

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky

Ing. Jana Púchyová

Autoreferát dizertačnej práce
Správanie sa multiagentových systémov s definovaným cieľom

na získanie akademického titulu „**philosophiae doctor**“ (v skratke **PhD.**)

v študijnom programe doktorandského štúdia

aplikovaná informatika

v študijnom odbore:

9.2.9 aplikovaná informatika

Žilina, apríl 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre technickej kybernetiky, Fakulte riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Jana Púchyová
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra technickej kybernetiky

Školiteľ: prof. Ing. Juraj Miček, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra technickej kybernetiky

Školiteľ špecialista: doc. Ing. Peter Gubiš, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra technickej kybernetiky

Oponenti: prof. Ing. Karol Rástočný, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta

doc. RNDr. Elena Gramatová, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta informatiky a informačných technológií

doc. RNDr. Michal Munk, PhD.
Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre
Fakulta prírodných vied

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika**, v študijnom programe **aplikovaná informatika**, vymenovanou dekanom Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline dňa

prof. Ing. Martin Klimo, PhD.

predseda odborevej komisie

študijného programu **aplikovaná informatika**
v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika**

Fakulta riadenia a informatiky

Žilinská univerzita

Univerzitná 8215/1

010 26 Žilina

Anotácia

Problematikou dizertačnej práce je oblasť multiagentových a multirobotických systémov so zameraním sa na ich správanie v úlohách prieskumu terénu. Cieľom práce je návrh takého multirobotického systému, ktorý je schopný plniť úlohu prieskumu pri možnom zlyhaní niektorých z robotov. Navrhnuté techniky súčasne uvažujú o nepresnostiach a chybách vznikajúcich v systéme. V práci je popísaný návrh, ako aj overenie značkovacieho algoritmu so skráteným návratom pre urýchlenie pokrytia prostredia. Ďalšia časť overuje správanie sa multirobotického systému pri použití rôznej úrovne fúzie spracovávaných informácií. Vytvorené závery o zložení systému a spôsobe kooperatívneho spracovania informácií poskytujú základné východiská pre experimenty, ktoré overujú kooperatívne správanie sa multirobotického systému a jeho odolnosti voči vznikajúcim nepresnostiam a zlyhaniu robotov. Úloha bola experimentálne verifikovaná na lokalizácii cieľa pri prieskume, pričom pri odhade vzniku chyby sa vychádzalo z teórie pravdepodobnostnej robotiky. Chyby boli potláčané technikou kooperácie, rozšíreným Kalmanovým filtrom, časticovým filtrom a časticovým filtrom s váhovaním. Experimenty boli vykonané na statickom, ako aj mobilnom systéme.

Kľúčové slová: multiagentový systém, multirobotický systém, pravdepodobnostná robotika, zlyhanie robota, filtrácia, časticový filter, rozšírený Kalmanov filter.

<i>Počet strán:</i>	112	<i>Počet použitej literatúry:</i>	111
<i>Počet obrázkov:</i>	49	<i>Počet tabuliek:</i>	10

Annotation

The subject of dissertation thesis is the area of multiagent and multirobot systems focusing on their behaviour in the field of terrain exploration tasks. The goal of thesis is to design the multirobot system which is able to complete exploration mission with the possibility of any robot failure. The proposed techniques consider the inaccuracies and errors arising in the system. In thesis is described the design, as well as the verification of marking coverage algorithm with shorten return for speeding up of environment coverage. The next part verifies behaviour of multirobot system with use of different level of information fusion. Created conclusions about system composition and the way of cooperative information processing provides basic starting points for experiments, that verify cooperative behaviour of multirobot system and its resistance against inaccuracies and failures of robots. The task was experimentally verified on target localization during the exploration, while for error estimation the theory of probabilistic robotics is used. The errors were suppressed using technique of cooperation, extended Kalman filter, particle filter and particle filter with weighting. Experiments were performed on static and also mobile system.

Keywords: multiagent system, multirobotic system, probabilistic robotics, robotic failure, filtration, particle filter, extended Kalman filter.

<i>Number of pages:</i>	112	<i>Number of used bibliographies:</i>	111
<i>Number of figures:</i>	49	<i>Number of tables:</i>	10

1 Teoretické východiská

1.1 Teória multiagentových a multirobotických systémov

Teória multiagentových systémov je oblasťou výskumu, ktorá vznikla prienikom viacerých vedných disciplín. Podľa Ferbera [1999] dvomi najdôležitejšími sú distribuovaná umelá inteligencia a umelý život.

Hlavným stavebným prvkom multiagentového systému je *agent*. Autori Wooldridge a Jennings [1995] zaviedli dva všeobecné druhy agentov, ktoré možno použiť aj v súvislosti s MAS. V prípade pojmu slabého agenta, agentom môže byť označený počítačový systém, ktorý sa vyznačuje vlastnosťami ako samostatnosť, sociálna schopnosť, reaktivita a proaktivita. Pojem silného agenta je používaný najmä v oblasti výskumu umelej inteligencie. Okrem vlastností, ktoré má slabý agent, silný agent má vlastnosti pripisované ľuďom, z tohto dôvodu je pojem silného agenta považovaný za sporný.

Multiagentový systém (MAS) môže byť chápaný ako systém skladajúci sa zo skupiny agentov nachádzajúcich sa v prostredí, v ktorom sa spoločne svojím konaním snažia dosiahnuť stanovený cieľ a splniť úlohu systému. Podľa [Ferber, 1999] okrem agentov a prostredia MAS zahŕňa v sebe súbor objektov, súbor vzťahov, súbor operácií a operátory. Aby bolo možné hovoriť o multiagentovom systéme, je nutné, aby v systéme prebiehala komunikácia a prispievala k splneniu cieľa.

Vo väčšine príkladov z oblasti simulácií bude za prostredie považovaná 2D štvorcová mriežka, kde každá bunka má 4 hranových susedov a agenty sa v tejto mriežke pohybujú.

V prípade aplikácií z reálneho sveta sa prostredie často nazýva *terén*. Súčasne aj agent môže byť nazvaný robot. Preto v prípade, že bude použitý pojem *agent*, bude používaný v zmysle ideálneho robota bez vzniku nepresností. Ak bude agent vykazovať chyby alebo bude zlyhávať, bude v práci uvádzaný pojmom *robot* a systém tvorený z takýchto prvkov sa bude nazývať multirobotickým systémom (MRS).

1.1.1 Prínos MAS a oblasti využitia

Hlavnou úlohou MAS je splnenie predpísanej úlohy. Aby bol využitý potenciál MAS čo najlepšie, je vhodné použiť systém v prípade takých úloh, kde jeho zavedenie prinesie skrátenie času riešenia v porovnaní s riešením jedným agentom, prípadne ide o zložité úlohy, ktorých riešenie je ťažké nájsť použitím jedného agenta. V niektorých prípadoch môže byť systém zostavený tak, aby svojimi vlastnosťami zvýšil spoľahlivosť, kvalitu riešenia, prípadne distribuovaním častí úlohy na viacero prvkov systému a využitím výpočtových zdrojov umožnil predĺženie operačného času na vyriešenie úlohy.

MAS sú používané v rôznych oblastiach, s overením ich prínosu sa začali ich princípy používať nielen v oblasti riešenia technických problémov. Riešenými úlohami v oblasti robotiky sú napríklad prieskum terénu, mapovanie terénu, spoznávanie vesmíru [Leitner, 2009], zároveň sa využívajú pri pomoci po katastrofách, prieskume nebezpečia v poškodenom teréne a hľadanie obetí v ňom.

1.2 Analýza metód prieskumu prostredia

Prieskum prostredia je jedna zo základných úloh v mobilnej robotike. Úlohou agentov je prejsť celým skúmaným prostredím a nájsť v ňom cieľ. Úloha teda môže byť rozdelená na dve podúlohy: *pokrývanie terénu* a *hľadanie cieľa*.

Za pokrývanie sú považované také úlohy, kde agenty musia prejsť celým prostredím tak, aby navštívili každú oblasť terénu. Pod úlohou hľadania cieľa sa rozumie proces nájdenia istého objektu nachádzajúceho sa v teréne. Riešenie tejto úlohy je v praxi zväčša spojené s rozsiahlejšou úlohou, a to napríklad hľadanie cieľov pri prieskume terénu. Agent pre nájdenie cieľa využíva pohyb a senzory.

1.2.1 Algoritmy pre pokrývanie terénu

Doteraz navrhnuté algoritmy pre úlohy pokrývania terénu sa líšia. Do veľkej miery závisí ich použitie od vybraného typu agentov a vlastností systému, v ktorom budú použité. Uvádzané algoritmy sa najčastejšie používajú v oblasti pokrývania neznámeho prostredia jednoduchými robotmi.

- Recency algoritmus [Thrun, 2001, b] - agent sa rozhoduje pri výbere ďalšej bunky na základe času návštevy bunky (časové pokrývanie),
- Node counting algoritmus [Koenig, 2001] - agent sa rozhoduje pri výbere susednej bunky na základe počtu návštev susednej bunky (priestorové pokrývanie),
- Alarm algoritmus [Menezes, 2007] - založený na princípoch algoritmu optimalizácie mravčej kolónie (ACO) [Dorigo, 2004]; agent zanecháva značku, ktorá časom vyprcháva (kombinácia priestorového a časového pokrývania),
- Skupina algoritmov s agent-to-tag komunikáciou - algoritmy sú založené na kombinácii mobilných agentov a fixných senzorov (tagov) [Ferranti, 2009, b],
- Skupina Spanning Tree Covering (STC) algoritmov vychádza z predpokladu, že prostredie, ktoré je tvorené štvorcovými bunkami, môže byť považované za graf $G = (V, E)$, pričom vrcholmi tohto grafu sú všetky vrcholy štvorcových buniek a hranami sú hrany buniek [Gabriely, 2001]. Úlohou agenta je teda zo všetkých vrcholov vytvoriť strom grafu a na základe neho prejsť po celom prostredí [Senthilkumar, 2008], [Agmon, 2006].

1.3 Zlyhanie robota pri plnení úlohy multirobotickým systémom

Väčšina autorov, ktorí sa zaoberajú problematikou pokrývania terénu pomocou multirobotického systému, testuje riešenie v simulačných prostrediach a neuvažuje o možnosti zlyhania agenta-robota. V tomto prípade sa bude za zlyhanie považovať „úmrtie“ robota, a teda po zlyhaní nie je schopný ďalej plniť svoju úlohu. Algoritmy vytvorené pre pokrývacie úlohy je potrebné vyhodnotiť vzhľadom na náchylnosť vyriešenia úlohy pri zlyhaní. Treverton [2009] vo svojej práci popísal tri modely zlyhania založené na empirickej analýze, akým spôsobom môžu roboty zlyhať v reálnom svete.

Medzi navrhnuté modely patria model bez zlyhania, v ktorom sa nepočíta so zlyhaním robota. Ďalšími sú model fixnej pravdepodobnosti zlyhania, model konštantnej pravdepodobnosti zlyhania a model rastúcej pravdepodobnosti zlyhania.

1.4 Pravdepodobnostná robotika

Pravdepodobnostná robotika je novým prístupom k robotike a od ostatných konvenčných prístupov sa odlišuje tým, že pri riešení akceptuje neistotu či už pri snímaní prostredia robotom alebo pri jeho pohybe. Neistota je reprezentovaná explicitne použitím výpočtov z teórie pravdepodobnosti.

Pre analýzu a vytvorenie domnienok o dynamickom systéme sú použité dva modely v pravdepodobnostnej forme - stavový model a model meraní. Stavový model popisuje vývoj stavu v čase, model meraní prideluje šumové merania k stavom.

V prostredí robotov sa deje mnoho nepredvídateľných javov, a teda merania robota sú ovplyvnené chybou, ktorá môže byť čiastočne eliminovaná pravdepodobnostnými algoritmi. Pravdepodobnostné algoritmy sú založené na Bayesových filtroch:

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{z}) = \frac{p(\mathbf{z}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{z})} = \frac{\textit{likelihood.prior}}{\textit{evidence}}, \quad (1.1)$$

kde v tomto prípade \mathbf{x} označuje vektor stavov, \mathbf{z} označuje vektor meraní. Základným predpokladom pravdepodobnostných metód je tzv. Markovov predpoklad, a teda nasledujúci stav závisí iba na aktuálnom stave.

1.4.1 Rozšírený Kalmanov filter

Rozšírený Kalmanov filter (EKF) prekonáva jednu z vlastností klasického Kalmanovho filtra, a to podmienku linearity (stavu a pozorovaní).

Princíp rozšíreného Kalmanovho filtra možno nájsť v algoritme 1 [Ribeiro, 2004].

Algoritmus 1 Algoritmus rozšíreného Kalmanovho filtra

- 1: Vezmi do úvahy posledný filtrovaný odhad $\tilde{\mathbf{x}}_{k|k}$.
 - 2: Linearizuj dynamiku systému, $\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k$ v okolí $\tilde{\mathbf{x}}_{k|k}$.
 - 3: Aplikuj predikčný krok na linearizovanú dynamiku systému, čím dostaneš: $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ a $\mathbf{P}_{k+1|k}$.
 - 4: Linearizuj dynamiku pozorovania, $\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{u}_k$ v okolí $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1|k}$.
 - 5: Aplikuj filtrovací krok na linearizovanú dynamiku pozorovania, čím dostaneš: $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ a $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$.
-

Nevýhodou Kalmanovho filtra je, že ho nemožno považovať za optimálny odhad, a ak linearizovanie nie je vhodnou aproximáciou dynamického stavu, diverguje [Ribeiro, 2004].

1.4.2 Časticové filtrovanie

Časticový filter (PF) je suboptimálnym filtrom, ktorý vykonáva sekvenčný Monte Carlo odhad postavený na časticovej reprezentácii hustoty pravdepodobnosti pomocou váženej sady častíc.

Nech je vektor cieľových stavov označený ako $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$, kde n_x je dimenzia stavového vektora a \mathbb{R} je množina reálnych čísel, $k \in \mathbb{N}$ je časový index, a \mathbb{N} je množina prirodzených čísel. Index k prislúcha k okamihu spojitého času t_k [Ristic, 2004]. Cieľový stav je potom definovaný diskretným stochastickým modelom:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k), \quad (1.2)$$

kde f je známa, nielen lineárna funkcia stavu (\mathbf{x}_{k-1}) a sekvencie šumu (\mathbf{v}_k). Cieľom filtrovania je rekurzívne odhadnúť \mathbf{x}_k z meraní $\mathbf{Z}_k \triangleq \{\mathbf{z}_i, i = 1, \dots, k\}$. Hodnota meraní je závislá na stave systému cez model meraní:

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \quad (1.3)$$

kde h je známa, nielen lineárna funkcia stavu (\mathbf{x}_k) a sekvencie šumu merania (\mathbf{u}_k). Počiatočný

stav cieľa má známu hustotu pravdepodobnosti $p(\mathbf{x}_0)$ a je nezávislý na šumových sekvenciách.

Algoritmus časticového filtra pozostáva z troch krokov - predikcia, korekcia a prevzorkovanie, pričom prevzorkovanie slúži na zabránenie degenerácii vzoriek vo filtri (alg. 2).

Algoritmus 2 Algoritmus časticového filtra

Require: Sada N častíc, $i = 1, 2, \dots, N$, $p(\mathbf{x}_0)$ je známa, známa funkcia hustoty pravdepodobnosti

$k = k + 1$

if $N_{eff} < N_{thr}$ **then**

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^i)$$

▷ Nastala degenerácia častíc, prevzorkovanie

end if

for $i = 1$ to N **do**

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_{k-1})$$

▷ Predikcia

end for

Meranie \mathbf{z}_k

for $i = 1$ to N **do**

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k)$$

▷ Korekcia

$$\tilde{w}_k^i$$

▷ Výpočet váh w_k^i

end for

for $i = 1$ to N **do**

$$w_k^i = \frac{\tilde{w}_k^i}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}_k^i}$$

▷ Normovanie váh

end for

Vlastnosti časticových filtrov sa môžu líšiť v závislosti od ich modifikácie. Vo všeobecnosti ale možno podľa základných vlastností uviesť ako najväčšie výhody časticových filtrov ich použiteľnosť aj na nelineárne systémy, možnosť prispôbiť sa takmer ľubovoľnej charakteristike senzorov, dynamike pohybu alebo rozloženiu šumu. Ďalej sa vyznačujú schopnosťou reprezentovať ľubovoľnú hustotu, nielen Gaussove rozdelenie (napríklad multimodálne rozdelenie), schopnosťou odhadu celej funkcie hustoty pravdepodobnosti a paralelizovateľnosťou.

1.4.3 Model meraní

Thrun [2005] vykonal merania, aby dokázal, aké rozdelenie má šum senzorov. Model, ktorý vo svojich meraniach použil, zahŕňal štyri typy meracích chýb, pričom všetky značne ovplyvňujú funkčnosť modelu - malý merací šum, chyby z dôvodu neočakávaných predmetov, chyby z dôvodu zlyhania detekcie objektov a náhodné nevysvetliteľné chyby. Každá z týchto chýb má iné rozloženie pravdepodobnosti, no po ich spojení a testovaní správania na reálnych senzoch zistil, že v skutočnosti chyba merania nemá Gaussove rozdelenie, ale rozdelenie zložené z Gaussovho, exponenciálneho a rovnomerného rozdelenia.

1.5 Súčasný stav problematiky doma a v zahraničí

Vzhľadom na to, že problematika multiagentových a multirobotických systémov je relatívne nová oblasť skúmania, na Slovensku nie je do veľkej miery rozšírená. Princípy multiagentových systémov sú využívané v rôznych oblastiach výskumu [Malinovský, 2011], [Janota, 2008]. Lekýr [2004] vo svojej práci uvádza prístup pre modelovanie multiagentových systémov, Schmotzer [2005] navrhol softvérový multiagentový systém tvorený rozumnými agentmi. Využitie multiagentového systému s biologicky inšpirovaným správaním na riešenie mnohých problémov od koordinácie robotov [Budinská, 2012, a], [Masár, 2013] po plánovanie a rozvrhovanie [Budinská, 2012, b] skúmajú najmä v Slovenskej akadémii vied. Problémy týkajúce sa

multiagentových systémov s agentmi-robotmi sú riešené v prácach [Kostelník, 2005], [Hladek, 2009], [Havlík, 2012].

Vývoj algoritmov pre pokrývanie terénu je rozšírenejší mimo hraníc Slovenskej republiky. Prehľad vytvorených algoritmov je možné nájsť v časti 1.2.1.

Časticové filtre v robotike sú v súčasnosti používané často, avšak zväčša na riešenie úloh s použitím jedného robota. Filtrovanie sa do oblasti multirobotických systémov dostalo až neskôr, preto výskum v tejto oblasti je ešte pomerne mladý a nie je publikovaných veľa výsledkov. Časticové filtre v oblasti MRS sú použité pri riešení úloh lokalizácie [Matsubara, 2010], [Jayasekara, 2010], prieskumu [Ko, 2003], [Fu, 2010] alebo riešenie úlohy simultánnej lokalizácie a mapovania [Howard, 2005], [Je, 2008], kde býva často použitý Rao-Blackwellised Particle filter, ktorý je vhodný práve na úlohy tohto typu [Gil, 2010], [Lee, 2012].

2 Ciele dizertačnej práce

Použitie robotiky pri prieskume terénu je síce rozšírená úloha, no navrhnuté algoritmy sú často stavané pre riešenie prostredníctvom jedného agenta. Niektoré sú použiteľné iba v testovacej prevádzke, iné je možné použiť iba vo vopred známom teréne. Najnovšie algoritmy, ktoré slúžia na skrátenie času pokrývania s použitím reaktívnych robotov a sú schopné pokrývať neznámy terén, boli popísané v časti 1.2.1. Ich jednoduchosť je ich veľkou výhodou, no rýchlosť vykonania celého prieskumu ešte stále nie je optimálna. Preto jednou z úloh je vytvoriť taký algoritmus, ktorý skupinou homogénnych robotov dokáže skrátiť čas prieskumu a súčasne byť robustný v prípade zlyhania niektorého z agentov.

Jednou z výhod multiagentových systémov je efektívne využitie výpočtového výkonu, ktorý slúži k zvýšeniu kvality riešenia. Systém schopný kooperácie je možný spracovávať dostupné informácie s väčšou presnosťou vďaka svojim zdrojom. Ako ale ovplyvňuje množstvo zdrojov a miera paralelizmu v multirobotickom systéme kvalitu riešenia a ako ovplyvňujú predošlé faktory komunikačnú náročnosť, je úlohou, ktorá má byť overená v tejto práci.

Hľadanie a najmä presná lokalizácia cieľa je vhodnou úlohou pre použitie multirobotického systému tolerujúceho chyby. Očakáva sa, že pri lokalizácii cieľa bude možné potláčať chyby nielen pomocou kolektívneho plnenia úlohy. Nájsť vhodnú techniku, ktorej výsledky budú porovnateľné s už aplikovanými metódami, je hlavným cieľom dizertačnej práce. Je potreba poukázať na to, že využitie multirobotických systémov dokáže nielen potláčať chyby vznikajúce v systéme, ale je robustné aj na prípadné zlyhanie niektorých z prvkov systému.

Popísané ciele práce možno sformulovať do nasledujúcich bodov:

- návrh algoritmu správania sa agentov pre riešenie úlohy prieskumu neznámeho terénu,
- návrh spôsobu spracovania dát pre kolektívne vyhodnotenie,
- overenie činnosti MRS z hľadiska odolnosti proti vznikajúcim nepresnostiam a zlyhaniu robota.

3 Metódy práce

Úlohy prieskumu terénu sú jednou z oblastí, v ktorej je multiagentový systém používaný najčastejšie. Doteraz existujúce algoritmy sú však často postavené na algoritme pokrývania známeho prostredia, prípadne roboty na prieskum používajú zložité zariadenia. Preto bol v kapitole 4 navrhnutý jednoduchý algoritmus, ktorý vylepšuje algoritmus Spanning Tree

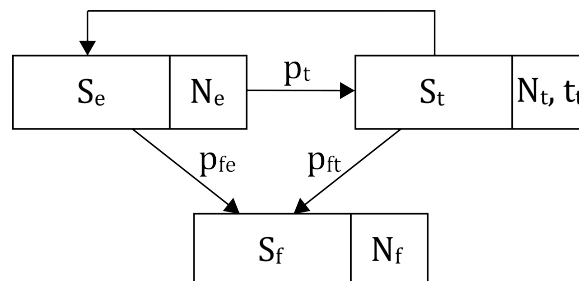
Covering tým, že znižuje počet potrebných krokov na základe značkovania. Výsledky boli testované v nástroji na simuláciu multirobotických systémov Player/Stage [Gerkey, 2003]. Nástroj bol navrhnutý presne na potreby simulácie robotických systémov.

Keďže multiagentový systém je možné použiť nielen na skrátenie času vykonávania úlohy, ale aj na zvýšenie kvality riešenia, v práci je popísaný spôsob, ako rôzne môžu byť v systéme vyhodnocované informácie a čo je možné rôznou úrovňou fúzie dát dosiahnuť. Tieto pokusy boli vykonávané na procese spracovania povelov a ich rozpoznávaní. Výsledky sú dokumentované v kapitole 5.

Časticové filtre sú v oblasti robotiky stále viac preferované. Ich najväčšou výhodou je, že nie sú obmedzené na normálne rozdelenie hustoty pravdepodobnosti, je možné ich použiť dokonca na multimodálne rozdelenie a súčasne v nelineárnych systémoch. Napriek ich veľkej univerzálnosti v oblasti multirobotických systémov nie sú využívané často. Z toho dôvodu vhodnosť ich použitia aj v úlohách riešených skupinou robotov bola overená na úlohe lokalizácie cieľa. Výsledky meraní sa nachádzajú v časti 6, kde boli porovnávané so systémom lokalizácie bez použitia filtra a s použitím rozšíreného Kalmanovho filtra. Ďalším navrhnutým riešením bolo využitie váhovania výsledkov robotov spolu s časticovým filtrom, od ktorého sa očakávali lepšie výsledky, ako v prípade použitia čistého filtrovania. Systém má byť zároveň odolný voči zlyhaniu robota. Na overenie hypotéz bol použitý nástroj Mobile Robot Programming Toolkit [Blanco Claraco, 2010].

3.1 Matematický model multirobotického systému s úlohou prieskumu terénu

Navrhnutý model multirobotického systému skúmajúceho terén, ktorý uvažuje o zlyhaní robotov, bol vytvorený na základe podkladov z matematického modelovania swarm robotiky [Martinoli, 2004], [Lerman, 2005], pričom ide o makroskopický model.



Obr. 3.1 Model MRS skúmajúceho terén

Na obr. 3.1 je znázornený model multirobotického systému skúmajúceho terén, kde S_e - stav prieskumu (pokrývania a hľadania cieľa), S_t - stav oznamovania nájdenia cieľa, S_f - stav zlyhania robota, p_t - pravdepodobnosť, že bol nájdený cieľ, p_{ft} - pravdepodobnosť zlyhania robota v stave oznamovania nájdenia cieľa, p_{fe} - pravdepodobnosť zlyhania robota v stave prieskumu, t_t je čas potrebný na vykonanie oznámenia o nájdení a polohe cieľa, N_e je počet robotov v stave prieskumu a ich počet sa v čase mení na základe vzťahu:

$$N_e(k+1) = N_e(k) - p_t \cdot N_e(k) - p_{fe} \cdot N_e(k) + p_t \cdot N_e(k - t_t), \quad (3.1)$$

N_f je počet robotov v stave zlyhania a ich počet sa mení podľa vzťahu:

$$N_f(k+1) = N_f(k) + p_{fe} \cdot N_e(k) + p_{ft} \cdot N_t(k) \quad (3.2)$$

a N_t je počet robotov v stave oznamovania nájdenia cieľa a mení sa v čase podľa vzťahu:

$$N_t(k+1) = N_0 - N_e(k+1) - N_f(k+1), \quad (3.3)$$

kde N_0 je celkový počet robotov v multirobotickom systéme skúmajúcom terén a platí, že:

$$N_e(k) = N_t(k) = N_f(k) = 0, \quad k < 0. \quad (3.4)$$

Index k prislúcha k okamihu spojitého času t_k , $T_{k-1} \triangleq t_k - t_{k-1}$.

Nech $N(k) = [N_e(k) \ N_t(k) \ N_f(k)]^T$, potom v počiatočnom stave sú všetky roboty v stave skúmania, a teda:

$$N(0) = [N_e(0) \ N_t(0) \ N_f(0)]^T = [N_0 \ 0 \ 0]^T. \quad (3.5)$$

Ďalej je potrebné povedať, že stav zlyhania sa v modeli považuje za trvalý, a teda zlyhaný robot natrvalo zostáva v tomto stave. Preto platí:

$$\begin{aligned} N_e^* &= \lim_{k \rightarrow \infty} N_e(k) = 0 \\ N_t^* &= \lim_{k \rightarrow \infty} N_t(k) = 0 \\ N_f^* &= \lim_{k \rightarrow \infty} N_f(k) = N_0 \\ N^* &= [N_e^* \ N_t^* \ N_f^*]^T = [0 \ 0 \ N_0]^T \end{aligned} \quad (3.6)$$

kde $N^*(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} N(k)$.

4 Značovací pokrývací algoritmus so skráteným návratom

Navrhnutý algoritmus pokrývania vychádza z algoritmu Spanning Tree Covering pre on-line pokrývanie terénu. Algoritmus bol vytvorený so snahou znížiť čas prieskumu prostredníctvom počtu krokov, ktoré musí agent vykonať.

4.1 Popis algoritmu

Úlohou agentov je spoločne pokryť prostredie, ktoré je rozdelené na štvorcové bunky. Veľkosť každej bunky prostredia, ktorú je možné pri každom kroku preskúmať, je závislá od rozmerov agenta a dosahu snímania senzorky. Všetky agenty pri multiagentovom prieskume začínajú z rovnakej, ľubovoľnej krajnej bunky.

Požiadavky na rozmery štvorcovej bunky závisia od dosahu použitého senzora, a teda:

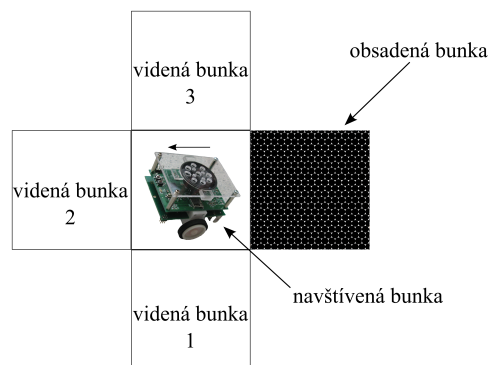
$$w < d < r_{sensor}, \quad (4.1)$$

kde w je šírka agenta, d je veľkosť strany bunky a r_{sensor} je dosah senzora.

Pri pokrývaní terénu si agent značkuje informácie o bunkách. Značky, ktoré používa, sú:

- *navštívená* - bunka, ktorou už sám prešiel,
- *obsadená* - bunka, ktorá je obsadená buď prekážkou alebo bola pokrytá iným agentom,
- *videná* - bunka bez prekážky, ktorú agent zbadal pri prieskume, avšak pokračoval pokrývaním inej bunky,

Keďže agent nepozná vopred prostredie, a teda nevie ani to, aké je veľké, pri pokrývaní je používané jednoduché pravidlo ľavej ruky. Tým sa zabezpečí, že po prvom prejdení prostredím agent zistí jeho veľkosť.



Obr. 4.1 Robot a susedné bunky pri značkovaní

Podľa obr. 4.1 bude ľavou bunkou nazývaná bunka naľavo od agenta, a teda podľa obrázku videná bunka č. 1, analogicky pravá bunka bude bunka napravo od agenta, videná bunka č. 3. Bunka pred agentom je videná bunka č. 2. Podľa navrhnutého algoritmu bude v ďalšom kroku navštívená bunka č. 1.

Princíp je vysvetlený v algoritme 3.

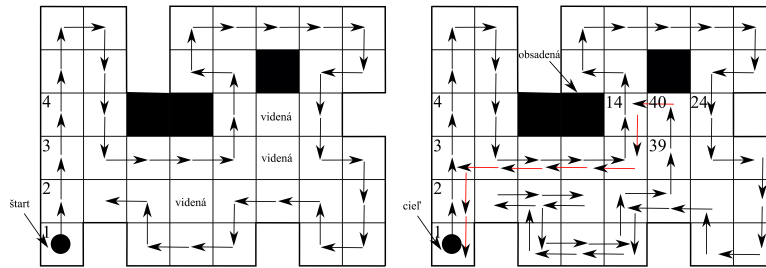
Algoritmus 3 Značkovací algoritmus pokrývania prostredia so skrátеным návratom

- 1: skontroluj či bunka, na ktorej sa nachádzaš, má značku poradia navštívenia; ak nie a nenachádza sa na nej prekážka, označ ju poradím svojej návštevy - prvá navštívená bunka má číslo 1, atď.
 - 2: skontroluj 4 susedné bunky:
 - ak si na bunke ešte nebol a nevidíš na nej prekážku, označ ju ako *videná*,
 - ak je na bunke viditeľná prekážka a na bunku sa preto nedá vstúpiť, označ ju ako *obsadená*,
 - ak bunka už bola navštívená predtým, nemeň značku,
 - 3: ak je niektorá z tvojich susedných buniek označená ako *videná*, vyber si ju na ďalšie pokrytie; ak je ich takých viac, vyber si podľa poradia: najprv ľavú bunku, potom bunku pred sebou, potom pravú bunku a nakoniec bunku za sebou,
 - 4: ak ani jedna z tvojich susedných buniek nie je označená ako *videná*, skontroluj či máš v celom prostredí niektorú z buniek označenú ako *videnú*. Ak nie, vyber si ako ďalšiu bunku tú, ktorá má najnižšie číslo poradia návštevy. V opačnom prípade vyber tú bunku, ktorá má najbližšie nižšie číslo poradia navštívenia, ako práve navštívená bunka,
 - 5: ak sa nachádzaš na bunke s poradím navštívenia 1, skonči; inak choď na krok 1;
-

Princíp prieskumu navrhnutým algoritmom je znázornený aj na obr. 4.2. Agent začína na bunke č. 1 a postupuje v smere šípok.

Pri predpoklade, že skrátены návrat je možný iba v prípade, že všetky bunky majú značku *navštívená* alebo *obsadená*, algoritmus by bol podobný algoritmu STC v zmysle návratovej cesty. No v prípade, že sú známe informácie o vlastnostiach prostredia, bolo by možné návrat skrátiť. Vlastnosti prostredia nepriamo udáva koeficient zložitosti terénu a je určený ako percento takých buniek, ktoré sú nedosiahnuteľné z hľadiska prekážok. Ak by počet neznámych buniek percentuálne nepresiahol koeficient zložitosti prostredia c_{env} , môže

agent považovať terén za pokrytý a je možné použiť skrátenejší návrat.



Obr. 4.2 Popis algoritmu prieskumu prostredia

V prípade prostredia znázorneného obr. 4.2, jeden agent musel vykonať na pokrytie a návrat 55 krokov. V prípade použitia online algoritmu STC podľa [Senthilkumar, 2008] pre pokrytie rovnakého prostredia, agent by vykonal 80 krokov za časovú jednotku. Zlepšenie v tomto prípade je teda 31,25 %.

4.2 Experimentálne výsledky

Experimenty prebiehali simulačne v nástroji pre robotické systémy Player/Stage [Gerkey, 2003]. Tento systém je schopný simulovať aj chyby a nepresnosti robotov, preto simulácia je viac podobná reálnemu správaniu sa robotov ako v iných simulačných nástrojoch. Preto v prípade, keď je potrebné otočenie robota na bunke o 90° , pokrytie takejto bunky trvá 2 základné kroky, v prípade otočenia o 180° , pokrytie trvá 3 základné kroky. Pri priamom pokrývaní je bunka pokrytá jedným krokom. Koeficient zložitosti terénu bol nastavený na 0.04.

Funkčnosť algoritmu bola najprv overená na prieskume terénu jedným robotom, pričom tvar prostredia možno vidieť na obr. 4.3 (a). Prostredie je rozdelené na štvorcové bunky, pričom na niektorých z nich sa nachádzajú prekážky. Vzhľadom na to, že agent skúma iba štyri hranovo-susedné bunky, všetky rohové bunky prostredia zostali s označením *neznáma*. Čísla prislúchajúce k slovným označeniam sú nasledovné:

- 0 - na bunke sa nachádzala prekážka - *obsadená* bunka,
- -1 - bunka je *neznáma*,
- 1 - *navštívená* bunka s poradím návštevy č.1 a podobne.

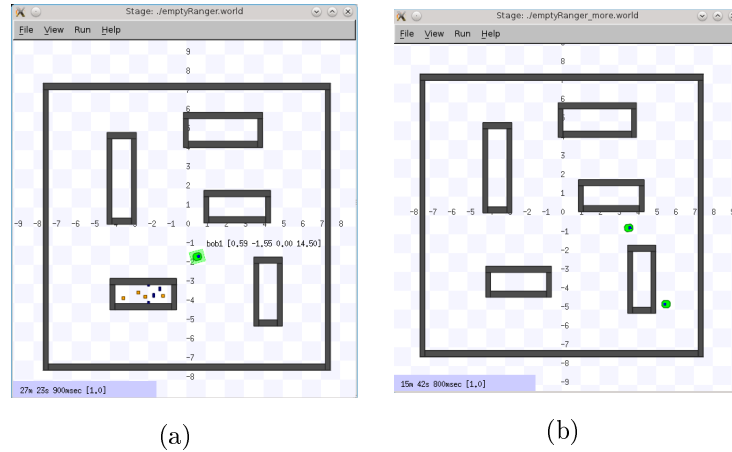
Výsledný počet krokov potrebných pre pokrytie, ako aj počet krokov v skrátenejšom návrate je popísaný v tabuľke 4.1.

Tabuľka 4.1 Pokrývanie prostredia jedným agentom

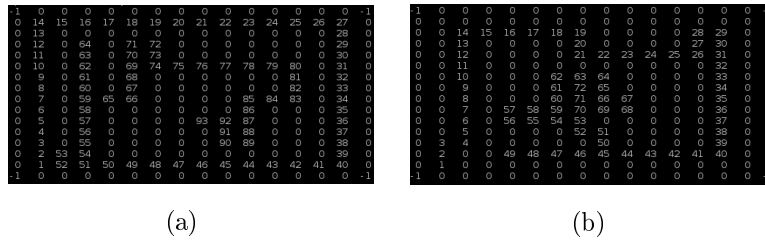
Celkový počet buniek: 256 , počet obsadených buniek: 86			
Agent	Počet pokrytých buniek	Počet krokov v skrátenejšom návrate	Počet krokov od štartu po návrat
A1	166	41	275

Prostredie pre testovanie funkčnosti na dvoch homogénnych agentoch je zhodné s predošlým prostredím (obr. 4.3 (b)). Agenty začínajú z rovnakého bodu a sú púšťané v malých časových rozostupoch. Týmto sa návrh líši od STC, kde každý z agentov vychádza z rôznej štartovacej bunky.

Agenty vytvorili značky, kde bunky pokryté iným agentom značili ako obsadené (obr. 4.4). Vytvorením stromov a ich spojením na základe štartovacej bunky je z obr. 4.5 (a) zrejmé, že agenti pokryli celé dostupné prostredie. Bunka s označením S je štartovacia bunka, bunka P_i je posledná pokrytá bunka i-tým agentom.



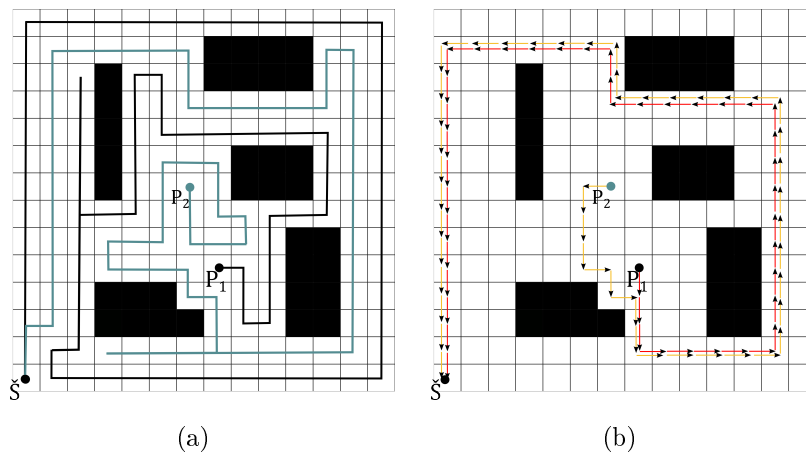
Obr. 4.3 Prostredie a simulácia prieskumu (a) jedným agentom, (b) dvoma agentmi



Obr. 4.4 Značky vytvorené (a) agentom č.1, (b) agentom č.2

Na obr. 4.5 (b) je znázornený skrátены návrat oboch agentov. Oba agenti využili na skrátены aj bunky, ktoré boli pokryté druhým agentom. Počet krokov, ktoré vykonal každý agent samostatne a súčasne počet základných krokov v čase od štartu agentov po návrat oboch na štartovaciu bunku, je popísaný v tab. 4.2.

I napriek jednoduchosti algoritmu nie je problém zabezpečiť robustnosť systému. V prípade, že niektorý z agentov zlyhá, prestane vysielat informáciu o pokrytých bunkách, a teda jeho úlohu prevzmu ostatné agenty.



Obr. 4.5 (a) Stromy pokrývania vytvorené dvoma agentmi, (b) skrátены návraty agentov po pokrývaní

Na záver tabuľky 4.2 je uvedená sumarizácia vzhľadom na celý multiagentový systém.

Tabuľka 4.2 Pokrývanie prostredia dvoma agentmi

Celkový počet buniek: 256 , počet obsadených buniek: 86			
Agent	Počet pokrytých buniek	Počet krokov v skrátanom návrate	Počet krokov od štartu po návrat
A1	93	49	
A2	72	60	
Spolu	162		161

V tom prípade počet pokrytých buniek je súčtom pokrytých buniek jednotlivými agentmi, avšak počet krokov od štartu po návrat udáva celkovú dĺžku pokrývania systémom v krokoch. To znamená, že dĺžku pokrývania udáva agent, ktorý počas pokrytia prešiel najviac krokov. Porovnaním výsledkov s tabuľkou 4.1 sa celkový počet základných krokov v rovnakom prostredí znížil z 275 na 161, čo je zlepšenie o 41,5 %.

5 Fúzia informácií v multirobotickom systéme

5.1 Multirobotický systém Georges

Na Katedre technickej kybernetiky Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline bol pre účely testov úloh pre skupinu robotov vytvorený multirobotický systém Georges. Je zložený z homogénnych robotov, ktoré sú schopné medzi sebou komunikovať pomocou RFM, prípadne prostredníctvom rečovej komunikácie.

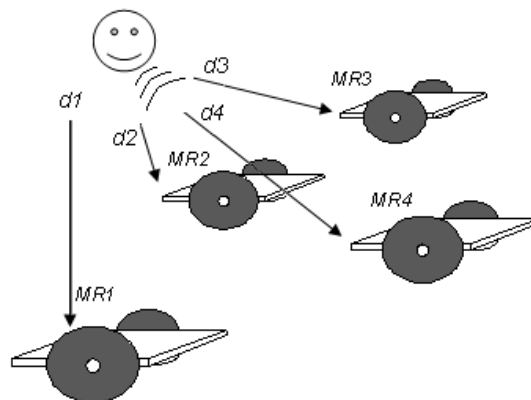
Napriek tomu, že fúzia informácií bola testovaná softvérovou, pri návrhu vhodného algoritmu pre rozpoznávanie povelov sa vychádzalo z vlastností a obmedzení systému Georges.

5.2 Fúzia informácií

Jednou z očakávaných výhod použitia multirobotického systému je zvýšenie kvality riešenia. V takom prípade býva systém často využívaný v úlohách, kde všetky prvky systému spoločne snímajú informácie z prostredia a kooperatívne ich vyhodnocujú. Závislosť kvality riešenia však nie je postavená len na počte prvkov v systéme, ale aj úrovni fúzie informácií.

Vo všetkých navrhnutých prípadoch je použitý centralizovaný multirobotický systém s agentom špecialistom.

Použitie rôznej miery fúzie informácií bolo experimentálne overené na úlohe klasifikácie vyslovených povelov. Cieľom systému je robotmi zosnímať vyslovené povel. Multirobotický systém následne povel rozpozná. Na rozpoznávanie bol použitý jednoduchý nízko-výpočtový algoritmus. Snahou úlohy je zvýšiť nielen kvalitu rozpoznania povelov, ale súčasne znížiť nároky na komunikačný podsystem.



Obr. 5.1 Multirobotický systém pre úlohu rozpoznávania povelov

Na obrázku 5.1 je načrtnutý multirobotický systém pre rozpoznávanie povelov, kde jednotlivé roboty sú označené MR_k , k je číslo robota a d_k reprezentuje vzdialenosť robota od rečníka. Akustický signál, ktorý bol zosnímaný senzormi možno popísať výrazom:

$$\mathbf{S}_k(t) = a_k \mathbf{x}(t - \tau_k) + e_k(t), \quad (5.1)$$

kde a_k je parameter vyjadrujúci útlm signálu generovaného rečníkom a je závislý od vzdialenosti snímača od rečníka d_k , τ_k je časové oneskorenia akustického signálu na ceste medzi rečníkom a snímačom k -teho robota, $e_k(t)$ je interferenčný biely Gaussov šum s nulovou strednou hodnotou, $e_k(t) = N(0, \sigma)$.

Aktívnym robotom (AR) bude nazývaný taký robot, ktorý identifikuje začiatok prehovoru, a teda zachytí vyslovený povel.

Princíp rozpoznávania je vysvetlený v [Miček, 2012]. Výsledkom celého procesu rozpoznávania je vektor kepstrálnych koeficientov. Každý novo-nameraný vektor akustického signálu prejde procesom rozpoznania a jeho vektor kepstrálnych koeficientov bude porovnaný pomocou Euklidovskej vzdialenosti s vektormi referenčnej skupiny. Najmenšia Euklidovská vzdialenosť určuje najväčšiu podobnosť s príslušným povelom z referenčnej skupiny. Euklidovská vzdialenosť je daná Pytagorovým teorémom.

Pri experimentoch bola použitá vzorkovacia frekvencia 16 kHz pri rozlíšení 12 bitov. Po identifikácii začiatku prehovoru každý robot získa 16384 vzoriek, t.j. 1024 ms . V referenčnej skupine sa nachádza 5 povelov: „back“, „go“, „left“, „right“ a „stop“.

5.2.1 Experimentálne výsledky

Experimenty rozpoznávania povelov pri rôznej úrovni fúzie informácií boli vykonávané na MRS s meniacim počtom aktívnych robotov. Pri testoch sa súčasne menila hodnota odstupu signál-šum (SNR). Cieľom použitia fúzie informácie je poukázať na to, ako vybraním vhodnej miery je možné zvýšiť spoľahlivosť klasifikácie.

5.2.1.1 Fúzia dát

Fúzia dát (*scenár 1*) bola prvým testovaným spôsobom spracovania informácie. Multirobotický systém má v tomto scenári centralizovanú architektúru a spôsob riešenia je navrhnutý so zámerom znížiť výpočtové nároky na jednotlivých robotov. Systém je zložený z M robotov rovnomerne rozložených v priestore, pričom jeden z nich (RR) má za úlohu vyhodnotiť dáta zaslané ostatnými robotmi. Fúzia dát kladie vysoké nároky na komunikačný podsystém množstvom dát potrebných na prenesenie referenčnému robotovi a naopak.

Ako je možné vidieť z tabuľky 5.1, Euklidovské vzdialenosti medzi vysloveným povelom a správnym prvkom z referenčnej skupiny pri rovnakom šume klesali s rastom aktívnych robotov v systéme. Podľa očakávania teda navrhnutá fúzia zabezpečuje, že rozpoznanie je spoľahlivejšie v prípade, že bol signál snímaný vyšším počtom robotov.

Rozdelenie záťaže pri klasifikácii je nerovnomerné, čo vyplýva z centralizovanej architektúry systému. Dochádza však k zníženiu výpočtových nárokov na jednotlivých robotov a ich presun na RR.

Závislosť Euklidovskej vzdialenosti od počtu robotov a súčasne aj od úrovne šumu je znázornená grafom na obr. 5.2. Experimenty boli vytvorené pri vyslovení povelu „go“ pri rôznom počte robotov a rôznej úrovni aditívneho šumu. Z grafu je možné usúdiť, že Euklidovská vzdialenosť klesá s rastúcim počtom robotov a s klesajúcim šumom.

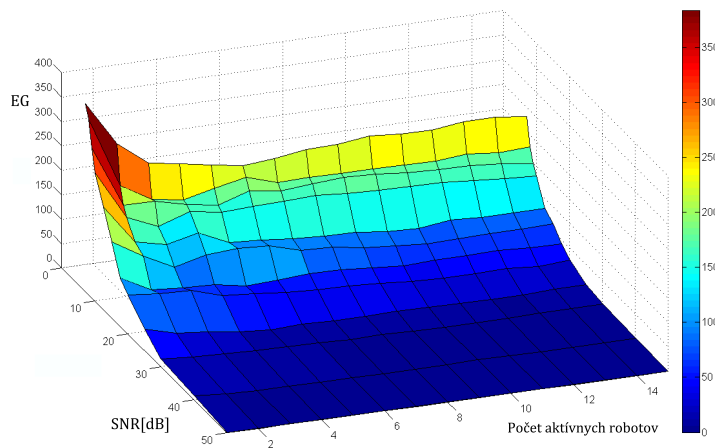
Tabuľka 5.1 Euklidovské vzdialenosti pri nahrávaní povelu pri rôznej úrovni šumu (a) dvoma, (b) štyrmi aktívnymi robotmi; fúzia dát

Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 2 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	2	2349	1127	1981	1025
„go“	2359	12	2051	2126	2447
„left“	1131	2053	0	1610	941
„right“	1972	2106	1604	5	1402
„stop“	1033	2433	940	1409	0

Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	0	2350	1128	1977	1021
„go“	2364	6	2056	2117	2446
„left“	1127	2055	0	1612	942
„right“	1977	2110	1607	2	1398
„stop“	1032	2431	941	1407	0

Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 2 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	35	2340	1124	1973	1026
„go“	2295	293	1943	1950	2232
„left“	1108	2052	22	1616	955
„right“	1965	2089	1615	43	1404
„stop“	1028	2427	943	1409	7

Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	23	2338	1119	1964	1022
„go“	2269	234	1938	1983	2241
„left“	1127	2045	19	1590	922
„right“	1941	2074	1584	41	1383
„stop“	1029	2430	937	1408	1



Obr. 5.2 Graf závislosti Euklidovskej vzdialenosti od počtu robotov a úrovne šumu

5.2.1.2 Fúzia charakteristických vlastností

Fúzia charakteristických vlastností je postavená taktiež na MRS s centralizovanou architektúrou, pričom v tomto prípade bolo zámerom znížiť nároky na komunikačný podsystem.

Každý z robotov samostatne spracuje zosnímaný signál až po výpočet hodnôt Mellovo-frekvenčných kepstrálnych koeficientov. Dostane tak vektor veľkosti 256 x 12 bitov. Každý robot potom vyšle takto získané parametre robotovi RR v pridelenom časovom slotu (TDMA - Time Division Multiple Access) (*scenár 2*).

Použitú fúziu možno modifikovať tak, že vektor Mellovo-frekvenčných kepstrálnych koeficientov sa pomocou Euklidovskej vzdialenosti porovná s koeficientami referenčnej skupiny a robotovi RR sú vyslané už len vypočítané Euklidovské vzdialenosti - *scenár 3*.

Výsledky pre fúziu charakteristických vlastností sú uvedené v tab. 5.2. Je teda zrejmé, že aj pri tomto type fúzie klesá Euklidovská vzdialenosť medzi vysloveným povelom a prislúchajúcim referenčným povelom s rastúcim počtom robotov a klesajúcou úrovňou šumu.

Oproti predchádzajúcemu scenáru došlo k zvýšeniu výpočtových nárokov kladených na jednotlivé roboty. Takýto systém má teda rovnomernejšie rozdelenie výpočtovej záťaže medzi jednotlivé prvky systému. Úloha finálneho rozhodnutia je však stále v réžii referenčného robota RR.

V prípade scenára 3, ktorý sa od scenára 2 líši zvýšením úrovne distribuovanosti spracovania dát, súčasne dochádza aj k rovnomernejšiemu rozdeleniu výpočtovej záťaže medzi jednotlivých robotov. Výsledky by však boli zhodné s tab. 5.2.

Tabuľka 5.2 Euklidovské vzdialenosti pri nahrávaní povelu pri rôznej úrovni šumu (a) dvoma, (b) štyrmi aktívnymi robotmi; fúzia charakteristických vlastností

(a) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 2 aktívne roboty						(b) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES	Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	4,5	2352	1126,5	1980,5	1023,5	„back“	3,25	2350,5	1124,25	1978,25	1021
„go“	2367,5	27	2059	2127,5	2451,5	„go“	2365,25	28,25	2060,25	2123	2450,25
„left“	1134	2054,5	1,5	1611	939	„left“	1132,25	2052,5	1,5	1610,75	942
„right“	1976,5	2101,5	1605	5,5	1402	„right“	1975,75	2107,75	1605,5	4,5	1401
„stop“	1031,5	2431	939,5	1406	0	„stop“	1030,75	2430,5	940,25	1407,75	0

(a) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 2 aktívne roboty						(b) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES	Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	68,5	2336,5	1131	1975	1043,5	„back“	63,75	2328,25	1125,75	1974,5	1042,5
„go“	2384	365	2033	2031	2329	„go“	2389,75	322	2069,75	2090,25	2377,75
„left“	1125	2055	42,5	1627	969	„left“	1142	2042,25	52,75	1606,75	942
„right“	1987	2091,5	1625,5	67	1416	„right“	1961	2076	1598	78,75	1404
„stop“	1024	2420,5	939	1412,5	10	„stop“	1029	2421,75	936,25	1409,75	9,5

5.2.1.3 Fúzia rozhodnutí

Fúzia rozhodnutí (*scenár 4*) je zameraná na úplné zníženie komunikačných nárokov a rovnomernú výpočtovú záťaž jednotlivých robotov. V tomto prípade každý robot vypočíta Euklidovskú vzdialenosť zosnímaného akustického signálu $\mathbf{S}_k(t)$ od referenčnej skupiny, vyberie povel s najmenšou Euklidovskou vzdialenosťou a rozhodnutie o vyslovenom povele vyšle do RR.

Vzhľadom na to, že s použitím algoritmu pre fúziu rozhodnutí dosahovali všetky roboty správne rozhodnutie, Euklidovské vzdialenosti v tabuľkách pre scenár 4 by sa zhodovali s tabuľkami pre scenár 2 a 3. Spôsob, ako je možné modifikovať tento scenár, je vyradenie výsledkov od toho robota, ktorý mal pri povele, o ktorom sa rozhodlo, že bol vyslovený, najvyššiu Euklidovskú vzdialenosť. Takto dosiahnuté výsledky sú zaznamenané v tab. 5.3.

Tabuľka 5.3 Euklidovské vzdialenosti pri nahrávaní povelu pri rôznej úrovni šumu (a) dvoma, (b) štyrmi aktívnymi robotmi; fúzia rozhodnutí

(a) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 2 aktívne roboty						(b) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 30 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES	Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	4	2349	1128	1982	1020	„back“	2,67	2349	1124	1978	1019
„go“	2379	16	2066	2133	2460	„go“	2368,33	25	2063	2123,33	2452,67
„left“	1131	2058	1	1615	941	„left“	1132	2053,33	1,33	1610,67	941
„right“	1972	2100	1603	5	1400	„right“	1976	2104,67	1606,67	4	1401
„stop“	1030	2432	940	1407	0	„stop“	1030	2430,67	940,67	1408,67	0

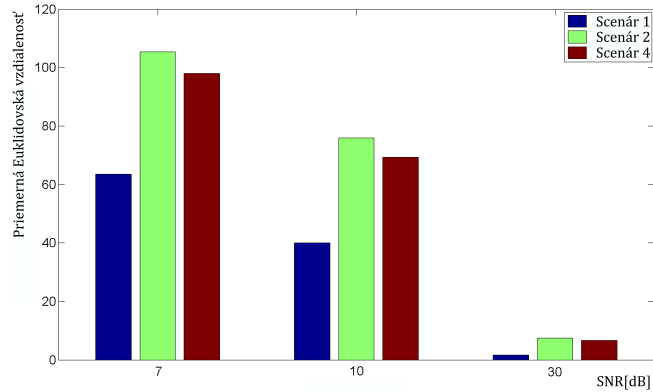
(a) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 2 aktívne roboty						(b) Euklidovské vzdialenosti; SNR = 7 dB, 4 aktívne roboty					
Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES	Vyslovený povel	EB	EG	EL	ER	ES
„back“	62	2333	1139	1984	1045	„back“	60	2324,33	1126,67	1977,33	1042,67
„go“	2413	346	2056	2070	2356	„go“	2401,33	301,33	2089,67	2123	2403
„left“	1125	2060	41	1619	958	„left“	1133,67	2047	47,67	1616	954
„right“	1986	2095	1620	64	1409	„right“	1969	2083	1602,67	73,33	1408
„stop“	1023	2423	935	1412	5	„stop“	1030,33	2423	934	1408,67	7,67

V prípade scenára 4 sa dosahovala relatívne rovnaká výpočtová záťaž na jednotlivých robotoch.

5.2.1.4 Vyhodnotenie experimentov

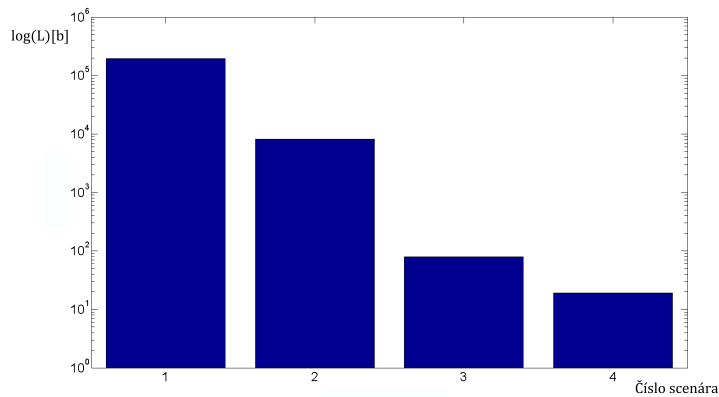
V každom zo scenárov boli ako vstupy používané rovnaké signály, a teda jednotlivé scenáre je možné na záver prostredníctvom dosiahnutých výsledkov porovnať.

Z grafu na obr. 5.3 je zrejmé, ako rastúca úroveň šumu ovplyvňuje presnosť klasifikácie,



Obr. 5.3 Porovnanie scenárov pri použití rôznej úrovne šumu

ktorá je reprezentovaná Euklidovskou vzdialenosťou vektora kepstrálnych koeficientov vzoru a vektora kepstrálnych koeficientov testovaného prehovoru. Porovnanie scenárov vychádza z výsledkov pre zaznamenávanie signálu štyrmi AR.



Obr. 5.4 Zafaženie komunikačného podsystemu

Porovnanie na obr. 5.3 prezentuje výsledok, že najnižšia Euklidovská vzdialenosť bola dosiahnutá pri scenári 1. S rastúcou úrovňou šumu sa tento fakt prejavoval výraznejšie.

Jednotlivé prístupy je možné porovnať aj z hľadiska zafaženia komunikačného podsystemu. V grafe na obr. 5.4 je uvedené zafaženie pri posielaní potrebných dát jedným aktívnym robotom do RR pri použití piatich vzorových povelov. Zafaženie komunikačného podsystemu je v tomto prípade nezávislé od úrovne šumu.

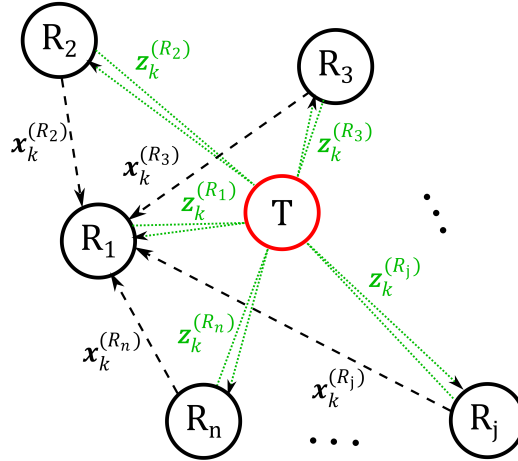
Z výsledkov je zrejmé, že scenár 1, ktorý dosahuje najlepšie výsledky z hľadiska rozpoznania, najviac zafažuje komunikačný podsystem. Zhodnotenie ostatných scenárov je taktiež možné vyčítať z grafov na obr. 5.3 a 5.4. Pri výbere vhodného scenára je teda potrebné uvažovať o spoľahlivosti riešenia, úrovni distribuovaného spracovania dát, nárokoch na pamäťový podsystem robotov, ale aj o nárokoch na komunikačný podsystem.

6 Lokalizácia cieľa multirobotickým systémom s potláčaním chyby merania

Lokalizácia cieľa spočíva v takom vyhodnotení merania charakteristickej vlastnosti hľadaného cieľa (rádioaktivita, teplota a pod.), že je možné určiť miesto zdroja vzniku meranej veličiny. V tejto časti práce je venovaná pozornosť systému, ktorý lokalizuje statický cieľ.

Vzhľadom na chyby, ktoré v systéme vznikajú, pri výpočte polohy sa uvažuje o možnom zlyhaní robota.

Úloha lokalizácie cieľa \mathbf{T} skupinou robotov $\mathbf{R}_j, j = 1, \dots, n$ v časovom okamihu k je znázornená na obr. 6.1. Každý z robotov vykoná meranie polohy cieľa $\mathbf{z}_k^{(R_j)}$, využije ho na vlastný odhad polohy cieľa $\mathbf{x}_k^{(R_j)}$, ktorý pošle na kolektívne vyhodnotenie polohy referenčnému robotovi. Na obrázku je referenčným robotom R_1 .



Obr. 6.1 Úloha lokalizácie cieľa multirobotickým systémom

Testy vykonané pre overenie spoľahlivosti a presnosti multirobotického systému v úlohe lokalizácie cieľa boli odskúšané na statickom a mobilnom systéme. Približovanie k spoločne odhadovanej pozícii cieľa je teda rozšírenou technikou pre potlačenie chyby systému.

Na oba typy systémov boli použité rôzne techniky pre potlačenie chyby merania - rozšírený Kalmanov filter, časticový filter a nakoniec je snahou potlačiť chybu algoritmom váhovania. Očakávanými chybami pri lokalizácii sú nepresnosti spôsobené vlastnosťami sensoriky a rušením v prostredí. Zároveň pri použítom systéme sa uvažuje o zlyhaní niektorého z prvkov systému.

Vzhľadom na výsledky z predchádzajúcich kapitol, systém je postavený na homogénnych robotoch a pre spoločné vyhodnotenie je použitá fúzia rozhodnutí (kap. 5). Zvýšením distribuovanosti systému sa znížili nároky na komunikačný podsystem.

Nech je dané, že roboty použité v úlohe lokalizácie cieľa poznajú svoju inicializačnú polohu. Potom poloha cieľa môže byť určená na základe sensorických meraní. Vektor pozície robota nech je $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_j, j = 1, \dots, n\}$, kde j je číslo robota a n je celkový počet robotov. Každý robot odhaduje pozíciu cieľa ako:

$$\mathbf{x}_k^{(R_j)} = (r_k^{(R_j)} \quad \alpha_k^{(R_j)}). \quad (6.1)$$

To znamená, že poloha cieľa je určená vzdialenosťou medzi cieľom a j -tým robotom $r_k^{(R_j)}$, a uhlom medzi cieľom a robotom $\alpha_k^{(R_j)}$; k korešponduje so spojitým časom t_k a vzorkovacím intervalom $T_{k-1} \triangleq t_k - t_{k-1}$.

Kolektívne odhadnutá pozícia cieľa

$$\mathbf{T}_k^{est} = (x_k^{(T^{est})} \quad y_k^{(T^{est})}) \quad (6.2)$$

a pozícia j -teho robota

$$(R_j)_k = (x_k^{(R_j)} \quad y_k^{(R_j)}) \quad (6.3)$$

sú vyjadrené súradnicami v karteziánskom súradnicovom systéme.

Je potrebné pripomenúť, že merania zo sensorov majú tvar meracieho vektora:

$$\mathbf{z}_k^{(R_j)} = (z(r^{(R_j)})_k \quad z(\alpha^{(R_j)})_k). \quad (6.4)$$

Roboty samostatne lokalizujú pozíciu cieľa s použitím ich sensorov podľa algoritmu 4. Nimi odhadnutá poloha cieľa je zaslaná do RR, kde dochádza k spracovaniu výsledkov a spoločnému odhadu polohy. Referenčný robot vypočíta polohu cieľa podľa algoritmu 5.

Algoritmus 4 Lokalizácia cieľa - časť algoritmu každého j – teho robota z MRS

- 1: $k \leftarrow 1$;
 - 2: (nastav novú pozíciu na základe vzťahu (6.8);)
 - 3: vykonaj nové meranie pozície cieľa $\mathbf{z}_k^{(R_j)}$ (6.4);
 - 4: (použi fitovanie;)
 - 5: pošli $\mathbf{x}_k^{(R_j)}$ centrálnemu bodu;
 - 6: $k \leftarrow k + 1$;
 - 7: choď na krok 2;
-

Algoritmus 5 Lokalizácia cieľa multirobotickým systémom - referenčný robot

- 1: $k \leftarrow 1$;
 - 2: vytvor n -uholník, ktorého vrcholmi sú odhadované pozície cieľa;
 - 3: vypočítaj ťažisko \mathbf{T}_k^{est} tohto n -uholníka;
 - 4: $k = k + 1$;
 - 5: choď na krok 2;
-

Pre potreby výpočtu presnosti dosiahnutého výsledku bola použitá reálna pozícia cieľa:

$$\mathbf{T}^{real} = (x^{(T^{real})} \quad y^{(T^{real})}). \quad (6.5)$$

Veľkosť chyby, ktorá je použitá pre vyhodnotenie a porovnanie algoritmov (v grafoch označovaná ako *err*), je určená ako:

$$\begin{aligned} err &= |\mathbf{T}^{real} - \mathbf{T}_k^{est}| \\ &= \sqrt{\left(x^{(T^{real})} - x_k^{(T^{est})}\right)^2 + \left(y^{(T^{real})} - y_k^{(T^{est})}\right)^2}; \end{aligned} \quad (6.6)$$

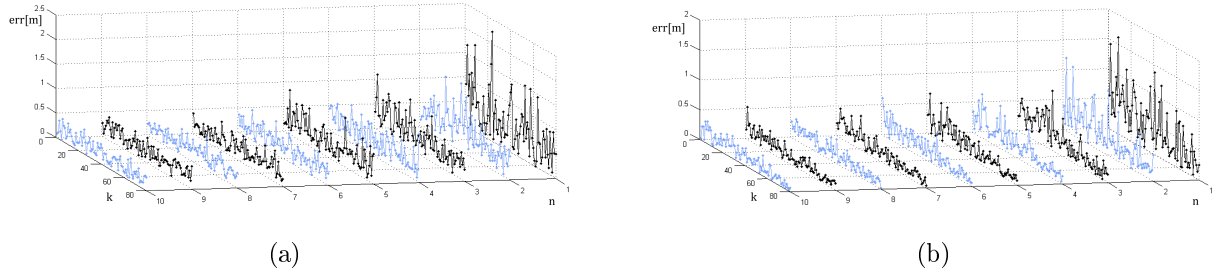
Senzory snímajú polohu cieľa so šumom merania s normálnym normovaným rozdelením pravdepodobnosti $N(0,1)$, pričom matica šumu merania vychádza z reálnych vlastností ultrazvukového snímača SRF08 a má tvar:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,131 \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Simulácia multirobotického systému lokalizujúceho cieľ prebiehala v nástroji Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT) [Blanco Claraco, 2010].

6.1 Potláčanie chyby kooperáciou

Pri hľadaní cieľa nepohyblivými robotmi môže byť skupina robotov považovaná za bezdrôtovú senzorickú sieť (WSN). V systéme dochádza k rôznym chybám, ktoré sú v tomto prípade potláčané len spoločným výpočtom. Ako je vidieť z grafu na obr. 6.2 (a), s rastúcim počtom robotov dochádza k vyváženejšej eliminácii chyby a graf veľkosti vznikajúcej chyby odhadu dosahuje vyhladenejší priebeh.



Obr. 6.2 Závislosť veľkosti chyby odhadu od počtu: (a) statických robotov, (b) mobilných robotov; použitie kooperácie

V prípade, že sú roboty mobilné, ich pozícia sa v každom kroku mení podľa vzťahu:

$$(\mathbf{R}_j)_k = \begin{cases} x_{k-1}^{(R_j)} + \cos(\alpha_{k-1}^{(R_j)}) \cdot K, & \text{pre } x_{k-1}^{(R_j)} < x_{k-1}^{(T^{est})} \\ x_{k-1}^{(R_j)} - \cos(\alpha_{k-1}^{(R_j)}) \cdot K, & \text{pre } x_{k-1}^{(R_j)} \geq x_{k-1}^{(T^{est})}, \\ y_{k-1}^{(R_j)} + \sin(\alpha_{k-1}^{(R_j)}) \cdot K, & \text{pre } y_{k-1}^{(R_j)} < y_{k-1}^{(T^{est})} \\ y_{k-1}^{(R_j)} - \sin(\alpha_{k-1}^{(R_j)}) \cdot K, & \text{pre } y_{k-1}^{(R_j)} \geq y_{k-1}^{(T^{est})}, \end{cases} \quad (6.8)$$

Nová pozícia robota teda závisí od predošlej pozície robota, od spoločne odhadnutej pozície cieľa a od veľkosti kroku robota K . V testoch bola veľkosť kroku nastavená na 0,05 m.

Všetky testy prebiehali obdobne ako v prípade statických robotov, chyba merania však bola v tomto prípade súčasne tlmená približovaním robotov k cieľu. Aj v prípade grafu na obr. 6.2 (b) možno povedať, že s rastom počtu aktívnych robotov, chyba odhadu pozície cieľa klesá.

Tabuľka 6.1 Stredné hodnoty a rozptyl chyby merania pri lokalizácii cieľa rôznym počtom robotov bez použitia filtra, (a) statické roboty, (b) mobilné roboty

Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,60373	0,51197	0,21385
2	0,45894	0,41012	0,0687
3	0,39796	0,35239	0,05272
4	0,34746	0,32467	0,03774
5	0,33936	0,28177	0,04420
6	0,28007	0,27785	0,02007
7	0,25783	0,2233	0,01927
8	0,25769	0,25448	0,01345
9	0,26406	0,25300	0,01396
10	0,22189	0,20244	0,0135

Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,47849	0,38283	0,12090
2	0,32258	0,26346	0,06227
3	0,27550	0,22727	0,03428
4	0,22639	0,17089	0,02382
5	0,19803	0,15882	0,02046
6	0,19800	0,17748	0,01698
7	0,17825	0,16244	0,01236
8	0,16041	0,15175	0,00802
9	0,15473	0,13269	0,00872
10	0,15875	0,14188	0,00881

Pre lepšie porovnanie priebehov bola vytvorená tabuľka 6.1 obsahujúca aritmetický prie-

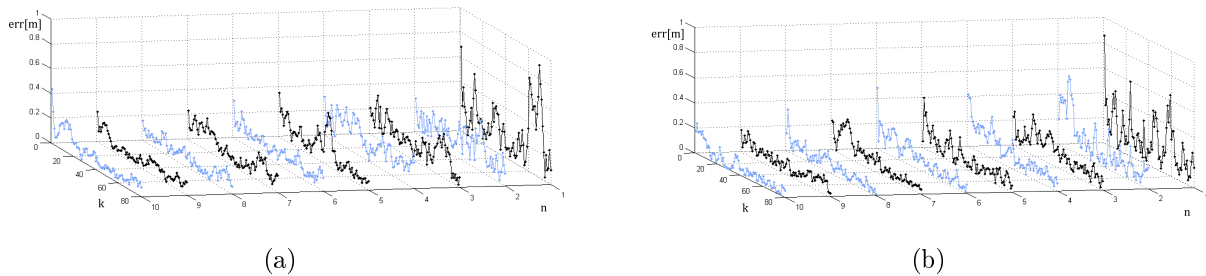
mer, medián a rozptyl chyby pri rôznom počte aktívnych prvkov. Je zrejmé, že čím menšie hodnoty charakteristiky štatistického súboru nadobúdajú, tým dosiahol navrhnutý algoritmus presnejší odhad.

Porovnaním oboch tabuliek 6.1 (a) a (b) je možné konštatovať, že hodnota všetkých charakteristík štatistického súboru klesá s rastom počtu robotov. V prípade tabuľky (a) bol najlepší výsledok dosiahnutý pri najväčšom počte aktívnych prvkov. V prípade mobilných robotov sa objavil heteroklický stav, kedy bol presnosť výpočtu vyššia pri menšom počte robotov. Systém v tomto prípade dosahoval už v prípade 8-mich robotov veľmi presné výsledky. Ako vidieť z hodnôt mediánu, hodnoty pre 8 - 10 robotov boli už natoľko blízke, že môžu byť pri miernom zaokrúhlení považované za konštantné. Toto tvrdenie vedie k záveru, že použitie desiatich robotov z hľadiska rozptylu hodnôt je zbytočné a postačí použitie ôsmich robotov. Ak by boli pre výsledok dôležité stredné hodnoty dosiahnutých odhadov, bolo by postačujúce použiť deväť robotov. Tabuľka na záver ešte dokazuje, že chyba merania je súčasne potláčaná pohybom v smere ku kolektívne odhadnutej pozícii cieľa.

6.2 Potláčanie chyby kooperáciou a rozšíreným Kalmanovým filtrom

V tejto časti bol na filtráciu chýb okrem spoločnej lokalizácie použitý rozšírený Kalmanov filter. Každý z robotov svoj odhad upravuje na základe nového merania s použitím filtra a do výpočtu spoločného výsledku prispeje už filtrovanou hodnotou. Aj v tomto prípade je z grafu pre statické roboty zrejmé, že chyba sa potláča a priebeh sa vyhladzuje s rastúcim počtom robotov (obr. 6.3) (a).

Aj v technike potláčania chyby s použitím rozšíreného Kalmanovho filtra vidieť, že v prípade mobilných robotov chyba kolektívneho odhadu err klesá s rastúcim časom (obr. 6.3) (b). Chyba klesá súčasne aj s počtom robotov lokalizujúcich cieľ.



Obr. 6.3 Závislosť veľkosti chyby odhadu od počtu: (a) statických robotov, (b) mobilných robotov; použitie kooperácie a EKF

V tabuľke 6.2, kde sú uvedené charakteristiky štatistických súborov pre oba použité typy systémov, sa objavili určité odchýlky od očakávaných hodnôt. Obdobne ako v prípade popísanom v časti 6.1, statický systém z hľadiska počtu aktívnych prvkov možno považovať za saturovaný pri použití desiatich robotov.

Nárast chyby pri štyroch statických robotov bol spôsobený nesprávnym odhadom robota č. 4. Po jeho pripojení do systému značne ovplyvnil veľkosť kolektívnej chyby odhadu. Napriek tomu chyby vznikajúce v systéme, kde sú nepresnosti filtrovania potláčané rozšíreným Kalmanovým filtrom sú natoľko potlačené, že odhad statickým systémom bol pri deviatich robotoch presnejší ako v prípade mobilného systému.

Tabuľka 6.2 Stredné hodnoty a rozptyl chyby merania pri lokalizácii cieľa rôznym počtom robotov s použitím EKF, (a) statické roboty, (b) mobilné roboty

(a)

Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,25270	0,19584	0,04217
2	0,16197	0,16024	0,00752
3	0,15152	0,13553	0,00680
4	0,17715	0,17401	0,00510
5	0,12779	0,09472	0,00899
6	0,10861	0,10331	0,00231
7	0,11599	0,10508	0,00361
8	0,08303	0,07413	0,00176
9	0,07840	0,07211	0,00194
10	0,10550	0,08683	0,00469

(b)

Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,22309	0,16438	0,04570
2	0,16159	0,12375	0,01839
3	0,12385	0,10741	0,00439
4	0,13505	0,11734	0,00695
5	0,09580	0,08127	0,00505
6	0,10075	0,08534	0,00564
7	0,09766	0,07245	0,00550
8	0,07295	0,06526	0,00253
9	0,08164	0,08018	0,00151
10	0,06940	0,05764	0,00296

6.3 Potláčanie chyby kooperáciou a časticovým filtrom

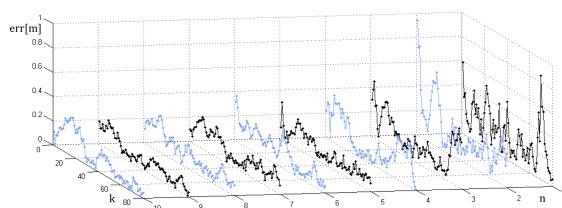
V prípade časticového filtra bola použitá verzia SIR [Gordon, 1993]. SIR algoritmus je odvodený zo základného SIS algoritmu (časť 1.4.2), od ktorého sa líši tým, že nové vzorky sú odhadované z prioru $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1})$ a prevzorkovacia fáza je vykonávaná v každom časovom kroku.

Vzhľadom na to, že prevzorkovanie sa vykonáva v každom časovom kroku k , potom $w_{k-1}^i = 1/N$ pre všetky častice $i = 1, 2, \dots, N$. Zároveň dôjde k zjednodušeniu výpočtu významných váh na tvar:

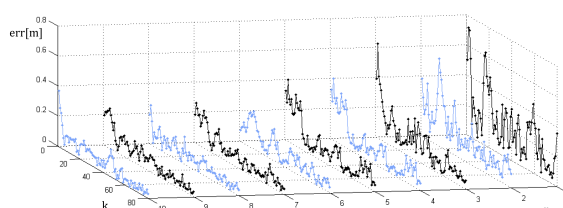
$$w_k^i \propto p(\mathbf{z}_k|\mathbf{x}_k^i), \quad (6.9)$$

pričom normalizovanie váh je vykonané pred prevzorkovaním, ktoré je v tomto prípade vykonané algoritmom systematického prevzorkovania.

Výsledky chyby filtrácie kolektívneho odhadu s použitím časticového filtra sú zobrazené na obr. 6.4. Pre testy bol použitý filter tvorený 5000 časticami. V priebehoch oboch grafov je možné pozorovať, že veľkosť chyby je v statickom systéme potláčaná výraznejšie s rastom počtu robotov. V prípade mobilných prvkov systému je chyba výraznejšie filtrovaná nielen rastom počtu robotov, ale súčasne aj s pribúdajúcim časom.



(a)



(b)

Obr. 6.4 Závislosť veľkosti chyby odhadu od počtu: (a) statických robotov, (b) mobilných robotov; použitie kooperácie a PF

Porovnanie charakteristík štatistického súboru lokalizácie cieľa pri rôznom počte robotov je uvedené v tab. 6.3. Aj v tomto prípade majú charakteristiky s rastom počtu prvkov systému klesajúcu tendenciu. Výnimkou je stav, keď dôjde k „presýteniu“ systému a použitie väčšieho počtu robotov nie je potrebné.

Tabuľka 6.3 Stredné hodnoty a rozptyl chyby merania pri lokalizácii cieľa rôznym počtom robotov s použitím PF, (a) statické roboty, (b) mobilné roboty

(a)				(b)			
Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$	Počet robotov	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,22506	0,19208	0,02466	1	0,22692	0,19130	0,02581
2	0,23320	0,19073	0,02861	2	0,16660	0,14359	0,01148
3	0,18541	0,14639	0,01456	3	0,13084	0,09808	0,01074
4	0,16644	0,14326	0,01292	4	0,11481	0,08077	0,00838
5	0,10444	0,09421	0,00288	5	0,11481	0,08077	0,00838
6	0,13308	0,12840	0,00556	6	0,09264	0,08367	0,00358
7	0,12965	0,12883	0,00356	7	0,08539	0,06532	0,00379
8	0,12812	0,11393	0,00414	8	0,07108	0,06106	0,00196
9	0,09486	0,08582	0,00290	9	0,08427	0,06843	0,00368
10	0,12102	0,10216	0,00761	10	0,07543	0,06889	0,00334

6.4 Potláčanie chyby kooperáciou, časticovým filtrom a váhovaním

Časticové filtre, ktoré boli použité v súčasnom aj predošlom algoritme, filtrujú len chyby vznikajúce pri meraní jednotlivých robotov. V systéme však dochádza k vzniku aj iných chýb, napríklad k chybám časticového filtra. Tieto nepresnosti sú preto čiastočne potláčané spoločným výpočtom, avšak v tomto prípade je kolektívny odhad posilnený váhovaním výsledkov od jednotlivých robotov.

Roboty samostatne lokalizujú pozíciu cieľa s použitím svojich senzorov (algoritmus 4). Ich odhady sú kolektívne spracované na základe váhy odhadu jednotlivých robotov. Kolektívne odhadovaná pozícia cieľa je

$$\mathbf{T}_k^{est} = f(\mathbf{x}_k^{(R_j)}, \mathbf{p}_k^{\mathbf{R}}), \quad (6.10)$$

kde $\mathbf{p}_k^{\mathbf{R}}$ je váha všetkých robotov v systéme.

$$\mathbf{p}_k^{(R_j)} = f(|\mathbf{x}_{k-1}^{(R_j)} - \mathbf{T}_{k-1}^{est}|, r_k^{(R_j)}), \quad (6.11)$$

čo znamená, že váha robota v spoločnom odhade pozície cieľa \mathbf{T}^{est} závisí od jeho vzdialenosti od cieľa $r_k^{(R_j)}$ v súčasnom časovom kroku k a od vzdialenosti medzi jeho odhadom a spoločným odhadom pozície $|\mathbf{x}_{k-1}^{(R_j)} - \mathbf{T}_{k-1}^{est}|$.

Formálne možno výpočet váhy m -tého robota vyjadriť ako:

$$\mathbf{p}_p^{(R_m)} = C_p \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{|\mathbf{x}_{k-1}^{(R_j)} - \mathbf{T}_{k-1}^{est}|}}{|\mathbf{x}_{k-1}^{(R_m)} - \mathbf{T}_{k-1}^{est}|} + \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{x}_k^{(R_j)}}{\mathbf{x}_k^{(R_m)}} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{p}_k^{(R_m)} = N_v \frac{\mathbf{p}_p^{(R_m)}}{\sum_{j=1}^n \mathbf{p}_p^{(R_j)}}$$

kde $\mathbf{p}_p^{(R_m)}$ je parciálny výpočet váhy, v ktorom hodnota C_p určuje experimentami zistenú konštantu, t.j. akou mierou do váhy prispieva odhad pozície v predošlom kroku $k - 1$. Konštanta N_v pri výpočte váhy $\mathbf{p}_k^{(R_m)}$ udáva normalizáciu na počet vrcholov, ktoré budú použité na kolektívny odhad podľa algoritmu 6. Je teda zrejme, že do spoločného odhadu sa výpočet robota m započíta $\mathbf{p}_k^{(R_m)}$ -krát.

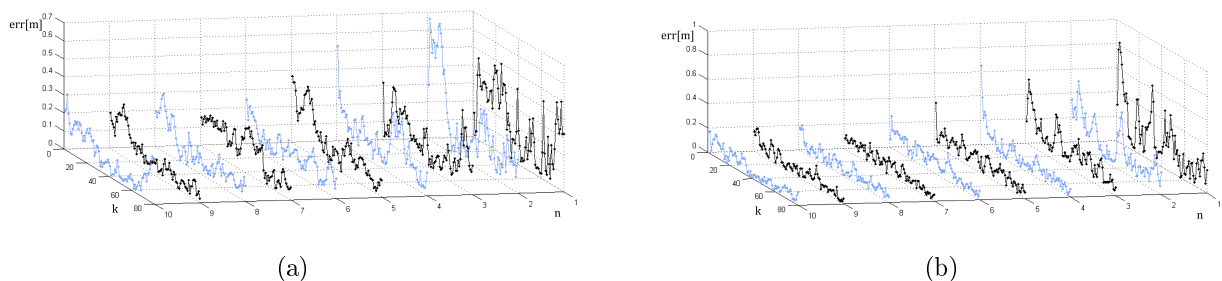
Takýmto váhovaním sa zabezpečí, že robot, ktorý čo najpresnejšie odhadol pozíciu cieľa vzhľadom na spoločný odhad v čase $k - 1$, dostáva vyššiu váhu pri kolektívnom výpočte

Algoritmus 6 Lokalizácia cieľa multirobotickým systémom s použitím časticového filtra - centrálny bod

- 1: $k \leftarrow 1$;
- 2: vypočítaj váhy \mathbf{p}_k^R ;
- 3: urči N_v vrcholov podľa odhadov jednotlivých robotov a ich váh;
- 4: vytvor n -uholník so N_v vrcholmi z kroku 3;
- 5: vypočítaj ťažisko \mathbf{T}_k^{est} n -uholníka;
- 6: $k = k + 1$;
- 7: choď na krok 2;

v čase k . Zároveň aj robot, ktorý sa podľa svojho odhadu nachádza bližšie k hľadanému cieľu, sa považuje za spoľahlivejší prvok.

Pri simuláciách, ktorých výsledky sú zobrazené na obr. 6.5, boli konštanty C_p a N_v stanovené na hodnotu 100. Použitý časticový filter bol zložený z 5000 častíc.



Obr. 6.5 Závislosť veľkosti chyby odhadu od počtu: (a) statických robotov, (b) mobilných robotov; použitie kooperácie, PF a váhovania

Ako je možné pozorovať nielen na uvedených grafoch, ale súčasne v tabuľke 6.4, vďaka váhovaniu robotov došlo k vyhladeniu priebehu veľkosti chyby, čo udávajú veľmi nízke hodnoty rozptylu $D(err)$. Aj v tomto prípade sa prejavilo „presýtenie“ systému počtom aktívnych prvkov.

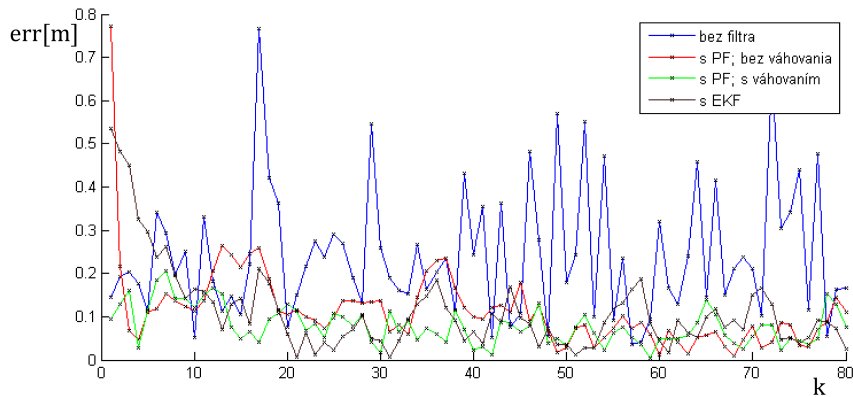
Tabuľka 6.4 Stredné hodnoty a rozptyl chyby merania pri lokalizácii cieľa rôznym počtom robotov s použitím PF a váhovania, (a) statické roboty, (b) mobilné roboty

Počet robotov	$\bar{err}[m]$	$\bar{err}[m]$	$D(err)[m^2]$	Počet robotov	$\bar{err}[m]$	$\bar{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
1	0,22504	0,22046	0,02000	1	0,23438	0,19568	0,03242
2	0,21863	0,15567	0,03178	2	0,17774	0,14518	0,01405
3	0,14307	0,12068	0,00827	3	0,16967	0,15092	0,01067
4	0,14746	0,11736	0,00869	4	0,09750	0,07763	0,00831
5	0,14188	0,11843	0,00854	5	0,10024	0,10284	0,00286
6	0,10709	0,10237	0,00276	6	0,09861	0,09492	0,00260
7	0,13773	0,13110	0,00461	7	0,07487	0,07423	0,00137
8	0,10844	0,08882	0,00522	8	0,07180	0,06462	0,00194
9	0,09475	0,07769	0,00422	9	0,07084	0,05972	0,00217
10	0,11019	0,10398	0,00485	10	0,07013	0,06147	0,00212

6.5 Porovnanie použitých algoritmov

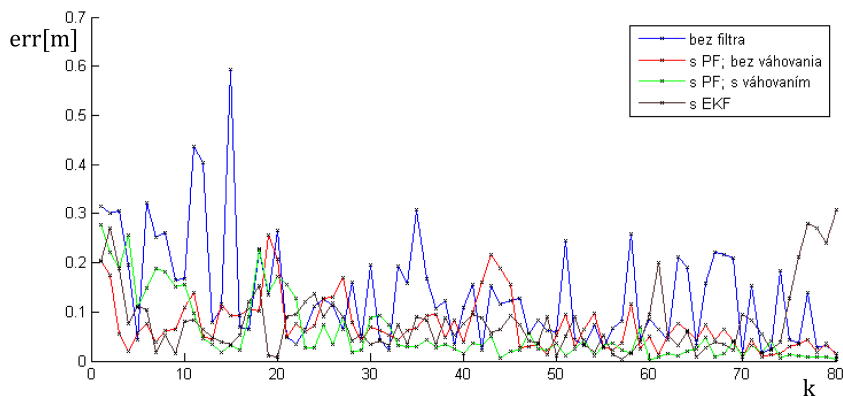
Porovnanie použitých techník pre potláčanie vznikajúcej chyby pri lokalizácii cieľa statickými robotmi je znázornené na obr. 6.6. Porovnávacie testy boli vykonané pri použití štyroch

snímacích robotov. Z grafu je zrejmé, že v prípade lokalizácie cieľa bez použitia filtrov je chyba err najväčšia, zároveň aj priebeh veľkosti chyby je najmenej vyhladený. Časticový filter bez váhovania výsledkov robotov a rozšírený Kalmanov filter v tomto prípade dosahujú podobné hodnoty. Časticový filter s váhovaním výsledkov však tak, ako sa očakávalo, najlepšie potláča chybu lokalizácie a súčasne aj filtruje prípadné výkyvy merania pri zvýšenej chybe.



Obr. 6.6 Porovnanie výsledkov v statickom multirobotickom systéme zloženom zo 4 robotov

Porovnanie výsledkov techník pre systém zložený z mobilných robotov je zobrazené na obr. 6.7. Aj v tomto prípade je zrejmé, že najlepšie filtrujúci algoritmus je použitie MRS s PF a váhovaním výsledkov robotov. Tento algoritmus okrem toho, že najpresnejšie odhaduje pozíciu cieľa, dokáže potláčať aj prípadné výkyvy pri odhade pozície.



Obr. 6.7 Porovnanie výsledkov v mobilnom multirobotickom systéme zloženom zo 4 robotov

Porovnanie použitých algoritmov je súčasne vytvorené v tab. 6.5. Na základe štatistických charakteristík možno povedať, že algoritmus kolektívnej lokalizácie s použitím časticového filtra a váhovania dosahuje najlepšie výsledky v úlohe potlačania chyby pri lokalizácii cieľa. Platí to nielen z hľadiska strednej hodnoty nameraných chýb, ako aj z hľadiska rozptylu. Rozptyl v prípade mobilných robotov dosahoval lepšiu hodnotu pri použití čistého časticového filtra, avšak stredná hodnota, okolo ktorej sa chyba pohybovala, bola značne vyššia ako v prípade použitia váhovania. Avšak graf na obr. 6.7 dokumentuje, že filter s váhovaním potreboval na svoje ustálenie prvých 22 krokov, po ktorých došlo k ustáleniu chyby merania. Disperzia po ustálení filtra by dosahovala hodnotu $0,000472 \text{ m}^2$.

Zo všetkých testov a porovnaní výsledkov je zrejmé, že použitie skupiny mobilných robotov pri lokalizácii cieľa prináša nielen potrebnú redundanciu v prípade zlyhania niekto-

Tabuľka 6.5 Stredné hodnoty a rozptyl chyby merania pri lokalizácii cieľa rôznymi algoritmi, (a) statické roboty, (b) mobilné roboty

(a)				(b)			
4 statické roboty lokalizujúce cieľ				4 mobilné roboty lokalizujúce cieľ			
Filter	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$	Filter	$\overline{err}[m]$	$\overline{err}[m]$	$D(err)[m^2]$
bez filtra	0,2415	0,2082	0,0223	bez filtra	0,1359	0,1122	0,0119
EKF	0,1126	0,0863	0,0098	EKF	0,0810	0,0623	0,0045
PF	0,1145	0,0980	0,0093	PF	0,0733	0,0600	0,0028
PF a váhovanie	0,0796	0,0743	0,0019	PF a váhovanie	0,0592	0,0316	0,0042

rého z robotov, no zároveň poskytuje možnosť potláčať chyby merania a chyby vznikajúce v prostredí. Pre lepšie potlačenie nepresností je vhodné použiť väčší počet robotov, zapojiť časticový filter a váhovať parciálne výsledky pri kolektívnom výpočte polohy cieľa. Touto kombináciou eliminačných techník bolo dosiahnuté potlačenie chyby merania, vyhladenie priebehu lokalizácie a zároveň urýchlenie lokalizácie cieľa s dostatočnou presnosťou. Keďže výsledky sú z uvedených obrázkov a tabuliek zrejme, možno vyvodiť záver, že časticové filtre spolu s použitím multirobotického systému sú vhodnými nástrojmi pre úlohu lokalizácie cieľa.

7 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov a využitie overených algoritmov

Hlavnými cieľmi práce bolo dokázať, že použitie multiagentového a multirobotického systému prináša pri niektorých úlohách zásadné zvýšenie kvality riešenia. Snahou práce bolo poukázať na výhody systému v úlohách prieskumu terénu. Zároveň boli overené parciálne výsledky, ako je možné znížiť nároky na systém a zvýšiť jeho efektívnosť.

Úloha prieskumu terénu bola rozdelená na dve dielčie úlohy, ktoré boli testované v práci samostatne. Úloha pokrývania terénu bola popísaná teoreticky v časti 1.2.1, pričom v kapitole 4 bol navrhnutý algoritmus pre skrátenie počtu krokov pri prieskume terénu. Pri testovaní navrhnutého značkovacieho algoritmu pokrývania so skráteným návratom sa podarilo overiť, že algoritmus dovoľuje v niektorých prípadoch značne skrátiť návrat robota. Použitie viacerých robotov skracaje čas prieskumu.

Overené výsledky sú veľmi užitočné v úlohách, kde čas prieskumu hrá významnú úlohu. Ide o úlohy, kde hľadaný prvok môže ohrozovať okolité prostredie, prípadne hľadaný prvok je ohrozený pobytom v prostredí a skrátením času pokrytia je možné zvýšiť jeho šancu na záchranu.

V ďalších experimentoch boli dosiahnuté výsledky pre rôzne stupne fúzií informácií v multirobotickom systéme. V kapitole 5 bolo overené, že s rastom prenášaných informácií klesajú výpočtové nároky na jednotlivé prvky systému, avšak dochádza k vyššiemu zaťaženiu prenosového systému. Kvalita riešenia je však pri fúzii dát najvyššia. Táto časť teda poskytuje podklady pre výber vhodnej formy kolektívneho spracovania informácií pri poznatkoch systému a nárokoch naň. Ak je komunikačný podsystém schopný prenosu veľkého množstva informácií, pre zvýšenie presnosti riešenia je vhodné použiť fúziu dát. Pre zníženie množstva komunikácie, ktorá môže byť v rušivom prostredí obmedzená, je vhodnejšie použiť fúziu rozhodnutí a zvýšiť počet aktívnych prvkov.

Pri lokalizácii cieľa v ideálnom prostredí je postačujúce použiť jedného robota. Avšak v prostredí, ktoré je zdrojom neistoty a systém je ovplyvnený nepresnosťami, prípadne sa uvažuje o zlyhaní robotov, je ukončenie zadanej úlohy značne ohrozené. Nasadenie viacerých

prvkov nielen zabezpečí zvýšenie kvality riešenia, súčasne však zabezpečí potrebnú redundanciu v prípade zlyhania robota. V časti 6 boli použité na overenie filtrácie chýb vznikajúcich v systéme štyri rôzne postupy. Vo všetkých bola redundancia proti zlyhaniu robota zabezpečená rovnako. V testoch sa podarilo overiť, že podľa očakávaní chyba v systéme lokalizujúcom cieľ je najviac potláčaná pri algoritme s použitím koordinácie, časticového filtra a váhovania. Avšak okrem overenia vhodnosti využitia časticových filtrov pre potlačenie chyby v multirobotickom systéme, veľkou výhodou časticových filtrov je možnosť ich použitia aj na multimodálnom rozdelení hustoty pravdepodobnosti.

Všetky stanovené hypotézy boli overené. Dosiahnuté výsledky je možné aplikovať do rôznych oblastí použitia úloh prieskumu a lokalizácie cieľa. Výsledky môžu slúžiť súčasne pre ďalší výskum, nakoľko použitie multirobotických systémov s princípmi pravdepodobnostnej robotiky je v súčasnosti stále novou a otvorenou oblasťou výskumu.

Záver

Multiagentové a multirobotické systémy stále hľadajú svoje uplatnenie v praxi. Riešenie úloh jedným prvkom je stále obľúbené, pretože prvotné náklady na realizáciu sú zvyčajne nižšie. Problém však nastáva, keď dôjde ku zlyhaniu aktívneho prvku a nie je možné splniť stanovený cieľ.

Ďalším aspektom, prečo multirobotické systémy v praxi nie sú veľmi rozšírené, je nedostatok algoritmov postavených tak, aby boli zdroje systému využité dostatočne efektívne. Súčasne navrhnuté algoritmy neuvažujú o vzniku chýb a nepresností v prostredí. Overenie prínosu použitia teórie multiagentových systémov v úlohách robotiky bolo cieľom tejto práce. Oblasťou výskumu boli úlohy prieskumu terénu so zameraním sa na parciálne časti - pokrývanie a lokalizáciu cieľa. V práci bol navrhnutý algoritmus prieskumu terénu skupinou robotov, pričom snahou algoritmu je znížiť počet krokov potrebných na prieskum.

Zníženie pôsobenia chyby systému na kvalitu riešenia bolo dosiahnuté prostredníctvom zlúčenia multirobotických systémov s princípmi pravdepodobnostnej robotiky. Navrhnuté spojenie sa ukázalo ako správny krok pre potlačanie chyby pri úlohe lokalizácie cieľa. Na potlačenie chyby boli využité viaceré techniky, no najúčinnějšíou overenou technikou sa ukázalo využitie kooperácie, časticového filtra a váhovania. Použitá metóda pracuje nielen s dostatočnou presnosťou, no súčasne poskytuje veľkú univerzálnosť v popise vznikajúcich chýb v systéme a zabezpečuje odolnosť voči zlyhaniu prvkov.

Vhodná realizácia multiagentovej štruktúry predstavuje moderný a efektívny nástroj s rozmanitými aplikačnými možnosťami v oblastiach výrobnjej sféry, informačných technológií, v ekonomických systémoch, zdravotníctve a podobne.

Každá overená hypotéza v novej oblasti, akou multirobotické systémy sú, môže priniesť veľký pokrok v ďalšom výskume, ako aj praktickom využití. Algoritmy a metódy, ktoré boli v tejto práci navrhnuté, prinášajú rozšírenie poznania správania sa multiagentových a multirobotických systémov v úlohách prieskumu terénu. Z dosiahnutých výsledkov na záver možno povedať, že použitie multirobotických systémov v kombinácii s časticovou filtráciou umožňuje nasadenie v reálnych aplikáciách, ktoré sú schopné rozšíriť obmedzené obzory jednorobotických systémov.

Literatúra

- Abbeel, P. (2011). *Probability: Review*. UC Berkeley EECS.
- Agmon, N., Hazon, N., Kaminka, G. (2006). Constructing spanning trees for efficient multi-robot coverage. In *Proceedings 2006 IEEE international conference on robotics and automation, 2006. ICRA 2006*. (p. 1698-1703).
- Anderson, B. D. O., Moore, J. B. (1979). *Optimal filtering*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. ISBN 0-13-638122-7.
- Arulampalam, M., Maskell, S., Gordon, N. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. In *IEEE transactions on signal processing* (Vol. 50, p. 174-188).
- Baglietto, M., Paolucci, M., Scardovi, L., Zoppoli, R. (2002). Information-based multi-agent exploration. In *Proceedings of the third international workshop on robot motion and control* (p. 173 - 179).
- Beneš, V. (1981). Exact finite-dimensional filters for certain diffusions with nonlinear drift. *Stochastics - An International Journal of Probability and Stochastic Processes*, 65-92.
- Blanco Claraco, J. L. (2010). *Development of scientific applications with the mobile robot programming toolkit* (Tech. Rep.). University of Malaga.
- Bolić, M. (2004). *Architectures for efficient implementation of particle filters*. PhD. Thesis, Stony Brook University.
- Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1), 14-23.
- Brooks, R. (1990). Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, 6, 3-15.
- Budinská, I., Kasanický, T., Zelenka, J. (2012, b). Production planning and scheduling by means of artificial immune systems and particle swarm optimisation algorithms. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 4(4), 237-248.
- Budinská, I., Masár, M. (2012, a). Koordinácia skupiny mobilných robotov s využitím biologicky inšpirovaných metód. *ATP journal - Priemyselná automatizácia a informatika*.
- Bullen, H., Menezes, R. (2008). Models for temporal and spatial terrain coverage. In *Advances in intelligent and distributed computing* (Vol. 78, p. 239-244). Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-74929-5.
- Carlone, L., Ng, M., Du, J., Bona, B., Indri, M. (2010). Rao-blackwellized article filters multi robot slam with unknown initial correspondences and limited communication. In *IEEE international conference on robotics and automation* (p. 243-249). Alaska, USA.
- Chen, Z. (2003). *Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond* (Tech. Rep.). McMaster University.
- Claraco, J. (2009). *Contributions to localization, mapping and navigation in mobile robotics*. PhD. Thesis, Universidad de Málaga.
- Daum, F. (1988). New exact nonlinear filters. *Bayesian Analysis of Time Series and Dynamic Models*, 199-226.
- Dorigo, M., Stützle, T. (2004). *Ant colony optimization*. USA : The MIT Press. ISBN 0-262-04219-3.
- Doucet, A., Freitas, N., Murphy, K., Russell, S. (2000). Rao-blackwellised particle filtering for dynamic bayesian networks. In *The 16th annual conference on uncertainty in artificial intelligence* (p. 176-183). Morgan Kaufmann Publishers.
- Doucet, A., Johansen, A. (2008). *A tutorial on particle filtering and smoothing: fifteen years later*.

- Ediger, P., Hoffmann, R., Désérable, D. (2010). Routing in the triangular grid with evolved agents. In *International conference on high performance computing and simulation*.
- Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley. ISBN 0-201-36048-9.
- Ferranti, E., Trigoni, N. (2009, a). The impact of localization errors on the performance of the ants exploration algorithm. *Workshop on Agent Technology for Sensor Networks (ATSN), a workshop of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*.
- Ferranti, E., Trigoni, N. (2011). Practical issues in deploying mobile agents to explore a sensor-instrumented environment. *Computer Journal*, 54 (3), 309-320.
- Ferranti, E., Trigoni, N., Levene, M. (2007). Brick&Mortar: An online multiagent exploration algorithm. In *IEEE int. conference robotics and automation (icra)*.
- Ferranti, E., Trigoni, N., Levene, M. (2008). HybridExploration: A distributed approach to terrain exploration using mobile and fixed sensor nodes. In *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems* (p. 1280-1286).
- Ferranti, E., Trigoni, N., Levene, M. (2009, b). Rapid exploration of unknown areas through dynamic deployment of mobile and stationary sensor nodes. In *Autonomous agents and multi-agent systems* (p. 210-243). Springer Netherlands.
- Fu, S., Kuai, X., Zheng, R., Yang, G., Hou, Z. (2010). Local vs. global: Indoor multi-robot simultaneous localization and mapping in wireless sensor networks. In *International conference on networking, sensing and control* (p. 171-176).
- Gabriely, Y., Rimon, E. (2001). Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31, 77-98.
- Gerkey, B., Vaughan, R. (2003). The Player/Stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems. In *Proceedings of the 11th international conference on advanced robotics* (p. 120 -125). Coimbra, Portugal.
- Gil, A., Reinoso, Ó., Ballesta, M., Juliá, M. (2010). Multi-robot visual slam using a rao-blackwellized particle filter. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(1), 68-80.
- Goodrich, M. (2006). *A tutorial on simple particle filters*.
- Gordon, N. (2003). *Beyond the kalman filter: Particle filters for tracking applications*. Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh.
- Gordon, N., Salmond, D., Smith, A. (1993). Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation. In *IEEE proceedings* (Vol. 140, p. 107-113).
- Graglia, P., Meystel, A. (1988). Minimum cost path planning for autonomous robot in the random traversability space. In *Proceedings of the 1st international conference on industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems*.
- Grewal, M. S., Andrews, A. P. (2001). *Kalman filtering : Theory and practice using matlab* (2nd ed.). Wiley-Interscience. ISBN 0471392545.
- Gustafsson, F. (2010). Particle filter theory and practice with positioning applications. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 25(7), 53-82.
- Handschin, J., Mayne, D. (1969). Monte carlo techniques to estimate the conditional expectation in multi-stage non-linear filtering. *International Journal of Control*, 547-559.
- Havangi, R., Nekoui, M., Teshnehlab, M. (2010). A multi swarm particle filter for mobile robot localization. *International Journal of Computer Science Issues*, 7(2), 15-22.
- Havlík, Š., Budinská, I., Masár, M. (2012). Multi-robot coordination in performing hazardous operations. In *RAAD 2012 : 21th international workshop on robotics in alpe-adria-danube region* (p. 169-176). Edizioni Scientifiche e Artistiche. ISBN 978-88-95430-45-4.
- Hazon, N., Mieli, F., Kaminka, G. (2006). Towards robust on-line multi-robot coverage. In

- Proceedings 2006 IEEE International conference on robotics and automation* (p. 1710-1715).
- Hladek, D., Vaščák, J., Sinčák, P. (2009). Multi-robot control system for pursuit-evasion problem. *Journal of Electrical Engineering*, 60(3), 143-148.
- Howard, A. (2005). Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters. In *Robotics: Science and systems conference* (p. 201-208).
- Hsiao, K., De Plinval-salgues, H., Miller, J. (2005). *Particle filters and their applications*.
- Icking, C., Kamphans, R., T. Klein, Langetepe, E. (2005). Exploring simple grid polygons. In *In 11th international computing and combinatorics conference*.
- Janota, A. (2008). MAS model of the level crossing. *International journal of ITS research*, 111-116.
- Jayasekara, P., Palafox, L., Sasaki, T., Hashimoto, H., Lee, B. (2010). Simultaneous localization assistance for multiple mobile robots using particle filter based target tracking. In *International conference on information and automation for sustainability (ICIAFs)* (p. 469-474).
- Je, H., Kim, D. (2008). Simultaneous localization and mapping based on PF-MDS. In *Symposium on learning and adaptive behaviors for robotic systems* (p. 109-114).
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*. Available from <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>
- Kalman, R. E. (1963). New methods in wiener filtering theory. In *Proc. 1st symp. engineering applications of random function theory and probability* (p. 270-388).
- Ko, J., Stewart, B., Fox, F., Konolige, K., Limketkai, B. (2003). A practical, decision-theoretic approach to multi-robot mapping and exploration. In *Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)* (p. 3232-3238).
- Koenig, S., Liu, Y. (2001). Terrain coverage with ant robots: A simulation study. In *Proceedings of the international conference on autonomous agents* (p. 600-607). ACM Press.
- Kostelnik, P. (2002). *Multiagentové systémy pre riadenie mobilných robotov*. Písomná práca k dizertačnej skúške. Bratislava, Košice.
- Kostelník, P. (2005). *Využitie individuálnych znalostí v tíme mobilných robotov*. PhD. Thesis, Slovenská akadémia vied.
- Krupa, M. (2012). *Methods of technical prognostics applicable to embedded systems*. PhD. Thesis, Vysoké učení technické v Brně.
- Kulich, M., Saska, M. (2011). *Vybraná témata z mobilní robotiky*.
- Lagoudakis, M., Markakis, V., D., K., Keskinocak, P., Kleywegt, A., Koenig, S., et al. (2005). Auction-based multi-robot routing. In *Proceedings of the international conference on robotics: Science and systems (ROBOTICS)* (p. 343-350).
- Lee, H., Lee, S., Choi, M. H., Lee, B. (2012). Probabilistic map merging for multi-robot rbpf-slam with unknown initial poses. *Robotica*, 30, 205-220.
- Leitner, J. (2009). Multi-robot cooperation in space: A survey. In *Advanced technologies for enhanced quality of life* (p. 144-151).
- Lekýr, M. (2004). A case-tool oriented approach for multi-agent modelling. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 2(2), 175-179.
- Lerman, K., Mataric, M., Galstyan, A. (2005). *Mathematical modeling of large multi-agent systems* (Tech. Rep.).
- Liu, J., Chen, R., Logvinenko, T. (2001). A Theoretical Framework for Sequential Imper-

- tance Sampling and Resampling. New York: Springer Verlag.
- MacKay, D. (1992). Information-based objective functions for active data selection. *Neural Computation*, 4, 590-604.
- Malinovský, Ľ. (2011). *Vypočtové modelovanie evolúcie jazyka v multi-agentovom systéme*. PhD. Minimum, Univerzita Komenského v Bratislave.
- Martinelli, A., Pont, F., Siegwart, R. (2005). Multi-robot localization using relative observations. In *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation* (p. 2797-2802).
- Martinoli, A., Easton, K., Agassounon, W. (2004). Modeling swarm robotic systems: A case study in collaborative distributed manipulation. *International Journal of Robotics Research*, 23, 415-436.
- Masár, M., Budinská, I. (2013). Robot coordination based on biologically inspired methods. *Advanced Materials Research*, 664, 891-896.
- Mason, J., Menezes, R. (2008). Autonomous algorithms for terrain coverage metrics, classification and evaluation. In *IEEE congress on evolutionary computation* (p. 1641-1648).
- Matsubara, M., T. and Kubo, Murachi, Y. (2010). A collaborative localization tolerant to recognition error by double-check particle exchange. *Artificial Life and Robotics*, 15(3), 253-257.
- Menezes, R., Martins, F., Vieira, F., Silva, R., Braga, M. (2007). A model for terrain coverage inspired by ant's alarm pheromones. In *Proceedings of the 2007 ACM symposium on applied computing* (p. 728-732). New York, NY, USA: ACM. ISBN 1-59593-480-4.
- Merwe, R. van der, Doucet, A., Freitas, N. de, Wan, E. (2000). *The unscented particle filter*.
- Miček, J., Hyben, M., Frátrik, M., Púchyová, J. (2012). Voice command recognition in multirobot systems: Information fusion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 891-896.
- Miskhin, A. (2003). *Sojourner: An insider's view of the Mars pathfinder mission*. Berkley Hardcover. ISBN 9780425191996.
- Mysorewala, M. F., Cheded, L., Popa, D. O. (2012). A distributed multi-robot adaptive sampling scheme for the estimation of the spatial distribution in widespread fields. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 1-19.
- Návrát, P. (2007). *Umelá inteligencia*. STU. ISBN 9788022726290.
- Payton, D., Daily, M., Estowski, R., Howard, M., Lee, C. (2001). *Pheromone robotics*. Springer Netherlands.
- Pfeiffer, M. (2004). *A brief introduction to particle filters*.
- Raghavan, S. (2006). *Distributed algorithms for hierarchical area coverage using teams of homogeneous robots*. PhD. Thesis, Indian Institute of Technology Madras.
- Reich, B., Ko, H., Becket, W., Badler, N. (1994). Terrain reasoning for human locomotion. In *Proceedings of computer animation '94* (p. 996-1005). IEEE Computer Society Press.
- Rekleitis, I. (2003). *Cooperative localization and multi-robot exploration*. PhD. Thesis, McGill University.
- Rekleitis, I. M. (2000). A particle filter tutorial for mobile robotic localization. *International Conference on Robotics and Automation*, 3.
- Rekleitis, I. M., Dudek, G., Milios, E. (1997). Multi-robot exploration of an unknown environment, efficiently reducing the odometry error. In *Proceedings of the international joint conference on artificial intelligence (IJCAI)* (p. 1340-1345).
- Ribeiro, M. I. (2004). *Kalman and extended kalman filters: Concept, derivation and properties*.
- Ristic, B., Arulampalam, S., Gordon, N. (2004). *Beyond the kalman filter*. Boston, London:

- Artech House.
- Russel, S. J., Norvig, P. (1995). *Artificial intelligence: A modern approach*. Alan Apt. ISBN 0-13-103805-2.
- Särkkä, S. (2012). *Lecture 6: Particle filtering — sequential importance resampling and rao-blackwellized particle filtering*.
- Sayed, A., Kailath, T. (1994). A state-space approach to adaptive RLS filtering. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 18-60.
- Schermerhorn, P., Scheutz, M. (2006). Social coordination without communication in multi-agent territory exploration tasks. In *Proceedings of the fifth international joint conference on autonomous agents and multiagent systems* (p. 654-661). New York, NY, USA: ACM. ISBN 1-59593-303-4.
- Schmotzer, M. (2005). *Samoorganizujúce sa skupiny rozumných agentov*. PhD. Thesis, Technická univerzita v Košiciach.
- Schulz, D., Burgard, W., Fox, D., Cremers, A. (2001). Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association. In *Proceedings of the 2001 IEEE international conference on robotics and automation* (p. 1665-1670). Seoul, Korea.
- Senthilkumar, K., Bharadwaj, K. (2008). Spanning tree based terrain coverage by multi robots in unknown environments. In *India conference INDICON 2008. annual IEEE* (Vol. 1, p. 120 -125).
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT Press. ISBN 026219502X.
- Stone, P., Veloso, M. (2000). Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective. In *Autonomous robots 8* (p. 345-383). Kluwer Academic Publishers.
- Sugawara, K., Kazama, T., Watanabe, T. (2004). Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone. In *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, proceedings* (Vol. 3, p. 3074 - 3079).
- Svennebring, J., Koenig, S. (2004). Building terrain-covering ant robots: A feasibility study. *Autonomous Robots*, 16, 313-332.
- Szepesvári, C. (2004). *Theory and implementation of particle filters*.
- Tanizaki, H., Mariano, R. (1996). *Nonlinear filters based on taylor series expansions*.
- Thrun, S. (1998). Bayesian landmark learning for mobile robot localization. *Machine Learning*, 33(1), 41-76.
- Thrun, S. (2001, b). A probabilistic online mapping algorithm for teams of mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 20, 335-363.
- Thrun, S., Burgard, W., Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. The MIT Press. ISBN 0262201623.
- Thrun, S., Fox, D., Burgard, W., Dellaert, F. (2001, a). Robust monte carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence*.
- Treverton, R., Menezes, R. (2009). Evaluating failure in terrain coverage by autonomous agents. In *IEEE workshop on robotic intelligence in informationally structured space* (p. 79-86).
- Vaswani, N., Chellappa, R. (2003). *A particle filtering approach to abnormality detection in nonlinear systems and its application to abnormal activity detection*. 3rd Intl. Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision.
- Weiss-Cohen, M., Bar, O., Shapira, S. (2011). GrasSmart2: A multi-robot terrain coverage system. In *Proceedings of the international multconference of engineers and computer scientists* (Vol. 1, p. 3852-3857).

- Welch, G., Bishop, G. (2001). *An introduction to the kalman filter* (Tech. Rep.). Chapel Hill, NC, USA.
- Wooldridge, M. (1999). A modern approach to distributed artificial intelligence. In G. Weiss (Ed.), (chap. Intelligent Agents). The MIT Press.
- Wooldridge, M., Jennings, N. (1995). Intelligent agents: theory and practice. In *The knowledge engineering review* (p. 115-152).
- Wurr, A., Anderson, J. (2004). Multi-agent trail making for stigmergic navigation. In *Advances in artificial intelligence* (p. 422-428). Springer Berlin / Heidelberg.
- Yan, D., Wang, J., Liu, L., Song, A. (2008). Target tracking based on multiagent and game theory in wireless sensor network. In *11th IEEE international conference on communication technology, ICCT 2008* (p. 97-100).
- Yan, J., Xin-Ping, G., Xiao-Yuan, L., Fu-Xiao, T. (2011). Target tracking and obstacle avoidance for multi-agent networks with input constraints. *International Journal of Automation and Computing*, 8(1), 46-53.
- Zheng, X., Jain, S., Koenig, S., Kempe, D. (2005). Multi-robot forest coverage. In *Proceeding IROS* (p. 3852-3857).

Zoznam vlastných publikácií

- [1] Púchyová, J. (2011). Behaviour of multiagent systems. *Zimná škola MICT - Mathematics for information and communication technologies, 6th winter school of mathematics for ICT*. Banská Bystrica: Science and Research Institute, MBU. ISBN 978-80-557-0252-0. pp. 84-86.
- [2] Púchyová, J. (2011). Simulation toolkits for multiagent system. *TRANSCOM 2011: 9-th European conference of young research and scientific workers*. June 27-29, 2011. Žilina: University of Žilina. ISBN 978-80-554-0372-4. pp. 201-204.
- [3] Púchyová, J., Miček, J. (2011). Development multirobot system . *Automatics and informatics '11- International conference*. Sofia, Bulgaria. October 3-7, 2011. John Atanasoff society of automatics and informatics. ISSN 1313-1850. pp. B-185-B-187.
Ohlas: Karpíš, O. (2012). System for vehicles classification and emergency vehicles detection. *Proceedings of 11th IFAC/IEEE international conference on programmable devices and embedded systems*. Brno, Czech Republic. May 23-25, 2012. ISBN 978-3-902823-21-2. pp. 155-159.
- [4] Miček, J., Púchyová, J., Hyben, M. (2011). Speech communication in multirobot system. *Proceedings of the VIth International scientific and technical conference Computer science and information technologies*. November 16-19, 2011. Lviv, Ukraine. Lviv : Publishing House Vezha&Co. ISBN 978-966-2191-04-2. pp. 255-257.
Ohlas: Jurečka, M., Čechovič, L. (2012). Application of pulse coupled neural network in speaker identification. *Proceedings of the VIIIth International Conference in MEMS design - MEMSTECH' 2012 : Perspective technologies and methods in MEMS design*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. ISBN 978-617-607-229-4, pp. 125-128.
- [5] Púchyová, J. (2012). Marking coverage algorithm with shortened return. *Journal of Information, Control and Management Systems*. Žilina. Vol. 10(1). ISSN 1336-1716. pp. 97-104.
- [6] Púchyová, J., Hyben, M. (2012). Command control of multirobot system. *10th International conference Process control 2012*. Kouty nad Desnou, Czech Republic. June 11-14, 2012. Pardubice : University of Pardubice. ISBN 978-80-7395-500-7. C046b, 4 pp.
- [7] Húdík, M., Púchyová, J. (2012). Load balancing in grid with use of agents. *10th International conference Process control 2012*. Kouty nad Desnou, Czech Republic. June 11-14, 2012. Pardubice : University of Pardubice. ISBN 978-80-7395-500-7. C046c, 4 pp.
- [8] Púchyová, J. (2012). Exploration algorithm with shortened return for group of mobile robots. *Proceedings of the VIIIth International Conference in MEMS design - MEMSTECH' 2012 : Perspective technologies and methods in MEMS design*. Polyana, Ukraine. April 18-21, 2012. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. ISBN 978-617-607-229-4, pp. 77-80.
- [9] Papán, J., Jurečka, M. Púchyová, J. (2012). WSN for forest monitoring to prevent illegal logging. *Proceedings of the IEEE Conference FedCSIS: Federated conference on computer science and information systems*. Wrocław, Poland. September 9-12, 2012. IEEE: 2012. ISBN 978-83-60810-51-4. pp. 809-812.

- [10] Miček, J., Hyben, M., Frátrik, M., Púchyová, J. (2012). Voice Command Recognition in Multirobot Systems: Information Fusion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Aiguo Song (Ed.), ISSN: 1729 -8806, InTech, DOI: 10.5772/52652. Current Contents. Available from: http://www.intechopen.com/journals/international_journal_of_advanced_robotic_systems/voice-command-recognition-in-multirobot-systems-information-fusion
- Ohlas*: Karpiš, O. (2013). FFT on ARM-Based Low-Power Microcontrollers. *International Journal of Engineering Research and Development*. Vol. 6(9). ISSN 2278-067X. pp. 67-72.
- [11] Kochláň, M., Hodoň, M., Púchyová, J. (2013). Vital Functions Monitoring via Sensor Body Area Network with Smartphone Network Coordinator. *Proceedings of the IXth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design - MEMSTECH ' 2013*. Polyana, Ukraine. April 16-20, 2013. ISBN 978-617-607-424-3. pp. 143-147.
- [12] Púchyová, J. (2013). Minimizing of Target Localization Error using Multi-robot System and Particle Filters. *ICDIPC 2013 : International Conference on Digital Information Processing and Communications*. Istanbul, Turkey. World Academy of Science, Engineering and Technology. June 20-21, 2013. (*v tlači*).
- [13] Kochláň, M., Hodoň, M., Púchyová, J. (2013). Body Area Network for Monitoring Human Vital Signs Using Smartphone. *TRANSCOM 2013: 10-th European conference of young research and scientific workers*. June 24-26, 2013. Žilina: University of Žilina. (*v tlači*).