

Modelování hledání potravy v mravenčích koloniích

David Beinhauer^{1,*}

¹*Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Bioinformatika, Praha, Česká republika*

^{*}*david.beinhauer@email.cz*

Abstrakt

Chování hmyzích druhů žijících v kooperujících koloniích je dodnes výzvou pro vědu. Pochopení této problematiky může vést k zdokonalení řešení řady zdánlivě nesouvisejících problémů. V práci je představen jednoduchý multiagentní model mravenčí kolonie zaměřující se na problematiku shánění potravy v různě komplexních prostředích. Při analýze byla prokázána schopnost modelu simulace koordinované spolupráce mravenců při sbírání potravy.

1 Úvod

Kolektivní chování řady druhů hmyzu, mezi něž patří například mravenci, je charakteristické komplexností a vysokou koordinovaností jedinců. Kolonie mravenců například společně zajišťuje potravu pro celou populaci, buduje hnízdo, stará se o potomky, či se brání před predátory. Pochopení tohoto chování by mohlo pomoci zdokonalit naše chápání řady biologických systému i nalézt řešení pro řadu zdánlivě vzdálených problémů, mezi něž patří například problém obchodního cestujícího¹. S ohledem na množství jedinců, komplexnost přirozeného prostředí a nepřesnost měřících zařízení je však exaktní studium chování a organizace těchto kolonií velmi komplikované a často značně nepřesné. V důsledku nárustu výpočetního výkonu se proto v současnosti pro studium takto komplexních dějů stále častěji využívají matematické modely^{2, 3, 4}.

V této práci navrhujeme a analyzujeme jednoduchý multiagentní model mravenčí kolonie zaměřený na problematiku shánění potravy. Model je založen na komunikaci mravenců pomocí vypouštění a detekce rozdílných hladin feromonu v prostředí. Z velké části je návrh modelu inspirován prací⁵, jenž studuje formování transportních drah plísně *Physarum polycephalum*⁶. V analytické části porovnáváme chování mravenců a jejich úspěšnost při sběru potravy v různě strukturovaných prostředích. Dále zkoumáme závislosti počtu jedinců a jejich schopnosti dopředu detekovat cílovou destinaci na celkovém množství potravy dopraveného do hnízda v průběhu simulace.

2 Matematický model

Při návrhu modelu jsme se zaměřili především na jednoduchou architekturu s malým množstvím snadno pochopitelných parametrů pro jednodušší analýzu fungování modelu. Ideálně by měl model zachytit kolektivní

chování mravenců při hledání potravy. Mravenci by měli být schopni jednoduchou lokální signalizací pomocí vypouštění feromonu co nejvíce optimalizovat trasu pro zásobování hnízda potravou. V modelu je dále možné zkoumat různé varianty map s různě rozmístěnými překážkami, hnízdy i potravou. Podrobnější popis modelu je k nahlédnutí v části 5.1.

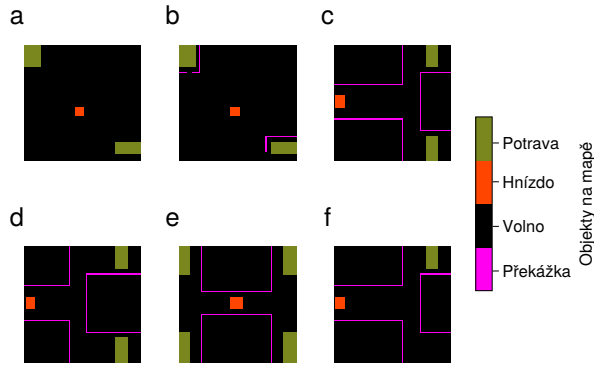
3 Výsledky

V analýze modelu jsme se zaměřili především na chování mravenců v různých variantách prostředí. Dále jsme se zaměřili na závislost počtu jedinců (parametr n) a maximální vzdálenosti pro detekci hledaného objektu (parametr d). Zbylé parametry jsme zvolili pevně na základě porovnávání výsledků pro různé varianty hodnot (podrobnější popis volby parametrů je k nahlédnutí v části 5.3).

3.1 Varianty prostředí

Pro analýzu modelu jsme zvolili celkem 6 variant mapy s účelem otestovat chování modelu v prostředích s odlišnou charakteristikou. Zvolili jsme jednotnou velikost mřížky prostředí, jež je rovna 100×100 . Jednotlivé varianty se liší rozmístěním zdrojů potravy, mraveniště a překážek v prostředí.

Základní varianta prostředí (ozn. jako **var-0**), jež je použita také pro výběr parametrů, neobsahuje žádnou překážku. Prostředí obsahuje jediné mraveniště umístěné přibližně uprostřed mapy a dva zdroje potravy umístěné v rozích mapy na společné diagonále. Zdroje potravy se od sebe mírně liší vzdáleností od hnízda a velikostí. Další varianta (ozn. **var-1**) je téměř identická vůči variantě **var-0**. Liší se však v obklopení téměř celého zdroje potravy překážkami s pouze malým prostorem pro vstup mravenců. Následující varianta (ozn. **var-2**) je jednoduché symetrické bludiště s hnízdem na levém



Obrázek 1: Varianty prostředí modelu: Zobrazení variant prostředí modelu použitých v experimentech. Barevně rozlišujeme objekty v prostředí (viz. legenda). **a** Varianta **var-0**, **b** varianta **var-1**, **c** varianta **var-2**, **d** varianta **var-3**, **e** varianta **var-4**, **f** varianta **var-5**.

konci. Okolí hnízda je ohraničeno překážkami, jež vytváří podélný průchod pro mravence směrem k potravě. V pravé části mapy je koncipováno rozdvojení na jejichž koncích jsou zdroje potravy. Úsek od rozdvojení k potravě je výrazně kratší než od hnízda k rozdvojení. Velmi podobné je rozložení další varianty (**var-3**). Liší se od **var-2** pouze ve vzdálenosti hnízda od rozdvojení, která je kratší, a vzdálenostmi rozdvojení od zdrojů potravy, které jsou delší. Další z variant (ozn. jako **var-5**) je v rozložení téměř totožná jako **var-2**. Liší se pouze v absenci jednoho ze zdrojů potravy. Poslední varianta (ozn. jako **var-4**) je koncipována jako průchod ve středu mapy s konci obsahujícími zdroje potravy. Hnízdo je umístěno ve středu mapy a je podélně ohraničeno překážkami vytvářející průchod. Na levém a pravém konci mapy jsou umístěny zdroje potravy. Obrázek 1 nabízí grafické znázornění rozložení variant prostředí.

3.2 Porovnání variant prostředí

V rámci kontroly správného fungování modelu a pochopení strategie chování mravenců jsme nejprve spustili 4000 iterací simulace modelu na všech variantách prostředí pro 400 mravenců (parametr n) a pro maximální vzdálenost detekce 10 (parametr d). Hodnoty parametrů n a d jsme volili tak, aby problém sbírání potravy nebyl příliš jednoduchý a nezajišťoval vždy téměř stoprocentní sesbírání potravy (vysoké hodnoty parametrů n a d). Zároveň však požadujeme, aby chování mravenců nebylo příliš náhodné (příliš nízké hodnoty parametrů n a d). Na základě opakovaného běhu simulací modelu a animací chování simulace pro různé hodnoty parametrů n a d jsme se rozhodli pro volbu parametrů popsanou výše. Zbylé parametry jsme nastavili na hodnoty, jež jsou popsány v části 5.4.

S takto zvolenými parametry jsme následně pozorovali chování modelu na základě rozložení hladin feromonů a animací pohybu mravenců v různých variantách prostředí. Na obrázcích 2, 3 a 4

mužeme nahlédnout na rozložení hladin feromonů na různých pozicích v daných prostředích po 300, 1000 a 4000 iteracích simulace modelu. Pro lepší pochopení je vhodné porovnat tyto obrázky s návrhy jednotlivých prostředí znázorněných na obrázku 1.

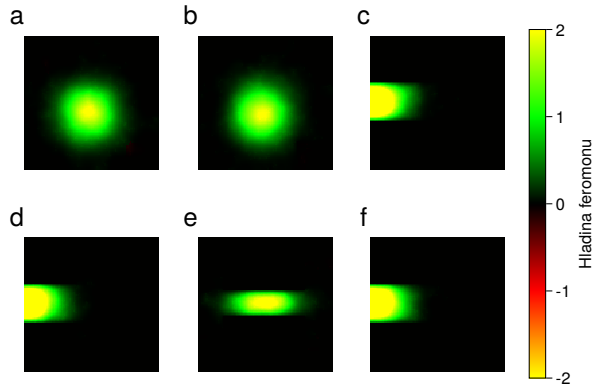
Téměř u všech variant prostředí pozorujeme vyšší koncentraci feromonu typu **food** v okolí hnízda a feromonu typu **nest** v okolí zdrojů potravy. Tato vlastnost je pravděpodobně dána vyšší koncentrací mravenců mřících k potravě v okolí hnízda (všichni mravenci vyražejí hledat potravu ze stejného mraveniště) a naopak vyšší koncentrací vracejících se mravenců v okolí zdroje potravy (z analogického důvodu jako v případě vyražejících mravenců).

Varianty **var-0** a **var-1** se liší pouze v rozestavení překážek okolo zdrojů potravy. Proto je rozložení hladin feromonů mezi těmito variantami především v počáteční fázi simulace velmi podobné (viz. obrázek 2a, b). Po uplynutí více iterací simulace však můžeme nahlédnout, že v případě varianty **var-1** je hladina feromonu typu **food** rovnoměrněji rozprostřena v prostředí než u varianty **var-0**, v níž jsou feromony koncentrovány více kolem optimálních cest mezi zdroji potravy a hnízdem (viz. obrázky 3a, b a 4a, b). Tuto skutečnost si odůvodňujeme vyšší mírou náhodného prohledávání prostředí mravenci v případě varianty **var-1**, jelikož nalezení cesty k potravě je náročnější z důvodu umístění překážky téměř okolo celého obvodu zdrojů potravy. Tato hypotéza je podpořena také animacemi simulací (viz. doplňové materiály S1, S2).

Podobně jako v předchozím případě stojí za zmínku porovnat chování podobných variant **var-2**, **var-3** a **var-5**. V případě 300 a 1000 iterací jsou tyto varianty od sebe téměř nerozlišitelné (viz. obrázky 2c, d, f a 3c, d, f). Po 4000 iteracích se však rozdíly v hladinách feromonů již výrazně odlišují (viz. 4c, d, f).

Při porovnání variant **var-2** a **var-5**, jež se liší pouze slepým ramenem ve variantě **var-5**, můžeme sledovat, že ve variantě **var-5** je pozorovatelně vyšší hladina feromonu typu **nest** v rameni se zdrojem potravy oproti oběma ramenům ve variantě **var-2**. Tato skutečnost vypovídá o vyšší koncentraci mravenců v rameni s potravou v porovnání s oběma rameny s potravou v případě **var-2** a je tedy i částečným potvrzením správného chování mravenců (očekáváme, že se budou spíše koncentrovat v okolí potravy než ve slepém rameni). Podobný jev lze pozorovat i v případě **var-3**, lišící se od **var-2** pouze v poměru jednotlivých délek ramen bludiště (křižovatka je blíže hnízdu a zdroje potravy dále od křižovatky). I v tomto případě jsou koncentrace feromonů přibližně stejné v obou větvích (mírný rozdíl v koncentracích přisuzujeme náhodnému výběru mezi větvemi, jenž je způsoben návrhem modelu).

Zajímavé je porovnání hladin feromonu typu **nest** mezi variantami **var-2** a **var-3** v ramenech se zdrojem potravy. V případě **var-2** je tato hladina výrazně nižší než v případě **var-3**. Tento jev je pravděpodobně způsoben rozdílnou délkou ramen. V případě kratších ramen se zdrojem potravy (**var-2**) mravenci velmi rychle zamíří ke křižovatce ramen, kde je typicky



Obrázek 2: Hladina feromonu po 300 iteracích simulace modelu: Kombinace hladin feromonů obou typů v různých variantách prostředí po 300 iteracích algoritmu. Absolutní hodnota hladiny feromonu značí součet hladin obou variant feromonů. Znaménko hladiny feromonu je dáno feromonem s vyšší koncentrací (záporné (červené odstíny) - vyšší koncentrace feromonu typu *nest* (navrácející se mravenci), kladné - více feromonu typu *food* (hledající potravu)). Oblasti se žlutým odstínem jsou oblasti s vysokou koncentrací obou typů feromonů. **a** Varianta *var-0*, **b** varianta *var-1*, **c** varianta *var-2*, **d** varianta *var-3*, **e** varianta *var-4*, **f** varianta *var-5*.

vyšší koncentrace feromonu, protože se zde slévají hladiny feromonu mravenců navrácejících se z obou ramen. Naopak v případě delších ramen s potravou (*var-3*). Nejsou mravenci tak silně přitahováni ke křižovatce a mohou tvořit cyklické skupinky navzájem se ovlivňujících vracejících se mravenců v jednotlivých ramenech.

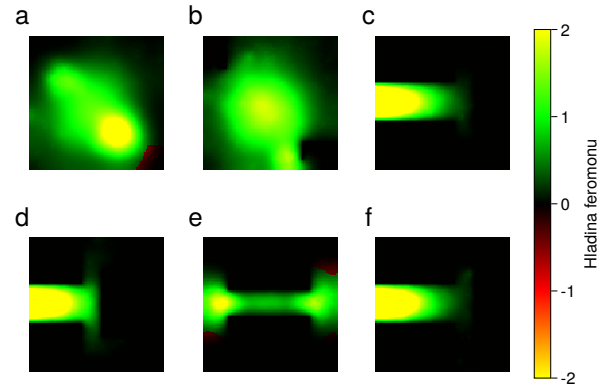
Problém vzniku cyklických skupinek navzájem se ovlivňujících mravenců lze také pozorovat u variant *var-2*, *var-3* i *var-5* v místě křižovatky ramen, kde je typicky vysoká koncentrace jak feromonu typu *nest*, tak i typu *food*, což svědčí o velké koncentraci mravenců navrácejících se do hnízda i hledajících potravu. Popsané vlastnosti chování mravenců ve variantách *var-2*, *var-3* a *var-5* jsou podpořeny také i animacemi simulací (viz. doplňové materiály S3, S4, S6).

Poslední varianta *var-4* prokazuje podobné vlastnosti jaké jsme již popisovali v předchozích variantách *var-2*, *var-3* a *var-5*. Můžeme zde však ještě výrazněji nahlédnout na tvoření cyklických skupinek navrácejících se mravenců, jež je způsobeno větším množstvím zdrojů potravy, menšími skupinkami mravenců v jednotlivých větvích a tedy také větším vlivem mezi jednotlivými mravenci (viz. obrázky 2e, 3e a 4e a doplňové materiály S5).

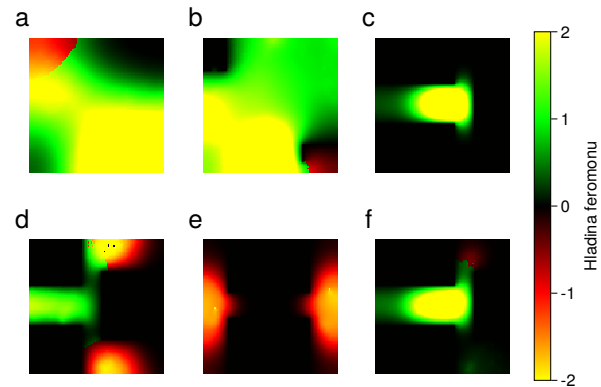
3.3 Různý počet mravenců

Jedním ze zkoumaných parametrů byl počet mravenců v modelu (parameter n), který jsme zkoumali při nastavení parametrů modelu popsaném v části 5.4 a pro parametr maximální hloubky detekce s hodnotou $d = 10$.

Nahlédli jsme, že volba parametru n výrazně



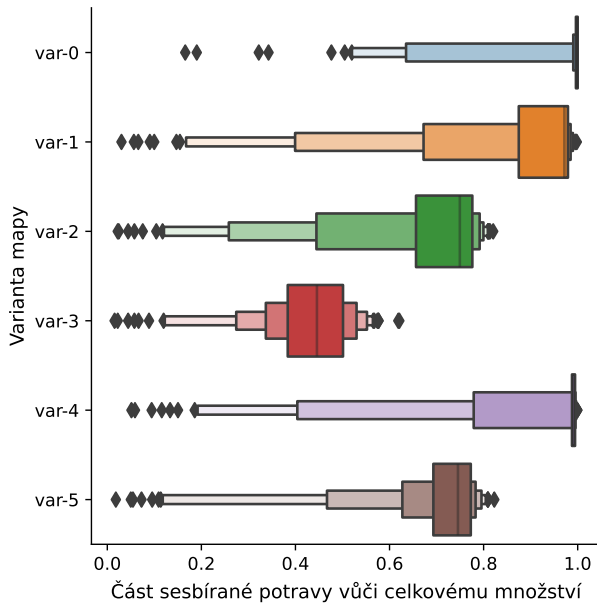
Obrázek 3: Hladina feromonu po 1000 iteracích simulace modelu: Kombinace hladin feromonů obou typů v různých variantách prostředí po 1000 iteracích algoritmu. Význam hladiny feromonu je podrobněji popsán v popisku obrázku 2. **a** Varianta *var-0*, **b** varianta *var-1*, **c** varianta *var-2*, **d** varianta *var-3*, **e** varianta *var-4*, **f** varianta *var-5*.



Obrázek 4: Hladina feromonu po 4000 iteracích simulace modelu: Kombinace hladin feromonů obou typů v různých variantách prostředí po 4000 iteracích algoritmu. Význam hladiny feromonu je podrobněji popsán v popisku obrázku 2. **a** Varianta *var-0*, **b** varianta *var-1*, **c** varianta *var-2*, **d** varianta *var-3*, **e** varianta *var-4*, **f** varianta *var-5*.

neovlivňuje množství sesbírané potravy v různých variantách prostředí (viz. obrázek 5). Můžeme také usuzovat, že v případě proměnlivého parametru n jsou nejobtížnější varianty pro sesbírání potravy varianty *var-2*, *var-3* a *var-5*. Naopak v případě variant *var-0*, *var-1* a *var-4* jsou v průměru sesbírány téměř veškeré zásoby potravy v prostředí. Překvapivé jsou především výsledky pro *var-4*, které prokazují dokonce lepší výsledky než v případě *var-1*. Tento fakt je částečně v rozporu s poznatky z části 3.2, které odhadovaly zacyklení mravenců v okolí křižovek a pravděpodobně také snížení celkového množství sesbírané potravy (část mravenců by vlivem zacyklení nikdy nedorazila do cíle). Důvodem rozdílných výsledků je pravděpodobně vyšší počet mravenců v průměrném případě oproti zkoumanému počtu $n = 400$ ve zmíněné části.

Poznatky zmíněné výše jsou také podpořeny



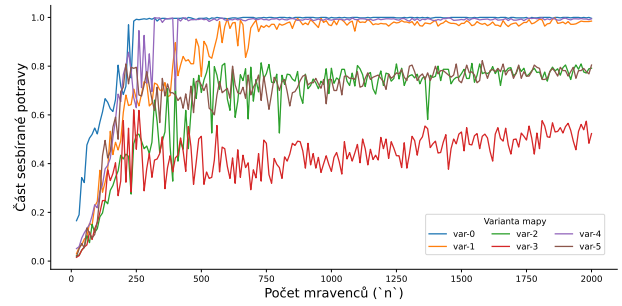
Obrázek 5: Porovnání množství sesbírané potravy mezi variantami mapy s proměnlivým počtem mravenců: Znázornění distribuce množství sesbírané potravy mravenci při různém počtu mravenců (parametr n).

závislosti sesbírané potravy na počtu mravenců při různých variantách (viz. obrázky 6 a 7). Na základě těchto závislostí můžeme nahlédnout, že při hodnotě parametru n okolo hodnoty 500 a výše, již téměř nedochází k nárůstu sesbírané potravy. Typicky buď dochází k sesbírání veškeré potravy, nebo k ustálení na určité části celkového počtu a zbylou část potravy téměř není možné sesbírat ani s vyšší počtem mravenců. K tomuto jevu dochází především při již zmíněných variantách **var-2**, **var-3** a **var-5**, zde pravděpodobně dochází k zacyklení části navracějících se mravenců na křižovatkách ramen a tím pádem k nemožnosti dopravit potravu do hnízda. Nejhuře v tomto ohledu dopadla varianta **var-3** s delšími rameny ke zdrojům potravy, kde pravděpodobně dochází k zacyklení mravenců ještě v jednotlivých ramenech. Nedosáhnou tak často ani křižovatky, kde je vyšší šance odtržení od cyklické skupinky a návratu do hnízda, jelikož je hnízdo v křižovatce blíže a není schováno za překážkou. Je tak možné, že bude v dostatečné blízkosti pro detekci mravencem a jeho odtržení od vlivu dalších mravenců. Dalším ze zajímavých poznatků je vyšší závislost na parametru n ve variantě **var-1**, způsobena pravděpodobně malým prostorem pro průchod mravenců k překážce.

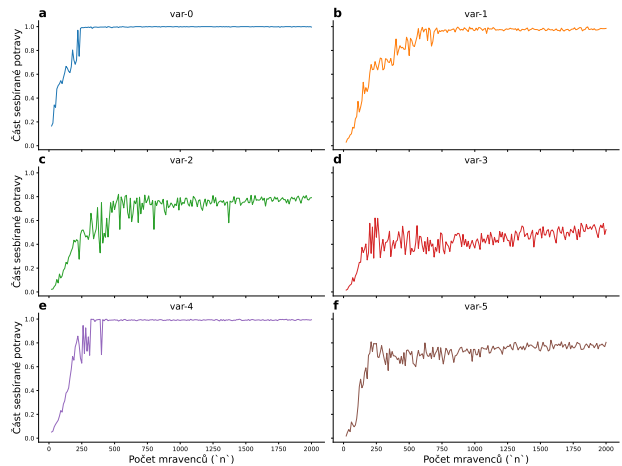
3.4 Různá vzdálenost detekce objektu

Posledním zkoumaným parametrem je závislost maximální vzdálenosti pro detekci cílového objektu (potrava, hnízdo) (parametr d). Nastavení parametrů je podrobněji popsáno v části 5.4. Počet mravenců jsme zvolili $n = 400$.

Na rozdíl od parametru n je množství sesbírané potravy především ve variantách **var-4** a **var-5** výrazně



Obrázek 6: Množství sesbírané potravy v závislosti na počtu mravenců: Porovnání závislostí množství sesbírané potravy na počtu mravenců n mezi variantami prostředí.



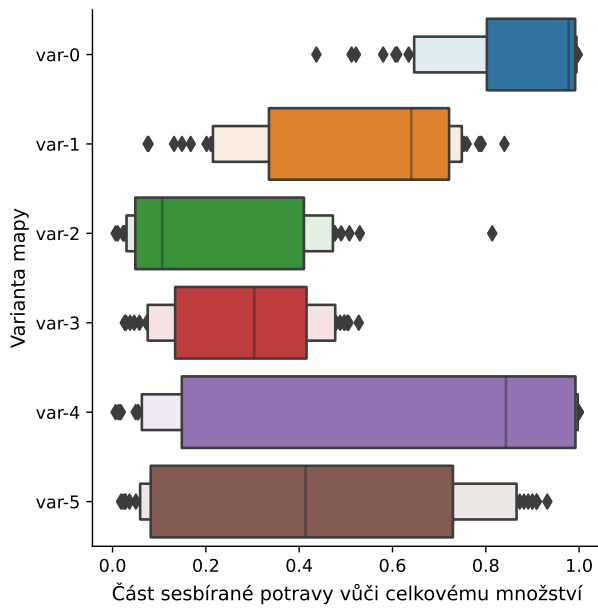
Obrázek 7: Množství sesbírané potravy v závislosti na počtu mravenců: Závislosti množství sesbírané potravy na počtu mravenců n při různých variantách prostředí. **a-f** Znázornění výsledků pro jednotlivé varianty prostředí, jejichž název je popsán v příslušném grafu.

závislé na volbě parametru d (viz. obrázek 8). Na základě průměrného množství sesbírané potravy dopadla nejhuře varianta **var-2** následována **var-3** a **var-5**.

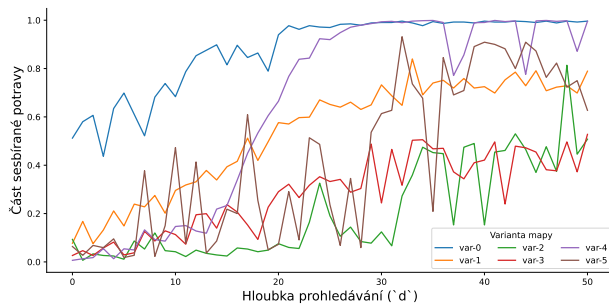
Závislost parametru d na množství sesbírané potravy můžeme sledovat u všech variant prostředí (viz. obrázky 9 a 10). Zvláštní chování můžeme sledovat v případě varianty **var-5**, v níž množství sesbírané potravy výrazně osciluje v závislosti na d (viz. obrázek 10) a oproti podobným variantám **var-2** a **var-3** se značně odlišuje a v průměru jsou výsledky při této variantě lepší. Tuto skutečnost si odůvodňujeme slepým ramenem, tedy také vyšší koncentrací mravenců mířících stejným směrem a tedy vyšší šancí následování správné cesty (nerozdělí se k různým zdrojům potravy).

4 Diskuze

Navržený model dokázal ve většině případů vhodně simulovat kolektivní chování mravenců s rozumnou úspěšností sesbírání potravy. Během analýzy jsme narazili na významnou závislost volby zkoumaného prostředí a nastavení parametru maximální vzdálenosti



Obrázek 8: Porovnání množství sesbírané potravy mezi variantami mapy s proměnlivou hloubkou prohledávání: Znázornění distribuce množství sesbírané potravy mravenci při různé maximální vzdálenosti detekce cílového objektu (parametr d).



Obrázek 9: Množství sesbírané potravy v závislosti na hloubce prohledávání: Porovnání závislosti množství sesbírané potravy při různé maximální vzdálenosti detekce cílového objektu (parametr d).

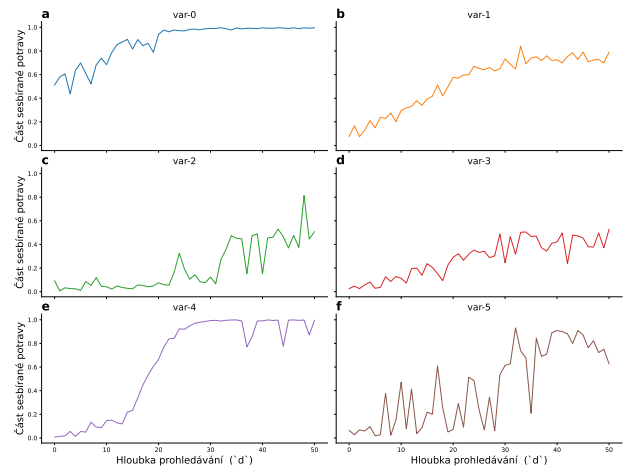
detekce hledaného objektu (parametr d). Podrobnější zaměření na tyto parametry by mohlo být předmětem zkoumání navazujících prací.

Dále jsme upozorovali častý vznik navzájem se ovlivňujících skupinek mravenců vedoucí k zacyklení pohybu mravenců, jež vedlo k významnému poklesu kvality chování mravenců. Eliminace vzniku tohoto fenoménu v modelu by mohlo vést k výraznému nárůstu kvality chování mravenců. Pravděpodobným řešením problému by mohlo být nalezení vhodnější kombinace parametrů modelu, či přidání funkcionality modelu ošetřující tyto problematické situace.

5 Metody

5.1 Návrh modelu

Model staví na návrhu z práce⁵ modelující formování transportních drah plísně *Physarum polycephalum*⁶ po-



Obrázek 10: Množství sesbírané potravy v závislosti na hloubce prohledávání: Závislosti množství sesbírané potravy při různé maximální vzdálenosti detekce cílového objektu (parametr d). a-f Znázornění výsledků pro jednotlivé varianty prostředí, jejichž název je popsán v příslušném grafu.

Proměnná	Popis
map_object	Objekt v buňce (možnosti: volno, překážka, potrava, hnízdo).
food_pheromone	Hladina feromonu pro sběr potravy.
nest_pheromone	Hladina feromonu pro návrat do mraveniště.

Tabulka 1: Seznam proměnných jedné buňky mapy simulace.

mocí chemotaxe. Tento model jsme zvolili, jelikož je založen na podobných principech jako námi zkoumaný problém.

Použili jsme multiagentní model v diskretním prostředí. Prostředí reprezentujeme pravidelnou 2D mřížkou, v níž každá buňka odpovídá pozici v simulovaném prostředí a je popsána množinou odpovídajících proměnných popsanych v tabulce 1. V prostředí jsou vždy omezené zásobárny potravy, kde každá buňka s potravou odpovídá množství zásob, které je schopen přepravit jeden mravenec. Pokud tedy mravenec sebere potravu z dané buňky, pak se veškeré zásoby potravy v buňce vyčerpají a stane se prázdnou. Naopak předpokládáme, že všechny buňky náležící hnízdu mají neomezenou kapacitu a je v nich možné nashromáždit neomezené množství potravy.

Agenti reprezentují jednotlivé mravence a jsou náhodně vygenerováni v mraveništích na začátku simulace. Jejich počet je dán parametrem `num_ants` a v průběhu simulace je již neměnný. Jsou charakterizováni pozicí na mapě, orientací a příznakem, zda hledají potravu, nebo se s ní vrací do mraveniště. Každý agent v každém kroku simulace provede následující posloupnost akcí:

1. Podle svého stavu zkontroluje, zda se nachází u

zdroje potravy (resp. v mraveništi). Pokud ano, pak sebere jednotku potravy (resp. vyloží ji v mraveništi) a náležitě změní stav.

2. Přesune se na novou pozici.
3. Vypustí jednotku odpovídajícího feromonu na nové pozici.

Mravenec má v každém kroku simulace pouze 3 možné varianty posunu, které jsou posun o 1 pozici vpřed, doleva nebo doprava. Z výběru jsou vyřazeny pozice s překážkami a vedoucí mimo mapu. Jestliže není ani jeden ze zmíněných pohybů možný, pak agent uniformě náhodně zatočí doleva, nebo doprava. V opačném případě je nová pozice náhodně zvolena z vážené distribuce, v níž je váha možné nové pozice p agenta a rovna:

$$weight(p, a) = pheromone(p, a) + c \quad (1)$$

Kde *pheromone* je funkce, jejíž hodnota je rovna hladině odpovídajícího feromonu na pozici p . Odpovídající hladina feromonu je dána stavem agenta a . Pokud mravenec hledá potravu, pak sleduje hladiny **food** feromonu, v opačném případě **nest** feromonu. Parametr c slouží jako faktor pro snížení vlivu hladiny feromonu na volbě nové pozice. Navíc pokud je mravenec dostatečně blízko cílovému objektu v alespoň jednom z možných směrů pohybu (rovně, vlevo nebo vpravo) a přímá cesta k cílovému objektu není blokována překážkou, pak se vždy posune směrem k tomuto objektu (viz. parametr d v tabulce 2).

Pro komunikaci mravenců používáme dvě varianty feromonů. Jeden pro označení cesty ke zdroji potravy, druhý pro signalizaci cesty do mraveniště. Každý mravenec v každé iteraci simulace vypustí na aktuální pozici, buď feromon typu **food**, pokud hledá potravu, nebo **nest**, pokud se s potravou vrací do hnízda. Aby nedocházelo k hromadění feromonu, je koncentrace feromonu na dané pozici shora omezena a v případě překročení hranice již nelze hladinu feromonu dále zvyšovat. Vyprchávání feromonu v čase je realizováno následující diferencí rovnicí:

$$level_p(t+1) = \begin{cases} level_p(t) - f & level_p(t) > f \\ 0 & level_p(t) \leq f \end{cases} \quad (2)$$

Kde $level_p(t)$ značí hladinu feromonu (platí stejná rovnice pro oba typy feromonů) na pozici p v čase t a f udává rychlost vyprchávání feromonu.

Dále je v každém kroku simulace část koncentrace feromonu na libovolné pozici p rovnoměrně difundována do Moorova okolí p z nějž jsou vyřazeny neplatné pozice (mimo mapu nebo překážky), množství difundovaného feromonu je dáno příslušným parametrem.

Tabulka 2 obsahuje podrobnější popis parametrů modelu.

Parametr	Popis
$n \in \mathbb{N}$	Počet mravenců v simulaci (num_ants).
$f \in (0, 1)$	Rychlost vyprchávání feromonu (pheromone_fade_rate).
$d \in \mathbb{N}_0$	Maximální vzdálenost pro detekování cílového objektu (search_depth).
$p \in (0, 1)$	Množství feromonu vypuštěného 1 mravencem (část maximální hladiny) (pheromone_power).
$r \in (0, 1)$	Část feromonu, jež se při difuzi rozprostře do sousedství (difusion_rate).
$c \in \mathbb{R}_0^+$	Parametr snížení vlivu feromonu (normalization_parameter).

Tabulka 2: Seznam parametrů modelu.

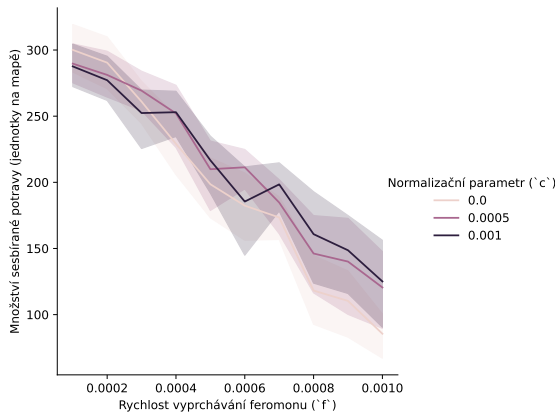
5.2 Analýza modelu

Veškeré zdrojové kódy implementace modelu a pro analýzu výsledků společně s výsledky experimentů a jejich podrobným nastavením jsou k nahlédnutí v githubovém repozitáři⁷. Model je naimplementován v jazyce Julia v prostředí Pluto, v němž je naimplementován také zdrojový kód pro běh experimentů a pro vytvoření animací výsledků simulací. Výsledky byly analyzovány za pomoci jazyku Python v prostředí Jupyter Lab.

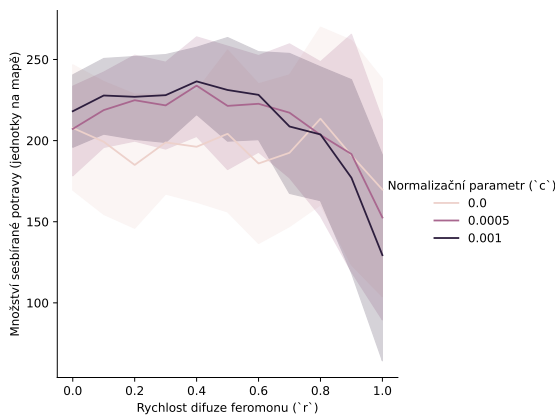
5.3 Výběr parametrů

V experimentech jsme se zaměřili pouze na vybrané parametry (viz. tabulka 2). Zbylé parametry jsme museli vhodně zvolit. Pro ohodnocení kvality volby parametrů jsme použili jako metriku množství sesbírané potravy v prostředí **var-0** (viz. část 3.1). Zkoumali jsme rychlost vyprchávání feromonu (parametr f), množství feromonu difundovaného do sousedství (parametr r) a míru vlivu feromonu (parametr c). Parametr určující množství feromonu vypuštěného jedním mravencem (parametr p) jsme zvolili pevně ($p = 0.02$), jelikož část vlastností tohoto parametru závisí na volbě parametru f (rychlostí vyprchávání feromonu f lze upravovat míru vlivu feromonu jednoho mravence v čase) a v rámci zjednodušení analýzy parametrů jsme se rozhodli pro pevnou hodnotu. Hlavním důsledkem volby parametru p je maximální kapacita hladiny feromonu, která v našem případě odpovídá množství feromonu vypuštěného 50 mravenci. Počet mravenců v simulacích jsme zvolili jako $n = 400$ a maximální vzdálenost detekování cílového objektu jako $d = 10$.

Výběr parametrů jsme rozdělili na 2 části. V první části jsme porovnávali množství potravy získané během 4000 iterací simulace s parametry s hodnotami v rozmezí $f \in (0.0001, 0.001)$ se sousedními hodnotami rozdílnými o 0.0001, $r \in (0, 1)$ s hodnotami odlišujícími se o 0.1 a $c \in (0, 0.001)$ s hodnotami odlišnými o 0.0005.



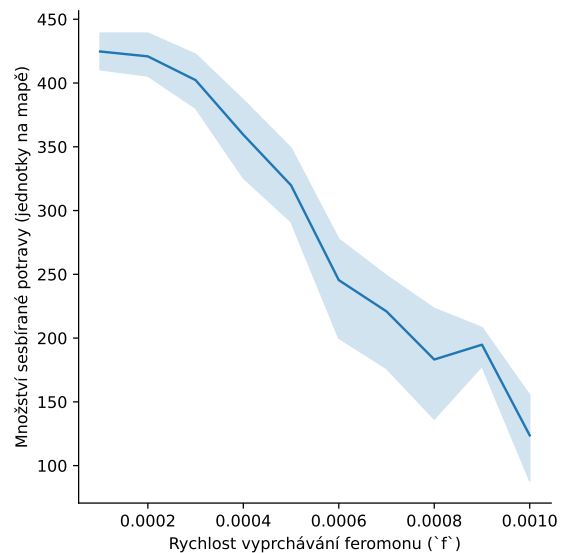
Obrázek 11: Množství sesbírané potravy v závislosti na parametrech 'f' a 'c': Množství sesbírané potravy je vyšší v případě částečně náhodného vlivu feromonu (varianty $c = 0.0005$ a $c = 0.001$). Množství sesbírané potravy klesá téměř lineárně s rostoucí rychlostí vyprchávání feromonu (parametr f).



Obrázek 12: Množství sesbírané potravy v závislosti na parametrech 'r' a 'c': Množství sesbírané potravy je vyšší v případě částečně náhodného vlivu feromonu (varianty $c = 0.0005$ a $c = 0.001$). Množství sesbírané potravy není téměř ovlivněno změnou rychlosti difuze (parametr r). Výrazný pokles pozorujeme až kolem hodnoty 0.8 a vyšší.

Z výsledků tohoto experimentu jsme vybrali 20 hodnot parametru c s nejvyšším počtem sesbírané potravy a spočítali jejich aritmetický průměr, jenž je roven 0.00045. Rozhodli jsme se zvolit mírně vyšší hodnotu $c = 0.0005$, jelikož výsledky pro hodnotu $c = 0.001$ prokazovaly v části případů lepší výsledky oproti nižším hodnotám, proto jsme také hodnotu parametru c mírně zvýšili. Na výsledky experimentu můžeme podrobněji nahlédnout na grafech 11 a 12.

V druhé části výběru parametru jsme se zabývali pouze volbou parametru rychlosti vyprchávání feromonu $f \in (0.0001, 0.001)$ se sousedními hodnotami rozdílnými o 0.0001 a rychlosti difuze $r \in (0, 1)$ s hodnotami odlišujícími se o 0.1. Porovnávali jsme množství sesbírané potravy za 8000 iterací simulace. S pevně zvolenými parametry jako v případě první části a dále s parametrem $c = 0.0005$, jehož hodnotu jsme odvodili v první části. Z výsledků jsme podobně jako



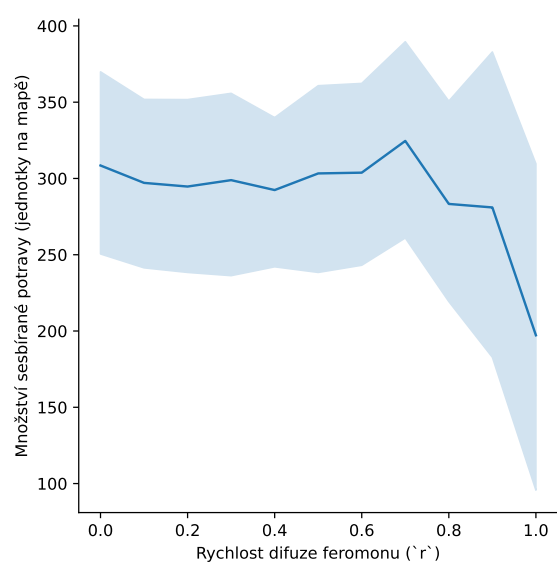
Obrázek 13: Množství sesbírané potravy v závislosti na rychlosti vyprchávání feromonu: Množství sesbírané potravy klesá téměř lineárně s rostoucí rychlostí vyprchávání feromonu (parametr f). Vyjímkou jsou hodnoty parametru f do 0.0002 u nichž je rozdíl téměř zanedbatelný.

v případě první části vybrali 20 variant s nejvyšším počtem nasbírané potravy a vypočítali aritmetický průměr hodnot parametru f a r . Vypočtené hodnoty jsou následující $f = 0.00021$ $r = 0.495$. Závislost vlivu parametru je srovnatelná s výsledky první části a je znázorněn grafy 13 a 14.

5.4 Popis experimentů

Hlavní část experimentů byla zaměřena na charakteristiku chování mravenců v různých variantách prostředí s různým počtem jedinců (parametr n v rozmezí (20, 2000) se sousedními hodnotami lišícími se o 10) a různou maximální vzdáleností pro detekci hledaného objektu (parametr d v rozmezí (0, 50) se sousedními hodnotami lišícími se o 1). V experimentech jsme se zaměřovali na poměr sesbírané potravy vůči celkovému počtu potravy na mapě po uplynutí 4000 iterací simulace v rámci zkoumání charakteristiky chování mravenců v různých prostředích a 8000 iterací pro zkoumání vlastností pro různé hodnoty parametru n a d . Na základě výběru parametru (viz. část 5.3) jsme pevně zvolili následující hodnoty zbylých parametru:

- $f = 0.00021$
- $p = 0.02$
- $r = 0.495$
- $c = 0.0005$



Obrázek 14: Množství sesbírané potravy v závislosti na rychlosti difuze feromonu: Množství sesbírané potravy není téměř ovlivněno změnou rychlosti difuze (parametr r). Výrazný pokles pozorujeme až kolem hodnoty 0.8 a vyšší.

References

- [1] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal, and W. J. Cook, in *The Traveling Salesman Problem* (Princeton university press, 2011).
- [2] A. Drogoul and J. Ferber, in *Artificial Social Systems: 4th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, MAA-MAW'92 S. Martino al Cimino, Italy, July 29–31, 1992 Selected Papers 4* (Springer, 1994), 2–23.
- [3] W. Xiang and H. P. Lee, Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **21**, 73 (2008).
- [4] S. Ilie and C. Bădică, Multi-agent approach to distributed ant colony optimization, *Science of Computer Programming* **78**, 762 (2013).
- [5] J. Jones, Characteristics of pattern formation and evolution in approximations of physarum transport networks, *Artificial life* **16**, 127 (2010).
- [6] A. Durham and E. Ridgway, Control of chemotaxis in physarum polycephalum., *The Journal of Cell Biology* **69**, 218 (1976).
- [7] D. Beinhauer, Ant Colony Model (2023), https://github.com/dbeinhauer/ant_colony_model/tree/main/source.

Doplňkové materiály

Elektronická verze práce obsahuje doplňové materiály obsahující animace simulací. Elektronická verze práce je dostupná na adrese https://github.com/dbeinhauer/ant_colony_model