

Předcházení kolizím

- Je základní funkcionalitou autonomního robotu operujícího v reálném (vždy částečně neznámém) prostředí
 - Jednoduché postupy detekují neočekávanou překážku a zastavují vykonávání plánu
 - Složitější postupy nad předchozí funkcionalitu realizují autonomní objetí překážky (tzv. reflexní předcházení srážkám nebo lokální plánování)

Zahrnuje kroky:

- Detekce překážky a stanovení jejího rozměru a tvaru
- Výpočet a realizace objízdne trajektorie s návratem na původní trajektorii k cíli

Nevýhoda:

- Při nevyužití apriorní znalosti o prostředí (modelu světa) může vést k realizaci neoptimálních trajektorií

Metody Vector Field Histogram (Plus) (VFH, VFH+)

Úloha: Jako součást fyzické realizace trajektorie

- Plánované bez úplného zohlednění omezujících podmínek
 - Překážky prostředí,
 - Kinematická omezení řízení robotu a
 - Fyzické rozměry robotu

Typické funkcionality úloh:

- Umožní detekci neznámých objektů
- Koriguje aktuálně vykonávanou trajektorii robotu směrem k cíli za současného předcházení srážkám s detekovanými objekty.
- Vstupem algoritmu je:
 - 2D pravděpodobnostní model světa - mřížku (Certainty Grids) - snadná kontinuální údržba obsahu modelu z dálkoměrných senzorů (sonar, lidar)
 - Aktuální měření hloubky scény dálkoměrnými senzory
- Proces zpracování (redukce) vstupních dat ve 2 až 4 stupních (dle metody, odlišují se stupněm hladkosti trajektorie, přesností aproximace původní trajektorie a náročností nastavení parametrů)
- Výstupem je okamžité řízení robotu (resp. jeho korekce)



Aplikace VFH – pasivní slepecký průvodce

Vector Field Histogram Plus (VFH+)

Odvozeno z originálního postupu VHF

- Dosahuje vyššího stupně hladkosti trajektorie
 - Zjednodušuje nastavení parametrů metody (explicitní kompenzace fyzikálního rozměru robotu)
 - Lepší aproximace originální trajektorie robotu → vyšší spolehlivost
-
- Vstupem VFH+ je mřížková mapa *histogram grid* (založená na předchozích postupech *certainty/occupancy grids*)
 - VHF+ realizuje 4-stupňové zpracování vstupních dat
 - Vstupní 2D mřížková mapa je zpracována do 1D polárních histogramů v (okamžitém) okolí robotu
 - Poslední krok postupu vybírá nejvýhodnější směr dalšího postupu robotu na využitím maskovaného polárního histogramu a cenové funkce

VFH+, krok 1

- Mějme mřížkovou mapu C obsahující objekt (aktivní oblast) C_a , jenž je tvořena kruhovým okolím robotu o průměru w_s (pohybuje se s robotem)

krok 1 mapuje C_a na tzv. *základní polární histogram H^p*

- Každá aktivní oblast (pixel) je zpracovávána jako vektor příslušný překážce
- Směr $\beta_{i,j}$ a velikost $m_{i,j}$ vektoru překážky jsou určeny aktivní oblastí a středem robotu (Robot Position Center RPC):

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{y_0 - y_j}{x_i - x_0} \right)$$

x_0, y_0 značí souřadnice středu robotu

x_i, y_j souřadnice aktivní oblasti

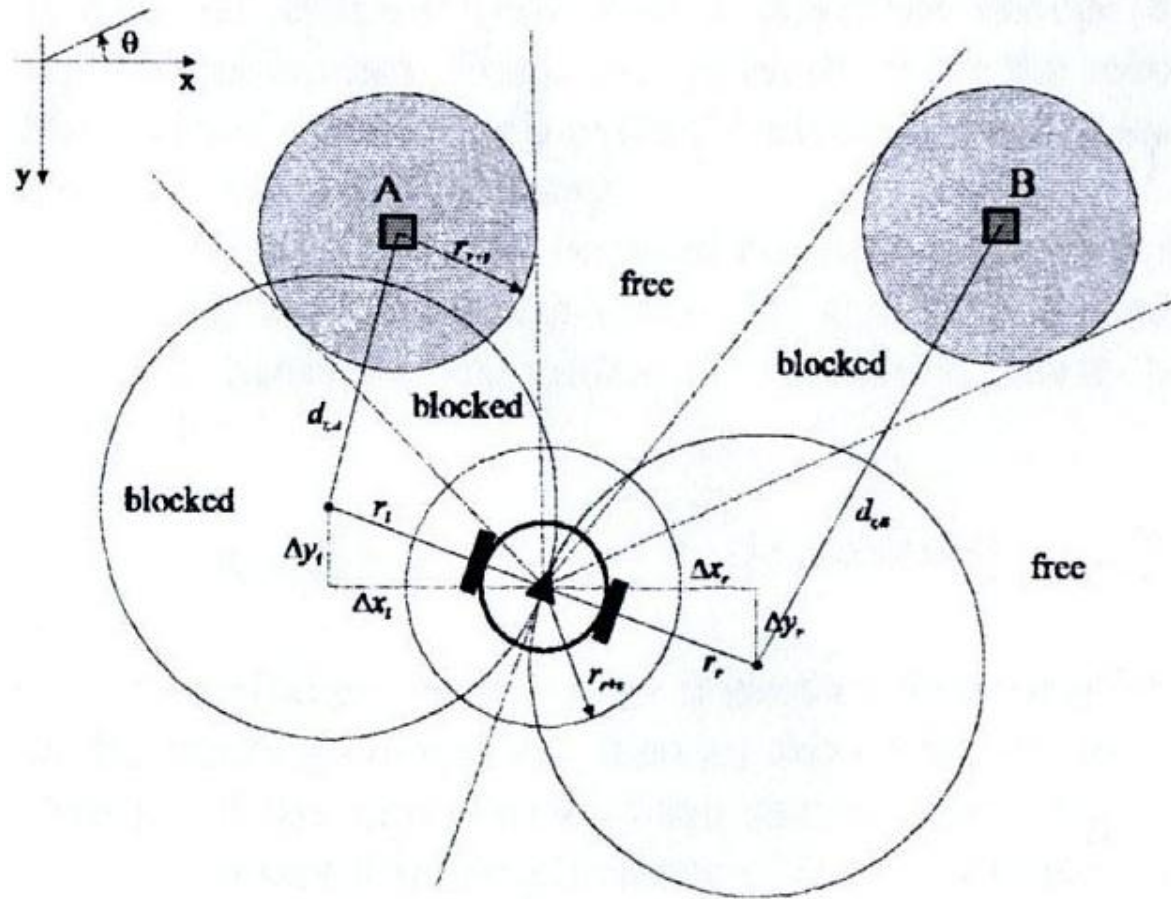
$$m_{i,j} = c_{i,j}^2 (a - b d_{i,j}^2)$$

$c_{i,j}$ značí hodnotu obsazenosti aktivní oblasti $C_{i,j}$

$d_{i,j}$ vzdálenost aktivní oblasti $C_{i,j}$ od středu robotu

a parametry a, b jsou zvoleny tak, že splňují podmínku: $a - b \left(\frac{w_s - 1}{2} \right) = 1$
(pro souřadnou soustavu viz. násl. obr.)

VFH+, krok1 - situace

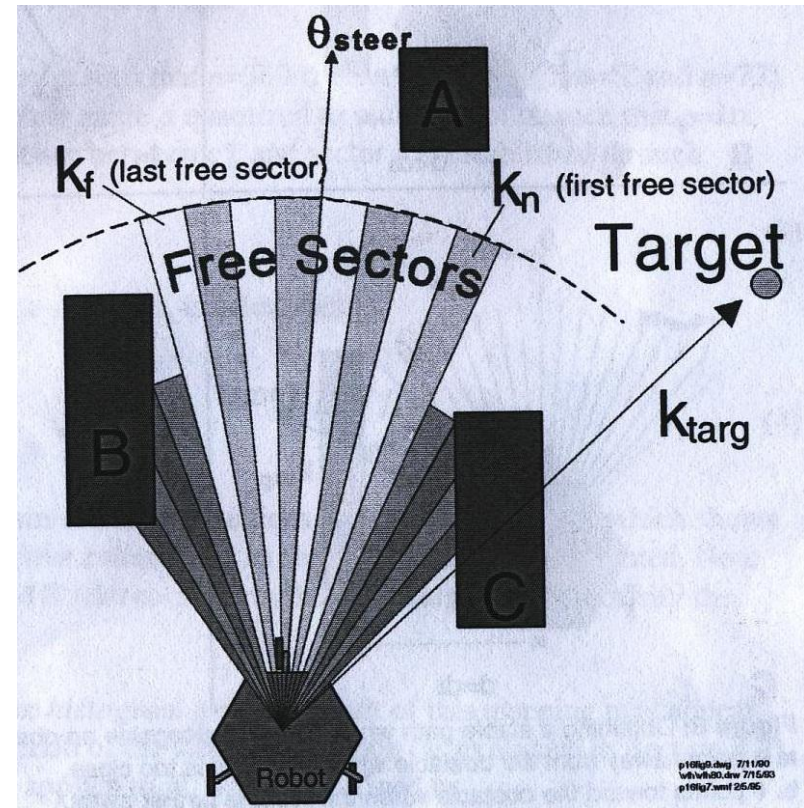


VFH+, krok 1, poznámky

- Kvadratický člen $c_{i,j}^2$ zohledňuje následující situace:
 - Vysoké hodnoty $c_{i,j}$ značí opakovaně potvrzená měření, tj. jistotu existence překážky
 - Nízké hodnoty $c_{i,j}$ mohou být způsobeny přítomným šumem a proto je ve výsledku potlačuje
- Velikost vektoru je též kvadratickou fcí $d_{i,j} \rightarrow$ preferuje blízké překážky vůči vzdálenějším
- Funkce velikosti vektoru oblasti je rotačně symetrická vzhledem ke středu robotu, tj. ve výsledku je chování VFH (robotu) invariantní vzhledem ke směru ke překážce.

VFH+, krok 1, základní polární histogram

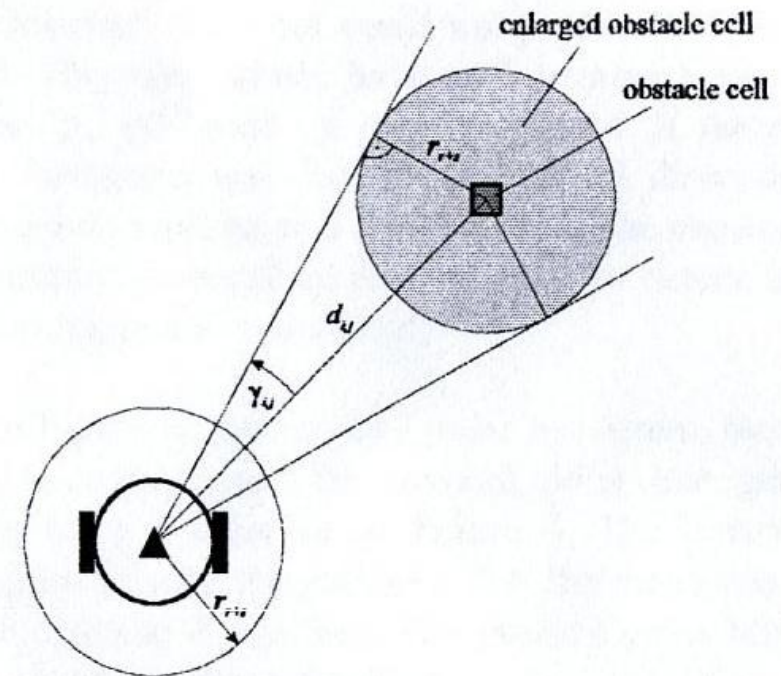
- Konstrukce *polárního histogramu* H^p s využitím vektorů překážek
 - H^p nechť má zvolené tangenciální rozlišení α takové, že $360/\alpha$ je celé číslo (typická volba např. $\alpha=5^\circ$, tj. obdržíme dělení do 72 diskretních směrů/sektorů)
 - Každý takový směr reprezentuje komponentu polárního histogramu – *polární „hustotu“ překážky* (míra jistoty existence překážky)



VFH+, krok 1, dilatace překážek I

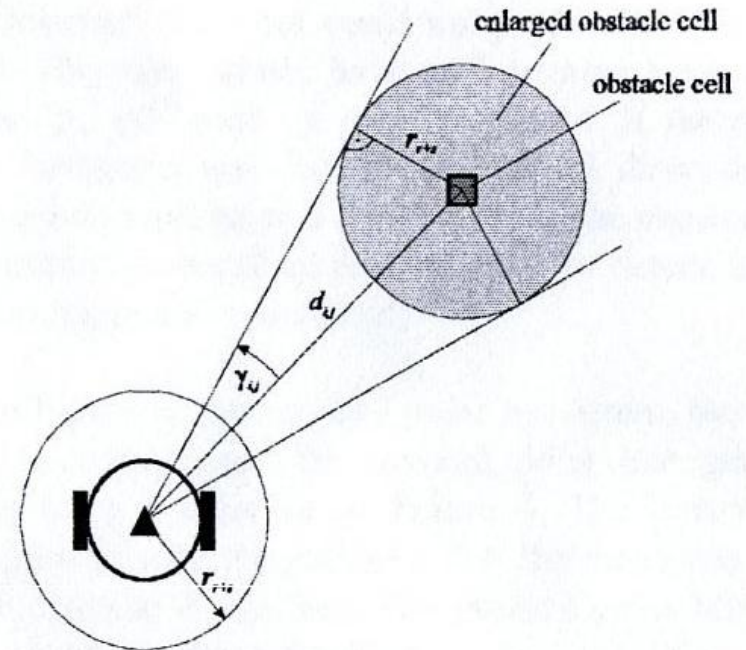
- Pro zpracování polárního histogramu je nezbytné zohlednit fyzický rozměr robotu
 - Původní VFH metoda aplikuje na hodnoty histogramu filtr (dolnofrekvenční propust) za účelem vyhlazení trajektorií a zohlednění šířky robotu (eliminuje úzké průchody mezi překážkami) – nevýhodné, náročné empirické nastavování
 - VFH+ aplikuje teoreticky odvozenou filtraci ke kompenzaci rozměru robotu bez nutnosti nastavování – *expanzí (dilatací) překážek*.
 - Překážky prostředí jsou dilatovány o rozměr robotu (tj. o největší vzdálenost r_r jeho okraje od středu robotu, případně zvětšenou o bezpečnostní rádius d_s), tj. výsledné zvětšení překážek je:

$$r_{r+s} = r_r + d_s$$
 - Situace je následně zpracována jako pro robot s nulovým rozměrem (bod)



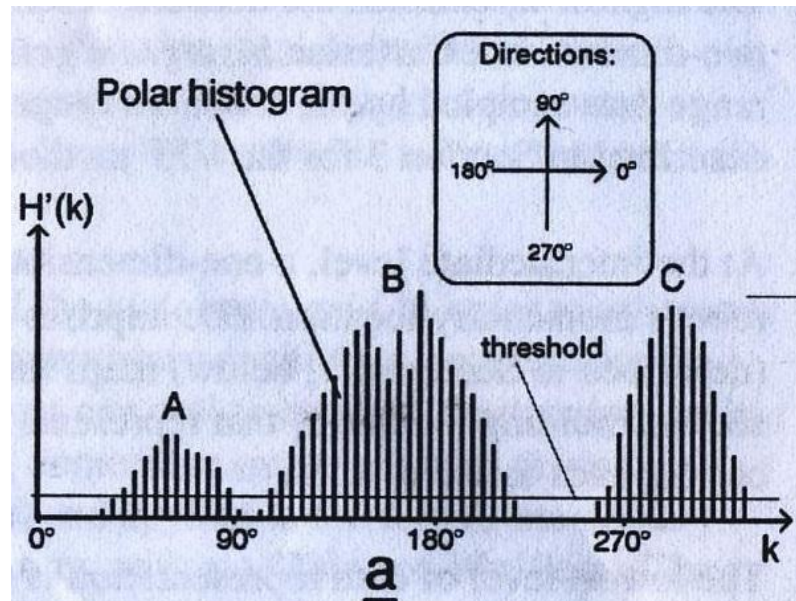
VFH+, krok 1, dilatace překážek II

- Filtrace dilatací objektů pracuje velmi dobře pro roboty s kompaktním tvarem; asymetrické roboty si vyžadují expanzi překážek s ohledem na okamžitou orientaci robotu.
- Dilataci lze efektivně implementovat již ve fázi vytváření polárních histogramů
 - Namísto update jediného korespondujícího sektoru ke každé oblasti lze provést update i pro všechny okolní sektory do úhlové vzdálenosti $\gamma_{i,j}$ odpovídající velikosti požadované dilatace



VFH+, krok 1, základní polární histogram - konstrukce

- Konstrukce *polárního histogramu* H^p s využitím vektorů překážek
 - H^p nechť má zvolené tangenciální rozlišení α takové, že $360/\alpha$ je celé číslo (typická volba např. $\alpha=5^\circ$, tj. obdržíme dělení do 72 diskretních směrů/sektorů)
 - Každý takový směr reprezentuje komponentu polárního histogramu – *polární „hustotu“ překážky* (míra jistoty existence překážky)
- Pro každý sektor k je hodnota polárního histogramu určena jako:



$$H_k^p = \sum_{i,j \in C_a} m_{i,j} \cdot h'_{i,j}$$

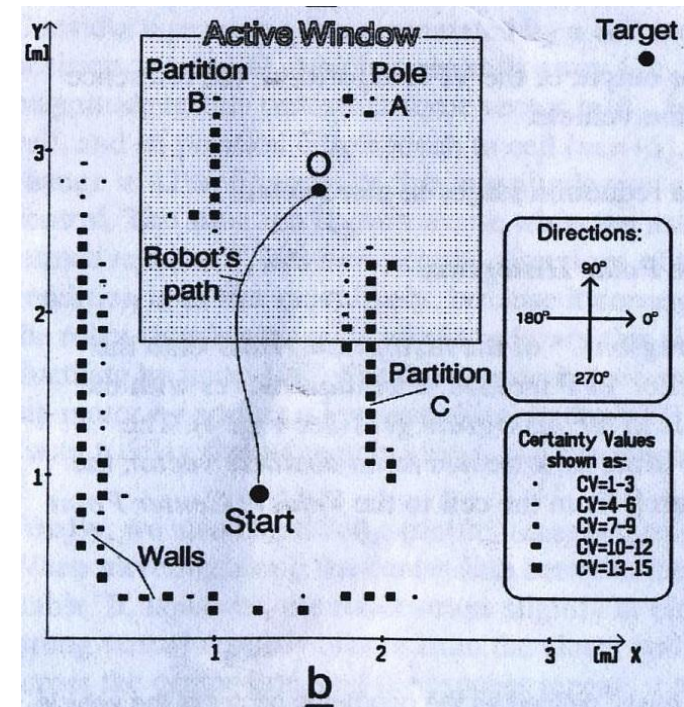
kde:

$$\forall k, \alpha; k.\alpha \in [\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}] \Rightarrow h'_{i,j} = 1$$

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

VFH+, krok 1, základní polární histogram - vlastnosti

- Vzniklý polární histogram zohledňuje fyzikální rozměr robotu, resp. jeho šířku vyhledem ke směru pohybu.
- Funkce h' má v důsledku vliv jako dolnofrekvenční propust, polární histogram vyhlazuje, nevyžaduje žádné nastavení
- Polární histogram je konstruován kolem aktuální pozice robotu, což umožňuje efektivní implementaci, tipy:
 - Reprezentace okolí maticemi o rozměru $w_s \times w_s$
 - Hodnoty směru vektoru překážky $\beta_{i,j}$, tangenciální dilatace $\gamma_{i,j}$ a hodnota výrazu $a-b_{i,j}^2$ pro každou aktivní buňku v oblasti C_a mohou být reprezentovány referenčními tabulkami



VFH+, krok 2, binární polární histogram

- Riziko oscilací a nekontrolovaného chování v situacích kdy je velikost průchodů v prostředí srovnatelná (blízká) s rozměrem robotu (periodická změna rozhodnutí algoritmu v závislosti na změně pozorovacího úhlu (vzorkování) – vede ke „kývání“ a neřízené přiblížení k hranicím objektů
- Problém je redukován zavedením hystereze pro hodnoty histogramu
 - Definice horní a dolní prahové hodnoty τ_{low} a τ_{high}
 - Následnou transformací původního histogramu H^p do binární formy H^b aplikací pravidel:

$$H_{k,j}^p > \tau_{high} \rightarrow H_{k,j}^b = 1$$

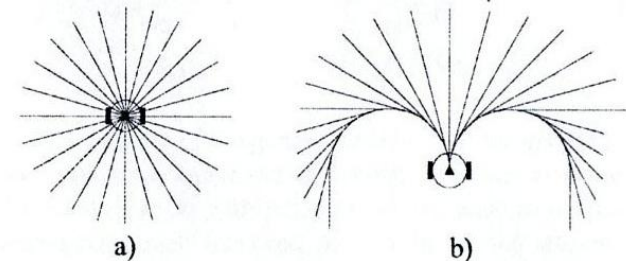
$$H_{k,j}^p < \tau_{low} \rightarrow H_{k,j}^b = 0$$

$$jinak : H_{k,j}^p = H_{k,j}^b$$

- Proces nahrazuje polární míru jistoty (jenž je „spojitá“ veličina) binárními hodnotami 0 (volný prostor) a 1 (nepřístupný prostor)

VFH+, krok 3, maskovaný polární histogram I

- Původní VFH metoda uvažuje robot bez dynamiky robotu a kinematického modelu, tj. robot je schopen měnit svůj směr bez omezení a plynule.
 - Uvedená podmínka je kromě situace, kdy robot ve vzorkovacím okamžiku zastaví a opraví svoji trajektorii, porušena.
- VFH+ metoda eliminuje předchozí užitím přesnější (realističtější) aproximace trajektorie robotu - předpokládá pohyb po *trajektorii s konstantní křivostí* (kružnice, přímka)
 - Křivost nechť je definována jako $K=1/r$, poloměr zatáčení r může být snadno určen
 - Křivost trajektorie je často funkcí dopředné rychlosti robotu
 - Čím rychleji se robot pohybuje, tím je dosažitelná křivost menší
 - Pro diferenciální pohon může být poloměr zatáčení roven nule pro nulovou dopřednou rychlost (!)
- Při znalosti dosažitelného poloměru zatáčení a mříčkové mapy prostředí, resp. úhlového/binárního histogramu, lze stanovit prostupnost jednotlivých úhlových sektorů pro daný robot.



Dosažitelné trajektorie bez dynamiky (a), se zohledněním dynamických omezení (b)

VFH+, krok 3, maskovaný polární histogram II

- Protíná-li se mezní trajektorie s dilatovanou hranicí překážky, jsou všechny trajektorie od překážky směrem k robotu nedostupné
- Středů trajektorií (L,R) dle obr. jsou vztaženy k relativní poloze robotu a definovány jako:

$$\Delta x_r = r_r \sin \Theta$$

$$\Delta y_r = r_r \cos \Theta$$

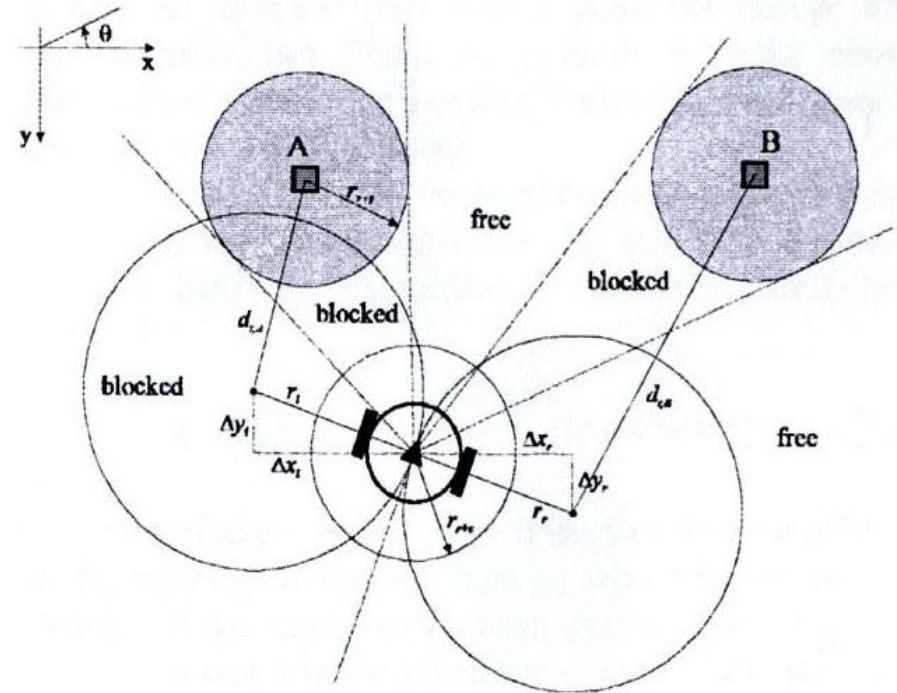
$$\Delta x_l = -r_l \sin \Theta$$

$$\Delta y_l = -r_l \cos \Theta$$

Vzdálenost(i) aktivní buňky $C_{i,j}$ ke středům trajektorií jsou dány vztahy:

$$d_r^2 = (\Delta x_r - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_r - \Delta y(i))^2$$

$$d_l^2 = (\Delta x_l - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_l - \Delta y(i))^2$$



Situace s blokovanou kruhovou trajektorií (překážka A) a volnou trajektorií (překážka B), rozdělení blokovaných a volných sektorů

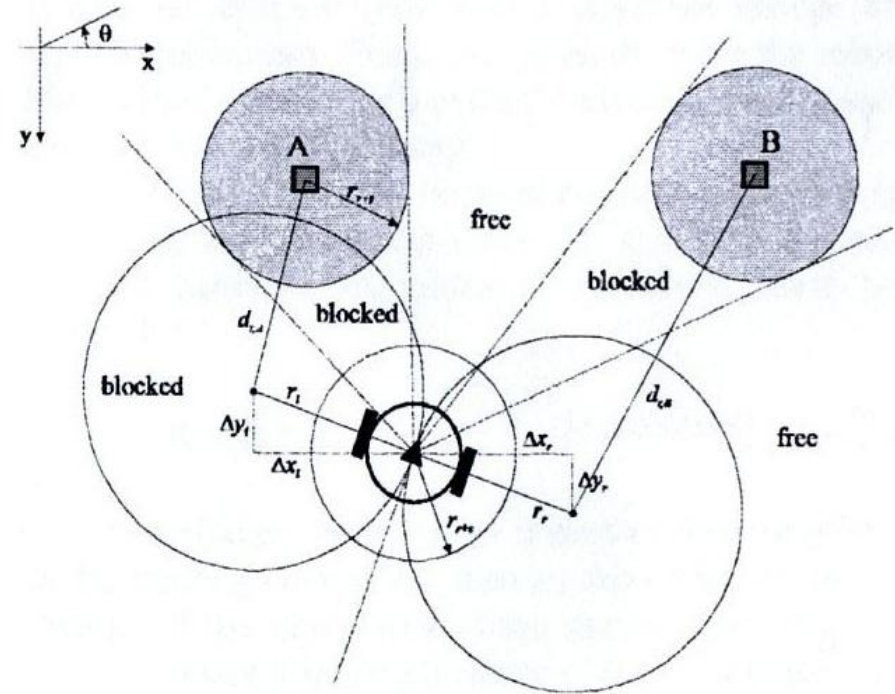
VFH+, krok 3, maskovaný polární histogram III

- Překážka blokuje směry po své pravé, resp. levé straně (viz. obr.) právě když je splněna *podmínka 1*, resp. *podmínka 2*:

$$d_r^2 \langle (r_r + r_{r+s}) \rangle$$

$$d_l^2 \langle (r_l + r_{r+s}) \rangle$$

- Testování všech aktivních buněk na platnost *podmínky 1* a *podmínky 2* obdržíme dvojici mezních úhlů φ_r a φ_l dostupných sektorů pro levý a pravý směr od robotu
- Přičtením úhlu π k hodnotám úhlů φ_r a φ_l obdržíme zpětné směry vzhledem k aktuálnímu směru pohybu úhlů: $\varphi_b = \Theta + \pi$



Situace s blokovanou kruhovou trajektorií (překážka A) a volnou trajektorií (překážka B), rozdělení blokovaných a volných sektorů

VFH+, krok 3, maskovaný polární histogram – alg., vlastnosti I

- Metodu lze snadno implementovat algoritmem, který uvažuje buňky mající vliv na jeden z úhlu úhlů φ_r a φ_l :
 1. Urči φ_b , nastav φ_r a φ_l rovno φ_b
 2. Pro každou buňku $C_{i,j}$ v aktivním okolí (okně) C_a mající $c_{i,j} > \tau$
 - Jestliže $\beta_{i,j}$ se nachází vpravo od Θ a vlevo od φ , ověř splnění „podmínky 1“, je-li splněna, nastav $\varphi_r = \beta_{i,j}$.
 - Jestliže $\beta_{i,j}$ se nachází vlevo od Θ a vpravo od φ , ověř splnění „podmínky 2“, je-li splněna, nastav $\varphi_l = \beta_{i,j}$.
- Efektivní implementace pro případ spolehlivých senzorů. V případě vyšší četnosti chyb měření mohou být φ_r a φ_l určeny stochastickými postupy:
 - Namísto porovnání míry jistoty obsazenosti buněk s pevným prahem lze sestavit polární histogram, jehož sektorové hodnoty reprezentují míru jistoty s jakou je tento sektor zablokován z důvodů dynamiky robotu
 - Hodnoty φ_r a φ_l jsou následně stanoveny prahováním výše zmíněného histogramu
 - Metoda je robustnější ale méně výhodná k výpočtu

VFH+, krok 3, maskovaný polární histogram – alg., vlastnosti II

- Při znalosti φ_r a φ_l a binárního polárního histogramu lze určit *maskovaný polární histogram* jako:

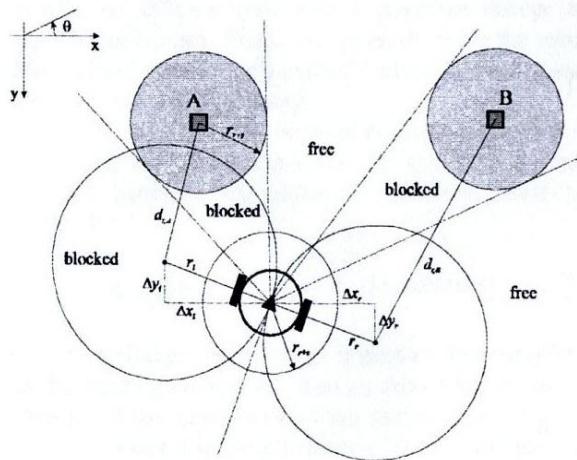
$$H_k^m = 0 \text{ jestliže } H_k^{b'} = 0 \wedge (k \cdot \alpha) \in \{[\varphi_r, \Theta], [\Theta, \varphi_l]\}$$
$$H_k^m = 1 \text{ jinak,} \quad \text{úhel sektoru } \varphi_n = \alpha \cdot k_n$$

Kde: α – úhlová šířka jednotlivého sektoru, k_n – pořadnice

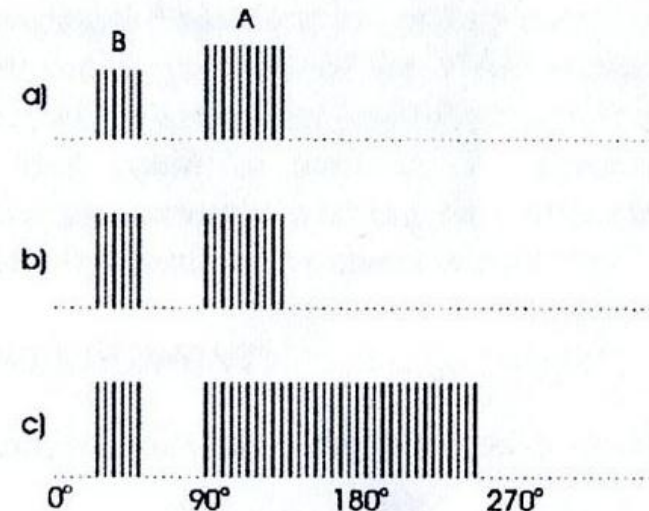
- Maskovaný histogram ukazuje, jaké směry jsou přípustné pro aktuální rychlost robotu, jsou-li všechny blokovány, robot nemůže na této rychlosti nalézt řešení, tj.:
 - Je třeba určit novou sadu hodnot φ_r a φ_l pro odlišnou (nižší) rychlost robotu; pokud nelze nalézt žádnou sadu hodnot φ_r a φ_l , pro kterou existuje aspoň jedno přípustné řešení (neblokovaný směr pohybu) → robot uvíznul (deadlock)

VFH+, krok 3, polární histogramy – ilustrace

- Binární polární histogram nesprávně indikuje směry vlevo od překážky *A* jako průchodné.
- Maskovaný histogram uvedenou chybu postihne a eliminuje
- Moduly vektorů příslušných překážce *A* jsou vyšší než pro *B* neboť *A* je blíže robotu než *B*. Z téhož důvodu je pro překážku *A* úhel oblasti s nedostupností trajektorií větší.



Výchozí situace



Prvotní polární histogram pro diskrétní směry (a), binární polární histogram téhož (b) a maskovaný binární histogram (c)

VFH+, krok 4, výběr směru I

- Maskovaný polární histogram ukazuje všechny směry vhodné k neomezeného pohybu robotu
- Z množiny přípustných (neblokovaných) směrů je vhodné zvolit nejvhodnější směr dalšího pohybu robotu:
 - V jednoduchém případě (původní VFH postup) lze zachovávat „cílově orientovanou“ strategii (t.j. výběr směru nejbližšího původnímu směru k_t směrem k cíli...
 - Postup VFH+ stanoví:
 - Množinu kandidátských směrů jako průchody v okolí překážek a
 - Proveďte výběr optimální cesty užitím (minimalizací) obecnějšího kritéria (než je odchylka od původní trajektorie) \rightarrow nově zvolený směr pohybu je: $\varphi_n = \alpha \cdot k_n$
- Výběr směru je prováděn v krocích:
 1. Výběr krajních směrů (levého k_l a pravého k_r) pro všechny existující průchody v maskovaném polárním histogramu.
 - Metoda rozlišuje *široké* a *úzké* průchody dle rozdílu pořadnice příslušných hraničních směrů jako:

$$|k_l - k_r| > s_{\max} \quad - \textit{široký} \qquad |k_l - k_r| \leq s_{\max} \quad - \textit{úzký}$$

(Typicky: $s_{\max} \sim 16$)

VFH+, krok 4, výběr směru II

2. Pro *úzké průchody* je směr řízení robotu c_n zvolen jednoznačně – středem průchodu:

$$c_n = \frac{k_r + k_l}{2}$$

3. Pro *široké průchody* existují pro směr řízení robotu celkem 3 kandidátské směry:
- Při levém a pravém okraji průchodu, směry k_r a k_l
 - Směr k cíli k_t , pokud se nachází mezi ostatními dvěma kandidátskými směry k_r a k_l

Tedy: $c_r = k_r + \frac{s_{\max}}{2}$ vpravo $c_l = k_l + \frac{s_{\max}}{2}$ vlevo $c_t = k_t$ pro $k_t \in \langle c_r, c_l \rangle$ k cíli

VFH+, krok 4, výběr směru III, vlastnosti

- Kandidátské směry c_l a c_r vedou robot podél kontury překážky (v bezpečné vzdálenosti, viz. dilatace překážky), směr c_t míří k cíli

$$c_n = \frac{k_r + k_l}{2}$$

- Pro necílově orientovaná chování robotu mohou být kandidátské směry vybírány jinou strategií (např. náhodná procházka může být realizována zachováním (volbou) nového směru přednostně shodného s aktuálním/minulým směrem):

$$c_\Theta = \frac{\Theta_i}{\alpha} \quad \text{pro } \frac{\Theta_i}{\alpha} \in \langle c_r, c_l \rangle$$

$$c_\varphi = k_{n,i-1} \quad \text{pro } k_{n,i-1} \in \langle c_r, c_l \rangle$$

- Pro situaci s cílově-orientovaným chováním obdržíme z maskovaného binárního histogramu 1 až 3 kandidátské směry pro každý průchod. Volbu mezi nimi provádíme užitím *cenové funkce* g pro kandidátský směr c .

VFH+, krok 4, výběr směru IV, výběr finálního směru

- Cenová funkce:
$$g(c) = \mu_1 \cdot \Delta(c, k_i) + \mu_2 \cdot \Delta\left(\frac{\Theta_i}{\alpha}\right) + \mu_3 \Delta(c, k_{n,i-1})$$

kde $\Delta(c_1, c_2)$ určuje absolutní úhlovou odchylku mezi sektory c_1 a c_2 ,

tj. její hodnota je vždy $\leq n/2$

Možná implementace je:
$$\Delta(c_1, c_2) = \min\{|c_1 - c_2|, |c_1 - c_2 - n|, |c_1 - c_2 + n|\}$$

- První výraz cenové fce $g(c)$ má význam ceny odvozené od úhlové odchylky kandidátského směru a směru k cíli, větší odchylka \rightarrow vyšší cena, zajišťuje cílově-orientované chování algoritmu
- Druhý výraz postihuje odchylku kandidátského směru od okamžitého natočení podvozku robotu, vyšší odchylka podvozku od kandidátského směru značí potřebu větší změny směru \rightarrow vyšší cena, přispívá k dosažení potřebného směru pro další činnost

VFH+, krok 4, výběr směru V, výběr finálního směru

- Třetí výraz značí cenu za změnu směru mezi kandidátským směrem a směrem zvoleným v předchozím kroku, větší řídicí zásah → vyšší cena, přispívá k dosažení potřebného směru pro další činnost
- Pozn.: Poslední dva výrazy realizují krátkodobou paměť chování - druhý výraz má význam mechanické paměti, třetí umožní robotu určit potřebný směr ještě před změnou jeho orientace.
- Váhové koeficienty μ , význam nemají absolutní hodnoty, nýbrž jejich vzájemný poměr:
 - μ_1 – ovlivňuje míru cílově orientovaného chování – striktnost vykonávání cesty k danému cíli
 - μ_2 – ovlivňuje jakou měrou se robot snaží realizovat efektivní budoucí trajektorii s minimálními změnami směru.
 - μ_3 – ovlivňuje snahu o zachování dříve zvoleného směru pohybu a tím zachování hladké trajektorie

VFH+, krok 4, výběr směru VI, výběr finálního směru

- K zachování cílově orientovaného chování robotu je nezbytné splnit podmínku:

$$\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$$

- Je-li získání efektivní trajektorie důležitější než změny v řízení směru robotu → volba $\mu_2 > \mu_3$ (preference hladkosti trajektorie se opírá o komplementární podmínku)
- Typická volba parametrů $\mu_1 = 5$, $\mu_2 = 2$, $\mu_3 = 2$...
- K implementaci dalších funkcionalit je možné“
 - rozšířit cenovou funkci o další členy (např. k vyhýbání se úzkým průchodům, přidáním členu $\mu_4 \cdot \Delta(k_r, k_l)$ zohledňujícím šířku průchodu, popř. nalézání úzkých míst (dveří) užitím výrazu $\mu_4 \cdot 1 / \Delta(k_r, k_l)$)
 - Cenovou funkci je možné dočasně modifikovat v průběhu řešení...

VFH+, závěr – vlastnosti

Výhody

- Spolehlivé řešení z důvodu práce s minulou trajetorií robotu (maskování blokováných trajektorií) a jeho okamžitou rychlostí a omezení.
- Minimální počet nastavovaných parametrů: s_{max} , n , μ_1 , μ_2 , $\mu_3...$
- Použití cenové funkce k realizaci strategie umožňuje volbu a dynamické přepínání chování

Nevýhody:

- Nastavení, byť nevelkého počtu, parametrů může být kritické
- Metoda pracuje ze své podstaty lokálně, t.j. existuje riziko uvíznutí při neznalosti potřebného okolí robotu/specifické struktuře a složitosti scény

Reference:

- Borenstein J. et. al.: The Vector Field Histogram – Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots, in: IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.7, No.3, June 1991, pp. 278-288
- 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