SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
Ústav informatiky, Slovenská akadémia vied

Ing. Marek Masár

Autoreferát dizertačnej práce

BIOLOGICKY INŠPIROVANÉ METÓDY PRE KOORDINOVANÝ POHYB SKUPINY MOBILNÝCH ROBOTOV

Na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

V doktorandskom študijnom programe 9.2.7. **Kybernetika**

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracované v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave informatiky SAV.

Predkladateľ: **Ing. Marek Masár**
Ústav informatiky
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9
84507 Bratislava

Školiteľ: **Ing. Ivana Budinská, PhD.**
Ústav informatiky
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9
84507 Bratislava

Oponenti: **Prof. Ing. Vladimír Kvasnička, DrSc.**
Fakulta informatiky a informačných technológií
Slovenská technická univerzita
Ilkovičova, 84213 Bratislava

Prof. Ing Peter Sinčák, PhD.
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach
Letná 9, 042200 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 3.7.2013o 11^{00}h. na Ústave informatiky SAV, Dúbravská cesta 9, 84507, Bratislava

doc. Ing. Ladislav Hluchý, CSc.
riaditeľ UI SAV

Abstrakt

Obsahom dizertačnej práce je návrh a vývoj biologicky inšpirovanej metódy určenej na priestorovú koordináciu pohybu mobilných autonómnych agentov. Popisuje princípy procesu distribuovaného riadenia skupiny autonómnych agentov v priestore, s cieľom dosiahnutia účelného a efektívneho správania celku. Účelom má byť koordinované prehľadanie neznámeho priestoru a kooperatívna tvorba modelu tohto prostredia a následne rovnomerné monitorovanie priestoru a aktualizácia vytvoreného modelu. Navrhnutá metóda je v prvej fáze overená simulačne za pomoci vytvoreného softvérového nástroja VERA. V druhej fáze je metóda testovaná na laboratórnych robotoch.

Abstract

Design and development of biologically inspired method for the purpose of motion coordination of the group of the mobile autonomous agent is the subject of this dissertation thesis. It describes principles of the distributed control of the group of autonomous agents, which leads to the effective behavior, with the purpose of the space exploration and surveillance and the cooperation in the virtual map creation. A simulation tool VERA was developed to test the proposed method. After the simulations, the method was tested using laboratory robots.

Obsah

Úvod ... 1
Ciele dizertačnej práce ... 2
1 Navrhované riešenie ... 3
1.1 Vektor vzájomného vplyvu ... 3
1.2 Detekcia feromónu ... 6
1.3 Pohyb robota ... 8
2 Implementácia metódy ... 10
2.1 Simulačný softvér VERA ... 11
3 Počítačové simulácie ... 12
3.1 Vlastnosti metódy a optimalizácia parametrov ... 12
3.2 Porovnanie s ďalšími metódami ... 13
3.3 Rozmiestnenie v priestore ... 13
3.4 Prehľadávanie ... 14
3.5 Stráženie ... 15
3.6 Zhodnotenie simulačných experimentov ... 17
4 Implementácia metódy na reálnych robotoch ... 20
4.1 Lokalizácia ... 21
4.2 Komunikácia ... 22
4.3 Vyššia vrstva riadenia, riadiaci program robota ... 23
5 Testovanie navrhnutej metódy na robotoch ... 25
6 Záver ... 27
Použitá literatúra ... 29
Publikácie autora ... 30

Úvod

V prírode je možné pozorovať kooperatívne správanie u množstva zvieracích druhov. Podľa teórie Ch. Darwina, mnohé jedince, od mravca až po človeka, sa formujú do skupín, v ktorých väčšina jedincov pracuje pre spoločný účel[1]. Hoci človek študuje rôzne druhy po stáročia, podrobnosti toho prečo a ako sa kooperácia vyvinula nie sú celkom objasnené. Kooperatívne správanie je možné študovať z viacerých perspektív. Evolučný biológovia hľadajú genetické základy a hnacie mechanizmy na molekulárnej úrovni. Neurológovia odhaľujú kľúčovú koreláciu medzi chemickými zlúčeninami v mozgu a sociálnymi stratégiami. Z matematického pohľadu bol vytvorený prístup - teória hier - určený na kvantifikovanie kooperácie a predikovanie behaviorálnych dôsledkov vyplývajúcich z rôznych okolností. Sociálne správanie jednoduchého hmyzu, môže byť z biologického pohľadu emulované mikro–robotickou kolóniou a tým spôsobom analyzované. Sledovanie trajektórií hmyzu môže byť nahradené sledovaním miniatúrnych robotov v laboratóriu.

Swarm robotika *(swarm robotics)* je prístup, ktorý vznikol na pôde umelej inteligencie, vo všeobecnosti zameraný na koordináciu decentralizovaného, samoorganizujúceho sa, multirobotického systému, popisujúci kolektívne správanie ako dôsledok vzájomných interakcií prvkov a interakcií prvkov s prostredím. Oblasť výskumu zahŕňa široké spektrum oblastí od dizajnu jednotlivých robotických elementov až po celkové správanie systému[2][3].

Swarm robotika a príbuzný koncept swarm inteligencia *(swarm intelligence)* je inšpirovaný pochopením decentralizovaných mechanizmov, ktoré sú základom usporiadania prírodných systémov a spoločenstiev, akými sú napríklad kolónie mravcov, včiel, kŕdle vtákov, húfy rýb, svorky a spoločenstvá vlkov a napokon aj ľudí[4]. Ich spoločnou vlastnosťou je, že napriek tomu, že jednotlivci majú často limitované možnosti, ako celok dokážu riešiť komplexné úlohy. Keďže neexistuje žiadne centrálne riadenie, kľúčovú úlohu zohráva komunikácia. V prípade prírodných systémov môže ísť o chemické značky (feromóny vylučované mravcami na prejdenej trase), pohyb (určovanie smeru a vzdialenosti zdroja potravy včelou tzv. včelím tancom), alebo prenosom informácie *(broadcasting)*.

Techniky založené na tomto prístupe ponúkajú široké oblasti využitia pre množstvo aplikácií. Cieľom koordinácie a kooperácie je vhodné rozdelenie úloh medzi agenty celého systému. Koordinácia vnáša rád do jednania spoločenstva a v jeho chovaní tak nevznikajú zreteľné spory (*coherent behaviour*). Za týmto účelom sa navrhujú princípy chovania agentov, ktoré sa uplatňujú v priebehu ich celého životného cyklu. Metódy kooperácie sa naopak sústreďujú na návrh princípov organizácie činnosti menšej skupiny vybraných pre realizáciu špecifickej úlohy, ktoré zabezpečujú jej úspešné dokončenie. Koordináciu a kooperáciu teda možno chápať ako dve strany jednej mince, pretože rozhodnutie v jednej z týchto oblastí si vynúti použitie určitých postupov v druhej a naopak[5].

Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh a vývoj biologicky inšpirovanej metódy určenej na priestorovú koordináciu pohybu mobilných robotických zariadení. Pod pojmom priestorovej koordinácie je chápaná stratégia a princípy procesu riadenia skupiny mobilných agentov v priestore, s cieľom dosiahnutia účelného a efektívneho správania celku.

Predkladaná práca úzko súvisí s projektom[1], ktorý je zameraný na biologicky inšpirované metódy pre koordinované riadenie pohybu skupiny mobilných robotov s aplikáciou v rôznych oblastiach reálneho sveta, napr. odmínovanie, vyhľadávanie v lavínach, stráženie a monitorovanie územia a pod. S ohľadom na to musí byť definovaný účel metódy tak, aby pokrýval niektorú z praktických aplikácií. Práca sa preto bude orientovať na:

- zabezpečenie koordinovaného prvotného prehľadania a zmapovanie priestoru – skupina musí byť schopná prehľadať neznámy priestor a interaktívne vytvoriť jeho mapu,
- stráženie priestoru – skupina musí byť schopná prostredníctvom pohybu jednotlivcov efektívne pokrývať priestor a neustále ho monitorovať.

Tým je definovaný účel metódy. Jej efektivita bude v prvej fáze vyhodnotená prostredníctvom simulačných experimentov a v druhej pomocou testov na reálnych robotoch.

Keďže potenciálnou aplikáciou môže byť napr. nasadenie vo vojenskej oblasti, požaduje sa, aby správanie jednotlivcov obsahovalo stochastický element, to znamená, aby sledovaním jedinca nebolo možné predpokladať jeho ďalší pohyb ako aj správanie celej skupiny.

Na účely overenia navrhnutých metód a algoritmov je nutné navrhnúť a vytvoriť simulačné (testovacie) prostredie, schopné simulovať priebeh metódy, vizualizovať jej proces a umožňovať užívateľovi konfigurovať a modifikovať všetky potrebné parametre.

Pri praktickej realizácií budú použité mobilné roboty, pričom ich konštrukcia nie je záväzne určená. Podmienkou však je ich autonómnosť. Každý mobilný agent musí všetky svoje rozhodnutia a akcie zvoliť sám, bez zásahu centralizovaného riadiaceho systému. Súhrn požiadaviek na navrhnutú metódu je nasledovný:

- účel prehľadávania a stráženia priestoru, kooperatívna tvorba mapy,
- platformová nezávislosť,
- škálovateľnosť,
- adaptívnosť,
- robustnosť,
- paralelné spracovanie,
- stochastický element v správaní agentov.

[1] Názov projektu: *Biologicky inšpirované metódy pre koordináciu skupinového pohybu mobilných robotov (APVV-0261-10).* Podrobný popis projektu je súčasťou prílohy dizertačnej práce.

1 Navrhované riešenie

Navrhovaná metóda je podobne ako metóda PSO *(particle swarm optimization)* založená na vektorovom počte. Vektorové operácie nie sú výpočtovo náročné, nepožadujú veľký výpočtový výkon. Agenty používajú rastrovú reprezentáciu prostredia. Priestor je rozdelený na sieť štvorcov, pričom však pohyb robota nie je nijakým spôsobom touto reprezentáciou obmedzený, napr. na hrany štvorcov alebo na ich stredy. Agenty sa nad rastrom pohybujú spojito. Jednotlivé štvorce slúžia na uchovávanie informácií o prekážkach a digitálnych feromónoch. Definovaním strany štvorca je určený najmenší element priestoru obsahujúci informáciu o zodpovedajúcom elemente reálneho priestoru. Stanovenie rozmeru strany štvorca je dôležité hlavne pri praktickej realizácii, kedy je nutné zohľadniť pracovné prostredie robotov, veľkosti a tvary prekážok, rozmery jednotlivých robotov a pod. Ďalší faktor ovplyvňujúci veľkosť štvorca je skutočnosť, že štvorcové elementy obsahujú aj informácie o virtuálnych feromónoch a tie ovplyvňujú rozhodovanie agentov pri pohybe.

1.1 Vektor vzájomného vplyvu

Podobne ako v simulácií virtuálneho kŕdľa vtákov *(virtual bird flocking-VBF)*, sú v okolí agenta stanovené zóny, ktoré definujú dosah jednotlivých zložiek ovplyvňujúcich jeho rozhodovanie[6]. Prvá zóna je zónou vzájomného vplyvu medzi agentmi. V prípade spomenutej simulácie VBF boli na tento účel použité dve zóny, tzv. zóna priťahovania a zóna odpudzovania, ktoré svojím polomerom určujú tých susedných členov skupiny, ku ktorým (od ktorých) sa snažil aktuálny člen priblížiť, resp. oddialiť. V prípade navrhovanej metódy je použitá jedna zóna vzájomného vplyvu *Z1* s polomerom r_{inf} a vplyv okolitých agentov je určený na základe transformačnej funkcie, ktorá transformuje vektor $\overrightarrow{d_{an}}$ určujúci vzájomnú polohu dvoch agentov (agenta R_a a R_n) na vektor $\overrightarrow{y_{an}}$reprezentujúci silu, ktorou sa agent *Ra* musí priťahovať, alebo odpudzovať od agenta *Rn*, za účelom dosiahnutia rovnovážnej polohy. Rovnovážna poloha dvoch agentov je stav, kedy sú agenty R_a a R_n v stanovenej preddefinovanej vzdialenosti *e*, platí $\overrightarrow{d_{an}} = e$ a vektor $\overrightarrow{y_{an}}$ je nulový.

Zóna vplyvu sa nachádza zvlášť okolo každého agenta. Ak sa iný agent vyskytne v tejto zóne, jeho prítomnosť ovplyvní správanie aktuálneho agenta v centre tejto zóny (v ďalšom texte označeného aj ako centrálneho agenta). Na účel určenia vektora $\overrightarrow{y_{an}}$ definujúceho vzájomný vplyv agentov bola navrhnutá tzv. funkcia vzájomného vplyvu, pomocou ktorej je stanovený transformačný koeficient. Ide o skalárnu veličinu, ktorá definuje pomer veľkostí vektorov $\overrightarrow{y_{an}}$ a $\overrightarrow{d_{an}}$. Vo všeobecnosti platí, že ak sú agenty príliš blízko seba, snažia sa vzájomne oddialiť, ak sú ďalej, no v dosahu zóny vzájomného vplyvu, snažia sa priblížiť. Všetky tieto relatívne pojmy sú objektivizované prostredníctvom transformačnej funkcie, ktorá je definovaná vzťahom:

$$\overrightarrow{y_a} = \frac{\overrightarrow{d_{an}} * t_a}{2}, \tag{1}$$

kde člen t_a je transformačný koeficient určený pomocou funkcie vzájomného vplyvu nasledovne:

$$t_a = \frac{\left|\overrightarrow{d_{an}}\right| - e}{\left|\overrightarrow{d_{an}}\right|}, \tag{2}$$

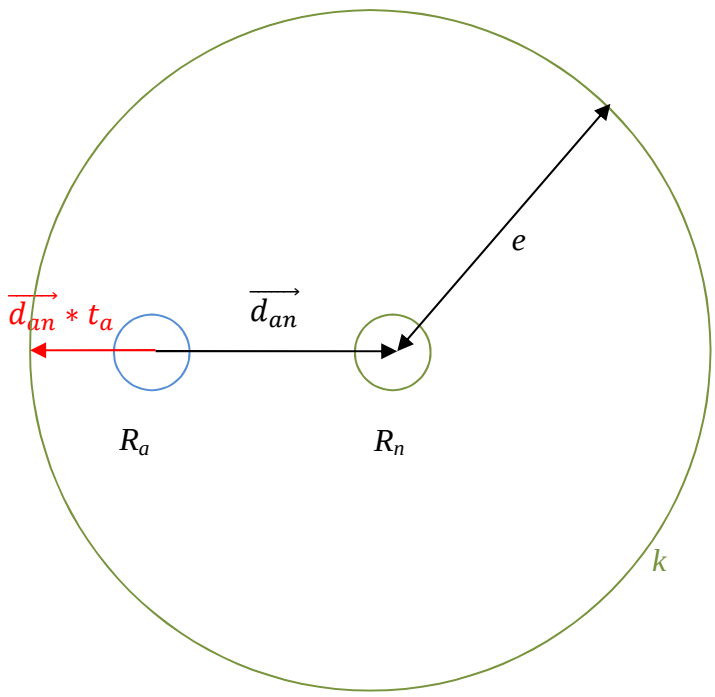
kde $\overrightarrow{d_{an}}$ je vektor určujúci relatívnu polohu agenta R_n vzhľadom na polohu centrálneho agenta R_a, $|\overrightarrow{d_{an}}|$ je dĺžka tohto vektora, resp. vzájomná vzdialenosť medzi oboma agentmi a e je rovnovážna vzdialenosť agentov. Funkcia vzájomného vplyvu je navrhnutá tak, aby jej výstupom bol koeficient t_a, pre ktorý v prípade skalárneho súčinu:

$$\overrightarrow{d_{an}} * t_a \tag{3}$$

platí, že veľkosť a smer výsledného vektora bude definovať najkratšiu vzdialenosť agenta R_a od kružnice k s polomerom e definujúcej rovnovážnu vzdialenosť v okolí robota R_n, čiže platí:

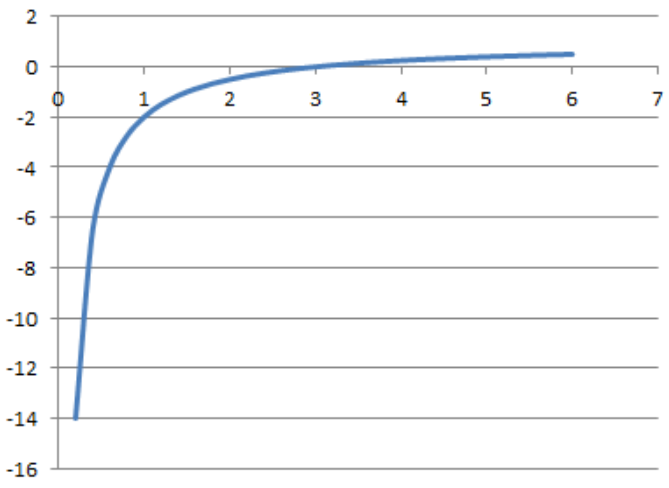
$$\overrightarrow{d_{an}} * t_a + \overrightarrow{d_{an}} = e, \tag{4}$$

čo je zobrazené na obrázku č. 1.



Obrázok 1: Kružnica *k* s polomerom *e* predstavuje rovnovážnu vzdialenosť agenta R_a od agenta R_n.

Definičný obor funkcie vzájomného vplyvu pre $e>0$ je $D(t_a) = (-\infty,0)\cup(0,\infty)$. Keďže vzdialenosť dvoch agentov nemôže byť záporná, praktický význam má priebeh funkcie pre kladné hodnoty. Obrázok č. 2 znázorňuje priebeh funkcie vzájomného vplyvu pre $e = 3$, v prvom a štvrtom kvadrante. Ak $|\overrightarrow{d_{an}}| = 3$ je funkčná hodnota funkcie vzájomného vplyvu $t_a = 0$ a teda aj veľkosť výsledného vektora $\overrightarrow{y_{an}}$ bude nulová. Toto je prípad, kedy sú roboty vo zvolenej rovnovážnej vzdialenosti, v tomto prípade vo vzdialenosti 3 (virtuálne štvorce).



Obrázok 2: Priebeh funkcie vzájomného vplyvu pre e=3.

Ak je vzdialenosť dvoch robotov menšia ako 3, platí $|\overrightarrow{d_{an}}| < 3$. Na tomto intervale ($0 < d_{an} < 3$) je obor hodnôt funkcie $H(t_a)<0$. Transformačný koeficient t_a teda nadobúda záporné hodnoty a výsledný vektor $\overrightarrow{y_{an}}$ bude mať opačný smer ako vektor $\overrightarrow{d_{an}}$.

Ak je vzdialenosť dvoch robotov väčšia ako 3, platí $|\overrightarrow{d_{an}}| > 3$. Ako bolo spomenuté, v okolí každého agenta je vymedzená zóna vplyvu s polomerom r_{inf}. Na to, aby agent R_n mal vplyv na agenta R_a, musí sa nachádzať vo vnútri tejto zóny, teda musí platiť $|\overrightarrow{d_{an}}| < r_{inf}$. Polomer r_{inf} tejto zóny je jedným z parametrov metódy a je určovaný experimentálne, individuálne pri každej praktickej aplikácií. Dôvodom tohto obmedzenia polomeru zóny vzájomného vplyvu je myšlienka, že je zbytočné, aby na agenta vplýval iný agent, ktorý sa nachádza vo veľkej vzdialenosti. Funkcia vzájomného vplyvu teoreticky nadobúda kladné hodnoty na intervale (e, ∞), ale maximálna vstupná hodnota je obmedzená na r_{infx}. Funkcia teda spracováva hodnoty na intervale $(0,r_{inf})$ a kladné hodnoty nadobúda na intervale (e, r_{inf}). Transformačný koeficient t_a na tomto intervale nadobúda kladné hodnoty a výsledný vektor $\overrightarrow{y_{an}}$ má rovnaký smer ako vektor $\overrightarrow{d_{an}}$.

Z obrázku č. 1 je zrejmá fyzikálna interpretácia vektora, ktorý vznikne súčinom transformačného koeficientu t_a a vektora $\overrightarrow{d_{an}}$. Ak by sa agent R_a presunul do koncového bodu tohto vektora, nachádzal by sa v čase $t+1$ vo vzájomnej rovnovážnej vzdialenosti s agentom R_n. Treba však vziať do úvahy, že v prípade ak si agent R_n v čase t určí vektor, ktorým na neho vplýva agent R_a, získa vektor rovnakej veľkosti no opačného smeru. Ak by následne na základe tohto vektora vykonal pohyb aj agent R_n, agenty by sa v čase $t+1$ neocitli v rovnovážnej vzdialenosti e, ale vo vzdialenosti:

$$|\overrightarrow{d_{an}}|_{t+1} = e + |\overrightarrow{d_{an}}|_t * t_a \tag{5}$$

Na to, aby sa agenty ocitli po vykonaní pohybu v rovnovážnej vzdialenosti je nutné, aby každý z nich vykonal iba polovicu pohybu, resp. aby v smere vektora $\overrightarrow{d_{an}}$ prešiel jeho polovičnú dĺžku. Z tohto dôvodu sa v menovateli transformačnej funkcie nachádza číslo 2. Úplný zápis zloženej transformačnej funkcie zahŕňajúci rozpísanú funkciu vzájomného vplyvu je nasledovný:

$$\overrightarrow{y_a} = \frac{\overrightarrow{d_{an}} * \frac{|\overrightarrow{d_{an}}| - e}{|\overrightarrow{d_{an}}|}}{2} \tag{6}$$

Predchádzajúci postup popisuje proces výpočtu vektora vplyvu jedného agenta R_n na agenta R_a. Počet agentov nachádzajúcich sa v zóne vzájomného vplyvu agenta R_a však môže byť vyšší. Ak označíme ich počet *z*, potom pre vektory vplyvu jednotlivých agentov platí.

$$\overrightarrow{y_{a1}} = \frac{\overrightarrow{d_{a1}} * \frac{|\overrightarrow{d_{a1}}| - e}{|\overrightarrow{d_{a1}}|}}{2} \tag{7}$$

až po *z*-tého agenta:

$$\overrightarrow{y_{az}} = \frac{\overrightarrow{d_{az}} * \frac{|\overrightarrow{d_{az}}| - e}{|\overrightarrow{d_{az}}|}}{2} \tag{8}$$

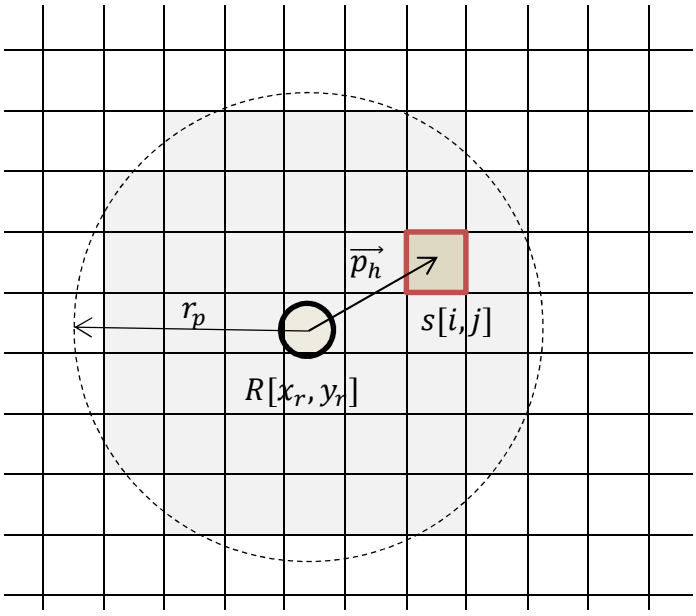
Výsledný vektor $\overrightarrow{y_a}$ je vypočítaný ako vektorový súčet všetkých týchto vektorov:

$$\overrightarrow{y_a} = \sum_{i=1}^{z} \overrightarrow{y_{ai}} \tag{9}$$

1.2 Detekcia feromónu

Výsledný vektor vzájomného vplyvu $\overrightarrow{y_a}$ je jednou z dvoch zložiek ovplyvňujúcich rozhodovací proces robota. Druhou zložkou je vektor určený feromónovou značkou v okolí agenta. Feromónové značky sú premenné nadobúdajúce celočíselné hodnoty, ktoré popisujú jednotlivé štvorcové elementy mapy a sú rozmiestňované počas pohybu agentov, agentmi samotnými. Ihneď ako agent vstúpi na nový štvorcový element, hodnota feromónu tohto štvorca a štvorcov v jeho okolí je upravená podľa stanovených pravidiel. Východzia hodnota feromónovej značky štvorca *s(x,y)*, ktorý nebol navštívený žiadnym z agentov je nulová. Táto hodnota teda označuje nepreskúmaný element mapy, prípadne element, ktorý preskúmaný bol, no prešiel stanovený čas t_{lim}, po ktorom je znova element považovaný za nepreskúmaný. Štvorcový element nadobúda najvyššiu hodnotu feromónu $\boldsymbol{\tau}_m$ v čase kedy je práve navštívený niektorým z agentov, alebo sa niektorý z agentov nachádza v stanovenom okolí štvorca. Ďalšou vlastnosťou feromónových značiek je znižovanie ich hodnoty v čase (známej aj ako vyprchávanie feromónu). Povolenie/zakázanie vyprchávania feromónu je kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim výsledné správanie agenta.

Rovnakým spôsobom, akým je určená zóna vzájomného vplyvu agentov, je určená zóna Z2 (kruhové okolie robota o polomere r_p), vo vnútri ktorej agent hľadá feromón na základe stanovených pravidiel. Polomer r_p tejto zóny môže byť konštantný, alebo v čase sa meniaci. Ide o druhý kľúčový faktor ovplyvňujúci správanie agenta. Ako tieto faktory ovplyvňujú chovanie agentov je podrobnejšie popísané v časti *3.1 Vlastnosti metódy, optimalizácia parametrov*.



Obrázok 3: Šedou farbou sú vyznačené štvorcové elementy zodpovedajúce rovnici $(i - x_r)^2 + (j - y_r)^2 < {r_p}^2$.

Účelom výberu feromónu vo vnútri zóny *Z2* (obr. č. 3) je stanovenie miesta v okolí agenta, ktoré nebolo preskúmané, resp. bolo nepreskúmané najdlhšie a ku ktorému by sa mal agent snažiť priblížiť a preskúmať ho. Určenie takéhoto feromónu sa vykonáva stochasticky na základe prislúchajúcej hodnoty feromónu. Pravdepodobnosť výberu štvorca *s(i,j)* s prislúchajúcou hodnotou feromónu $\boldsymbol{\tau_{ij}}$ je určená podľa vzťahu:

$$\mathrm{p_{ij}} = 1 - \frac{\tau_{\mathrm{ij}}}{\sum_{ij}^{z} \tau_{ij}} \qquad \text{pre} \qquad (i - x_r)^2 + (j - y_r)^2 < {r_p}^2 \tag{10}$$

Kde x_r, y_r je aktuálna poloha agenta. Z tejto rovnice vyplýva, že pravdepodobnosť výberu štvorca *s(i,j)* s prislúchajúcou feromónovou hodnotou τ_{ij}, je nepriamo úmerná hodnote tejto feromónovej značky. V prípade nemeniacej sa hodnoty feromónu v čase je pravdepodobnosť výberu ktoréhokoľvek štvorca z oblasti Z2 rovnaká:

$$p_{ij} = \frac{1}{n_p} \tag{11}$$

Kde n_p je celkový počet feromónových značiek v oblasti *Z2*. Po určení vhodnej feromónovej značky v okolí robota je stanovený vektor $\overrightarrow{p_h}$ určujúci relatívnu polohu tejto značky vzhľadom na aktuálneho robota.

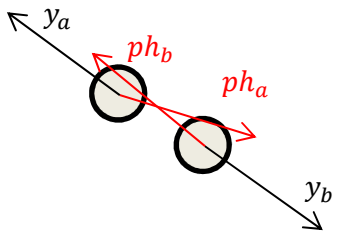
Stanovený vektor $\overrightarrow{p_h}$ sa ďalej upravuje. Ak jeho dĺžka presahuje povolený limit, je znížená na maximálnu povolenú hodnotu. Orientácia vektora zostáva zachovaná. Dôvodom tejto úpravy je zachovanie vyváženosti vplyvu feromónového vektora $\overrightarrow{p_h}$ a vektora vzájomného vplyvu $\overrightarrow{y_a}$ agentov. Ak by feromónový vektor svojou dĺžkou príliš presahoval vektor vzájomného vplyvu robotov, druhý spomenutý vektor by vo výslednom vektorovom súčte zohrával zanedbateľnú úlohu.

Znižovanie hodnoty feromónových značiek nie je na čase závislé, nie je stanovený čas po ktorom je hodnota značky znížená. Zmena hodnôt značiek je závislá na prechodoch agentov medzi jednotlivými štvorcovými elementmi mapy. Ku zníženiu dochádza vždy, keď ktorýkoľvek agent prekročí hranicu dvoch susedných štvorcových elementov. Znižujú sa vždy

všetky feromónové hodnoty v celej mape. Týmto spôsobom je odstránená nutnosť synchronizácie agentov, spoločného času a tým sú znížené komunikačné nároky metódy.

1.3 Pohyb robota

V predchádzajúcich častiach bol popísaný proces získania vektorov $\overrightarrow{y_a}$ a $\overrightarrow{p_h}$ ovplyvňujúcich rozhodovací proces agenta. Feromónový vektor sa však určuje iba ak sa v okolí centrálneho agenta nenachádza iný robot bližšie ako stanovená hraničná vzdialenosť d_{min}. V takom prípade sa určí iba vektor vzájomného vplyvu agentov a feromónový vektor je nulový. Dôvodom je fakt, že v situácii, kedy sú dva agenty príliš blízko, je zvýšené riziko kolízie. V takom prípade nie je dôležité, aby agenty vo svojom okolí vyhľadávali nepreskúmané územia, ale aby sa vyhli zrážke. Príkladom je hraničná situácia na obrázku č. 4. Dva agenty sú síce odpudzované pomocou vektorov vzájomného vplyvu, no táto sila je zmenšená o feromónové vektory, ktoré majú opačný smer.

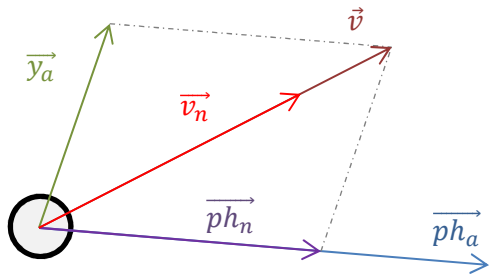


Obrázok 4: Vektory vzájomného vplyvu (čierne) spôsobujú odpudzovanie robotov, no feromónové vektory (červené) v tomto prípade zmenšujú toto odpudzovanie. Obrázok ilustruje hraničnú situáciu, kedy môže dôjsť ku vzájomnej kolízií agentov.

V prípade, že agenty sa nenachádzajú v kriticky malej vzdialenosti, sú určené oba vektory a výsledný pohyb robota je vyrátaný ako vektorový súčet oboch vektorov. Výsledný vektor $\vec{v}$ určuje smer a vzdialenosť, čiže bod do ktorého sa má robot presunúť.

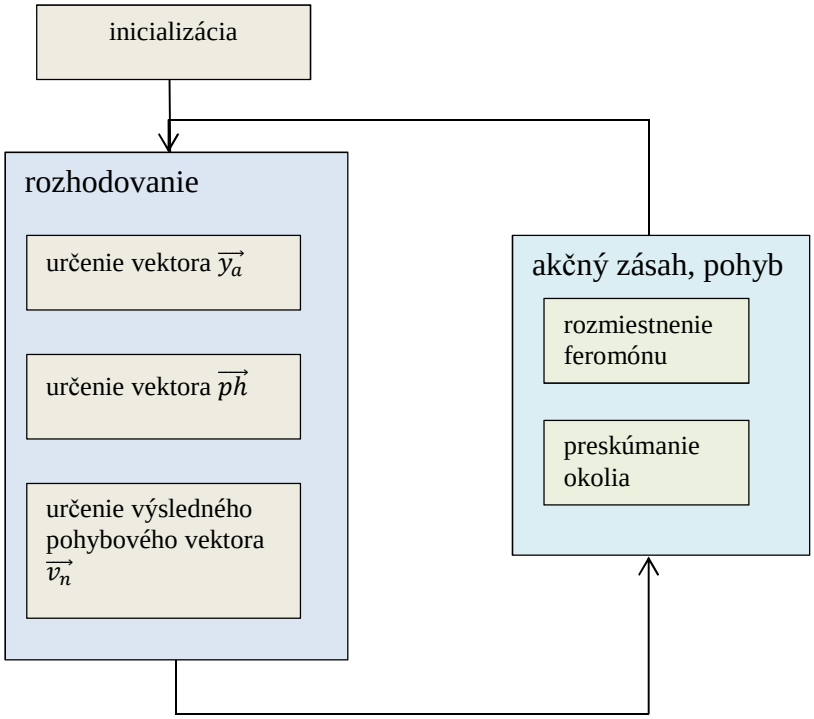
$$\vec{v} = \overrightarrow{y_a} + \overrightarrow{p_h} \tag{12}$$

Ak vektorový súčet presiahne povolenú maximálnu hodnotu, resp. vektor $\vec{v}$ presiahne maximálnu dĺžku, je upravený na vektor $\overrightarrow{v_n}$, ktorý je rovnakého smeru, no má zmenšenú dĺžku na maximálnu povolenú hodnotu v_{max}. Táto hodnota je jedným z užívateľom stanovených parametrov. Ovplyvňuje, ako často sa agent rozhoduje pre svoj ďalší krok. V prípade malej hodnoty v_{max}, agent prejde iba malú vzdialenosť a znovu určí vektor$\overrightarrow{v_n}$ ovplyvňujúci jeho pohyb. Ak je hodnota v_{max} vyššia, agent medzi jednotlivými rozhodovacími procesmi prejde väčšie vzdialenosti. Tento parameter je možné považovať za faktor vplývajúci na časové rozlíšenie jednotlivých rozhodnutí, resp. faktor ovplyvňujúci odozvu na zmenu v prostredí. Čím častejšie sa bude agent rozhodovať pre ďalší krok (nižšia hodnota v_{max}), tým viac bude schopný reflektovať zmeny v prostredí a reagovať na ne. Na druhej strane, príliš nízka hodnota môže viesť k chaotickému pohybu agenta, pretože skôr ako stihne vykonať zvolený pohyb - napr. preskúmať zvolený nepreskúmaný priestor – bude nútený zvoliť ďalší krok, ktorý pre nízku hodnotu v_{max} nebude znova schopný dokončiť. Ide preto o dôležitý parameter, ktorý je nutné citlivo nastaviť a zohľadniť pri tom viaceré aspekty, týkajúce sa najmä priestoru, rozmerov robota, jeho akčného rádiusu (dosahu jeho snímačov) a rýchlosti jeho pohybu. Na obrázku č. 5 sú znázornené všetky vektory potrebné k získaniu výsledného vektora $\overrightarrow{v_n}$.



Obrázok 5: Všetky vektory potrebné k získaniu výsledného vektora $\vec{v_n}$.

Po stanovení vektora $\vec{v_n}$ agent vykoná samotný pohyb. Táto činnosť sa cyklicky opakuje. Pracovný cyklus agenata sumarizujúci všetky uvedené činnosti je na obrázku č. 6.



Obrázok 6: Pracovný cyklus agenta.

Aby bol agent schopný určiť vektory $\vec{y_a}$, $\vec{p_h}$ a následne výsledný vektor $\vec{v_n}$, musí mať potrebné informácie o prostredí a ďalších agentoch v skupine. Metóda je navrhnutá tak, aby vyžadovala iba minimum informácií a minimalizovala tak komunikačné nároky. Komunikácia by teda mala zahŕňať:

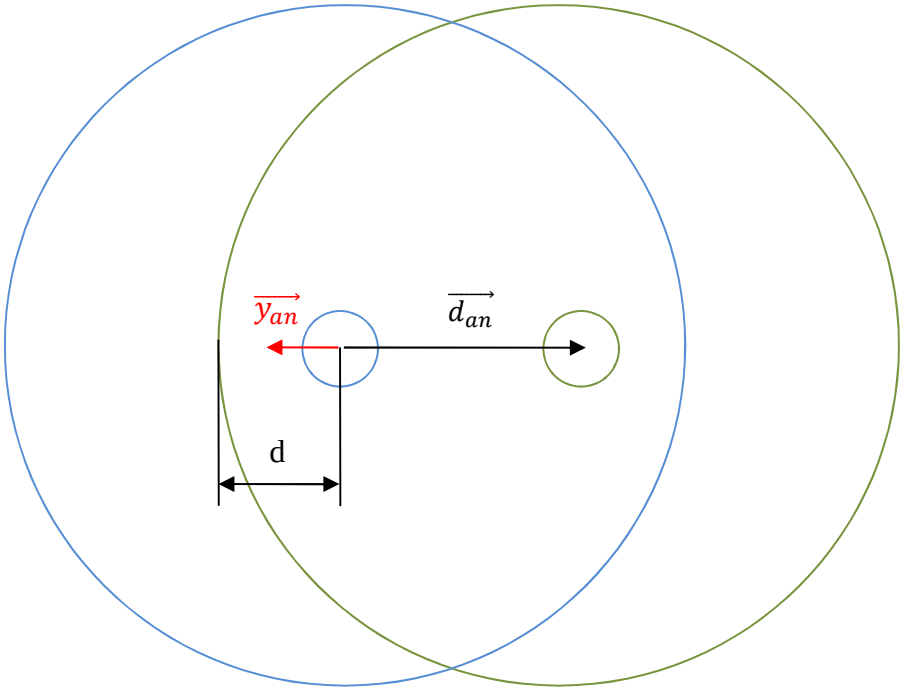
- informácie o feromónových značkách,
- informácie o polohách zvyšných robotov.

V skutočnosti je však možné odvodiť informácie o feromónových značkách z informácií o aktuálnych polohách ostatných agentov, čo ešte viac minimalizuje komunikačné nároky. Tento proces je detailnejšie popísaný v časti *4.2 Komunikácia*, ktorá popisuje praktickú realizáciu komunikácie.

2 Implementácia metódy

Na začiatku sa zisťuje či sa v zóne vzájomného vplyvu *Z1* prislúchajúcej aktuálnemu agentu nachádza aspoň jeden ďalší agent. Ak je agentov viac, je určené *id* najbližšieho agenta, pretože ten bude určovať vzájomný vektor vplyvu medzi agentmi. Ak sa v tejto zóne nenachádza žiadny ďalší agent, *id* je stanovené na -1.

V prípade, že *id* nadobudlo nezápornú hodnotu, je následne určený vektor vzájomného vplyvu agentov $\overrightarrow{y_{an}}$. Vychádza sa z vektora určujúceho vzájomnú polohu agentov $\overrightarrow{d_{an}}$. Tento vektor je určený vzhľadom na polohu aktuálneho agenta. Jeho dĺžka je vstupným parametrom funkcie, ktorá určí tzv. transformačný koeficient. Tento koeficient je následne použitý na transformáciu vektora $\overrightarrow{d_{an}}$. Výsledný vektor $\overrightarrow{y_{an}}$ určuje smer a polovičnú vzdialenosť aktuálneho agenta k bodu v ktorom bude aktuálny a najbližší agent v rovnovážnej vzdialenosti. Vzdialenosť je polovičná z toho dôvodu predpokladu, že druhý agent (ten ktorý je v tomto prípade najbližšie k aktuálnemu) si určí vektor vplyvu, ktorý bude opačný a teda tento agent vykoná zvyšnú polovicu pohybu, ktorá je nutná na to, aby oba agenty dosiahli rovnovážnu vzdialenosť.



Obrázok 7. Pre vektor $\overrightarrow{y_{an}}$ platí $|\overrightarrow{y_{an}}| = d/2$, kde d je dĺžka vektora ku rovnovážnej vzdialenosti oboch agentov. Vonkajšie kružnice predstavujú túto vzdialenosť pre každého agenta. Po tom čo si pravý agent určí vektor rovnakej dĺžky opačného smeru, agenty vykonajú pohyb a budú v rovnovážnej vzdialenosti.

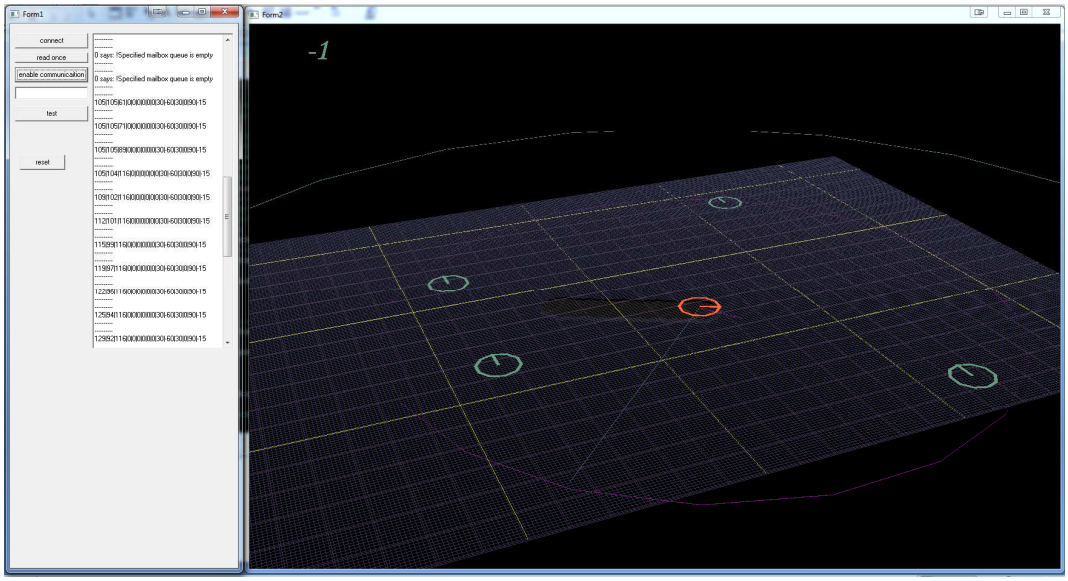
Následne sa určuje feromónový vektor. Podmienkou však je, aby vzdialenosť najbližšieho agenta nebola nižšia než stanovená minimálna hodnota d_{min}. Ak sú dva agenty bližšie, je zvýšená možnosť kolízie a preto nie je podstatné to, aby bol agent priťahovaný nepreskúmaným priestorom, ale to, aby nedošlo ku kolízií. Ide teda o ochranný mechanizmus, ktorý má opodstatnenie hlavne pri praktickej realizácii systému. Samotný feromónový vektor je určený stochasticky. Pravdepodobnosť výberu feromónu v okolí aktuálneho agenta je nepriamo úmerná jeho aktuálnej hodnote. Na začiatku je určené náhodné číslo, ktoré je postupným prechádzaním všetkých feromónových značiek v definovanom okolí agenta zmenšované o rozdiel medzi maximálnou a aktuálnou hodnotou feromónudaného štvorca.

K najväčšiemu zníženiu dochádza na miestach kde je hodnota feromónu najmenšia (to sú miesta, ktoré neboli najdlhšie preskúmané) a na týchto miestach je teda najvyššia pravdepodobnosť, že náhodné číslo dosiahne nulu, alebo zápornú hodnotu. Toto miesto určuje absolútnu polohu feromónu v okolí agenta, na základe ktorého je následne určený relatívny feromónový vektor vzhľadom na aktuálnu polohu agenta. Dĺžka výsledného vektora $\overrightarrow{p_h}$ je obmedzená na maximálnu hodnotu, ktorá sa rovná rovnovážnej vzdialenosti agentov (dôvod bol uvedený).

Pre účely simulácie sú rozhodovacie procesy jednotlivých agentov v čase usporiadané sekvenčne za sebou. Tieto procesy je však možné paralelizovať. Táto vlastnosť je využitá pri praktickej realizácii metódy, ktorá je popísaná v časti *4.3 Vyššia vrstva riadenia, riadiaci program robota*.

2.1 Simulačný softvér VERA

Na účely simulácie navrhovanej metódy bol vytvorený simulačný softvér VERA, ktorý dokáže simulovať pohyb virtuálnych robotov vo virtuálnom priestore na základe predloženej metódy. Je vytvorený v jazyku C++ s využitím knižníc openGL. Tento nástroj umožňuje nastavovať a meniť všetky dôležité parametre simulácie. Činnosť agentov v skupine je vizualizovaná v trojrozmernom priestore, pričom užívateľ môže sledovať dôležité vektory určujúce pohyb jednotlivých agentov. Prostredníctvom farebného rozlíšenia štvorcových elementov mapy sú odlíšené preskúmané oblasti od nepreskúmaných. Vyprchávanie feromónových značiek je znázornené pomocou tmavnúcej farby zodpovedajúceho štvorca.



Obrázok 8: Simulačná aplikácia VERA.

Tento softvér je navrhnutý ako samostatná aplikácia, ktorá umožňuje simulovať chovanie agentov popísané pomocou matematických rovníc. Aplikácia bola použitá na stanovenie dôležitých parametrov simulácie, odladenie navrhovaného algoritmu a vyhodnotenie úrovne koordinácie robotov vo virtuálnej skupine, čo je nevyhnutný krok pred implementáciou metódy na reálne laboratórne roboty.

3 Počítačové simulácie

3.1 Vlastnosti metódy a optimalizácia parametrov

Vlastnosti navrhnutej metódy je možné meniť zmenou príslušných parametrov. V časti *1.2 Detekcia feromónu* boli spomenuté boli dva kľúčové faktory ovplyvňujúce správanie robota; znižovanie hodnoty feromónových značiek $\boldsymbol{\tau_{ij}}$ a časová premenlivosť polomeru okolia agenta r_p. Zmenou týchto dvoch parametrov je možné meniť správanie agentov a rozlišovať medzi prehľadávaním a pokrývaním priestoru nasledovne. V prípade, že feromón neznižuje v čase svoju hodnotu, je možné rastrovú mapu považovať za boolovu maticu a jednotlivé prvky matice poskytujú informáciu o tom, či bol zodpovedajúci element mapy preskúmaný, alebo nie. Ak rozlíšime iba tieto dva stavy, posilníme tým tendenciu robota za vyhľadávaním nepreskúmaného priestoru. Ak sa totiž v zóne vyhľadávania feromónu vyskytne jeden element *s(i,j)*, ktorý je označený ako nepreskúmaný (*s(i,j)=0*), je pravdepodobnosť jeho výberu p_{ij} = 100%. Ak je takýchto elementov v okolí robota viac, je táto pravdepodobnosť rovnomerne distribuovaná medzi všetky elementy a pravdepodobnosť zvolenia už preskúmaného elementu je nulová. Z toho však vyplýva, že je nutné zabezpečiť, aby sa v okolí robota vyskytol minimálne jeden element označený ako nepreskúmaný. To zabezpečuje druhý faktor vplývajúci na rozhodovanie agenta a tým je spomenutá variabilita polomeru r_p zóny vyhľadávania feromónu. Ak sa v kruhovej zóne s polomerom r_p v okolí robota nenájde žiadny element označený ako nepreskúmaný, je polomer tejto zóny zvýšený a preskúmané sú elementy v širšom okolí:

$$r_{p_{t+1}} = r_{p_t} + \Delta r_p \tag{13}$$

Kde $r_{p_{t+1}}$ je polomer zóny v čase *t+1*, r_{p_t} je polomer v čase *t*. Δr_p je prírastok o ktorý sa tento polomer cyklicky zvyšuje, ak nebol nájdený žiadny nepreskúmaný element. Toto zvyšovanie je ohraničené. Ak je úlohou pokryť celú mapu o rozmeroch m x *n*, maximálny povolený limit r_{pmax} pre polomer r_p je nastavený na:

$$r_{p\,max} = \sqrt{m^2 + n^2} \tag{14}$$

Tým sa zabezpečí nájdenie nepreskúmaného elementu aj pre najhorší prípad, kedy je agent v rohu mapy a posledný nepreskúmaný element je v rohu protiľahlom. Správanie skupiny, ktorej účelom má byť prehľadávanie priestoru je teda určené:

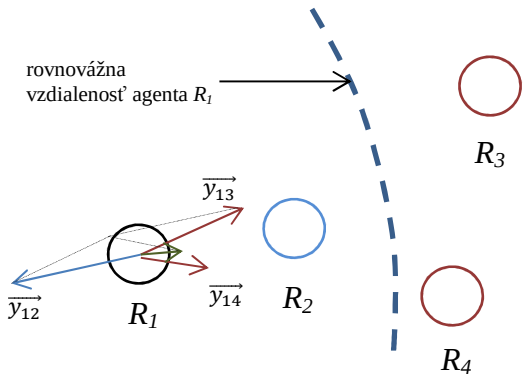
- zakázaním znižovania hodnoty feromónových značiek
- časovou premenlivosťou okolia vyhľadávania týchto značiek r_p

Na účely pokrývania priestoru je nastavenie parametrov nasledovné:

- povolenie znižovania hodnoty feromónových značiek
- polomer okolia r_p je konštantný

Ďalším z dôležitých faktorov navrhnutej metódy ovplyvňujúcich správanie skupiny je parameter *z*, určujúci počet agentov ovplyvňujúcich aktuálneho agenta (rovnica 8, 9). Najlepšie koordinačné vlastnosti dosahovali agenty v prípade nízkej hodnoty parametru *z* (približne z = 1 až 3). Pri vyššom počte zhluknutých agentov sa môže stať, že výsledné vektory vzájomného vplyvu budú viesť ku chaotickému správaniu, alebo až ku vzájomnej

kolízii. Obrázok č. 9 ilustruje prípad, kedy je pre agenta R_1 dôležité, aby sa vyhol zrážke s agentom R_2. Ak by však vzal do úvahy aj ďalšie dva agenty, ktoré sa nachádzajú za agentom R_2, výsledný vektor by nútil agenta ešte viac sa priblížiť ku modrému agentu R_2. Z tohto dôvodu je dôležité, aby agent reagoval predovšetkým na najbližších okolitých susedov čo viedlo k spomenutému nastaveniu parametru *z*.



Obrázok 9: V situácii na obrázku je dôležité, aby sa agent R_1 vyhol koízii s najbližším agentom. Udržať sa vo formácii so zvyšními agentami nie je v tomto momente prioritou.

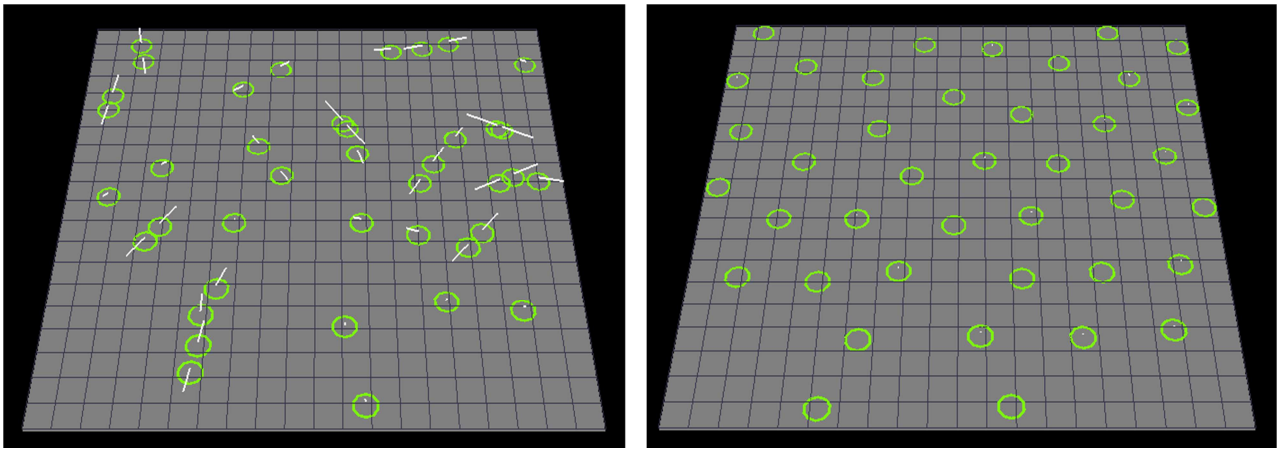
3.2 Porovnanie s ďalšími metódami

Účelom testovania bolo porovnať úspešnosť pokrývania a stráženia priestoru navrhovanej metódy s ďalšími metódami. Všetky porovnávané metódy patria do skupiny biologicky inšpirovaných metód. Boli porovnávané metódy:

- metóda č.1: navrhovaná metóda,
- metóda č.2: zjednodušená metóda sACO založená na rozmiestňovaní a detekcii virtuálneho feromónu[7],
- metóda č.3: modifikácia PSO algoritmu na účel prehľadávania priestoru – táto metóda využíva prístup[8][9][10], čiže ide o úpravu základného PSO algoritmu s názvom pePSO (ePSO),
- metóda č.4: rozšírená metóda pePSO (ePSO) s rovnakými princípmi ako metóda č. 3, v ktorej správanie agentov je naviac podmienené okolitým nepreskúmaným priestorom. Ide o rozšírenie metódy spôsobom, ktorý bol popísaný v[11],
- metóda č.5: spojenie metódy pePSO (ePSO) a koordinačného mechanizmu virtuálneho kŕdľa vtákov (VBF)[6][12].

3.3 Rozmiestnenie v priestore

Účelom prvého simulačného experimentu je preukázanie, že funkcia vzájomného vplyvu je navrhnutá správne a že agenty sú s jej využitím schopné koordinovať sa v priestore. Preto v tejto simulácií si agenty určujú iba vektor vzájomného vplyvu, feromónový vektor nie je určovaný, resp. je vždy nulový. Zo správania agentov je takýmto spôsobom odstránená sila, ktorá vytvára tendenciu vyhľadania nepreskúmaného miesta v ich okolí a pohybu na toto miesto. Agenty sú ovplyvňované iba vzájomne medzi sebou. Vektor vzájomného vplyvu je na obrázku č. 10 znázornený bielou farbou.



Obrázok 10: Agenty sú na začiatku (obrázok vľavo) rozmiestnené na náhodných pozíciách. Na konci simulácie sú rovnomerne rozmiestnené v priestore (obrázok vpravo).

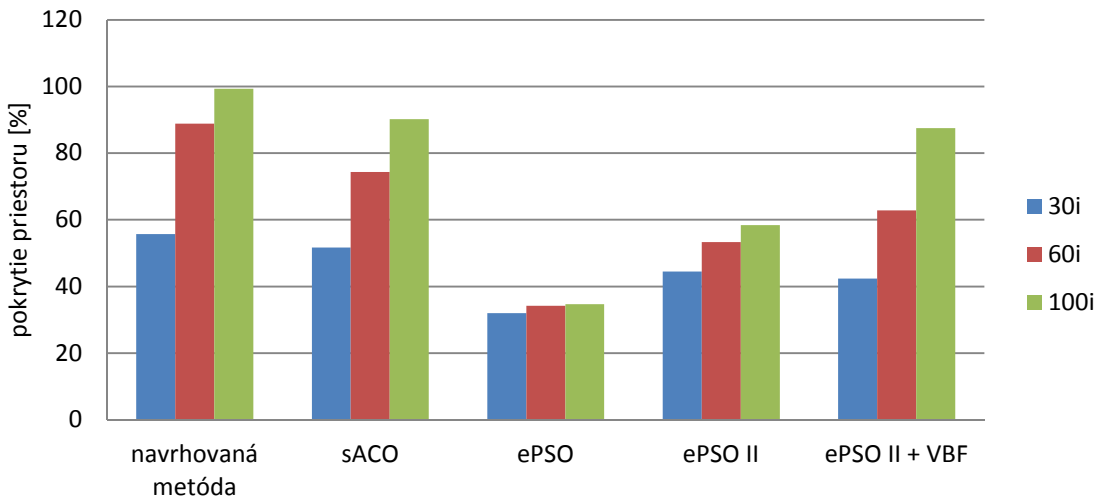
Pohyb agentov spôsobuje, že biele vektory vzájomného vplyvu sa postupne zmenšujú (obr. č. 10 vľavo). Stav kedy majú všetky vektory nulovú veľkosť je rovnovážny stav kedy sú všetky agenty rovnomerne rozmiestnené v priestore. Neexistuje žiaden vektor, ktorý by spôsoboval pohyb agentov a tí zostávajú na jednom mieste (obr. č. 10 vpravo). Tento simulačný experiment potvrdzuje, že funkcia vzájomného vplyvu, ktorá má vytvárať u agentov tendenciu udržiavať rovnovážnu vzdialenosť je navrhnutá správne.

3.4 Prehľadávanie

V nasledujúcich simuláciách bolo úlohou agentov pokryť svojimi senzormi celý priestor. Dosah senzorov agenta je definovaný ako kruhové okolie s polomerom r_{sen}. Počiatočné rozmiestnenie agentov v priestore je náhodné. Parametre, ktoré sú pre metódy spoločné boli nastavené na rovnakú hodnotu. Ide o:

- dosah senzorov,
- maximálna dĺžka kroku,
- polomer zóny detekcie feromónu,
- polomer zóny rozmiestňovania feromónu

Každá metóda bola testovaná s rozličným počtom agentov (3, 10, 20 agentov) postupne pre 30, 60, 100 iterácií, na štatistickej vzorke päťdesiatich pokusov. Výsledky predložené v dizertačnej práci sa teda opierajú o súbor 2250 vykonaných simulačných experimentov. V autoreferáte sú z dôvodu stručnosti uvedené iba výsledky pri použití 10 agentov. Ide však o reprezentatívny výsledok, pretože pri iných počtoch agentov bolo poradie metód aj ich relatívna úspešnosť podobné.



Graf 1: Výsledky simulačných experimentov pre 10 agentov.

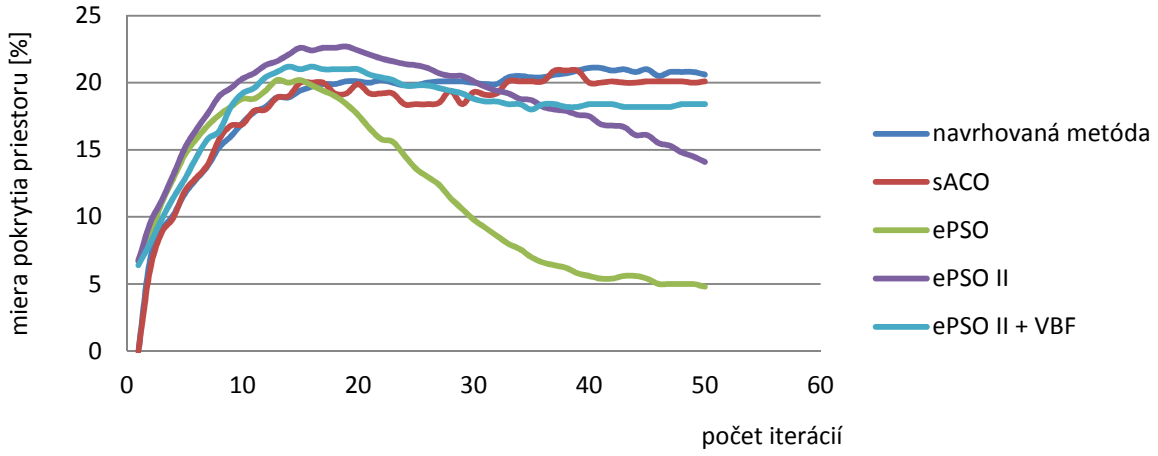
Z grafov možno odvodiť úspešnosť jednotlivých metód v pokrývaní priestoru. Metóda ePSO dosahovala najnižšiu úspešnosť spomedzi všetkých metód. Dôvodom je tendencia častíc/agentov zhlukovať sa, ktorá je pozostatkom z originálnej neupravenej metódy. Upravená metóda PSO s pridaným vektorom priťahujúcim agenty k nepokrytému priestoru dosiahla lepšie výsledky, ktoré sa so zvyšujúcim počtom iterácii ďalej zlepšovali. Ešte lepšie výsledky dosiahla metóda, ktorá zahŕňala koordináciu odvodenú z metódy simulácie virtuálneho kŕdľa vtákov. Metóda sACO využívajúca virtuálny feromón dosiahla spolu s navrhovanou metódou najlepšie výsledky. Rozdiel medzi týmito metódami nie je veľký, no navrhovaná metóda bola vždy mierne úspešnejšia.

3.5 Stráženie

Nasledujúce simulačné experimenty ilustrujú proces stráženia priestoru. Vyhodnocované bolo aktuálne pokrytie priestoru a pokrytie priestoru meniace sa v čase. Ak sa element priestoru *s(i,j)* nachádzal v dosahu senzorov agenta, bol považovaný za aktuálne preskúmaný a označený mierou preskúmania $p_{p(i,j)} = 100$ (100%).Nepreskúmaný element bol označený hodnotou $p_{p(i,j)} = 0$ (0%). Rovnakou hodnotou bol označený aj element, ktorý bol preskúmaný, no prešiel čas t_{lim}, po ktorom je tento element považovaný za nepreskúmaný. Od momentu preskúmania elementu až po čas t_{lim}, jeho hodnota $p_{p(i,j)}$ lineárne klesá. Aktuálna miera preskúmania celého priestoru P_p o rozmeroch m x n bola následne určovaná podľa vzťahu:

$$P_p = \frac{\sum_{i=0,j=0}^{m,n} p_{p(i,j)}}{mn} \tag{15}$$

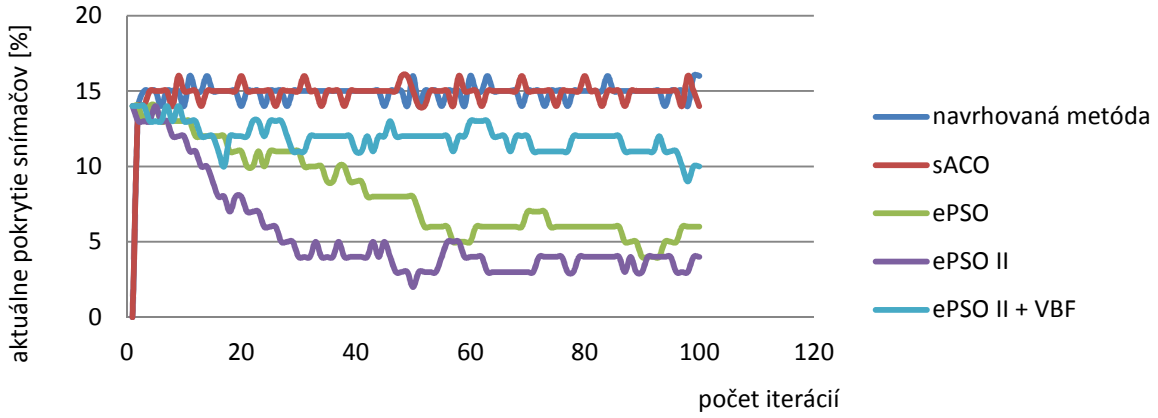
V nasledujúcich grafoch je znázornený priebeh hodnoty P_p v závislosti na čase, resp. počte iterácií. Simulačné experimenty boli znovu vykonané pomocou 3, 10, 20 agentov a každá krivka je výsledkom spriemerovania väčšieho počtu opakovaní. Na tomto mieste bude opäť uvedený graf ilustrujúci proces monitorovania priestoru s použitím desiatich agentov.



Graf 2: Výsledky simulačných experimentov pre 10 agentov.

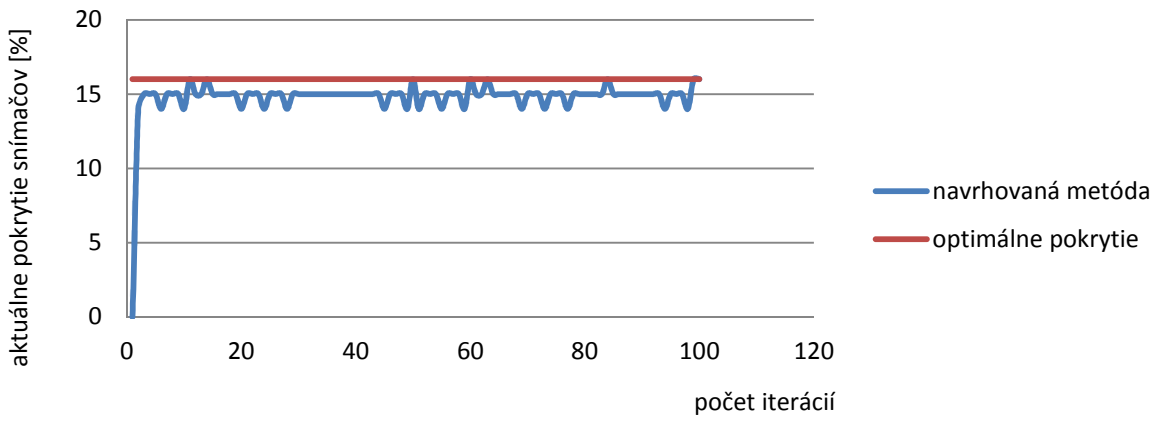
Upravená metóda ePSO, spolu s jej variantom s pridaným vektorom spôsobujú zhlukovanie agentov, čoho dôsledkom je neefektívne stráženie priestoru. Zvyšné metódy si udržujú konštantný priebeh veličiny P_p. Znamená to, že agenty sa zbytočne nezhlukujú a duplicitne nepokrývajú svoje okolie. Týmto spôsobom sa dosiahne efektívne a vyvážené stráženie priestoru. Zo všetkých metód dosahuje najlepšie výsledky opäť navrhovaná metóda.

V grafe 7 je znázornený priebeh aktuálneho pokrytia priestoru – koľko z celkového priestoru je aktuálne v dosahu senzorov všetkých agentov. Najlepšie výsledky boli znovu dosiahnuté pomocou metódy využívajúcej virtuálny feromón a navrhnutej metódy.



Graf 3: Výsledky simulačných experimentov pre 20 agentov.

V tejto simulácii bolo použitých 20 agentov, so simulovaným dosahom senzorov 2 štvorcové elementy na mape s rozmermi 40x40. Jeden agent s takýmto akčným rádiusom pokryje 0,8% celkovej plochy mapy stanovených rozmerov. Dvadsať agentov teda za ideálnych podmienok pokryje 16%. V grafe 8 je porovnaný ideálny stav so stavom dosiahnutým navrhnutou metódou.



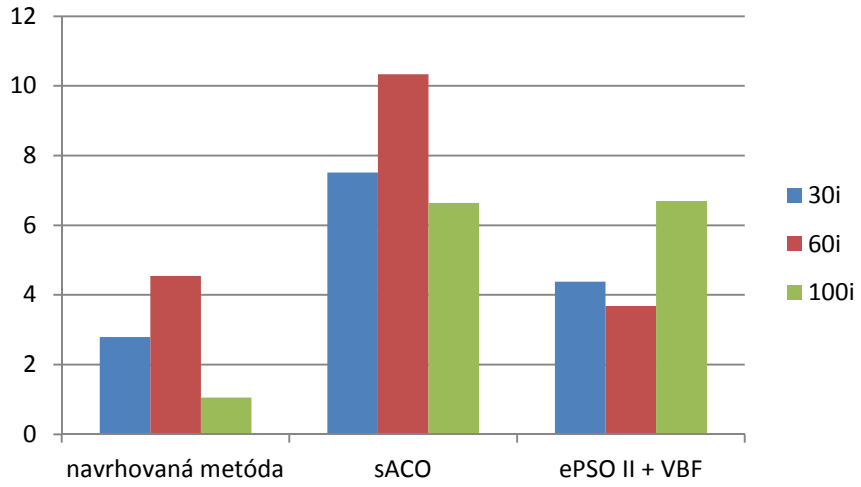
Graf 4: Porovnanie optimálneho a dosiahnutého pokrytia priestoru.

Z grafu vidno, že navrhnutá metóda sa blíži optimálnemu stavu. Pokles od optimálnej hodnoty je čiastočne spôsobený stochastickým elementom v správaní agentov.

3.6 Zhodnotenie simulačných experimentov

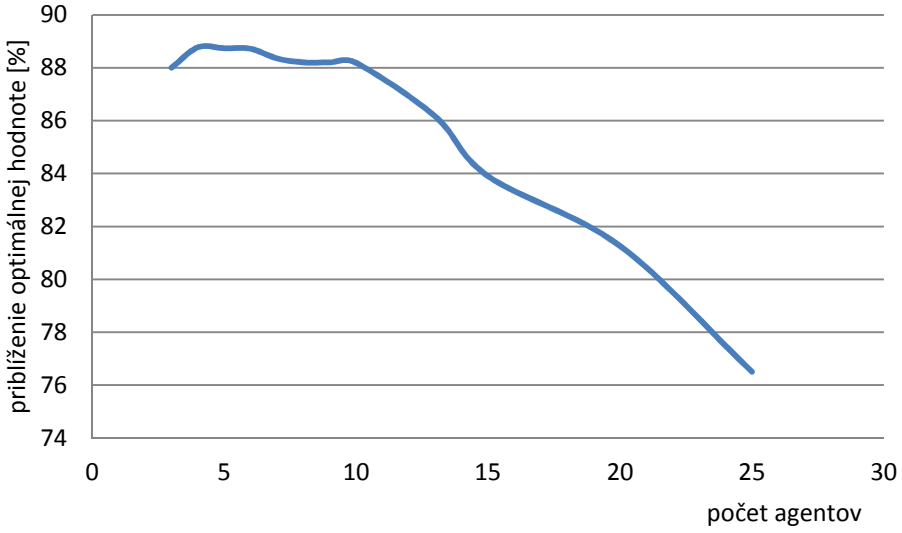
Na základe simulačných experimentov možno tvrdiť, že spomedzi testovaných metód dosahuje navrhovaná metóda najlepšie výsledky. Metóda č.3 a č.4 prejavovali tendenciu agentov zhlukovať sa, čo viedlo k neefektívnemu pokrývaniu priestoru. Metóda č.5, využívajúca dodatočnú koordináciu s využitím virtuálneho kŕdľa vtákov minimalizovala tento efekt a agenty tak boli schopné pokryť priestor a strážiť ho. Metóda č. 2, založená na rozmiestňovaní virtuálneho feromónu dosahovala spolu s navrhovanou metódou najlepšie výsledky. Dôvodom je fakt, že aj v navrhovanej metóde vytvára snahu agentov skúmať priestor práve virtuálny feromón. Na rozdiel od navrhnutej metódy metóda č.2 však neimplementuje žiadne koordinačné mechanizmy a nijakým spôsobom nepredchádza zrážke agentov a neudržuje rovnomernú formáciu skupiny. Ak sa však zameriame iba na pokrývanie priestoru, metóda č. 3 a č. 4 nie sú na tento účel vhodné. Zvyšné metódy dokážu pokryť a strážiť priestor, pričom navrhovaná metóda je najefektívnejšia.

V nasledujúcom grafe je znázornená stredná kvadratická odchýlka výsledných hodnôt pri pokrývaní priestoru desiatimi agentmi, pre tri najúspešnejšie metódy. Z grafu vidno, že najmenší rozptyl údajov dosiahla navrhovaná metóda, čo svedčí o schopnosti dosahovať konzistentné výsledky.



Graf 5: Stredná kvadratická odchýlka štatistických údajov pre tri najúspešnejšie metódy.

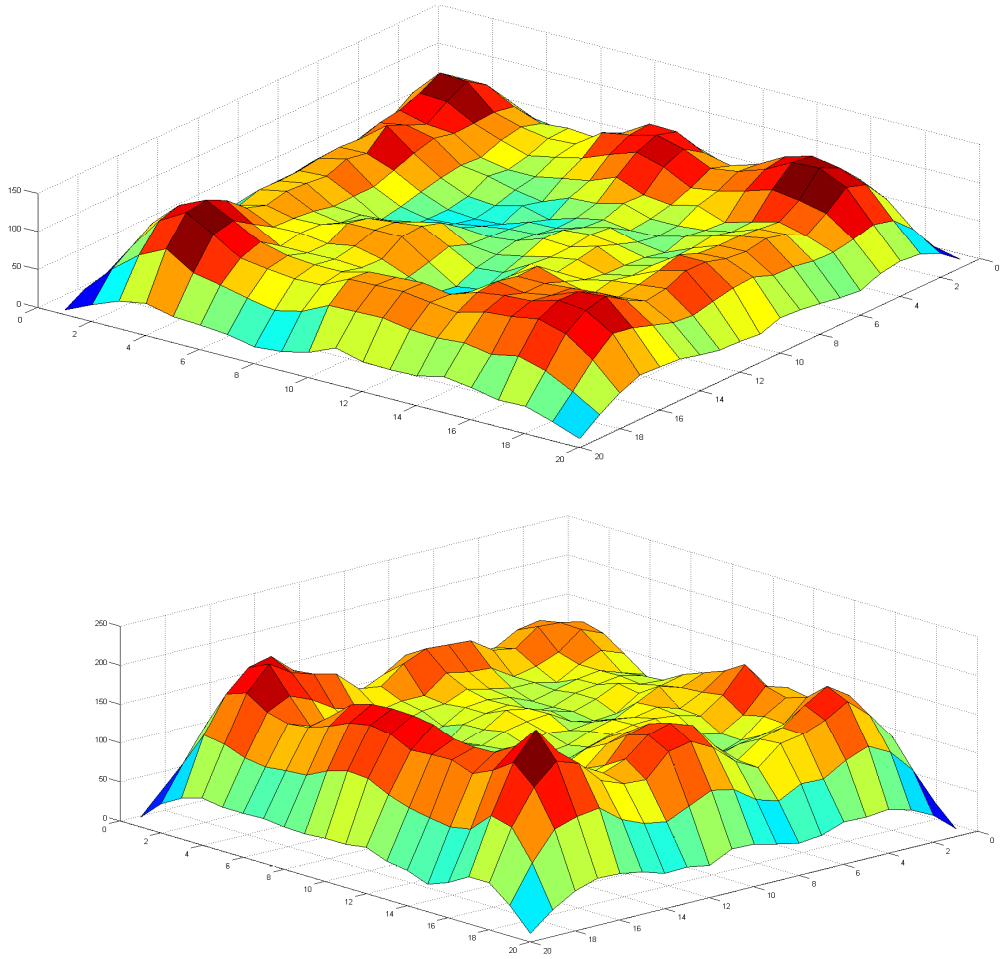
Experimentálne bola vyhodnotená efektivita metódy v závislosti od celkového počtu agentov. Priestor rovnakých rozmerov postupne pokrývali skupiny agentov so zvyšujúcim sa počtom. Celkový počet *k* agentov dokáže pri optimálnom rozmiestení a pohybe pokryť *kq* % celkovej plochy (kde q je percentuálne pokrytie celkovej plochy jedným agentom). V grafe 10 je úspešnosť dosiahnutia tejto optimálnej hodnoty v závislosti od celkového počtu agentov.



Graf 6: Priblíženie optimálnej hodnote pokrytia priestoru v závislosti od počtu agentov.

Pri nižších počtoch agentov bola dosiahnutá približne konštantná efektivita pokrývania priestoru. Od istého počtu agentov (v prípade grafu 6 približne jedenásť) sa táto efektivita postupne znižuje. Pri použitom väčšom dosahu snímačov, by táto krivka začala klesať pri nižšom počte agentov, pri menšom rozsahu zasa pri vyššom počte. Dôvodom klesania je príliš veľká koncentrácia agentov vzhľadom na ich pokrytie, čo spôsobuje prekrývanie oblastí dosahu senzorov jednotlivých agentov. Presný tvar krivky je teda závislí od konkrétnej aplikácie.

Na obrázku č. 11 je znázornená celková rovnomernosť pokrývania priestoru. Na vertikálnej osi je celkový počet prehľadaní konkrétneho miesta v mape. Rovnejší povrch predstavuje rovnomernejšie celkové pokrytie. Isté zvlnenie povrchu je nevyhnutné, dôležité je však to, že nevzniká jeden extrém, ktorý by predstavoval miesto neefektívneho zhlukovania agentov.



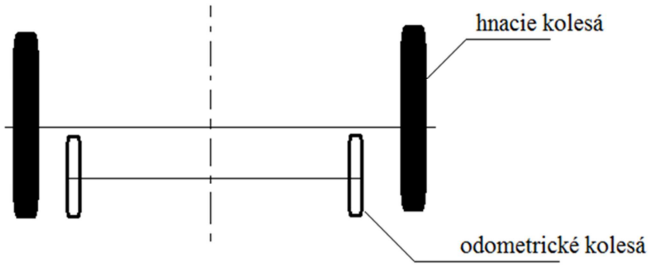
Obrázok 11: Celková rovnomernosť pokrývania priestoru. Výsledok 200 iterácií (horný) a 400 iterácií (spodný) s 10 virtuálnymi agentmi. Charakter povrchu zostáva nezmenený.

4 Implementácia metódy na reálnych robotoch

V nasledujúcej časti je popísaná implementácia navrhovanej metódy na robotoch pohybujúcich sa v reálnom prostredí. Cieľom bolo dokázať jej použiteľnosť na reálnom systéme a overenie konceptu.

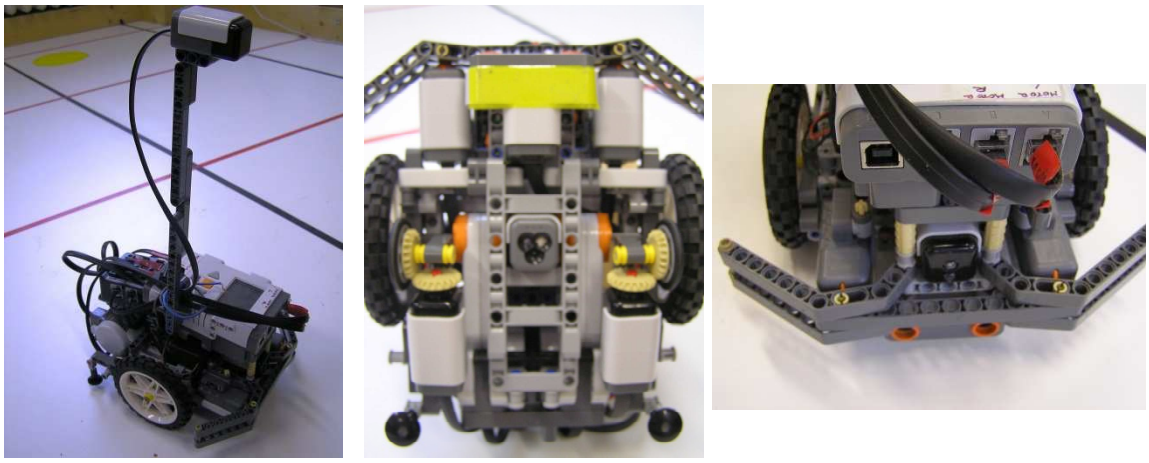
Pracovné prostredie robotov bolo tvorené hladkou bielou rovnou podlahou o rozmeroch 2m x 2,6m; bez terénnych nerovností a elevácií. Na podlahe sa nachádzali farebne odlíšené vyhľadávané značky a značky slúžiace na účel korekcie lokalizácie.Na účel testovania bola použitá robotická platforma LEGO Mindstorm. Ide o modulárnu stavebnicu s pestrým senzorickým a pohonným vybavením, kontrolovaným riadiacou jednotkou, so širokými možnosťami programovania. Riadiaca jednotka *NXT Brick* pozostáva z hlavného 32-bitového procesora Atmel ARM a 8-bitového koprocesora Atmel AVR.

Konštrukcia robota bola navrhnutá ako dvojkolesový robot s diferenciálnym pohonom. Na jednej náprave sú dve nezávisle poháňané kolesá. Priamo pod osou hnacích kolies a rovnobežne s ňou, sa nachádza os, na ktorej sú umiestnené pomocné kolesá, ktoré sú priamo pripojené na senzor uhlového otočenia a snímajú tak skutočný pohyb robota v priestore.



Obrázok 12: Znázornenie nápravy robota a odometrických kolies.

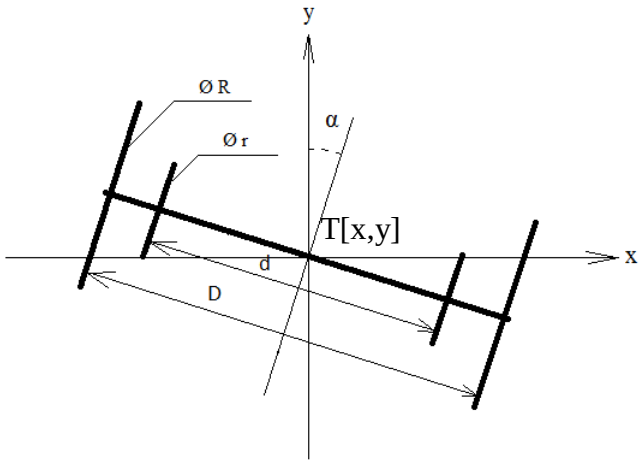
Takýmto spôsobom sa dá zabrániť niektorým bežným chybám pri lokalizácií robota prostredníctvom odometrie. Ak sa napríklad robot dostane do kontaktu s prekážkou, alebo nerovnosťou na inak hladkom teréne (nečistota, spojnica podlažných plôch), môže sa stať, že dôjde k prekĺznutiu hnacích kolies, čo sa v prípade použitia týchto kolies na účely odometrie prejaví ako chyba lokalizácie, ktorá sa postupne bude zväčšovať. Ak sa však použijú pomocné odometrické kolesá, nehrozí že sa dostanú do šmyku.



Obrázok 13: Konštrukcia robota.

V prednej časti robota je umiestnený ultrazvukový senzor a pokrýva priestor pred ním. Deteguje prekážku do vzdialenosti 1-2 m, no pre zvýšenie spoľahlivosti sú robotom akceptované iba prekážky detegované bližšie ako 30 cm. Dotykové snímače sú umiestnené po stranách ultrazvukového senzora a dokážu zaznamenať kontakt s prekážkou. Mechanicky sú prepojené a upravené tak, že dokážu rozoznať tri miesta dotyku. Senzor snímania farby sa nachádza v strede nápravy robota, priamo na osi otáčania a je nasmerovaný nadol. Sníma farbu, ktorá sa nachádza priamo pod robotom. Je používaný pri vyhľadávaní značiek v priestore a pri korekcií chýb odometrie pomocou korekčných čiar rovnomerne rozmiestnených v priestore. Kompas je umiestnený nad robotom, aby nebol ovplyvňovaný zvyšnou elektronikou. Ak robot prostredníctvom ultrazvukového senzora zaznamená prekážku v určitej vzdialenosti, táto vzdialenosť je transformovaná na absolútnu polohu v mape a súradnice tohto miesta sú odoslané aplikácií, ktorá na základe údajov od všetkých robotov vytvára pravdepodobnostný model. Rovnako to platí pre dotykové snímače a senzor snímania farby. Snímanie svojho okolia robot robí nepretržite.

4.1 Lokalizácia



Obrázok 14: Matematický model podvozku.

Obrázok č. 14 znázorňuje nápravu robota. Vnútorné odometrické kolesá sú priamo pripojené na snímač uhlového otočenia. Z neho je načítavaná hodnota celkového uhlového otočenia v intervale od -2147483648 do+ 2147483647 stupňov, čo pri použitom obvode kolesa (96 mm) postačuje na detekciu vzdialenosti v intervale približne +/- 572 km.

Pre uvedenú konštrukciu podvozku bola navrhnutá odometrická metóda (detailne opísaná v dizertačnej práci), založená na prírastkoch prejdenej trajektórie ľavým a pravým odometrickým kolesom za konštantný časový úsek. Pre prírastok x-ovej, resp. y-ovej súradnice určujúcej polohu robota v priestore platí:

$$\Delta x = \frac{s_l + s_r}{2} * sin\left(\frac{\frac{s_l}{d} - \frac{s_r}{d}}{\frac{\pi}{180}}\right) \qquad \Delta y = \frac{s_l + s_r}{2} * cos\left(\frac{\frac{s_l}{d} - \frac{s_r}{d}}{\frac{\pi}{180}}\right) \qquad (16,17)$$

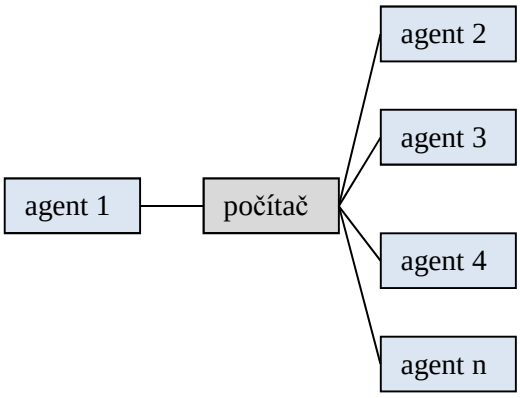
kde vstupné hodnoty sú prejdené dráhy ľavého a pravého kolesa s_l, resp. s_r za určený časový úsek a tie sú vypočítavané z údajov uhlových senzorov. Postupným sčítavaním jednotlivých prírastkov je určovaná aktuálnu poloha a orientácia robota v priestore.

Agenty majú implementovanú nižšiu vrstvu riadenia, ktorá ma za úlohu navigovať agenta z východzieho do cieľového bodu – určeného vyššou vrstvou riadenia – a zabrániť pri

tom vzájomnej kolízií a kolízií s prekážkou. Keďže jadrom práce je návrh a vývoj vyššej formy riadenia, nižšia vrstva riadenia agenta je navrhnutá ako jednoduchá reaktívna riadiaca vrstva bez plánovania a zabránenie kolízii s prekážkou je len reaktívnou reakciu agenta. Ak agent zaznamená bezprostredne pred sebou prekážku, zaznačí si ju do vlastnej mapy a na toto miesto sa nebude snažiť presunúť (keďže agenty vedia o svojich aktuálnych polohách, agent, ktorý zaznamenal, alebo narazil na objekt rozozná, či ide o prekážku v priestore, alebo o iného agenta). Zabezpečí to proces výpočtu feromónového vektora, ktorý nepovolí výber miesta s prekážkou.

4.2 Komunikácia

Riadiaca jednotka NXT je vybavená bluetooth modulom, ktorý umožňuje komunikáciu s ďalšími riadiacimi jednotkami, alebo s počítačom. Ideálnym riešením by bolo použitie broadcasting komunikácie, kedy by každý robot posielal zvyšným robotom svoju aktuálnu polohu. Riadiaca jednotka je však z tohto hľadiska obmedzená, pretože dovoľuje spárovanie s maximálne tromi zvyšnými riadiacimi jednotkami a umožňuje iba typ komunikácie master-slave a nie broadcasting. Preto je nutné broadcasting komunikáciu simulovať. Na tento účel je ako prostredník použitý počítač, ktorý komunikuje s každým agentom. Ak chce agent R1 zaslať informáciu o aktuálnej polohe agentu R2 a R3, zašle túto informáciu počítaču, ktorý ju postupne rozošle ostatným robotom.



Obrázok 15: Broadcasting simulovaný pomocou PC.

Počítač sa žiadnym iným spôsobom nepodieľa na komunikácii, iba číta správy zasielané z riadiacich jednotiek. Keďže vyššie spomenuté obmedzenie v počte spárovaných zariadení počítač nemá[2], môžu byť následne spracované správy rozoslané zvyšným agentom.

Pre správnu činnosť algoritmu je nutné, aby mali agenty informácie o feromónových značkách a o polohách zvyšných agentov. Navrhovaný spôsob komunikácie spolu s mechanizmom ich spracovania však minimalizuje nevyhnutné informácie, ktoré musí agent prijímať iba na údaje o polohách zvyšných agentov a informácie, ktoré musí agent poskytnúť iba na údaj o vlastnej polohe. Všetky agenty neustále vysielajú údaj o ich aktuálnej polohe. To znamená, že každý agent vie neustále aká je aktuálna[3] poloha zvyšných agentov. Všetky agenty používajú rovnakú symbolickú reprezentáciu prostredia, t.j. rastrovú mapu s rovnakým rozlíšením. Vzhľadom na to vedia určiť, na ktorom štvorcovom elemente sa ktorý agent

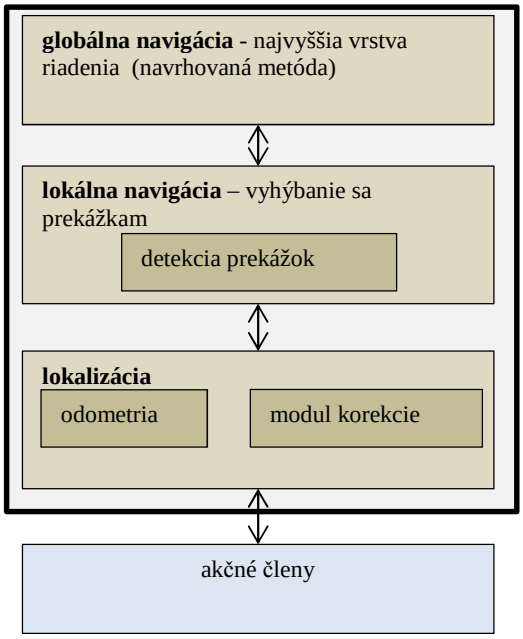
[2] Počet zariadení, ktoré môžu súčasne komunikovať s počítačom cez bluetooth je limitovaný. Súčasne môže prebiehať komunikácia so 7 zariadeniami. Ďalších 248 zariadení však môže byť pripojených v sleep móde.

[3] Vzhľadom na komunikačné a programové oneskorenie môže byť táto informácia stará približne 2 sekundy, čo pri rýchlosti, ktorou sa roboty pohybujú, nespôsobuje žiadnu veľkú nepresnosť.

nachádza a vedia tiež určiť, kedy ktorý agent prekročil hranicu susedných štvorcov. Z tejto informácie si každý agent dokáže odvodiť a postupne upravovať rozmiestnenie feromónových značiek v priestore. V tomto prípade teda nie je použitý mechanizmus stigmergie ako komunikačný nástroj prostredníctvom prostredia. Feromónové značky sú na účely označovania priestoru pre agenta R_n rozmiestňované agentom R_n samotným, sú iba odvodzované z informácií od iných agentov. Toto riešenie znižuje značne komunikačné nároky, pretože odpadá nutnosť zdielania feromónovej mapy. Nie je potrebná ani časová synchronizácia znižovania hodnôt feromónových značiek – tie sú znížené vždy, keď ktorýkoľvek z agentov prekročí hranicu oddeľujúcu susedné (aj diagonálne susedné) štvorcové elementy mapy. Výsledkom je, že každý agent má feromónovú mapu rovnakú ako zvyšné agenty.

4.3 Vyššia vrstva riadenia, riadiaci program robota

Navrhovaná metóda predstavuje najvyššiu vrstvu riadenia robota. Použitý je rovnaký algoritmus ako bol popísaný v časti *2 Implementácia metódy*. Upravené a nastavené boli iba parametre systému s ohľadom na pracovné prostredie robotov, ich rozmery, komunikačné možnosti, rýchlosť pohybu a presnosť senzorov. Keďže algoritmus metódy už bol detailne popísaný, na tomto mieste bude doplnený iba o celkovú schému znázorňujúcu jednotlivé vrstvy chovania.



Obrázok 16: Riadiace vrstvy agenta.

Riadiaci program robota integruje všetky procesy popísané v predchádzajúcich častiach práce, ktorými sú snímanie prekážok, lokalizácia, vyhýbanie sa prekážkam a najvyššia vrstva riadenia, ktorou je predkladaná metóda.

Ako vizualizačný nástroj bola vytvorená aplikácia, ktorá počas činnosti systému zbiera údaje z jednotlivých agentov. Ide o softvérového agenta, ktorý zabezpečuje simulovanie broadcasting komunikácie a vizualizuje informácie o prostredí prijaté od jednotlivých agentov do trojrozmerného modelu prostredia. Medzi tieto dáta patria okrem samotných polôh agentov informácie zo snímačov o prekážkach a farebných značkách v priestore. Na ich základe tento agent vytvára pravdepodobnostný model prostredia. Použitá je rastrová reprezentácia

prostredia, no s vyšším rozlíšením ako majú mobilné agenty. Každý agent poskytuje informáciu o absolútnej polohe detegovanej prekážky, ktorú vizualizačný nástroj transformuje na konkrétny štvorcový element svojej mapy. V prípade, že neskôr iný agent deteguje prekážku na rovnakom mieste, je pravdepodobnosť výskytu prekážky na tomto elemente mapy zvýšená. Takýmto spôsobom sa všetky agenty podieľajú spoločne na tvorbe mapy prostredia.

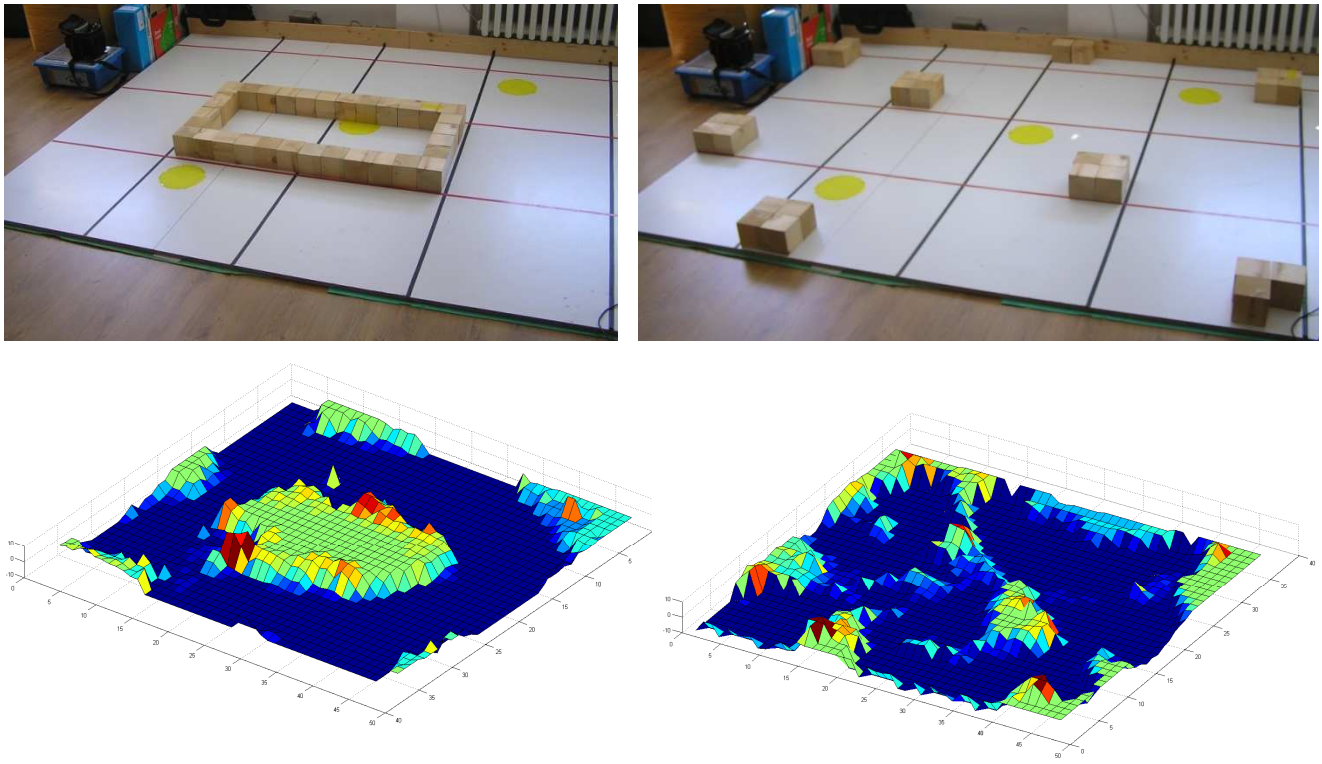
5 Testovanie navrhnutej metódy na robotoch

Účelom testovania bolo preukázanie, že navrhnutá metóda je použiteľná na reálnych robotoch. Multiagentový systém, použitý na tento účel, pozostával z troch mobilných robotov.

Počas testovania metódy bol použitý postupne jeden agent, až tri agenty, ktorých úlohou bolo zmapovanie priestoru a jeho monitorovanie. est preukázal schopnosť viacerých agentov koordinovať sa v priestore, detegovať svoje okolie a zaznamenávať kruhové značky na podlahe. Agenty informácie o prostredí odosielali prostredníctvom bluetooth komunikácie do počítača, kde softvérový agent fúziou týchto dát vytváral v reálnom čase pravdepodobnostnú mapu prostredia. Týmto spôsobom agenty kooperujú na tvorbe ucelenej mapy prostredia. Rovnako to platí aj pre situáciu, kedy agenty majú za úlohu strážiť územie. Tie boli schopné rovnomerne pokrývať definovaný priestor, vzájomne koordinovať a spolupracovať na nepretržitej aktualizácií mapy priestoru.

Testovaná bola aj robustnosť metódy, kedy zadanú úlohu mali plniť tri agenty, no na dvoch z nich bola po krátkom čase simulovaná porucha. Cieľom bolo overenie tvrdenia, že metóda je dostatočne robustná na to, že v kritickej situácii, aj po zlyhaní väčšiny skupiny, jediný robot dokáže pokračovať v činnosti. Agenty so simulovanou poruchou prerušili svoju komunikáciu a zostali stáť na mieste. Keďže agent, ktorý pokračoval v činnosti nemal informácie o polohách týchto agentov, boli ním zaznamenané ako prekážka.

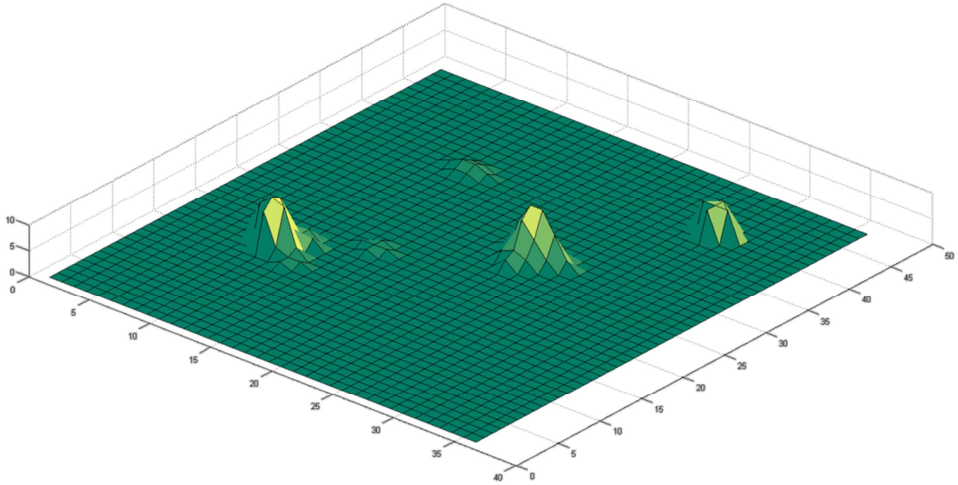
Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené reálne prostredia a im zodpovedajúce vytvorené pravdepodobnostné modely. Na procese tvorby sa zúčastňovali tri agenty.



Obrázok 17: Reálne prostredie a jemu zodpovedajúci vytvorený pravdepodobnostný model.

Na obrázku č. 18 je znázornený pravdepodobnostný model výskytu značiek v priestore. Princíp jeho tvorby zostáva rovnaký ako v prípade tvorby pravdepodobnostného modelu prostredia. Tri najvyššie miesta v grafe predstavujú miesta, kde sa skutočne nachádzali značky, no vidno aj dve menšie zvlnenia, ktoré boli spôsobené chybou snímača

farby. Tento prípad demonštruje účel pravdepodobnostnej tvorby mapy, ktorý odhalí takéto falošné detekcie, či už prekážok, alebo farebných značiek.



Obrázok 18: Pravdepodobnostný model výskytu značiek.

Presnosť vytvorenej mapy prostredia bola závislá od presnosti lokalizácie agentov a od presnosti detekcie prekážok. Presnosť lokalizácie bola zaťažená systematickými a náhodnými chybami. Určité spresnenie bolo dosiahnuté pomocou korekčných mechanizmov popísaných v predchádzajúcej časti, no napriek tomu sa vyskytovali prípady, kedy agenty zaznamenali prekážku na mieste kde nebola, alebo naopak nezaznamenali prekážku vôbec. Výsledná mapa je preto prezentovaná ako pravdepodobnostná, kde pravdepodobnosť výskytu prekážky je zvýšená, ak bola detegovaná viacerými agentmi. Analogicky to platí i pre detekciu značiek na podlahe.

6 Záver

Cieľom práce bol návrh a implementácia biologicky inšpirovanej metódy pre distribuované riadenie skupiny mobilných robotov. Podľa prvého cieľa, bol v teoretickej časti práce vypracovaný prehľad aktuálnych problémov autonómnej robotiky s distribuovaným riadením a prehľad biologicky inšpirovaných metód, v ktorom boli analyzované prednosti a nedostatky jednotlivých prístupov. V práci sú tiež popísané princípy ich fungovania, spôsoby využitia a prípadné modifikácie na iné účely.

Druhým cieľom práce bol návrh a implementácia biologicky inšpirovanej metódy určenej na koordináciu skupiny mobilných agentov. Na základe vypracovanej analýzy bola navrhnutá nová biologicky inšpirovaná metóda, ktorá efektívne využíva a kombinuje vlastnosti iných metód, vytvára nový spôsob priestorovej koordinácie mobilných agentov a zefektívňuje tak proces prehľadávania a pokrývania priestoru. Metóda bola navrhnutá ako súčasť projektu BioMRCS, ktorý je zameraný na biologicky inšpirované metódy pre koordinované riadenie pohybu skupiny mobilných robotov s aplikáciou v rôznych oblastiach reálneho sveta, napr. vyhľadávanie mín, vyhľadávanie v lavínach, stráženie a monitorovanie územia a pod. S ohľadom na to bol definovaný účel metódy tak, aby zabezpečoval koordinované prvotné prehľadanie, zmapovanie priestoru a jeho stráženie. Požadovaný stochastický element v správaní bol dosiahnutý.

Na účely testovania metódy bol vytvorený simulačný nástroj VERA, ktorý umožňuje simulovať pohyb virtuálnych agentov vo virtuálnom priestore na základe definovaných pravidiel. Činnosť robotov v skupine je vizualizovaná v trojrozmernom priestore, pričom užívateľ môže sledovať dôležité vektory určujúce pohyb jednotlivých agentov.

Efektivita metódy bola v prvej fáze vyhodnocovaná prostredníctvom simulačných experimentov v nástroji VERA. Bola porovnaná s ďalšími biologicky inšpirovanými metódami, spomedzi ktorých dosahovala najlepšie výsledky v úspešnosti pokrývania priestoru a jeho rovnomerného prehľadávania. V ďalšej fáze boli určené optimálne nastavenia parametrov pre zvýšenie efektívnosti priebehu týchto činností.

V záverečnej fáze testovania, bola metóda implementovaná a testovaná na robotoch, čím bol splnený posledný cieľ práce. Testovaním sa preukázalo, že metóda je použiteľná na reálnom multiagentovom systéme. Agenty sa samostatne rozhodovali na základe ich vnímania okolitého prostredia a na základe komunikovaných informácii. Dokázali kooperatívne vytvárať pravdepodobnostný model prostredia, ktorý zahŕňal pravdepodobnostný výskyt identifikovaných objektov (značiek). Vizualizácia a tvorba pravdepodobnostného modelu prostredia prebiehala v nástroji VERA.

Medzi jednotlivými druhmi správania je možné prechádzať zmenou dvoch parametrov, čo robí metódu flexibilnou. Algoritmus nie je nijakým spôsobom obmedzený z pohľadu počtu agentov zhora ani zdola. Jediný agent dokáže sám prehľadávať prostredie a vytvárať jeho model. Algoritmus môže byť použitý v rôznych typoch prostredí, vo vnútornom aj vo vonkajšom. Dôležitou vlastnosťou je robustnosť, pretože, ako bolo overené pri testovaní metódy na reálnych agentoch, v prípade zlyhania väčšiny agentov, jediný agent dokáže pokračovať v činnosti, dokončiť úlohu prehľadávania, alebo pokračovať v rovnomernom monitorovaní priestoru. Metóda nie je obmedzená na konkrétny typ robotickej platformy. Môže byť použitá na pozemných robotoch (pozemné všesmerové roboty, roboty s diferenciálnym podvozkom, ackermanovým podvozkom) a lietajúcich robotoch (vrtuľníky, viacrotorové vrtuľníky, lietadlá), prípadne na iných, menej známych platformách (napr. plávajúce roboty). Ďalšou vlastnosťou ovplyvňujúcou efektívnosť je

možnosť paralelného spracovania. Riadenie systému je distribuované, neexistuje žiaden centrálny riadiaci člen. Každý agent sa rozhoduje individuálne na základe vlastných informácii o prostredí a okolitých agentoch. Súhrn hlavných vlastností navrhnutej metódy je nasledovný:

- flexibilita,
- škálovateľnosť,
- adaptívnosť,
- robustnosť,
- platformová nezávislosť,
- paralelizácia,

čím sú splnené všetky požiadavky zadania práce. Ďalším prínosom práce je aj návrh a implementácia nástroja VERA, ktorý umožňuje simulovať rôzne multiagentové systémy pozostávajúce z jednotlivcov, ktorých správanie je zadefinované pomocou vhodných pravidiel. Rovnakým spôsobom môže byť použitý s inými typmi robotickej platformy a zapojiť sa do skupiny ako softvérový agent zodpovedný za tvorbu pravdepodobnostného modelu prostredia.

Potenciálne využitie navrhnutej metódy je v rôznych oblastiach reálneho sveta, napríklad stráženie a monitorovanie územia, mapovanie nebezpečného prostredia, v prípade použitia lietajúcich platforiem - tvorba kartografických máp, vyhľadávanie zemných mín a podobne. Zjednodušený variant tejto úlohy bol simulovaný detekciou farebných značiek na podlahe.

Hlavným cieľom dizertačnej práce, ktorým bol návrh a implementácia biologicky inšpirovanej metódy určenej na priestorovú koordináciu pohybu mobilných robotických zariadení bol dosiahnutý. Decentralizovaný systém riadenia dosahuje účelné a efektívne správania skupiny autonómnych mobilných agentov pri plnení globálneho cieľa.

Použitá literatúra

[1] Ch. Darwin: „*On the origin of spieces*“, Vydavateľ: John Murray, ISBN N/A, 1859

[2] E. M. Martín: „*Swarm Robotics, From Biology to Robotics*“, InTech 2010, ISBN 978-953-307-075-9, 2010

[3] Ch. Blum, D. Merkle: *„Swarm Intelligence: Introduction and Applications, Natural Computing Series“*, Springer 2008, ISBN 3540740899, 2008

[4] Y. Mohan, S. G. Ponnambalam: *"An extensive review of research in swarm robotics"* World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC 2009, pp.140,145, 9-11 Dec. 2009, ISBN 978-1-4244-5053-4, 2009

[5] V. Mařík, O. Štepánková, J. Lažanský, et al.: *„Umělá inteligence 2“*, Academia Praha, prvé vydanie, ISBN 80-200-0504-8, 1997

[6] C. W. Reynolds: *„FLocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model, Computer graphics“*, vol 21, no. 4, 1987

[7] M. Dorigo, T. Stutzle: *„Ant Colony Optimization“*, MIT Press. ISBN 0-262-04219-3, 2004

[8] J.M. Hereford, M.A. Siebold: *„Bio-Inspired Search Strategies for Robot Swarms“* Swarm Robotics, from Biology to Robotics,. E.M. Martin, Editor, Intech (http://www.intechopen.com/), 2010

[9] M. S. Couceiro, R. P. Rocha: *„A Novel Multi-Robot Exploration Approach based on Particle Swarm Optimization Algorithms“* Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics Kyoto, Japan, 2011

[10] J. Hereford, M. Siebold: *„Multi-robot search using a physiclly-embedded Particle Swarm Optimization“*, International Journal of Computational Intelligence Research, vol.4, no.2, pp.197–209, ISSN 0973-1873, 2008

[11] M. Masár, J. Zelenka: *„Modification of PSO algorithm for the purpose of space exploration“*. INES 2012: IEEE 16th Internetional Conference on Intelligent Engineering Systems. - Piscataway : IEEE Operations Center, 2012, pp. 51-54. ISBN 978-1-4673-2692-6, 2012

[12] M. Masár, I. Budinská: *„Robot coordination based on biologically inspired methods“*. Advanced Materials Research, vol. 664, pp. 891-896. ISSN 1022-6680, 2013

Publikácie autora

Typ ADEA: Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch impaktovaných:

MASÁR, Marek - BUDINSKÁ, Ivana. Robot coordination based on biologically inspired methods. In Advanced Materials Research, 2013, vol. 664, pp. 891-896. ISSN 1022-6680. [SCOPUS]

Typ ADFB: Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch neimpaktovaných

BUDINSKÁ, Ivana - MASÁR, Marek. Koordinácia skupiny mobilných robotov s využitím biologicky inšpirovaných metód. In ATP Journal, 2012, no. 12, p. 26-28. ISSN 1336-233X.

Typ AEC: Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch (aj konferenčných), monografiách

BUDINSKÁ, Ivana - ZELENKA, Ján - MASÁR, Marek. Biologically inspired methods for coordinated control of mobile robots. In Girotechnologiï, navigacija, keruvannja ruchom ta konstrujuvannja aviacijno-kosmičnoï techniki : zbirnik dopovidej. Časť 4. - Kijev : Politechnika, 2011.

HAVLÍK, Štefan - BUDINSKÁ, Ivana - MASÁR, Marek. Multi-robot coordination in performing hazardous operations. In RAAD 2012 : 21th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. - Naples : Edizioni Scientifiche e Artistiche, 2012, p. 169-176. ISBN 978-88-95430-45-4.

MASÁR, Marek - ZELENKA, Ján. Modification of PSO algorithm for the purpose of space exploration. In SAMI 2012 : proceedings. - Piscataway : IEEE, 2012, p. 223-226. ISBN 978-1-4577-0195-5. [WOS, SCOPUS]

MASÁR, Marek - ZELENKA, Ján. Modification of PSO algorithm for the purpose of space exploration. In INES 2012 : IEEE 16th Internetional Conference on Intelligent Engineering Systems 2012. - Piscataway : IEEE Operations Center, 2012, p. 51-54. ISBN 978-1-4673-2692-6.Typ: **[**SCOPUS]

MASÁR, Marek. A biologically inspired swarm robot coordination algorithm for exploration and surveillance. In INES 2013 : IEEE 17th Internetional Conference on Intelligent Engineering Systems 2013, (akceptované) [SCOPUS]

PAJOROVÁ, Eva - MASÁR, Marek. Cooperative mobile agents for swarm behavior simulation, Konferencia CDVE 2013, (akceptované) [WOS, SCOPUS]

Typ AED: Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch (aj konferenčných), monografiách

MASÁR, Marek - ZELENKA, Ján. Modification of PSO algorithm for the purpose of space exploration. In Kybernetika a informatika ´12. - Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2012, 4 p. ISBN 978-80-227-3642-8.

MASÁR, Marek. Multiple robots in demining process. In ELITECH´11 : 13th Conference of Doctoral Students. - Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2011, session 5, 4 p. ISBN 978-80-227-3500-1.