

# Tvorba máp neznámeho prostredia pre mobilný robot s využitím ultrazvuku (1)

Jaroslav Hanzel  
Ladislav Jurišica

V príspevku sa zaoberáme problémom tvorby mapy neznámeho prostredia. Túto mapu má vytvoriť riadiaci systém mobilného robota s využitím merania vzdialenosti pomocou ultrazvukového diaľkomeru. Použijeme mriežkovú reprezentáciu pracovného priestoru robota. Cieľom je určenie obsadených a prázdnych oblastí pracovného prostredia, pričom nejde o jednoduchú vec vzhľadom na neurčitost vnesenú sensorovým systémom. Porovnáme tri rôzne algoritmy na tvorbu mapy, ktoré sú založené na teórii pravdepodobnosti, Dempster-Shaferovej teórii potvrdzovania a teórii fuzzy množín. Mriežky obsadenia sú vytvorené na základe reálnych údajov experimentálne získaných vo vnútornom prostredí budov.

## Úvod

Výskumná činnosť v oblasti mobilných robotov bola v minulých rokoch, a v súčasnosti stále je, veľmi intenzívna. Veľký dôraz sa kladie na výskum autonómnosti robotického systému. Pod pojmom autonómnosť rozumieme schopnosť vykonávania zverených úloh bez riadenia človekom. Táto vlastnosť je užitočná najmä v prostredí, kde je ľudská činnosť obtiažna, zdraviu škodlivá alebo úplne nemožná, napríklad vo vesmíre, v morských hĺbkinách alebo zamorených prostrediach v niektorých priemyselných odvetviach. Ďalšou užitočnou aplikáciou autonómnych mobilných robotov je servisná robotika zahŕňajúca napríklad pomoc zdravotne postihnutým ľuďom, odpadové hospodárstvo, čistenie rozličných priestorov, zdravotníctvo atď. Narastajúci počet aplikovaných robotických systémov v priemysle si rovnako žiada vyvíjať flexibilnejšie a inteligentnejšie roboty s vyšším stupňom autonómnosti.

Autonómnosť vyžaduje schopnosť inteligentnej reakcie na rôzne situácie. Riadiaci systém robota musí byť schopný vnímať svoje okolie pomocou vlastného sensorového systému. Navyše musí toľto vnímaniu určitým spôsobom „rozumieť“, čo je bez vhodnej vnútornej reprezentácie pracovného prostredia takmer nemožné. Táto reprezentácia by mala byť dostatočne abstraktnou na podporu úloh rozhodovania na vyššej úrovni, ako napríklad strategické plánovanie alebo odhad situácie. Zároveň musí poskytovať dostatok informácií o najbližšom okolí na podporu vykonávania úloh nižšej úrovne, ako je napr. vyhýbanie sa prekážkam, lokalizácia a plánovanie trajektórií pohybu.

Vezmime si teraz problém tvorby reprezentácie okolitého prostredia. Mobilný robot sa pohybuje po nejakej trajektórii a zhromažďuje údaje zo svojho sensorového systému. Rôzne druhy snímačov získavajú informáciu o okolí robota rozličným spôsobom. Získané informácie majú preto rozdielne charakteristiky. Na trhu je v súčasnosti dostupné množstvo domyselných snímačov, ako aj značný výpočtový výkon. Avšak pre použitie robota v reálnych aplikáciách je potrebné dosiahnuť určitý kompromis medzi cenou a úžitkom. Ten často hovorí v prospech lacnejších snímacích zariadení a obmedzuje používanie drahých snímačov, napr. videokamer. Najbežnejšie snímače, napr. ultrazvukové a laserové diaľkomery, zisťujú vzdialenosť ku prekážke v snímacom rozsahu vysiadaním signálu a meraním času po návrat odrazeného signálu. Vo väčšine prípadov sa signál odrazí od najbližšej prekážky v smere vysiadaného signálu. Získaná vzdialenosť môže byť využitá viacerými spôsobmi. Jedným z nich je tvorba reprezentácie prostredia, ktorá je v podstate mapou snímaného priestoru.

## 1. Snímacie zariadenia

Ultrazvukové diaľkomery (sonary) sú v mnohých technických odboroch často používanými zariadeniami na meranie relatívnych

vzdialeností. Vďaka svojim výhodným vlastnostiam, medzi ktoré patrí jednoduchosť použitia, nízka cena, jednoduchosť realizácie a bezpečnosť, majú široké možnosti využitia. V mobilnej robotike sú používané na meranie vzdialenosti k prekážkam v okolí robota. Napriek všetkým vyššie uvedeným výhodám je použitie ultrazvukových snímačov na meranie relatívnej vzdialenosti k prekážkam spojené s množstvom problémov, ktoré vyplývajú zo samotného fyzikálneho princípu ich činnosti. Podstata činnosti sonaru je jednoduchá: v snímanom smere sa vyšle balík ultrazvukových vln a čaká sa na odraz tohto signálu od prekážky. Uplynutý čas medzi vysiadaním a prijatím signálu je priamo úmerný vzdialenosti k prekážke. Ďalej v texte budeme mať na mysli v mobilnej robotike často používaný ultrazvukový merací systém Polaroid [6].

Samozrejme, existuje viacero príčin spôsobujúcich neúspešnosť merania. V procese určovania prítomnosti objektu a merania jeho relatívnej vzdialenosti v danom smere rozlišujeme v zásade tri zdroje neurčitosti merania. Prvým zdrojom neurčitosti merania je chyba nameranej vzdialenosti  $r$ . V prípade diaľkomeru Polaroid, ktorého merací rozsah je 0,15 až 10,7 m, je chyba merania  $\pm 1\%$  nameranej vzdialenosti na celom rozsahu [6]. Táto neurčitost je spôsobená vlastnosťami okolitého vzduchu, kam patrí teplota, vlhkosť, turbulencia a tlak [8]. Ďalšia neurčitost vyplýva zo skutočnosti, že ultrazvukový signál sa šíri do priestoru v tvare kužeľa, ktorého os leží v snímanom smere a vrcholový uhol sa rovná vyžarovaciemu uhlu snímača. Keďže našou úlohou je určiť rozmiestnenie prekážok v okolí robota, z praktických dôvodov uvažujeme iba priemet vyžarovacieho kužeľa do roviny podlahy. Vyžarovací uhol snímača môže byť v skutočnosti značne veľký, a preto je nemožné určiť presnú uhlovú polohu objektu odraďajúceho signál na kružnicovom oblúku s polomerom nameranej vzdialenosti. Snímač môžeme chápať ako plochý kruhový piest na analýzu vlastností vyžarovacej charakteristiky, ktorá je daná nasledovne [6]:

$$P(\vartheta) = 2 \frac{J_1(ka \sin \vartheta)}{(ka \sin \vartheta)} \quad (1)$$

kde  $J_1$  je Besselova funkcia prvého rádu,  $k = 2\pi/l$  je vlnové číslo úmerné vlnovej dĺžke  $l$ ,  $a$  je polomer piesta a  $\vartheta$  je azimutálny uhol meraný vzhľadom na os vyžarovania. V našom prípade sa  $a = 0,01921$  m a  $l = c/f$ , kde  $c$  je rýchlosť zvuku vo vzduchu  $a f = 49,410$  kHz. Na praktické účely stačí brať do úvahy len hlavný vyžarovací zväzok charakteristiky, preto berieme do úvahy šírenie ultrazvukových vln radiačným kužeľom s veľkosťou uhla  $25^\circ$ . Posledným zdrojom neurčitosti je úkaz viacnásobných odrazov, ktorý sa objaví v prípade, ak je uhol dopadu signálu na povrch prekážky väčší ako takzvaný kritický uhol, ktorý je silne závislý od vlastností povrchu prekážky. V tom prípade je odraz signálu prevažne zrkadlový a zväzok vln môže dosiahnuť prijímač po viacerých odrazoch, čo nazývame dlhé čítanie, resp. nemusí dosiah-



nuť prijímač vôbec. Preto je na získanie platného merania vzdialenosti potrebné, aby bol uhol dopadu na povrch objektu menší než kritický uhol.

## 2. Algoritmy tvorby máp

V mobilnej robotike často používané ultrazvukové diaľkomery z uvedených dôvodov poskytujú pri snímaní prostredia značne neurčité údaje. V ostatných rokoch sa na vyriešenie tohto problému vynaložilo veľa úsilia. Reprezentovanie prostredia pomocou mriežky obsadenia je jedným z jeho úspešných riešení. Mriežka obsadenia poskytuje efektívnu platformu pre fúziu informácií z viacerých snímačov, ako aj snímacích pozícií. Po získaní čítania zo snímača sa na mriežku aplikuje model snímača a vykoná sa aktualizácia každej bunky. Pochopiteľne, rôzne typy snímačov majú odlišne tvarované modely snímačov. Keďže sú modely snímačov definované na všeobecných štatistických základoch, napríklad funkcie hustoty pravdepodobnosti, môžu byť vzájomne kombinované v tej istej mriežke. Mriežky obsadenia sú väčšinou používané pre dvojrozmerné vyjadrenie priestorového usporiadania prostredia. Každá bunka mriežky reprezentuje určitú oblasť priestoru a obsahuje informáciu o mieste, ktoré reprezentuje.

Uvažujme dvojrozmerné prostredie  $U$ , diskretizované z výpočtových dôvodov do štruktúry pozostávajúcej z konečného počtu štvorcových elementov – buniek s veľkosťou hrany  $\delta \times \delta$ . Množinu  $U$  môžeme formálne zapísať ako  $U = \{c_1, \dots, c_M\}$  pre  $j = 1, \dots, M$ . Ďalej uvažujme zhromaždený súbor údajov o vzdialenosti ku prekážkam  $R = \{r_1, \dots, r_n\}$  získaných na známych pozíciách v prostredí  $L = \{l_1, \dots, l_k\}$ . Úlohou mapovacieho subsystému riadiaceho systému robota je spracovať dané údaje s cieľom čo najpresnejšieho určenia buniek obsadených prekážkami (aj čiastočne) a prázdnych buniek (úplne), ktoré sú vhodné pre pohyb robota. Takto môžeme rozdeliť množinu  $U$  na množinu obsadených buniek  $O$  a na množinu prázdnych buniek  $E$ . Pri prítomnosti neurčitosti je možné poskytnúť len odhad, ktoré bunky patria do množiny  $E$  a ktoré do množiny  $O$ . Vhodný spôsob reprezentácie tohto odhadu je prostredníctvom šedo-úrovňovej navigačnej mapy  $N$ , na ktorej je každej bunke  $c_j$ , z  $U$  priradené reálne číslo  $v(c_j) \in \langle 0, 1 \rangle$  reprezentujúce informáciu o  $c_j$  získanú z  $R$ . Interpretácia ako aj postup výpočtu navigačnej mapy  $N$  závisí od zvoleného prístupu narábania s neurčitouťou.

### 2.1 Model neurčitosti snímača

Pre všeobecné modelovanie schopnosti detekcie ultrazvukového snímača závislej od uhla a vzdialenosti objektu vzhľadom na snímač bola zavedená angulárna  $f_a$  a radiálna  $f_d$  modulačná funkcia [2], [5]. Určitosť výrokov „obsadený“ a „prázdny“ je väčšia v blízkosti osi vyžarovacieho kužeľa, pretože sa intenzita ultrazvukových vln na jeho hraniciach znižuje na nulu. Táto skutočnosť je modelovaná angulárnou modulačnou funkciou

$$f_a(\vartheta) = \begin{cases} P(\vartheta) & 0 \leq |\vartheta| \leq 12,5^\circ \\ 0 & |\vartheta| \geq 12,5^\circ \end{cases} \quad (2)$$

kde  $P(\vartheta)$  je smerová vyžarovacia funkcia (1). Podobne s narastajúcim vzdialenosťou  $r$  bunky  $c_j$  od snímača sa určitosť výrokov „prázdny/obsadený“ znižuje. Tento fakt je modelovaný radiálnou modulačnou funkciou

$$f_d = (\rho) = 1 - \frac{\tanh(2(\rho - \rho_v))}{2} \quad (3)$$

Parameter  $\rho_v$  sa nazýva rádius viditeľnosti a definuje vzdialenosť od snímača, v ktorej určitosť výrokov prechádza plynulo do neurčitosti [2].

### 2.2 Algoritmus tvorby mapy na základe teórie pravdepodobnosti

Metódy využívajúce bayesovský odhad sú najčastejším spôsobom fúzie dát pri tvorbe mriežok obsadenia [3], [1]. Pri tomto prístupe

obsahuje každá bunka pravdepodobnostný odhad obsadenosti danej bunky formou stavovej premennej  $s(c_j)$ . Táto premenná je definovaná ako nezávislá, diskrétna náhodná premenná so stavmi: obsadený a prázdny ( $O$  a  $E$ ). To znamená, že neexistuje žiadna závislosť medzi stavmi dvoch buniek  $c_j$  a  $c_i$ , dokonca ani keď sú susedné [1]. Cieľom je výpočet pravdepodobnosti obsadenia prekážkou pre každú bunku  $c_j$  v mriežke na základe meraní z množiny  $R$ . Pravdepodobnosti stavov bunky spĺňajú pre všetky bunky z  $U$  nasledujúcu podmienku

$$P[s(c_j) = O] + P[s(c_j) = E] = 1 \quad (4)$$

Na základe práce [7] sme na interpretáciu nameraných údajov vzdialenosti navrhli nasledujúci model snímača

$$P[r|s(c_j) = O] = p_1[r|s(\rho, \vartheta) = O] + p_2[r|s(\rho, \vartheta) = E] \quad (5)$$

$$p_1[r|s(\rho, \vartheta) = O] = \begin{cases} (1-\lambda)(0,5-p_E) & 0 \leq \rho < r-2\Delta r \\ (0,5-p_E) \left[ 1 + \lambda \left( \left( \frac{r-2\Delta r-\rho}{\Delta r} \right)^2 - 1 \right) \right] & r-2\Delta r \leq \rho < r-\Delta r \\ \lambda(p_O-0,5) \left( 1 - \left( \frac{r-\rho}{\Delta r} \right)^2 \right) & r-\Delta r \leq \rho < r+\Delta r \\ 0, & \rho \geq r+\Delta r \end{cases} \quad (6)$$

$$p_2[r|s(\rho, \vartheta) = E] = \begin{cases} p_E & 0 \leq \rho < r-\Delta r \\ 0,5 & \rho \geq r-\Delta r \end{cases} \quad (7)$$

Konštanty  $p_E$  a  $p_O$  predstavujú minimálnu a maximálnu hodnotu funkcie modelu snímača a spĺňajú podmienku  $p_E + p_O = 1$ ,  $r$  je dané meranie vzdialenosti,  $2\Delta r$  je šírka oblasti považovanej za „blízku“ kružnicovému oblúku s polomerom  $r$ ,  $\rho$  a  $\vartheta$  sú polárne súradnice bunky  $c_j$  vzhľadom na polohu snímača a jeho orientáciu a  $\lambda = f_a(\vartheta) f_d(\rho)$ .

Rekurzívna formulácia Bayesovej teórie umožňuje zlučovanie senzornej informácie s cieľom aktualizácie odhadu stavu bunky. Pre danú bunku  $c_j$ , súčasný odhad jej stavu  $P(s(c_j) = O | r_1, \dots, r_{n-1})$  na základe meraní  $R = \{r_1, \dots, r_{n-1}\}$  a pre nové meranie  $r_n$  sa aktualizácia vykoná nasledujúcim vzťahom

$$P(s(c_j) = O | r_1, \dots, r_n) = \frac{P(r_n | s(c_j) = O) P(s(c_j) = O | r_1, \dots, r_{n-1})}{\sum_{X \in \{E, O\}} P(r_n | s(c_j) = X) P(s(c_j) = X | r_1, \dots, r_{n-1})} \quad (8)$$

kde  $P(r | s(c_j) = X)$  sa určí z modelu snímača (5) s využitím rovnice (4) a  $X \in \{E, O\}$ . Na začiatku procesu tvorby mapy pred prvým meraním sa všetky bunky v mriežke inicializujú hodnotou vyjadrujúcou úplnú neznalosť o stavoch buniek  $P(s(c_j) = O) = P(s(c_j) = E) = 0,5$ . Navigačnú mapu  $N$  získame priradením  $v(c_j) = P(s(c_j) = O | r_1, \dots, r_n)$ .

*Literatúra bude uvedená v budúcej časti.*

*Pokračovanie v budúcom čísle.*

**Ing. Jaroslav Hanzel**  
**prof. Ing. Ladislav Jurišica, CSc.**

**Katedra automatizácie a regulácie**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Slovenská technická univerzita**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**  
**e-mail: jaroslav.hanzel@kar.elf.stuba.sk**  
**ladislav.juristica@kar.elf.stuba.sk**

32

