

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# PLÁNOVÁNÍ CESTY ROBOTY POMOCÍ MRAVENČÍCH SYSTÉMŮ

ROBOT PATH PLANNING BY MEANS OF ANT SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VÁCLAV SEDLÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**RNDr. JIŘÍ DVOŘÁK, CSc.**

BRNO 2009



## **ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

(na místo tohoto listu vložte originál a nebo kopii zadání Vaší práce)



## **LICENČNÍ SMLOUVA**

(na místo tohoto listu vložte vyplněný a podepsaný list formuláře licenčního ujednání)



## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá plánováním cesty robota pomocí mravenčích systémů. V teoretické části je úvod do problematiky plánování cesty mobilních robotů a přiblížení mravenčích systémů coby nástroje pro optimalizaci a plánování cesty. Praktická část práce se zabývá návrhem a programovou implementací mravenčích systémů pro plánování cesty robota v prostředí Borland Delphi 7.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with robot path planning by means of ant systems. The theoretical part contains an introduction to the path planning of mobile robots and an introduction to ant systems as optimization and path planning tool. The practical part deals with design and program implementation of path planning by ant systems in Borland Delphi 7 environment.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mravenčí systémy, plánování cesty, mobilní robot, optimalizace.

## **KEYWORDS**

Ant systems, path planning, mobile robot, optimization.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval RNDr. Jiřímu Dvořákovi za cenné podněty a rady k této práci.



## Obsah:

	<b>Zadání závěrečné práce.....</b>	<b>3</b>
	<b>Licenční smlouva.....</b>	<b>5</b>
	<b>Abstrakt.....</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Plánování cesty robota.....</b>	<b>13</b>
2.1	Reprezentace prostředí.....	13
2.2	Překážky.....	14
2.3	Pohyb robota.....	14
2.4	Metody plánování cesty.....	15
2.4.1	Metoda rozkladu do buněk.....	15
2.4.2	Metody mapy cest.....	16
2.4.3	Metody potenciálových polí.....	17
<b>3</b>	<b>Mravenčí algoritmy.....</b>	<b>19</b>
3.1	Biologické pozadí.....	19
3.1.1	Chování reálných mravenců.....	19
3.1.2	Experiment s dvojitým mostem.....	20
3.1.3	Experiment s překážkou.....	21
3.2	Umělí mravenci.....	21
3.2.1	Pohyb umělých mravenců.....	21
3.3	Plánování cesty pomocí mravenčího systému.....	22
3.3.1	Podmínka ukončení běhu algoritmu.....	23
3.4	Aplikace mravenčích algoritmů.....	23
<b>4</b>	<b>Návrh algoritmu pro plánování cesty robota.....</b>	<b>25</b>
4.1	Model prostředí.....	25
4.1.1	Robot.....	25
4.1.2	Vytvoření grafu.....	25
4.2	Mravenčí kolonie.....	26
4.2.1	Pohyb mravenců.....	26
4.2.2	Reset mravence.....	27
4.2.3	Feromonová stopa.....	27
4.3	Návrh algoritmu.....	28
4.3.1	Podmínka ukončení běhu algoritmu.....	28
4.3.2	Algoritmus.....	28
4.4	Srovnávací algoritmus.....	29
4.4.1	Model prostředí.....	29
4.4.2	Náhodné hledání.....	29
<b>5</b>	<b>Popis programu.....</b>	<b>31</b>
5.1	Ovládání programu.....	31
5.2	Členění a běh programu.....	33
<b>6</b>	<b>Výsledky experimentů.....</b>	<b>35</b>
6.1	Ověření funkčnosti programu.....	35
6.2	Srovnání strategií ukládání feromonové stopy.....	35
6.3	Srovnání algoritmů hledání cesty.....	38
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>43</b>



# 1 ÚVOD

Během posledních let došlo v plánování cesty robotů k velkému pokroku. S rozvojem informačních technologií došlo i k rozvoji robotiky, od možnosti plánování pohybu pouze ve zcela známém prostředí až po současnou možnost navigace mobilního robota ve zcela neznámém měnícím se prostředí. V současnosti dokážou roboty řešit problémy v mnoha složitých prostředích. Plánování cesty se uplatňuje v mnoha aplikacích, jako např. automatizace, počítačová animace, chirurgie atd. .

Existují různé metody plánování cesty robota. Většina metod obsahuje dvě části. První z těchto částí je tzv. předzpracování, kdy se pomocí grafu nebo funkce popisuje pracovní prostor robota. Druhou částí je tzv. dotazovací část, kdy již dochází k hledání cesty robota mezi startovním a cílovým bodem. Důležité pro plánování cesty robota je, aby robot splnil zadaný úkol v nejkratším možném čase s co nejmenšími náklady, eventuálně aby byly splněny další podmínky optimality.

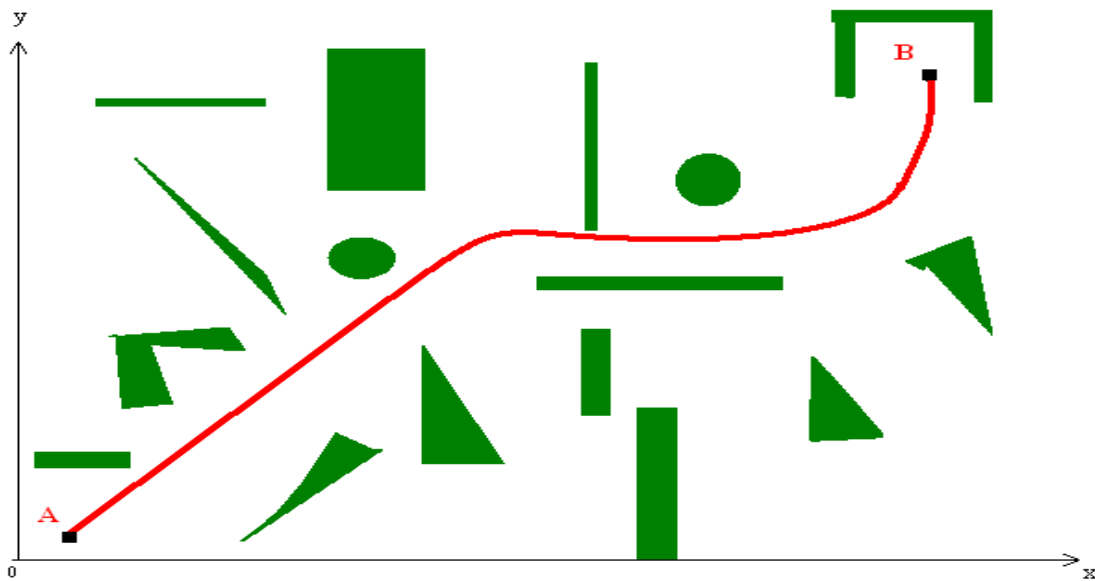
Mravenčí systémy jsou pravděpodobnostní algoritmy inspirované chováním reálných mravenců. Mravenčí algoritmy představují kolonie jednoduchých umělých mravenců, kteří spolupracují na řešení daného problému a vzájemně komunikují pouze přes změnu prostředí ve kterém se pohybují. Tyto algoritmy rojové inteligence jsou silným nástrojem pro řešení složitých optimalizačních úloh. Oblast použití těchto mravenčích algoritmů je široká a uplatnění našly i v problematice plánování cesty robota.

Cílem mé práce je popsat problematiku plánování cesty mobilního robota a principy mravenčích systémů, a na základě těchto systémů navrhnout a implementovat metodu plánování cesty robota a provést ověřovací a srovnávací experimenty.

Pro plánování cesty robota využiji mravenčí systémy, použitý algoritmus bude vycházet z algoritmů popsaných v [1]–[4]. Zaměřím se na globální plánování v diskrétním dvou-rozměrném prostředí reprezentovaném neorientovaným grafem. Tato reprezentace umožňuje s jistým omezením modelovat i složité reálné prostředí. Navržený algoritmus musí být schopen nalézt optimální řešení i v tomto komplikovaném prostředí. Aplikací některých specifických operátorů se pokusím zlepšit kvalitu hledání cesty tak, aby hledání bylo rychlejší a cesta byla nejkratší.







Obr. 2 Spojité prostředí.

Spojitý model prostředí je kontinuální prostor, který je podobný reálnému prostředí a není rozdělen na buňky jako diskrétní model prostředí. Směr pohybu robota v tomto prostředí není omezen rozkladem na síť buněk jako v případě diskrétního modelu prostředí. Spojitý model také umožňuje přesnější zadávání překážek.

## 2.2 Překážky

Překážky představují různé objekty reálného prostředí, které omezují směr nebo způsob pohybu robota. Zobrazení překážek závisí na zvoleném modelu prostředí. V diskrétním modelu je překážka reprezentovaná jednou nebo více buňkami. Ve spojitém modelu mohou být polygonální překážky reprezentovány vrcholy a hranami, nepolygonální překážky například pomocí křivek.

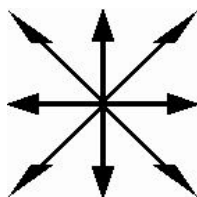
Překážky lze dělit na statické a dynamické. Statické nemění s časem svoji polohu či velikost, naopak dynamické překážky mohou s časem měnit svoji polohu nebo tvar. Pro hledání vhodné cesty v prostředí s dynamickými překážkami je vhodné použít lokální plánování.

Překážky lze také dělit z hlediska omezení pohybu a to na prostupné a neprostupné. Prostupné může robot překonat změnou způsobu pohybu. Neprostupné překážky může robot pouze obejít.

## 2.3 Pohyb robota

Podle omezení pohybu robota rozlišujeme holonomní a neholonomní plánování. Holonomní robot není nijak omezen v pohybu. Neholonomní je omezen v pohybu z hlediska času a prostoru.

Pohyb robota je omezen překážkami a způsobem reprezentace prostředí. Počet možných směrů pohybu se odvíjí od počtu rozměrů prostoru a také od spojitě nebo diskrétní reprezentace prostředí. Ve spojitém prostředí existuje nekonečně mnoho směrů pohybu. V diskrétním prostředí se počet možných směrů pohybu odvíjí od struktury prostředí, často bývá povoleno jen 8 směrů pohybu, jak je naznačeno na obr. 3. Robot se poté pohybuje jen ve směrech, kde nehrozí kolize s překážkou. Rychlost pohybu robota může být konstantní nebo proměnná.



Obr. 3 Možné směry pohybu ve 2D diskrétním prostředí členěném do čtvercových buněk.

## 2.4 Metody plánování cesty

Existuje množství metod pro plánování cesty robota mezi body dvěma body. Tyto metody vždy obsahují dvě části. První je tzv. předzpracování, kdy se popisuje pracovní prostor pomocí grafu či funkce. Dle [5] poté následuje tzv. dotazovací část, kdy již probíhá hledání cesty mezi počátečním a koncovým bodem. Obecně platí, že robot hledající cestu daným prostředím se do cílového bodu může dostat za splnění různých podmínek. Základní podmínkou je nalezení nejkratší cesty v nejkratším možném čase bez kontaktu s překážkami. Odkazy na podrobnější informace o dotazovací části lze nalézt v literatuře [10], [11].

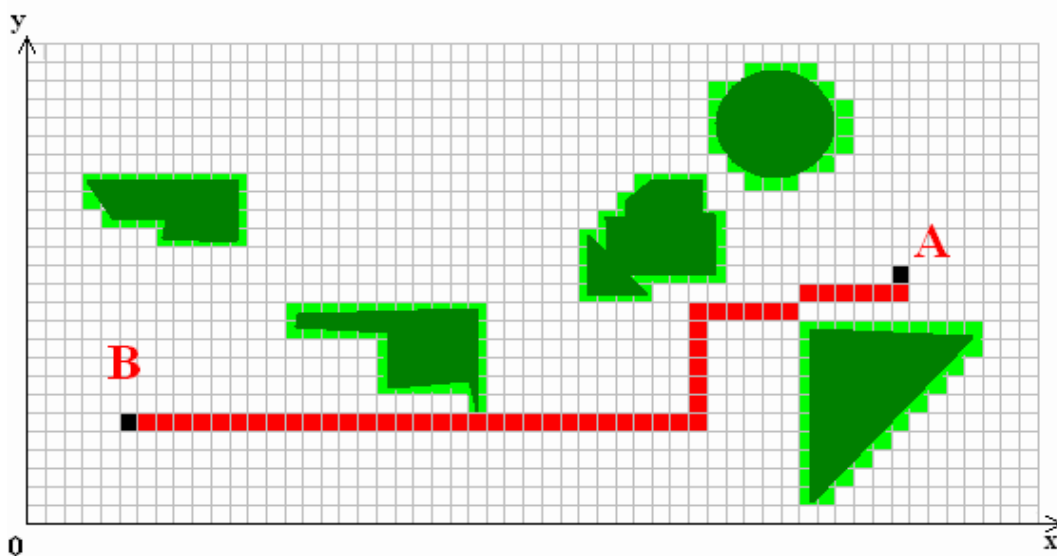
Vzhledem k velkému množství metod plánování cesty a jejich různých modifikací uvádím jen ty nejzákladnější metody předzpracování.

### 2.4.1 Metoda rozkladu do buněk

Princip této metody spočívá v rozkladu prostředí do buněk. Pro každou z buněk pracovního prostoru se určí, zda obsahuje volný prostor nebo překážku. Na základě těchto informací je vytvořen graf, kde vrcholy grafu představují buňky neobsahující překážku a hrany jsou spojnice vrcholů představující sousední buňky. Metodu rozkladu do buněk lze použít jako exaktní nebo aproximativní. Po vytvoření grafu se v dotazovací části aplikuje některý z algoritmů pro hledání cesty grafem.

#### Aproximativní rozklad do buněk

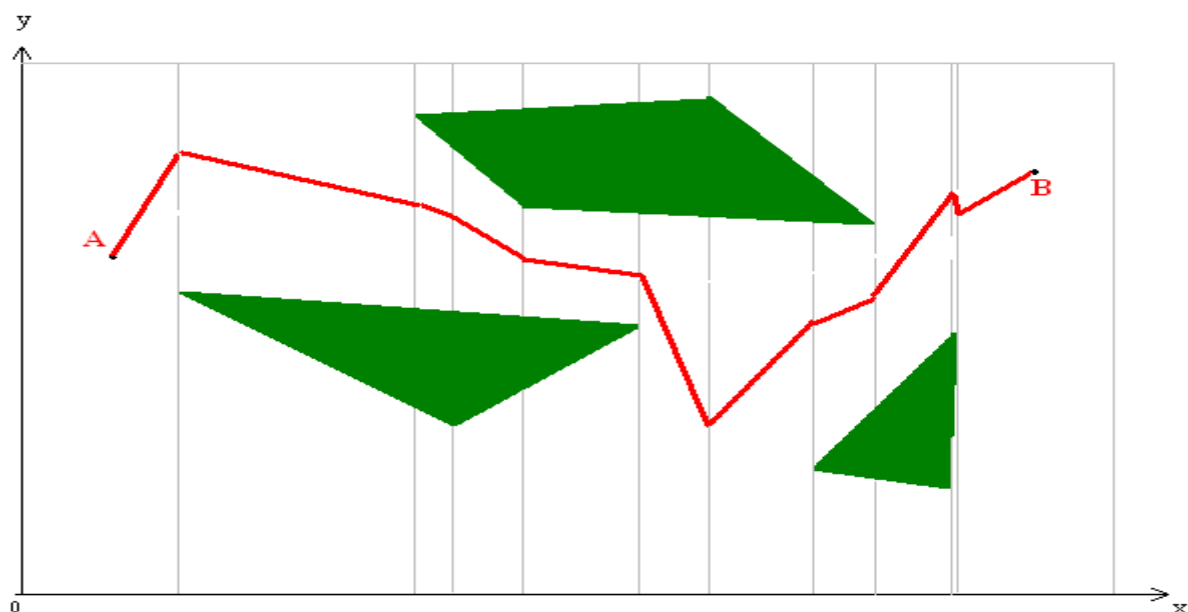
Aproximativní metoda rozkládá celé prostředí do buněk stejného tvaru. Tím se daný prostor převede na diskrétní tvar. Přesnost se odvíjí od velikosti buněk, protože i malá část překážky v buňce označí buňku jako překážku. S menší velikostí buňky roste tedy přesnost, ale také roste výpočetní náročnost.



Obr. 4 Aproximativní rozklad prostředí do buněk.

#### Exaktní rozklad do buněk

Exaktní metoda rozkládá prostředí do nepřekrývajících se buněk. Kvůli usnadnění výpočtu hranic a stanovení přechodů mezi buňkami se volí jednoduchý tvar těchto buněk, nejčastěji trojúhelníky nebo lichoběžníky. Ukázka rozkladu prostředí do lichoběžníkových buněk je na obr. 5. Trasa robota se skládá z počátečního a cílového bodu a bodů přechodu, které robot využívá k bezpečnému pohybu mezi překážkami v modelu prostředí.



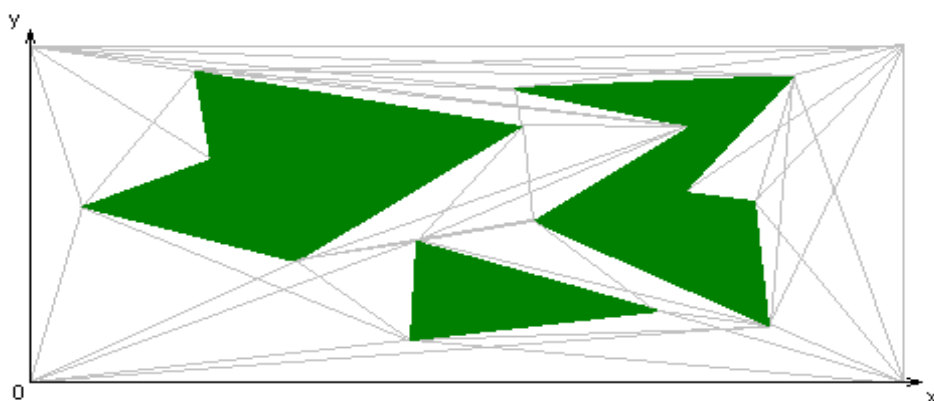
Obr. 5 Exaktní rozklad do lichoběžníkůvých buněk.

### 2.4.2 Metody mapy cest

Tyto metody vytvářejí mapu cest, která má podobu grafu reprezentujícího volný prostor. Hrany grafu tvoří cesty, po kterých se může robot pohybovat. Pro hledání cesty se poté využije některý z algoritmů hledání cesty grafem.

#### Graf viditelnosti

Dle [11] představuje graf viditelnosti popis volného pracovního prostoru robota, kde vrcholy grafu jsou startovní a cílový bod robota a vrcholy všech překážek v daném prostoru. Hrany grafu poté tvoří spojnice vrcholů, které neprotínají žádnou z překážek. Omezením grafu viditelnosti je nutnost zadávání polygonálních překážek a proto kružnice, elipsy aj. je nutné nahradit polygony.



Obr. 6 Graf viditelnosti [5].

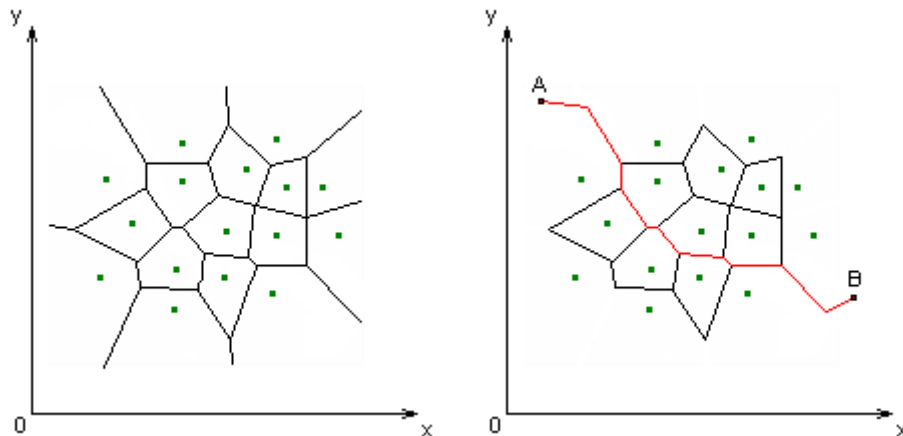
#### Voronoiův diagram

Jak uvádí [5] a [11], Voronoiův diagram je geometrická struktura v rovině tvořená body o stejné vzdálenosti od jedné nebo více překážek. Body společně tvoří hrany diagramu, po kterých se



robot může pohybovat bez rizika kolize s překážkou. Z diagramu je vytvořen graf, jehož vrcholy jsou body o stejné vzdálenosti od třech nebo více překážek a hrany jsou úsečky, tvořené body o stejné vzdálenosti od dvou překážek. Do grafu je třeba zahrnout první a poslední úsek cesty, které vzniknou napojením startu a cíle na nejbližší hrany Voronoiova diagramu.

Řešením je nalezení nejkratší cesty grafem. Na obr. 7 je ukázka Voronoiova diagramu ve zjednodušeném modelu prostředí tvořeném bodovými překážkami.



Obr. 7 Voronoiova diagram (vlevo) a graf s vyznačenou cestou z něj vytvořený (vpravo) [5].

### Pravděpodobnostní metody

Algoritmus pravděpodobnostních metod pracuje ve dvou krocích. V prvním kroku se popisuje volný pracovní prostor grafem. Graf se vytváří tak, že se náhodně zkouší pozice v pracovním prostoru a pokud zvolená pozice neleží v žádné z překážek je bod přidán jako vrchol grafu. Algoritmus poté zkouší propojit nový vrchol s existujícími vrcholy a pokud spojnice neprotíná žádnou z překážek, je přidána jako hrana grafu. Poté, co je pracovní prostor dostatečně popsán, se přejde ke druhému kroku. V této části je k vrcholům přidán startovní a cílový bod a opět se propojí možnými cestami s ostatními vrcholy.

Pro nalezení cesty takto popsáním prostředím stačí použít některý z algoritmů pro hledání cesty grafem.

#### 2.4.3 Metody potenciálových polí

Práce [10] uvádí, že metody potenciálových polí popisují pracovní prostor potenciálovou funkcí  $E(x,y)$ . Startovní bod robota má vyšší potenciál než cílový bod. Překážky mají vyšší potenciál než volný pracovní prostor. Robot, který hledá cestu prostorem popsáním potenciálovou funkcí, se pohybuje ve směru největšího záporného gradientu potenciálové funkce.



Obr. 8 Potenciálové pole.



### 3 MRAVENČÍ ALGORITMY

Mravenčí algoritmy (v literatuře také uváděné jako ACO, ant colony optimization- optimalizace pomocí mravenčích kolonií) představují pravděpodobnostní algoritmy rojové inteligence inspirované chováním reálných mravenců. Původně byly tyto algoritmy, inspirované chováním reálných mravenců při hledání zdrojů potravy, použity pro hledání cesty grafem a v současnosti se mravenčí algoritmy používají v nejrůznějších aplikacích, viz podkapitola 3.4 .

Jak uvádí [7] a [4], hlavní myšlenkou mravenčích algoritmů je fakt, že principy samoorganizace, které umožňují vysoce koordinované chování reálných mravenců, mohou být použity pro koordinaci populací umělých jedinců, kteří budou vzájemně spolupracovat na řešení výpočetních problémů. Různé aspekty mravenčího chování jsou přitom inspirací pro různé druhy mravenčích algoritmů. Mezi tyto aspekty můžeme zařadit například hledání potravy, stavba mraveniště, rozdělení prací nebo spolupráce při přepravě věcí.

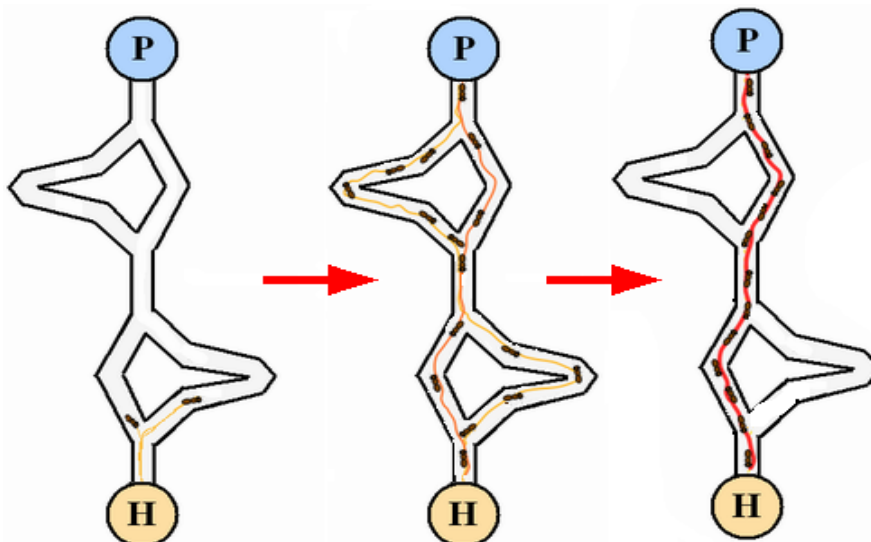
#### 3.1 Biologické pozadí

Hlavní inspirací pro mravenčí algoritmy představuje chování mravenčích kolonií při hledání potravy. Mravenci vykazují schopnost nalézt nejkratší cestu mezi mraveništěm a zdrojem potravy a to i přesto, že jsou téměř slepí. Této schopnosti mravenci dosahují díky způsobu komunikace mezi členy kolonií. Mravenci mezi sebou komunikují nepřímou, změnou prostředí ve kterém se pohybují. Tento nepřímý způsob se, zejm. v anglické literatuře, označuje jako „stigmergy“. Změna prostředí je realizována ukládáním feromonových stop, na které reagují ostatní členové mravenčích kolonií. Tento nepřímý způsob komunikace je dle [7] nástrojem k samoorganizaci mravenčích kolonií. Důležitým prvkem ve vzájemné komunikaci mravenců je také průběžné odpařování feromonových stop, protože způsobuje částečné zapominání a může zamezit konvergenci řešení.

##### 3.1.1 Chování reálných mravenců

Bylo dokázáno, že chování některých mravenčích druhů je pravděpodobnostní, tzn. že mravec, který se má rozhodnout kudy pokračovat v cestě, si pravděpodobněji vybere směr, ve kterém detekuje větší množství komunikační látky–feromonu. Také bylo prokázáno, že v mravenčích koloniích se uplatňuje pozitivní zpětná vazba.

Pro vysvětlení pravděpodobnostního pohybu a pozitivní zpětné vazby poslouží obr. 9 .



Obr. 9 Chování mravenčích kolonií, výběr nejkratší cesty [9].

Na obr. 9 je naznačen zdroj potravy (P) a hnízdo (H). Nalezení nejkratší cesty mezi těmito dvěma body lze popsat ve 4 krocích.

1. Mravenci hledají cestu z hnízda (H) ke zdroji potravy (P). Pokud mravenec najde zdroj potravy (P), začne hledat cestu zpět do hnízda (H).
2. Pokud mravenec dorazí do bodu, kde se cesta rozděljuje do dvou větví rozhoduje se s pravděpodobnostní  $P_{(S)}(t)$  pro kratší větev a  $P_{(L)}(t)$  pro delší větev.

$$P_{(S)}(t) = \frac{(S(t)+k)^h}{(S(t)+k)^h + (L(t)+k)^h} \quad (1)$$

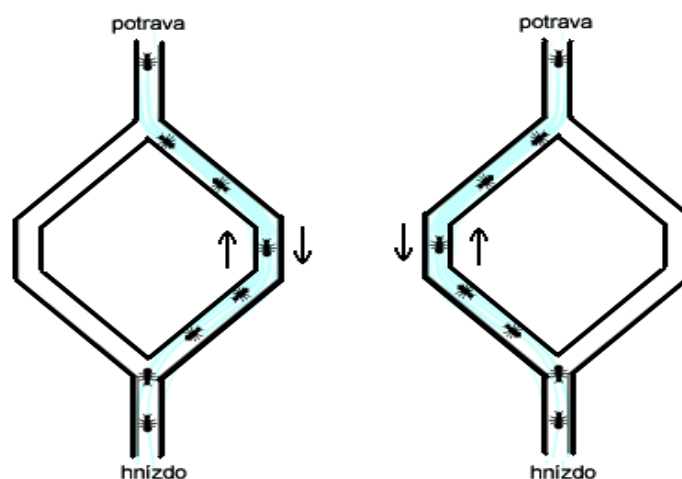
kde  $S(t)$  je intenzita feromonu na kratší větvi,  $L(t)$  je intenzita feromonu na delší větvi,  $h$  a  $k$  jsou konstanty. Dle [8] odpovídají experimentům na živých mravencích hodnoty  $k=20$  a  $h=2$ . Vzorec pro výpočet pravděpodobnosti volby delší větve  $P_{(L)}(t)$  je obdobný.

3. Na počátku není na žádné z možných cest feromonová stopa a mravencům se tedy všechny cesty jeví stejné a proto volí cesty náhodně.
4. Z obr. 9 vyplývá, že existují celkem 4 možné cesty mezi hnízdem a zdrojem potravy. Pokud na počátku mravenci nezvolí nejkratší možnou cestu, tak dorazí ke zdroji potravy později než ti mravenci, kteří zvolili nejkratší cestu. Intenzita feromonu na kratší cestě již však mezitím zesílila příspěvkem vracejících se jedinců a při dalším hledání cesty proto bude kratší cesta zvýhodněna. Tuto zvýhodněnou cestu bude postupně využívat více mravenců až nakonec zcela převládne, právě tento mechanismus je již zmiňovanou pozitivní zpětnou vazbou.

### 3.1.2 Experiment s dvojitým mostem

V případě, že mezi zdrojem potravy a hnízdem existují dvě stejně dlouhé cesty, dojde po určité době k ustálení pohybu mravenců pouze po jedné z nich, jak naznačuje obr. 10.

Důvod takového chování je naznačen v podkapitole 3.1.1, na počátku není na žádné z možných cest feromonová stopa a mravencům se tedy všechny cesty jeví stejné a proto volí cesty náhodně. Pokud se na některou z cest vydá více mravenců, dojde k uložení většího množství feromonu a tato cesta bude mravenci upřednostňována. Pozitivní zpětná vazba pak zajistí, že všichni mravenci začnou používat jen jednu z cest jak naznačuje obr. 10.



Obr. 10 Experiment s dvojitým mostem.

### 3.1.3 Experiment s překážkou

Kromě výše zmíněné schopnosti nalézt nejkratší cestu ke zdroji potravy mají mravenci také schopnost snadno se přizpůsobit změnám prostředí. Například dokážou nalézt nejkratší cestu i přesto, že původní cesta není již více dostupná kvůli nové překážce. Když se na cestě objeví překážka, ti mravenci, kteří jsou těsně u ní, nemohou pokračovat dál po feromonové stopě, ale musí nalézt novou cestu. Nalezení nové nejkratší cesty je obdobné jako v podkapitolách 3.1.1 a 3.1.2.

## 3.2 Umělí mravenci

Výše zmíněné experimenty dokazují, že mravenčí kolonie mají optimalizační schopnosti. Použitím pravděpodobnostních pravidel na základě lokálních informací dokážou mravenci nalézt nejkratší cestu mezi dvěma body.

Mravenčí algoritmy jsou založeny na koloniích umělých mravenců, jednoduchých agentů, kteří vzájemně komunikují přes umělé feromonové stopy. Mezi těmito koloniemi umělých a reálných mravenců je množství podobností. Jedinci v obou typech kolonií spolupracují, aby dosáhli jistého cíle. Schopnosti obou typů kolonií jako celku vysoce převyšují schopnosti jednotlivých členů těchto kolonií.

Umělí mravenci vynikají stejnými schopnosti jako jejich reálné předlohy, ovšem v jistých ohledech se od reálných mravenců liší. Dle [4] se jedná zejména o následující odlišnosti:

- Umělí mravenci se pohybují v diskretním světě, pohybují se přes konečnou množinu bodů v diskretním čase.
- Umělí mravenci mají vnitřní paměť, která zaznamenává provedené akce.
- Množství umělého feromonu, který mravenci zanechávají může být např. funkcí kvality nalezeného řešení, funkcí délky cesty, konstantní atd. .
- Mechanismus odpařování umělého feromonu zajišťuje, že algoritmus neuvízne v lokálním optimu.

### 3.2.1 Pohyb umělých mravenců

Umělí mravenci mají stejně jako jejich reálné předlohy pravděpodobnostní chování, tedy čím vyšší hodnotu feromonu detekují na cestě, tím vyšší je pravděpodobnost, že se touto cestou vydají. Původní rovnici (1) je pro použití v koloniích umělých mravenců nutno modifikovat. Modifikovaná rovnice pravděpodobnosti výběru cesty  $P^k(i,j)$  mravencem  $k$  z bodu  $i$  do bodu  $j$  má tvar:

$$P^k_{(i,j)} = \frac{|\tau(i,j)|^\alpha |\eta(i,j)|^\beta}{\sum_{z \notin Tabu_k} |\tau(i,z)|^\alpha |\eta(i,z)|^\beta} \quad \text{pro } \forall (i,j) \notin Tabu_k \quad (2)$$

$$0 \quad \text{pro } \forall (i,j) \in Tabu_k$$

kde  $\tau(i,j)$  představuje intenzitu feromonu na spojnici bodů  $i$  a  $j$ ,  $\eta(i,j)$  je dle [1] viditelnost bodu  $j$  z bodu  $i$ , přičemž platí:

$$\eta(i,j) = \frac{1}{d_{(i,j)}} \quad (3)$$

kde  $d_{(i,j)}$  je vzdálenost bodů  $i$  a  $j$ . Exponenty  $\alpha, \beta$  určují důležitost intenzity feromonové stopy, resp. vzdálenosti mezi body  $i$  a  $j$ , při výpočtu pravděpodobnosti výběru cesty z bodu  $i$  do bodu  $j$ .  $Tabu_k$  je oblast zakázaných bodů, jedná se o již navštívené body uchovávané v paměti mravence. Průběžné ukládání navštívených bodů do vnitřní paměti umělého mravence zamezí tomu, aby se mravenec začal pohybovat ve smyčce po již navštívených bodech. Více informací o této problematice uvádí [4].

Umělí mravenci tedy volí směr cesty na základě obdobných pravidel jako jejich reálné předlohy. Stejně tak jako reální mravenci, mají i umělí mravenci schopnost ukládat po cestě feromonovou stopu, resp. již uloženou feromonovou stopu zesilovat. Intenzita feromonové stopy mezi body  $i$  a  $j$   $\tau_{(i,j)}(t)$  je poté průchodem mravence  $k$  v čase  $t$  zvýšena o hodnotu  $\Delta\tau_k(t)$  jak naznačuje rovnice (4). Hodnota  $\Delta\tau_k(t)$  může být jak konstantní, tak proměnná (více informací uvádí literatura [1]–[4]).

$$\tau(i, j)(t+n) = \tau(i, j)(t) + \Delta \tau_k(t) \quad (4)$$

V případě, že v modelu umělých mravenců kalkulujeme i s průběžným odpařováním feromonové stopy, má poté výše uvedená rovnice tvar:

$$\tau_{(i,j)}(t+n) = (\rho) \tau_{(i,j)}(t) + \Delta \tau_k(t) \quad (5)$$

kde  $\rho \in \langle 0; 1 \rangle$  je koeficient odpařování feromonové stopy mezi časy  $t$  a  $t+n$ .

Kromě možnosti ukládat konstantní nebo proměnné množství umělého feromonu také existují různé strategie ukládání feromonové stopy jako takové (podrobnější informace uvádí [4]).

Na základě výše uvedených rovnic a předpokladu, že mechanismy pozitivní zpětné vazby a samoorganizace budou pracovat stejně jako v koloniích reálných mravenců, lze kolonie umělých mravenců použít k hledání nejkratší cesty prostředím, eventuálně pro řešení jiných optimalizačních problémů, které lze na tento problém převést.

Různé modifikace výše uvedených rovnic daly vzniknout různým mravenčím algoritmům. Přehled těchto algoritmů, jejich porovnání a možnosti aplikací uvádí literatura [4],[7],[8]. Dále použitý a uvažovaný mravenčí algoritmus je tzv. mravenčí systém (ant system, AS), popsáný v literatuře [1],[7],[4].

### 3.3 Plánování cesty pomocí mravenčího systému

Práce [2] uvádí, že užitím mravenčích algoritmů na problematiku plánování cesty lze dosáhnout nejen nalezení cesty ze startovního do cílového bodu, ale také nalezení nejkratší možné cesty, resp. cesty nejbližší optimu.

Pro potřeby plánování cesty pomocí mravenčích algoritmů je nutné popsat pracovní prostor pomocí grafu a v tomto grafu určit startovní a cílový bod. Předpokládejme, že máme kolonii umělých mravenců o  $m$  jedincích. Algoritmus pro plánování cesty mezi startovním a cílovým bodem pomocí mravenčího systému je v pseudokódu popsán níže

1. Inicializace:
  - Nastav:  $t := 0$ ; (  $t$  je časovač )
  - $NC := 0$ ; (  $NC$  je čítač cyklů )
  - Pro všechny hrany grafu  $(i, j)$  nastav počáteční intenzitu feromonové stopy  $\tau(i, j) := C$ .
  - Umístí  $m$  mravenců na startovní bod.
2. Nastav:
  - $s := 1$ ; (  $s$  je velikost paměti mravence )
  - for  $k := 1$  to  $m$  do:
    - Umístí startovní bod do  $Tabu_k^{(s)}$  v paměti  $k$ -tého mravence.
3. repeat
  - Nastav:  $s := s + 1$ ;
  - for  $k := 1$  to  $m$  do:
    - Vyber bod  $j$  dle rovnice (2).
    - Přesuň mravence  $k$  do bodu  $j$ .
    - Nastav  $cl_k := cl_k + d_{ij}$  (  $cl_k$  je délka cesty  $k$ -tého mravence )
    - (  $d_{ij}$  je vzdálenost bodů  $i$  a  $j$  )
    - if(  $cl_k > cl_{MAX}$  ) then
      - Zabij mravence  $k$ .
    - else
      - Umístí bod  $j$  do  $Tabu_k^{(s)}$ .
- until(dosažen cíl).
4. for  $k := 1$  to  $m$  do:
  - Přesuň. mravence  $k$  z  $Tabu_k^{(n)}$  do  $Tabu_k^{(1)}$ .
  - Spočítej délku cesty  $k$ -tého mravence  $L_k$ , urči nejkratší nalezenou cestu.
  - Urči  $\Delta \tau_k(t)$ .

5. Pro všechny hrany grafu urči novou hodnotu  $\tau_{(i,j)}(t+n)$  dle rovnice (4).  
     Nastav:  $t := t+n$ ;  
      $NC := NC+1$ ;
6. if ( $NC < NC_{MAX}$ ) and (Nestagnující chování) then  
     Vymaž paměť všem mravencům.                   (Paměť =  $Tabu_k$ )  
     Pokračuj na krok 2.  
     else  
     Zobraz nejkratší nalezenou cestu.  
     Stop.

V tomto algoritmu je aplikovaná omezující podmínka na délku cesty mravence. Pokud mravenec urazí delší cestu než je nejdelší možná, je mravenec eliminován. Další podmínka je aplikovaná na běh algoritmu: po dosažení nejvyššího dovoleného počtu cyklů  $NC_{MAX}$  je běh algoritmu ukončen.

Kromě výše uvedeného algoritmu lze pro plánování cesty použít také kombinaci mravenčího algoritmu a genetického algoritmu, tzv. ACO-GA, jak uvádí [2].

### 3.3.1 Podmínka ukončení běhu algoritmu

Každý cyklus běhu algoritmu je testován na vybrané parametry a ukončení běhu algoritmu je řízené dosažením definované hodnoty daného parametru. Podmínek ukončení běhu algoritmu může být i více a je možné je kombinovat. V tomto případě je algoritmus ukončen při dosažení alespoň jedné z těchto podmínek. Dále jsou uvedeny nejčastější podmínky.

- Dosažen maximální počet cyklů.
- Dosažen maximální čas výpočtu.
- Nalezení dostatečného počtu řešení.
- Pouze malé změny v řešení během dalších cyklů, ustálení řešení na určitém optimu.

### 3.4 Aplikace mravenčích algoritmů

Mravenčí systémy byly původně užity pro řešení problému obchodního cestujícího, resp. pro hledání nejkratší cesty v grafu. S rozvojem dalších mravenčích algoritmů se poté značně rozšířilo pole možných aplikací těchto optimalizačních metod.

Mravenčí algoritmy jsou již ze své podstaty využívány coby nástroj pro optimalizaci přepravních procesů. Jak uvádí [8], existuje několik společností zabývajících se vývojem a implementací mravenčích algoritmů pro optimalizaci nejrůznějších přepravních procesů, resp. distribučních systémů.

Dalším možným polem aplikací těchto algoritmů je oblast počítačových sítí. Na základě mravenčích algoritmů byly navrženy metody pro propojování počítačových sítí.

Mravenčími algoritmy byly dále řešeny problémy plánování, problém přidělování frekvencí, problém batohu aj. . Další možnosti použití těchto algoritmů uvádí [8] a [9].



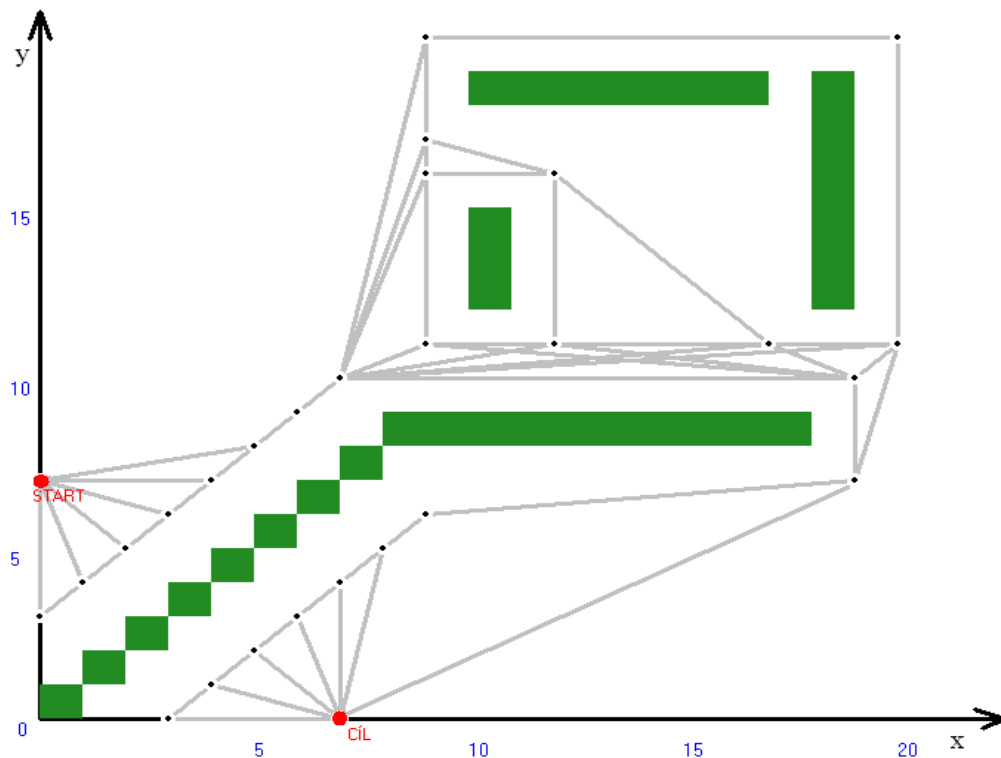


## 4 NÁVRH ALGORITMU PRO PLÁNOVÁNÍ CESTY ROBOTA

### 4.1 Model prostředí

Prostředí je řešeno jako dvourozměrný diskretní prostor omezený svými hranicemi. Pracovní prostor robota je popsán neorientovaným grafem. K popisu prostředí byl použit redukovaný graf viditelnosti, jak je naznačeno na obr. 11. Na hrany grafu se ukládá feromonová stopa, kterou využívají členové kolonie umělých mravců při hledání nejkratší cesty mezi startovním a cílovým bodem.

Překážky v tomto prostoru mohou být reprezentovány buď čtverci nebo obdélníky. Nekonvexní tvary překážek v tomto modelu nelze zadávat přímo, ale složité tvary je možné vytvořit vhodným složením několika jednoduchých překážek. Překážky nemění svoji polohu v čase a robot je nemůže nijak překonat, pouze je může obejít. Překážky lze do volného prostoru zadávat pomocí souřadnic a rozměrů.



Obr. 11 Grafická reprezentace prostředí.

#### 4.1.1 Robot

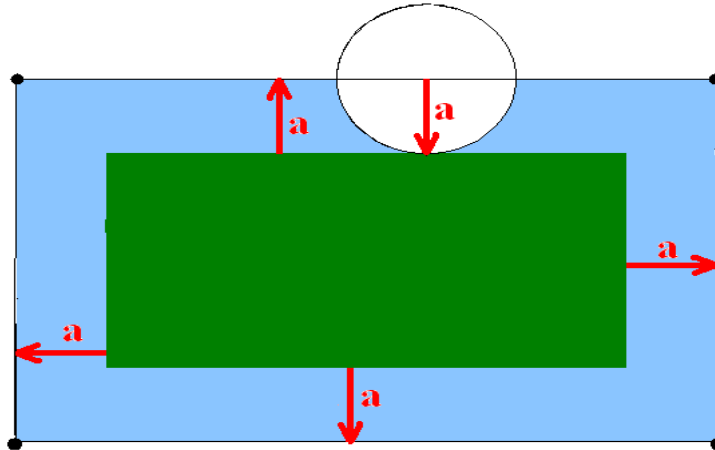
Předpokládám, že robot pohybující se v prostředí popsaném výše má nenulové rozměry. Pro zjednodušení je tvar robota nahrazen kružnicí o poloměru  $a$ . Takto reprezentovaný robot se ve výše popsaném prostředí může pohybovat pouze po hranách grafu.

#### 4.1.2 Vytvoření grafu

Jak je zmíněno výše, k popisu pracovního prostoru robota je použit redukovaný graf viditelnosti. Pro zajištění průchodu ze startovního do cílového bodu bez kontaktu s překážkami je třeba již při vytváření grafu uvažovat rozměry robota a hrany i vrcholy grafu umístit tak, aby nikde během pohybu nemohlo dojít ke kontaktu robota s překážkou. Pro vysvětlení tvorby grafu poslouží obr. 12 :

Pro zajištění průchodu prostředím bez kolize s překážkami je nutné umístit vrcholy a hrany grafu do dostatečné vzdálenosti od překážek. Vzhledem k tomu, že robot je reprezentován kružnicí o poloměru  $a$ , nabízí se možnost zajistit bezpečný průchod prostředím tak, že všechny překážky budou zvětšeny v kladném i záporném směru obou os o poloměr  $a$ , jak je naznačeno na obr. 12. Na průsečících sousedních hran „nafouknuté“ překážky poté vzniknou vrcholy grafu a hrany grafu jsou ty spojnice vrcholů, které neprotínají žádnou ze zvětšených překážek.

V případě, že se v modelu prostředí nachází více překážek (viz obr. 11), probíhá při vytváření grafu kontrola, zda vrcholy zvětšených překážek neleží uvnitř jiné zvětšené překážky. Pokud ano, nedojde k vytvoření vrcholu grafu v tomto bodě.



Obr. 12 „Nafouknutí“ překážky.

## 4.2 Mravenčí kolonie

Cesta výše uvedeného robota je plánovaná pomocí kolonie  $m$  mravenců. Každý z těchto umělých mravenců obsahuje vnitřní paměť, kam se průběžně ukládají vrcholy, které mravenec navštívil. Tato paměť, dále popisovaná jako  $Tabu_k$ , zajišťuje, aby mravenec nenavštívil žádný z vrcholů vícekrát a po dosažení cílového bodu umožní mravenci návrat po stejné trase. Mravenci také do své paměti průběžně ukládají počet vykonaných kroků a informaci o délce cesty. Mravenci hledají cestu mezi startovním a cílovým bodem a pohybují se po hranách grafu popisujícího prostředí. Vrcholy grafu představují místa, kde mravenci volí další směr pohybu.

### 4.2.1 Pohyb mravenců

Mravenci se pohybují po hranách grafu a po dosažení vrcholu volí jeden ze sousedních vrcholů a to na základě toho, jakou hodnotu umělé feromonové stopy detekují na hraně spojující tyto vrcholy. Pravděpodobnost pohybu mravence  $k$  z bodu  $i$  do bodu  $j$  je následující:

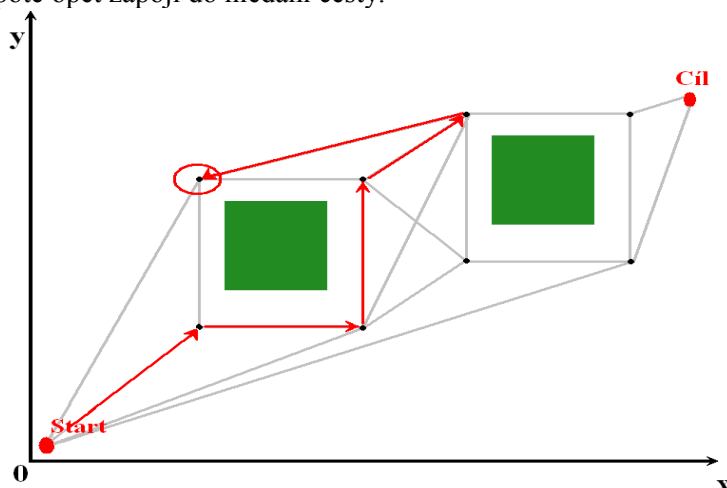
$$P_{(i,j)}^k = \frac{|\tau(i,j)|^\alpha |\eta(i,j)|^\beta}{\sum_{z=1}^n |\tau(i,z)|^\alpha |\eta(i,z)|^\beta} \quad \text{pokud } j \notin Tabu_k$$

$$0 \quad \text{pokud } j \in Tabu_k$$
(6)

kde  $\eta(i,j)$  je převrácenou hodnotou vzdálenosti bodů  $i$  a  $j$ ,  $\tau(i,j)$ , resp  $\tau(i,z)$ , je intenzita feromonové stopy na hraně spojující vrcholy  $i$  a  $j$ , resp  $z$ . Exponent  $\alpha$  určuje důležitost hodnoty feromonové stopy při výběru další cesty. Naopak exponent  $\beta$  určuje důležitost vzdálenosti při výběru další cesty. Pokud je  $\alpha$  větší než  $\beta$ , rozhodují se mravenci na základě hodnoty feromonové stopy, kterou detekují na hraně mezi dvěma vrcholy, tedy upřednostňují cestu použitou dalšími členy kolonie. Naopak pokud je  $\beta$  větší než  $\alpha$ , hraje při rozhodování větší roli vzdálenost vrcholů grafu na úkor intenzity feromonové stopy mezi těmito vrcholy.

### 4.2.2 Reset mravence

V podkapitole 3.3 je uvedeno, že pokud mravenec překročí maximální dovolenou délku cesty, dojde k jeho eliminaci. V návrhu algoritmu v případě obdobného problému předpokládám eliminaci mravence a okamžité umístění identického mravence na startovní vrchol, tedy reset mravence. Reset proběhne v okamžiku, kdy se mravenec dostane do bodu odkud nemůže pokračovat dále, jak je naznačeno na obr. 13. Poté dojde k vymazání celé paměti mravence a jeho umístění na startovním bodě. Mravenec se poté opět zapojuje do hledání cesty.



Obr. 13 Reset mravence po 5 krocích.

### 4.2.3 Feromonová stopa

Ukládání feromonové stopy je klíčem k samoorganizaci a nalezení nejkratší cesty mezi startovním a cílovým bodem. Umělá feromonová stopa je reprezentovaná ohodnocením hran grafu. Při cestě mravence  $k$ . po hraně spojující body  $i$  a  $j$  je původní množství feromonu  $\tau_{(i,j)}(t)$  navýšeno o hodnotu  $\Delta\tau_{(i,j)}^k(t)$ . Množství feromonu na uvedené hraně je poté dáno rovnicí (5). V algoritmu předpokládám aplikaci mechanismu odpařování umělé feromonové stopy.

Existují různé strategie ukládání feromonové stopy a v návrhu algoritmu se dále budu zabývat následujícími možnostmi ukládání feromonové stopy.

- Mravenci uloží feromonovou stopu na všechny hrany, kterými prošli a to bez ohledu na to, zda dorazili do cílového bodu či nikoliv. Mravenci ukládají feromonovou stopu i při návratu z cílového do startovního bodu. Množství ukládaného feromonu je konstantní.
- Mravenci ukládají feromonovou stopu jen při cestě od cíle zpět ke startovnímu bodu a množství feromonu je konstantní.
- Mravenci ukládají feromonovou stopu jen při cestě od cíle zpět ke startovnímu bodu a množství feromonu je dáno funkcí:

$$\Delta\tau_{(i,j)}^k(t) = \frac{Q}{l_k(t)} \quad (7)$$

kde  $Q$  je konstanta, v tomto případě jeden a půl násobek vzdálenosti startovního a cílového bodu,  $l_k(t)$  je délka cesty  $k$ -tého mravence po dosažení cílového bodu.

- Mravenci uloží konstantní množství feromonu na všechny hrany, které použili cestou k cíli v okamžiku dosažení cílového bodu. Při cestě od cílového zpět ke startovnímu bodu již mravenci ukládají průběžně konstantní množství feromonu.
- Mravenci uloží proměnné množství feromonu na všechny hrany, které prošli cestou k cíli v okamžiku dosažení cílového bodu. Ukládané množství feromonu je dáno rovnicí (7). Při cestě od cílového zpět ke startovnímu bodu mravenci ukládají průběžně množství feromonu dle rovnice (7).

Předpokládám, že uvedená strategie průběžného ukládání umělé feromonové stopy bude ve srovnávacích experimentech vykazovat nejhorší výsledky. Důvodem by měl být fakt, že mravenci uloží stopu bez ohledu na nalezení cílového bodu. Tato stopa tedy může ovlivnit rozhodování dalších členů kolonie bez ohledu na to zda spojuje startovní a cílový bod.

Dále předpokládám, že nejlepších výsledků ve srovnávacích experimentech bude dosahovat čtvrtá a pátá strategie ukládání stopy. Důvodem by mělo být to, že tato stopa je uložena vždy po dosažení cíle a je tedy zaručeno, že pokud budou další členové kolonie tuto stopu následovat, dosáhnou vždy cíle.

### 4.3 Návrh algoritmu

#### 4.3.1 Podmínka ukončení běhu algoritmu

Bez tohoto kritéria by algoritmus nikdy neskončil svůj výpočet a proto je třeba určit, při jakých podmínkách musí ukončit svou činnost. Tyto podmínky musí mít schopnost posoudit kvalitu nalezeného řešení a proto je vhodné kombinovat více omezujících podmínek. V návrhu algoritmu předpokládám následující podmínky ukončení běhu programu.

- Dosažení maximálního počtu cyklů algoritmu.
- Dosažení časového limitu běhu algoritmu.
- Dostatečný počet mravenců najde cestu ze startovního do cílového bodu.
- Nalezení první možné cesty.

#### 4.3.2 Algoritmus

Algoritmus plánování cesty robota pomocí mravenčích systémů je možné rozdělit na tři dílčí části. První část vytváří model prostředí a vkládá překážky. Druhá část vytváří kolonii umělých mravenců a hledá cestu prostředím. Třetí část poté kontroluje běh algoritmu, správnost zadaných dat a určuje optimální cestu robota.

V pseudokódu uvádím návrh algoritmus pro plánování cesty robota pomocí mravenčího systému.

1. Inicializace:

Vytvoř model prostředí a vlož překážky.

Nastav:

Startovní a cílový bod.

Konstanty  $\alpha, \beta$ .

Urči strategii ukládání feromonové stopy.

Vytvoř kolonii  $m$  mravenců, umístí kolonii do startovního bodu.

$NC := 0$ . ( $NC$  je čítač cyklů)

Pro všechny hrany grafu  $(i, j)$  nastav počáteční intenzitu feromonové stopy  $\tau(i, j) := C$ .

2. for  $k:=1$  to  $m$  do:

$s := 1$ .

(  $s$  je velikost paměti mravence)

Umístí startovní bod do Tabuk( $s$ ) v paměti  $k$ . mravence.

3. repeat

for  $k:=1$  to  $m$  do:

if (mravenec  $k$  uvíznul) then

Reset  $k$ - tého mravence.

else do:

Nastav:

$s := s + 1$ .

Na základě rovnice (6) vyber bod  $j$ .

Přesuň  $k$ . mravence do bodu  $j$ .

Nastav:

$cl_k := cl_k + d_{ij}$

(  $cl_k$  je délka cesty  $k$ . mravence )

(  $d_{ij}$  je vzdálenost bodů  $i$  a  $j$  )

- Umístí bod  $j$  do  $Tabu_k^{(s)}$ .  
 until(Dosažen cíl) or ((Nedosažen cíl) and (Dosažen časový limit))
4. for  $k:=1$  to  $m$  do:
    - Ulož feromonovou stopu.
    - Přesuň  $k$ . mravence z  $Tabu_k^{(n)}$  do  $Tabu_k^{(1)}$ .
    - Spočítej délku cesty  $k$ . mravence  $L_k$ , urči nejkratší nalezenou cestu.
  5. Nastav:
    - $NC := NC + 1$ .
    - Pro všechny hrany grafu urči novou hodnotu  $\tau_{(i,j)}(NC)$  dle rovnice (5).
  6. If (splněny podmínky dle § 4.3.1) then
    - Zobraz nejkratší nalezenou cestu.
    - Ulož výsledky hledání.
    - Stop.
    - else
    - Reset všech mravenců.
    - Pokračuj krokem 2.

#### 4.4 Srovnávací algoritmus

Vše uvedený algoritmus bude srovnáván ve dvou směrech. Stejný algoritmus hledání cesty bude použit na odlišný model prostředí a dále bude v modelu prostředí uvedeném v podkapitole 4.1 použito náhodné vyhledávání kolonií agentů namísto mravenčího algoritmu.

##### 4.4.1 Model prostředí

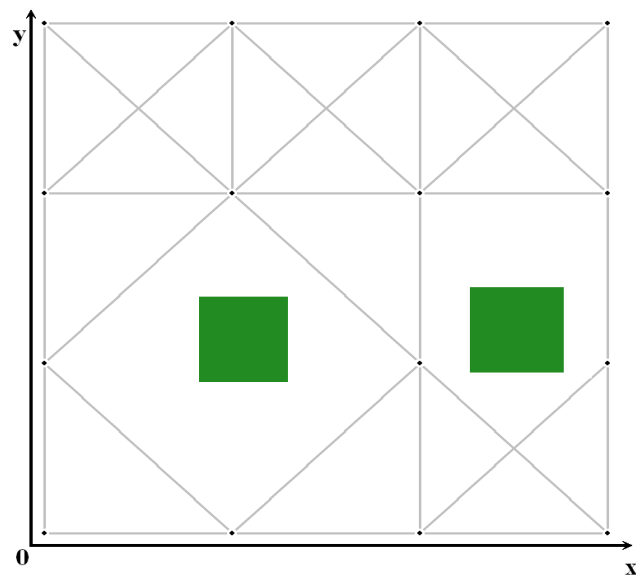
Prostředí je řešeno jako dvourozměrný diskretní prostor omezený svými hranicemi. Pracovní prostor robota je popsán neorientovaným grafem. Prostředí je rozloženo do čtvercových nebo obdélníkových buněk, kde vrcholy buněk představují vrcholy grafu. Svislé, vodorovné a úhlopříčné spojnice sousedních vrcholů poté představují hrany grafu. Na tyto hrany se poté ukládá umělá feromonová stopa. Na obr. 14 je naznačeno, že každý vrchol grafu může mít maximálně 8 sousedů. Překážky jsou reprezentovány stejně jako v podkapitole 4.1.

Model prostředí je vytvořen tak, že nejprve je vytvořen graf a poté jsou přidány překážky. Pokud je vložena překážka tak, že překryje vrchol grafu, je tento vrchol vyjmut z grafu a veškeré vazby tohoto vrcholu na okolní vrcholy grafu a opačně zaniknou. Pokud je překážka vložena tak, že hrana spojující dva vrcholy tuto překážku protíná, je tato hrana z grafu vyjmuta.

Pro hledání cesty takto reprezentovaným prostředím bude použit algoritmus uvedený v podkapitole 4.3.

##### 4.4.2 Náhodné hledání

Algoritmus náhodného hledání vychází z algoritmu popsaného v podkapitole 4.3. Rozdíl mezi mravenčím algoritmem a algoritmem náhodného hledání spočívá v tom, že mravenci volí další vrcholy náhodně, bez ohledu na intenzitu feromonových stop a bez ohledu na vzdálenost vrcholů. Umělí mravenci využívající tento algoritmus také nebudou ukládat feromonové stopy.



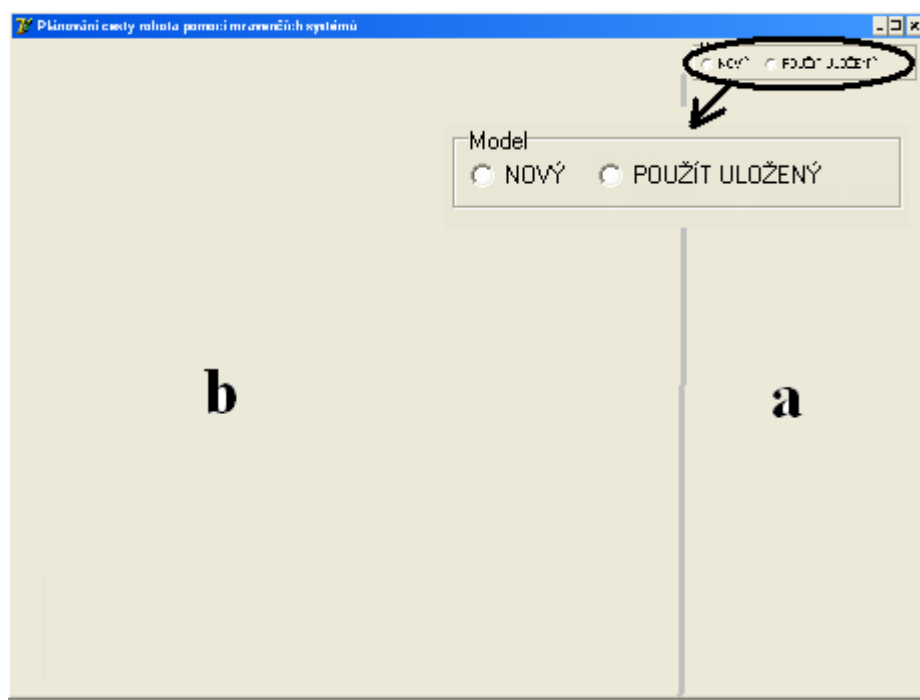
*Obr. 14 Grafická reprezentace srovnávacího modelu prostředí*

## 5 POPIS PROGRAMU

Simulace robota je naprogramovaná v prostředí Borland Delphi 7. Snahou bylo využít dostupných prostředků k snadnému a intuitivnímu ovládní programu. Program byl vytvořen použitím technik objektivě orientovaného programování.

Okno programu je rozdělena do dvou částí hlavních částí:

- Největší část zabírá pracovní plocha robota. Zde se také zobrazuje výsledné řešení a model prostředí (viz b) na obr. 15 ,b).
- Menší část zabírají potřebné ovládací prvky aplikace (viz obr. 15 ,a).



Obr. 15 Okno programu s úvodním ovládacím panelem.

Jak je naznačeno na obr. 15 , po spuštění programu se zobrazí úvodní ovládací panel, který nabízí možnost vytvoření nového modelu, nebo použití modelu uloženého do souboru. V závislosti na volbě uživatele jsou poté zobrazovány další ovládací panely. Vždy je ovšem aktivní jen jeden panel, na kterém uživatel vkládá potřebné parametry pro běh programu.

### 5.1 Ovládání programu

Volba „Nový“ na úvodním panelu zpřístupní panel s následujícími možnostmi volby:

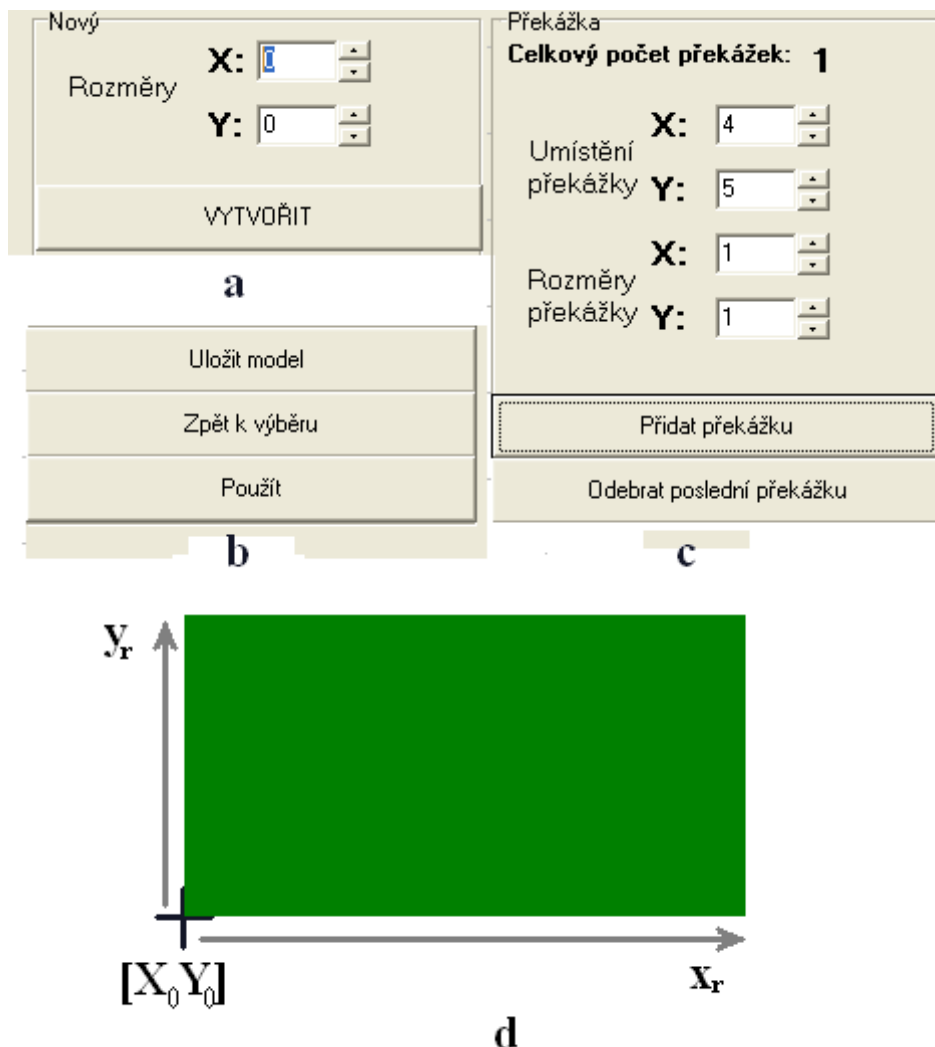
- Vytvoření modelu prostředí o požadovaných rozměrech, viz obr. 16 a).
- Možnost uložit model do souboru, návratu do úvodního menu, použít daný model pro hledání cesty, viz obr. 16 b)..
- Vložení a odebrání překážek v modelu prostředí, viz obr. 16 c),d).

Překážky jsou vytvářeny pomocí souřadnic výchozího bodu a rozměrů překážky, jak naznačuje obr. 16 d). Nejprve je určen počáteční bod o souřadnicích  $(X_0, Y_0)$ , tento bod je použit jako levý dolní roh překážky, jak je patrné z obr. 16 d). Program neumožňuje zadávat jiné překážky než čtvercové či obdélníkové. Složitější tvary možné vytvořit skládáním jednotlivých překážek. Každá vložená překážka je vykreslena na pracovní plochu.

Volba „Použít uložený“ na úvodním panelu zobrazí na pracovní plochu robota první z dostupných uložených modelů a zpřístupní panel s následujícími možnostmi (viz Obr. 17 ,a) ) :

- Přejít k následujícímu modelu, pokud je k dispozici.
- Přejít k předchozímu modelu, pokud je k dispozici..
- Možnost návratu do úvodního menu.

- Možnost použít daný model pro hledání cesty.



Obr. 16 Ovládací panely, volba „Nový“.

Volba „Použít“ na obou výše zmíněných panelech zpřístupní ovládací panel pro nastavení parametrů hledání cesty, viz obr. 17 ,b). Možnosti zadávání parametrů jsou následující:

- Zadání počtu umělých mravenců v kolonii, která hledá cestu prostředím.
- Zadání konstant  $\alpha, \beta$  viz rovnice (6).
- Určení strategie ukládání feromonové stopy, viz podkapitola 4.2.3.
- Koeficient odpařování feromonové stopy.
- Rozměr robota, viz podkapitola 4.1.1
- Podmínky ukončení běhu algoritmu, při zadání více podmínek se běh algoritmu ukončí při dosažení kterékoliv z podmínek bez ohledu na stav ostatních.
- Zadání souřadnic startovního a cílového bodu.

Volba „Start“ na panelu pro nastavení parametrů zahájí hledání cesty modelem daného prostředí. Po ukončení hledání jsou výsledky hledání cesty uloženy do souboru a je zpřístupněný panel pro opětovné hledání cesty se stejnými parametry. Na pracovní ploše robota je zobrazen model prostředí se startovním cílovým bodem a všemi překážkami v daném modelu prostředí. Na pracovní plochu robota se také vykreslí graf popisující pracovní prostor robota, viz obr. 18 .



The image shows a software interface with two main panels, labeled 'a' and 'b' at the bottom.

**Panel a (Left):** Titled "Nahrát ze souboru" (Load from file). It contains a text input field with "Počet uložených modelů: 3". Below it is a label "Model č.2". There are four buttons: "POUŽÍT" (Use), "DALŠÍ" (Next) which is highlighted with a dashed border, "PŘEDCHOZÍ" (Previous), and "ZPĚT K VÝBĚRU" (Back to selection).

**Panel b (Right):** Contains several configuration sections:
 

- Mravenci (Ants):** "Počet agentů" (Number of agents) set to 15; "Alfa" set to 3; "Beta" set to 2; "Algoritmus ukládání feromonové stopy" (Algorithm for saving pheromone trails) set to 1; "Koeficient odpařování feromonové stopy" (Evaporation coefficient) set to 1.
- Robot:** "Velikost" (Size) set to 1.
- Parametry ukončení hledání (Search termination parameters):** "Maximální počet cyklů" (Max number of cycles) checked and set to 1000; "Maximální počet dosažení cíle" (Max number of goal reaches) checked and set to 100; "Časový limit [ms]" (Time limit) checked and set to 1000.
- Start + cíl (Start + goal):** "Start X:" set to 7, "Start Y:" set to 7, "Cíl X:" (Goal X) set to 2, "Cíl Y:" (Goal Y) set to 2.

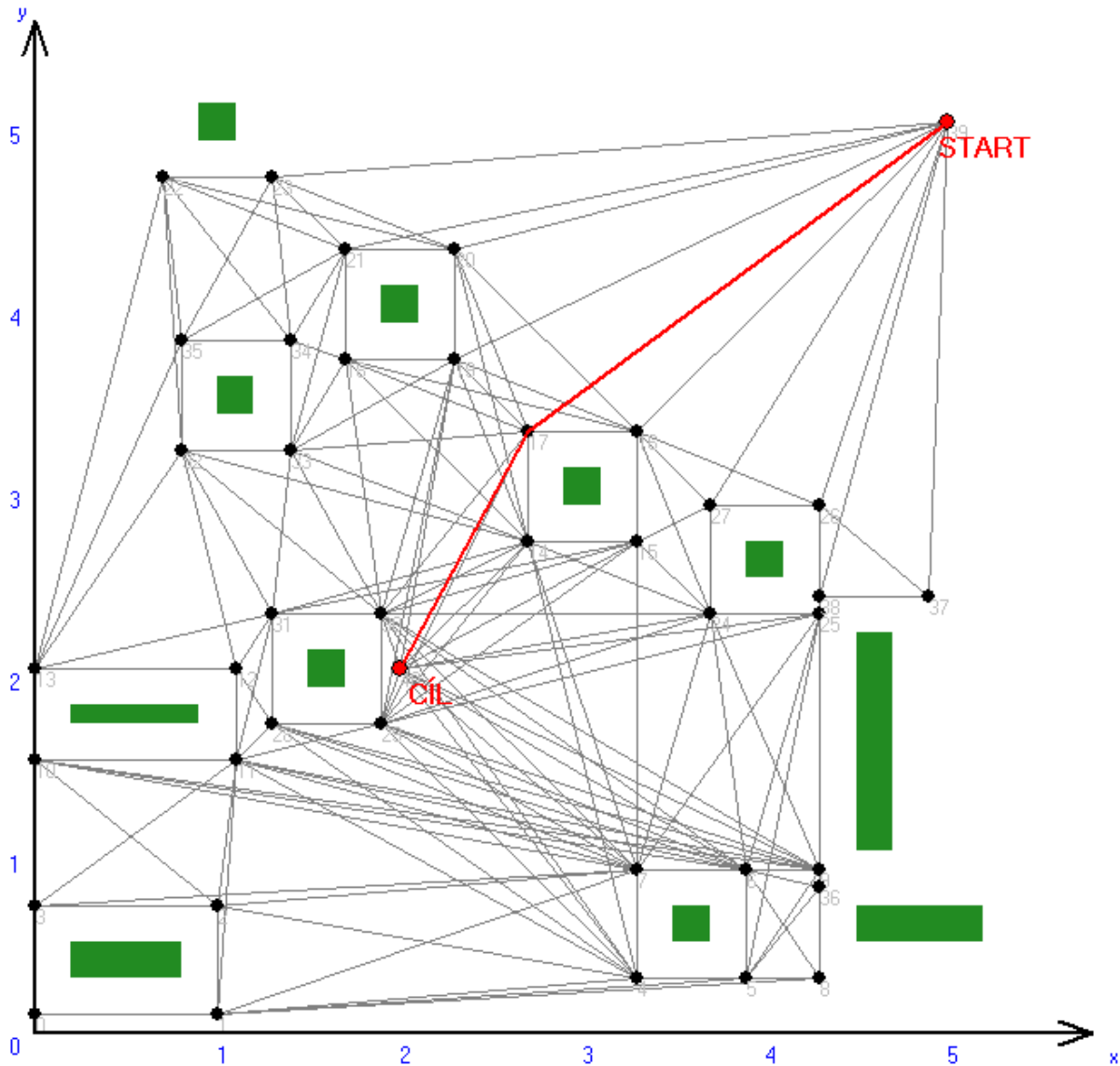
 At the bottom of panel b are two buttons: "Start" and "Zrušit, zpět k výběru" (Cancel, back to selection).

Obr. 17 Ovládací panely, volby „Použit uložený“ a „Použit“.

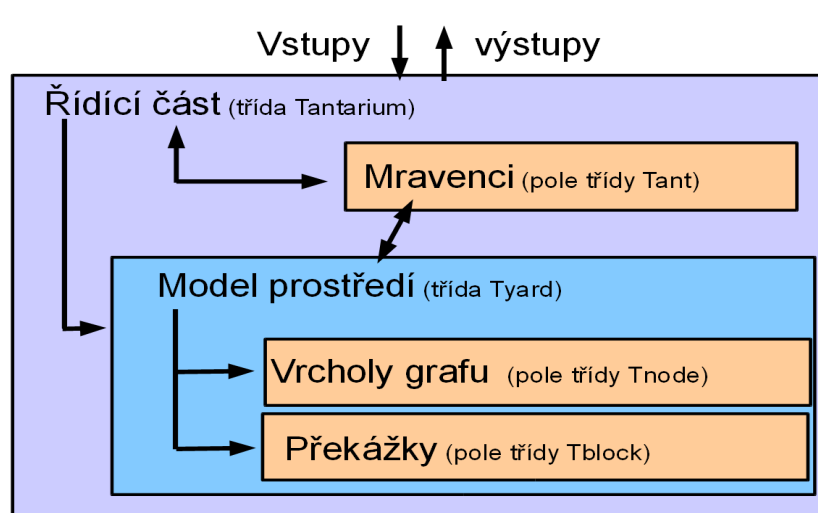
## 5.2 Členění a běh programu

Program byl vytvořen použitím dostupných technik objektově orientovaného programování. Program pracuje celkem s pěti instancemi, jak je naznačeno na obr. 19 .

Po spuštění programu je volbami „Nový“ a „Použit uložený“ vytvořena řídicí část, která pracuje se vstupními a výstupními daty a vytváří další instance programu. První instancí, kterou řízení programu vytvoří, je model prostředí. Model prostředí dále vytváří pole překážek a pole vrcholů grafu. Na základě informací o poloze překážek a vrcholů je dále vytvořen graf popisující volný prostor. Do grafu je vložen startovní a cílový bod a řídicí část poté vytvoří kolonii umělých mravenců (pole mravenců). Tito umělí mravenci hledají cestu mezi startovním a cílovým bodem a přitom využívají informace z modelu prostředí. Pokud najdou spojnici startu a cíle, předají informaci řídicí části programu, která rozhodne o ukončení nebo dalším pokračování hledání. Po ukončení hledání jsou výsledky uloženy do souboru a zobrazeny na pracovní plochu robota. Řídicí část poté uvolní všechny instance programu. Opakování běhu programu je možné opětovnou volbou „Nový“ nebo „Použit uložený“.



Obr. 18 Výsledek hledání cesty zobrazený na pracovní ploše robota.



Obr. 19 Schéma objektů použitých v programu

## 6 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Experimenty probíhaly ve třech krocích. Nejprve byly ověřovány jednotlivé funkce programu a funkčnost programu jako celku. V druhém kroku byly srovnávány výsledky hledání cesty při různých strategiích ukládání feromonové stopy. Nakonec byly provedeny experimenty s odlišným modelem prostředí, resp. s náhodným hledáním cesty, a výsledky těchto experimentů byly srovnávány s výsledky z druhého kroku.

### 6.1 Ověření funkčnosti programu

V rámci ověřování funkčnosti programu bylo odstraněno několik méně závažných chyb, dále bylo že program se v určitých případech může chovat nestabilně. Jedná se zejména o následující případy:

- Použití časového kritéria.
- Velikost mravenčí kolonie přesáhne cca 30 jedinců.
- Hodnoty exponentů  $\alpha$  a  $\beta$  vyšší než 4.
- Exponent  $\beta$  je větší než  $\alpha$ .
- Počet omezení cyklů algoritmu je vyšší než 1500.
- Počet dosažení cílového bodu je vyšší než 1500.

### 6.2 Srovnání strategií ukládání feromonové stopy

V experimentech byl testován vliv různých strategií ukládání feromonové stopy na hledání cesty daným prostředím. Experimenty byly provedeny ve třech různých modelech.

Byly zadány následující parametry hledání cesty:

- Exponenty  $\alpha = 3$ ,  $\beta = 2$ .
- Mravenčí kolonie o 15 členech.
- Koeficient odpařování feromonové stopy = 0,75.
- Velikost robota = 0,25.
- Podmínky ukončení běhu algoritmu: Dosažení 1.000 cyklů.

Sledovány byly tyto parametry: délka cesty, počet kroků mezi startovním a cílovým bodem, počet dobrých řešení a také doba řešení. Za dobré řešení považují takové řešení, kdy délka trasy robota je nejvýše jeden a půl násobkem nejkratší nalezené cesty, nebo během experimentu nedojde k nestabilnímu chování programu. Pro každou strategii ukládání feromonové stopy (viz § 4.2.3) bylo provedeno dvacet experimentů.

#### Model 1

Byl vytvořen jednoduchý model prostředí o rozměrech 8x8, viz obr. 20, tento model prostředí je popsán grafem o 44 vrcholech. Souřadnice startovního bodu jsou (0;1) a souřadnice cílového bodu jsou (8;8).

Strategie ukládání stopy.	Délka cesty		Kroky		Dobrá řešení [%]	Průměrný čas řešení [ms].
	Průměr	Min/Max	Průměr	Min/Max		
1.	14,1	12,5 / 20,7	5,8	5 / 7	100	603
2.	13,9	12,5 / 18,5	5,7	5 / 7	100	570
3.	13,4	12,6 / 16,4	5,8	5 / 7	100	603
4.	14,0	12,5 / 18,3	5,5	5 / 8	100	600
5.	13,1	12,5 / 14,2	5,3	5 / 6	100	607

Tab. 1 Srovnání strategií ukládání feromonové stopy

Cílem experimentů s prvním modelem bylo srovnat vliv volby strategie ukládání feromonové stopy na kvalitu řešení. Experimenty odhalily, že v uvedeném modelu nemá volba strategie ukládání feromonové stopy podstatný vliv na hledání cesty. Všechny strategie dosáhly přibližně stejných hodnot všech sledovaných parametrů. Experimentem bylo zjištěno, že při zadaných parametrech hledání upřednostňuje algoritmus nižší počet kroků k cíli na úkor délky cesty, jak naznačuje obr. 20 .

## Model 2

Byl vytvořen jednoduchý model prostředí o rozměrech 5x5, viz obr. 21 , tento model prostředí je popsán grafem o 34 vrcholech. Souřadnice startovního bodu jsou (1;1) a souřadnice cílového bodu jsou (5;5) .

Strategie ukládání stopy.	Délka cesty		Kroky		Dobrá řešení [%]	Průměrný čas řešení [ms].
	Průměr	Min/Max	Průměr	Min/Max		
1.	11,7	8,9 / 15,7	6,8	5 / 11	80	1190
2.	10,8	8,45 / 14,1	6,3	4 / 8	75	1185
3.	9,8	8,1 / 11,4	5,6	4 / 7	80	1217
4.	10,7	8,9 / 12,1	5,6	4 / 8	85	1103
5.	9,7	8,5 / 10,4	5,9	4 / 6	80	983

Tab. 2 Srovnání strategií ukládání feromonové stopy

Cílem experimentů s druhým modelem bylo opět porovnat vliv strategií ukládání feromonové stopy na kvalitu nalezeného řešení. Předpoklad, že výsledky budou obdobné jako u prvního modelu, se potvrdil. Rozdílem oproti experimentům s prvním modelem je zastoupení dobrých řešení. Zatímco u prvního modelu nedošlo během hledání cesty k nestabilnímu chování programu, u druhého modelu docházelo ve 20 až 25% experimentů k pádům aplikace. Příčinu tohoto chování se ovšem nepodařilo odhalit.

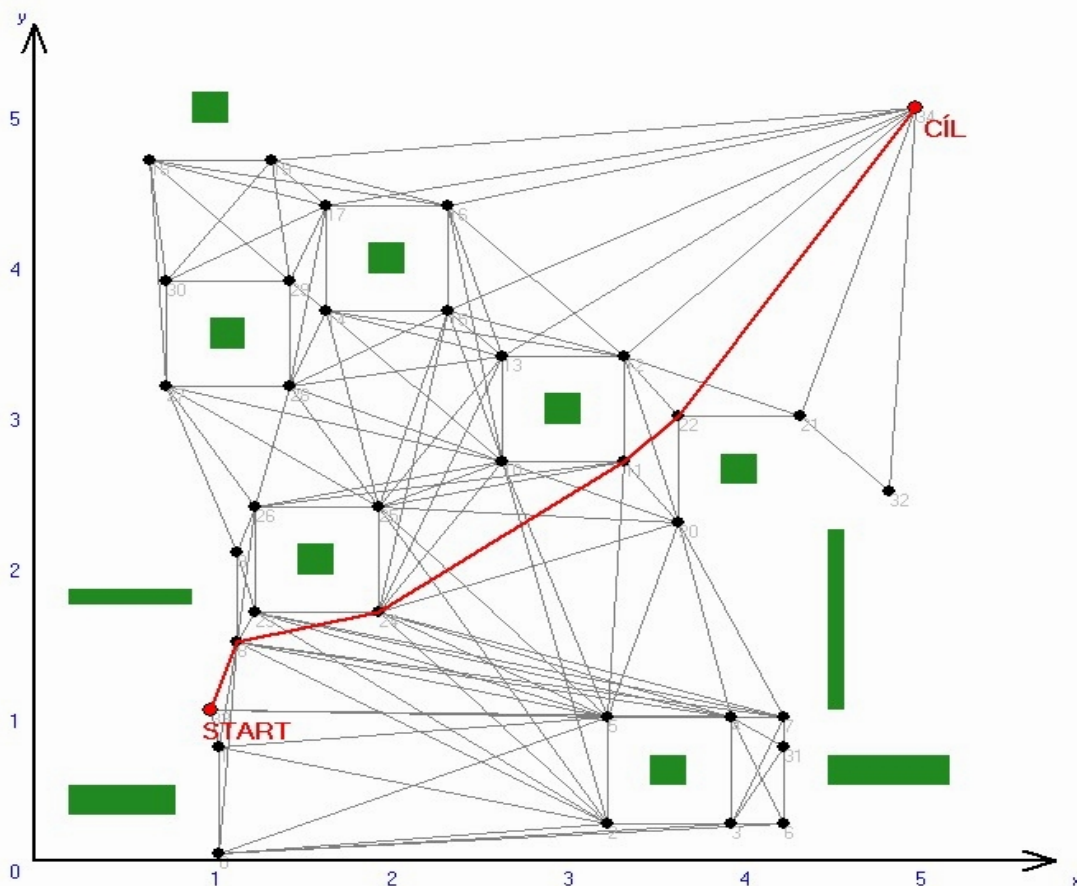
## Model 3

Byl vytvořen model prostředí o rozměrech 30x30, viz obr. 22 , tento model prostředí je popsán grafem o 65 vrcholech. Souřadnice startovního bodu jsou (21;21) a souřadnice cílového bodu jsou (7;7) . U tohoto modelu byly změněny podmínky ukončení hledání cesty, protože při první části experimentů program vykazoval až 75% selhání (při použití parametrů ukončení hledání zmíněných na počátku této podkapitoly). Podmínky ukončení hledání u tohoto modelu byly proto změněny na ukončení hledání po dosažení 100 cyklů.

Strategie ukládání stopy.	Délka cesty		Kroky		Dobrá řešení [%]	Průměrný čas řešení [ms].
	Průměr	Min/Max	Průměr	Min/Max		
1.	36,4	31,1 / 41,3	10,1	9 / 11	85	106
2.	33,4	28,7 / 36,5	9,7	9 / 10	90	105
3.	33,4	28,7 / 36,0	10,0	9 / 10	95	109
4.	34,9	28,7 / 42,0	9,9	9 / 11	90	99
5.	33,5	28,7 / 36,5	9,9	9 / 10	90	105

Tab. 3 Srovnání strategií ukládání feromonové stopy.





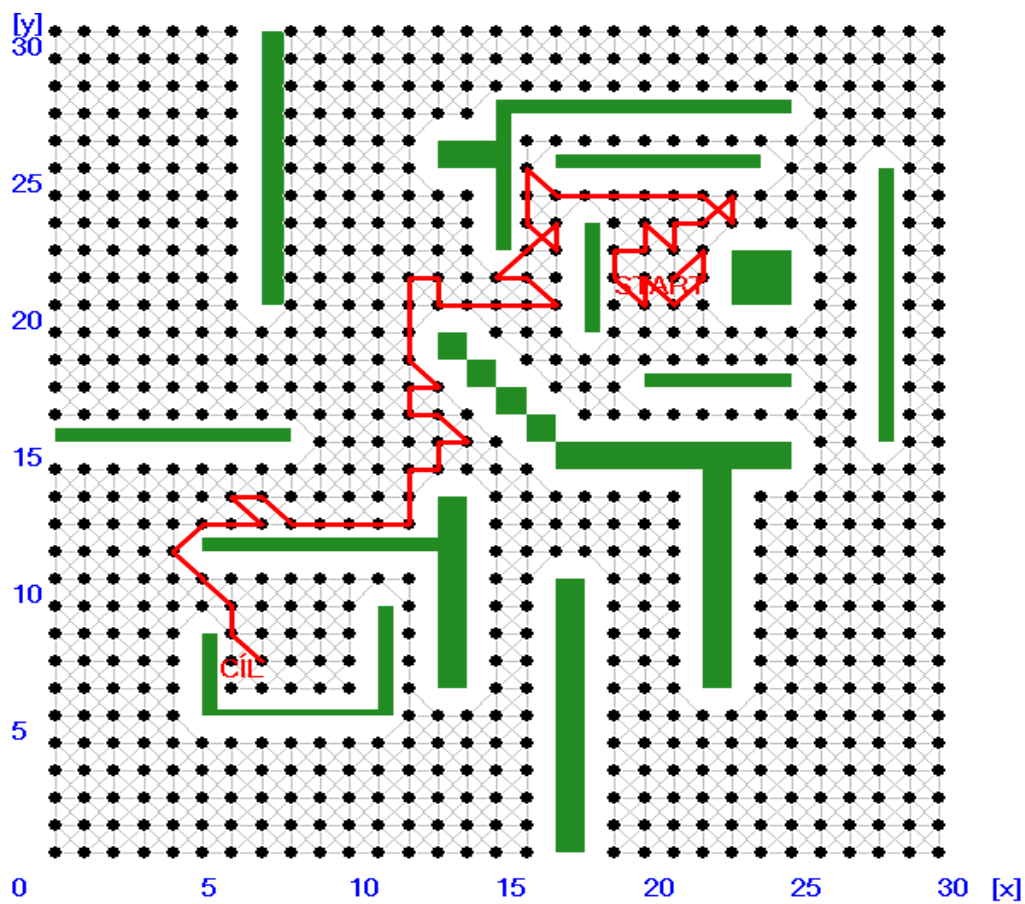
Obr. 21 Model prostředí s nejkratší nalezenou cestou, model 2.

### 6.3 Srovnání algoritmů hledání cesty

Pro srovnání algoritmů z podkapitoly 4.4 a mravenčích systémů jsem použil prostředí reprezentované modelem č. 3. Provedl jsem dvacet experimentů s algoritmem náhodného hledání a celkem padesát experimentů s odlišným modelem prostředí (viz § 4.4.1), tedy deset experimentů pro každou strategii ukládání feromonové stopy. Uvedené algoritmy srovnávám s průměrem výsledků mravenčího systému aplikovaného na model prostředí č.3. Podmínky ukončení hledání cesty byly omezeny na dosažení 100 cyklů programu.

Strategie hledání		Délka cesty		Kroky		Dobrá řešení [%]	Průměrný čas řešení [ms].
		Průměr	Min/Max	Průměr	Min/Max		
Mravenčí systémy		34,3	29 / 38	9,9	9 / 10,4	90	104,5
Náhodné hledání		35,5	29 / 52	11,4	9 / 21	80	160
Strategie ukládání stopy.		Délka cesty		Kroky		Dobrá řešení [%]	Průměrný čas řešení [ms].
		Průměr	Min/Max	Průměr	Min/Max		
Odlišný model	1.	203,3	203	183	183	10	25
	2.	104,5	80 / 126	86,5	67 / 105	90	168
	3.	116,9	108 / 130	96,5	90 / 105	90	169





Obr. 23 Nejlepší nalezené řešení v modelu prostředí dle § 4.4.1.



## 7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámit se s problematikou plánování cesty robota a problematikou mravenčích systémů, dále navrhnout mravenčí algoritmus pro plánování cesty robota a tento algoritmus implementovat a provést porovnávací experimenty.

Navržený algoritmus předpokládá pohyb holonomního robota v diskrétním dvourozměrném prostředí reprezentovaném grafem. Navržený algoritmus pracuje ve statickém prostředí a používá globální plánování cesty pomocí kolonie umělých agentů, kteří se rozhodují na základě lokálních informací.

Návrh algoritmu vychází z nejstaršího mravenčího algoritmu, tzv. mravenčího systému. V navrženém algoritmu se uplatňují principy pozitivní zpětné vazby a také je zajištěno, že v každém cyklu běhu algoritmu jsou upřednostňovány kratší cesty k cílovému bodu. To je zajištěno mechanismem návratu všech členů umělé kolonie do startovního bodu bezprostředně po nalezení cíle, nejdříve jsou tedy nalezeny kratší cesty a ty jsou později díky mechanismu pozitivní zpětné vazby upřednostňovány, až zcela převládnou. Dalším klíčovým prvkem návrhu mravenčího algoritmu je volba strategie ukládání umělé feromonové stopy.

Z provedených srovnávacích experimentů vyplynulo, že v daných modelech dosahovaly všechny metody ukládání feromonových stop téměř stejných výsledků. Původní předpoklad z § 4.2.3, že strategie průběžného ukládání komunikační látky kdykoli během pohybu bude vykazovat odlišné výsledky než ostatní algoritmy ukládání stopy, se nenaplnil. Taktéž strategie ukládání komunikační látky po dosažení cíle nedosahovala výrazně lepších výsledků než ostatní strategie ukládání umělých feromonových stop. Srovnávací a ověřovací experimenty také ukázaly jistá omezení navrženého programu. Jedná se zejména o nestabilní chování po nastavení určitých parametrů hledání.

Ze srovnávacích experimentů dále vyplývá důležitost volby vhodného modelu prostředí. Algoritmus sice pracoval i v grafu s devíti sty vrcholy, ovšem nalezené řešení nedosahovalo parametrů hledání pomocí mravenčích systémů. Výhodou tohoto algoritmu je ovšem větší stabilita. Algoritmus náhodného hledání dosáhl přibližně stejných výsledků jako mravenčí systémy. Důvode je naznačen v podkapitole 6.3.

Dle mého názoru je navržený algoritmus dostačující pro globální plánování cesty robota ve statickém prostředí. Úpravou algoritmu a umožněním lokálního plánování pohybu robota měnícím se prostředím by mohla být rozšířena možnost reálných aplikací tohoto algoritmu. V tomto případě by pravděpodobně bylo nutné změnit model prostředí. Další možností rozšíření stávajícího algoritmu je možnost aplikace, resp. kombinace některého dalšího algoritmu ze skupiny evolučních algoritmů. Při úpravě algoritmu je ovšem nutné vzít v potaz možný nárůst výpočtové náročnosti algoritmu v případě úpravy vlastního algoritmu či modelu prostředí.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI, A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, Vol.26, No.1, 1996, pp.1-13.
- [2] GARRO B. A., SOSSA H., VAZQUEZ, R. A. Path Planning Optimization Using Bio-Inspired Algorithms. In: *Fifth Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI'06)*, 2006, pp. 319-330.
- [3] MAZZEO, S., LOISEAU, I. An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, Vol. 18, 2004, pp. 181-186.
- [4] DORIGO, M, STÜTZLE, T. *Ant Colony Optimization*. : MIT Press, 2004. 305 s. ISBN 0262042193.
- [5] GROSS, T. *Plánování cesty mobilního robota* (Diplomová práce).Brno:Vysoké učení technické,Fakulta strojního inženýrství, 2007. 71 s. Vedoucí práce: RNDr. Jiří Dvořák, Csc.
- [6] NOVOTNÝ, M. *Tvorba lokální mapy pracovního prostředí mobilního robota*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 34 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.
- [7] VACULÍKOVÁ, M. *Ant Colony Optimization v prostředí Mathematica*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2008. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zuzana Oplatková, Ph.D.
- [8] KOVÁŘÍK, O. *Ant Colony Optimization for Continuous Problems*. Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2006. 69 s.. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Kordík. Dostupný z WWW: <<http://ant-colony-optimization.no-ip.org/>>.
- [9] Ant colony optimization - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. [2004] , 18.4.2009 [cit. 2009-04-29]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Ant\\_colony\\_optimization](http://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization)>.
- [10] WINKLER, Z. *Plánování na mřížce (Robotika.cz > Průvodce)* [online]. 2003 , 12.3.2003 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://robotika.cz/guide/gridplan/cs>>.
- [11] DLOUHÝ, M. *Exaktní plánování (Robotika.cz > Průvodce)* [online]. 2003 , 2003-11-07 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://robotika.cz/guide/exactplan/cs>>.