. František Duchoň, PhD.

Ing. Andrej Babinec

Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava  
ladislav.juristica@stuba.sk, frantisek.duchon@stuba.sk,  
andrej.babinec@stuba.sk