



Zadání bakalářské práce

Název:	Hierarchické řízení rojů při evakuaci
Student:	Kristýna Janovská
Vedoucí:	doc. RNDr. Pavel Surynek, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Znalostní inženýrství
Katedra:	Katedra aplikované matematiky
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2021/2022

Pokyny pro vypracování

Cílem práce je navrhnout techniky pro řízení roje agentů v evakuačních scénářích, kdy je třeba mobilní agenty přesunout z ohrožené oblasti do bezpečí. Předpokládáme hierarchické řízení agentů, tj. někteří budou mít řídicí roli, zatímco jiní, typicky početnější a méně informovaní budou následovat řídicí agenty. Roj agentů je třeba řídit dostatečně robustně, aby nedocházelo k opouštění agentů následníků a evakuace byla celkově plynulá. Motivací pro úlohu je evakuace v prostředí školy, kdy řídicí agenti jsou učitelé a agenti následníci jsou děti. Úkoly jsou následující:

1. Prozkoumejte existující algoritmy pro multi-agentní hledání cest, řízení rojů a evakuaci.
2. Navrhněte hierarchický systém koordinace agentů, kde například řídicí agenty ovládá centrální algoritmus, zatímco agenti následníci budou řízení reflexně.
3. Navržený systém implementujte jako softwarový prototyp a ověřte jej v relevantních evakuačních scénářích co do úspěšnosti evakuace, tj. počtu zachráněných agentů.

[1] Róbert Selvek, Pavel Surynek: Engineering Smart Behavior in Evacuation Planning using Local Cooperative Path Finding Algorithms and Agent-based Simulations. KEOD 2019: 137-143

[2] Liang Chen, Tie-Qiao Tang, Ziqi Song, Hai-Jun Huang, Ren-Yong Guo: Child behavior during evacuation under non-emergency situations: Experimental and simulation results. Simul. Model. Pract. Theory 90: 31-44 (2019)

[3] Caroline Even, Victor Pillac, Pascal Van Hentenryck: Convergent Plans for Large-Scale Evacuations. AAAI 2015: 1121-1127



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Hierarchické řízení rojů při evakuaci

Kristýna Janovská

Katedra aplikované matematiky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Pavel Surynek, Ph.D.

27. června 2021

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu práce, panu doc. RNDr. Pavlu Surynkovi, Ph.D. za mnoho cenných rad, trpělivost a vedení, a také svým rodičům a příteli za všechnu jejich podporu, bez níž by tato práce nevznikla.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 2373 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů, tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu) licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 27. června 2021

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2021 Kristýna Janovská. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Janovská, Kristýna. *Hierarchické řízení rojů při evakuaci*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2021.

Abstrakt

V této práci se zabývám návrhem hierarchického systému koordinace agentů určeného pro simulaci evakuace. V práci rozeznávám dva typy agentů. Řídící agenti navzájem komunikují pomocí algoritmu konfliktového prohledávání a odvádějí své roje do bezpečné oblasti, zatímco agenti následníci následují svého řídicího agenta.

Představím několik modelů, které se liší jak chováním řídicích agentů vůči svým rojům, tak chováním agentů následníků, co se týče pokusu o samostatnou evakuaci.

V práci provádím experimenty, jejichž výsledky ukáží, jak úspěšnost evakuace ovlivňují parametry chování agentů. Výsledky těchto experimentů poukážou na výhody komunikace mezi řídicími agenty, problémy, které mohou při evakuaci nastat a jejich závislost na nevhodném chování agentů.

Klíčová slova Evakuace, multiagentní hledání cest, hierarchické řízení rojů, konfliktové prohledávání

Abstract

In this work I propose a hierarchical system of multi-agent coordination for simulating evacuations. I distinguish between two types of agents. Leaders communicate between themselves and escort their swarms to a safe location, while followers follow their leader. For this multi-agent path finding algorithms are used.

I propose multiple models varying both in leaders' behavior towards their respective swarms and followers' behavior considering their attempts at individual evacuation.

In the work I perform experiments, whose results will show how parameters of agents' behavior influence the success of an evacuation. Results of these experiments will point out advantages of communication between leaders, problems, that might occur during an evacuation and their connection to agents' inadequate behavior.

Keywords Evacuation, multi-agent pathfinding, hierarchical control of swarms, conflict-based search

Obsah

Úvod	1
1 Cíl práce	3
2 Teoretická východiska	5
2.1 Multiagentní model	5
2.2 Problém multiagentního hledání cest	5
2.3 Problém evakuace	7
2.4 Konfliktové prohledávání	8
2.5 Algoritmus A*	9
3 Související práce	13
4 Návrh evakuačního modelu	15
4.1 Informovanost agentů	15
4.1.1 Návrh architektury evakuačního multiagentního systému	15
4.1.2 Typy agentů	17
4.1.3 Návrh geometrie prostředí	17
4.2 Návrh agenta následníka	18
4.2.1 Analýza návrhu	18
4.2.2 Návrh	18
4.2.3 Nalezení překážky v zorném poli agenta	19
4.2.4 Pohyb agenta následníka	19
4.2.5 Problémy při návrhu	20
4.3 Návrh řídicího agenta	22
4.3.1 Analýza návrhu	22
4.3.2 Návrh	22
4.3.3 Prohledávací algoritmy pro řídicí agenty	22
4.3.3.1 Hledání konfliktů	22
4.3.3.2 Algoritmus A*	24

4.4	Modely chování agentů při evakuaci	24
4.4.1	Model A – Jednoduché následování	24
4.4.1.1	Hypotéza chování	25
4.4.2	Model B – Přiřazené skupiny	25
4.4.2.1	Hypotéza chování	25
4.4.3	Částečná informovanost agenta následníka	25
4.4.4	Model C – Letadlo	26
4.4.4.1	Hypotéza chování	26
5	Experimentální vyhodnocení	27
5.1	Volby způsobu realizace konfliktového prohledávání	27
5.1.1	Omezení hloubky stromu konfliktů	27
5.1.2	Zpracování výsledného vrcholu	27
5.2	Scénáře počátečních pozic agentů	28
5.2.1	Vyučovací hodina	28
5.2.2	Přestávka	28
5.2.3	Náhodné rozdělení agentů	29
5.2.4	Letadlo	29
5.3	Experimentální úpravy parametrů	31
5.3.1	Parametry speciální pro model B	32
5.4	Zkoumané prvky mapy	32
5.5	Hodnocení úspěšnosti pro jednotlivé modely	32
5.6	Experimenty	33
5.6.1	Počáteční experiment	33
5.6.2	Porovnání vývoje evakuace v modelech A a B s částečně informovanými agenty následníky	35
5.6.3	Porovnání vývoje evakuace v modelech A a B s neinformovanými agenty následníky	37
5.6.4	Porovnání modelů A a B v závislosti na částečné informovanosti agentů následníků	38
5.6.5	Vliv počtu agentů na úspěšnost evakuace	39
5.6.6	Vývoj účelové funkce v závislosti na počtu evakuovaných agentů	41
5.6.7	Vývoj účelové funkce a jejích odchylek v závislosti na počtu evakuovaných agentů	43
5.6.8	Vliv minimální velikosti roje η na rychlost evakuace	45
5.6.9	Vliv kombinace parametrů η a γ na rychlost evakuace	46
5.6.10	Vývoj evakuace v závislosti na parametru ϕ	48
5.6.11	Vývoj evakuace v závislosti na parametru β	50
5.6.12	Vývoj průměrného času evakuace v závislosti na parametru α	51
5.6.13	Vývoj evakuace v závislosti na počtu únikových východů θ	53
5.6.14	Vývoj evakuace v závislosti na šířce únikových cest ι	56
5.6.15	Vývoj evakuace v závislosti na prostředí	57
5.6.16	Vývoj evakuace v závislosti na scénáři	60

5.6.17	Vývoj času evakuace v závislosti na počtu agentů – model A	61
5.6.18	Vývoj evakuace v závislosti na scénáři – model A	63
5.6.19	Vývoj evakuace v závislosti na prostředí – model C	64
5.6.20	Vývoj evakuace v závislosti na počtu agentů – model C	66
5.6.21	Shrnutí výsledků	67
Závěr		69
Literatura		71
A Seznam použitých zkratk		75
B Obsah přiloženého média		77

Seznam obrázků

2.1	Vizualizace grafu, na kterém probíhá multiagentní hledání cest	6
4.1	Vizualizace mapy s agenty	15
4.2	Agenti následníci nevidí řídicího agenta	16
4.3	Agenti následníci vidí řídicího agenta	17
4.4	Obr. 4 - Návrh reflexního agenta (přepřacováno na základě [2])	18
4.5	Agent následník F_1 nevidí na řídicího agenta L přes agenta následníka F_2 . .	19
4.6	Shlukování agentů následníků v diskretním prostředí s přímou vzdáleností . .	21
4.7	Návrh agenta s cílem a modelem prostředí (přepřacováno na základě [2]) . . .	23
5.1	Rozmístění agentů při scénáři „vyučovací hodina“	29
5.2	Rozmístění agentů při scénáři „přestávka“	30
5.3	Náhodné rozmístění agentů	30
5.4	Rozmístění agentů při scénáři „letadlo“	31
5.5	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B	34
5.6	Mapa použitá při experimentu	34
5.7	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B	35
5.8	Mapa použitá při experimentu	35
5.9	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B	37
5.10	Mapa použitá při experimentu	37
5.11	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase	39
5.12	Mapa použitá při experimentu	39
5.13	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase	40
5.14	Mapa použitá při experimentu	40
5.15	Graf závislosti procent evakuovaných agentů na čase	40
5.16	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů	42
5.17	Mapa použitá při experimentu	42
5.18	Mapa použitá při experimentu	43
5.19	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů	44
5.20	Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase	45

5.21	Mapa použitá při experimentu	45
5.22	Mapa použitá při experimentu	47
5.23	Graf závislosti času evakuace na parametrech η , γ_L a γ_F	47
5.24	Vývoj evakuace v závislosti na konfliktní vzdálenosti řídicích agentů ϕ	49
5.25	Mapa použitá při experimentu	49
5.26	Graf vývoje evakuace v závislosti na parametru β	50
5.27	Mapa použitá při experimentu	50
5.28	Graf průměrného času evakuace v závislosti na parametru α	52
5.29	Mapa použitá při experimentu	52
5.30	Vizualizace nastalého problému	53
5.31	Použitá mapa s vyznačenými možnými únikovými cestami	54
5.32	Vývoj evakuace v závislosti na počtu únikových východů	55
5.33	Použitá mapa s vyznačenou chodbou, jejíž šířka byla testována	56
5.34	Vývoj evakuace v závislosti na parametru ι	57
5.35	Mapa building1.4.map	58
5.36	Mapa building2.map	58
5.37	Mapa building3.map	58
5.38	Vývoj evakuace v závislosti na prostředí	59
5.39	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů	60
5.40	Mapa použitá při experimentu	60
5.41	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů a mapa použitá při experimentu	62
5.42	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů	63
5.43	Mapa použitá při experimentu	63
5.44	Mapa plane1.map	64
5.45	Mapa plane2.map	64
5.46	Mapa plane3.map	64
5.47	Graf závislosti procent evakuovaných agentů na čase	65
5.48	Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů a mapa použitá při experimentu	66

Úvod

Problém evakuace provází lidstvo od jeho samého počátku – nebezpečí číhá na každém rohu, a ne vždy je možné se mu vyhnout, ať už se jedná o požáry budov či zemětřesení. Metodiky evakuací se zabývají nalezením takového postupu při nebezpečné situaci, při němž se zachrání co nejvíce lidí. Jak ale můžeme určit, který způsob evakuace je ten nejlepší?

Multiagentní systémy umožňují simulovat různé situace z reálného života, mezi něž evakuace patří. Pomocí algoritmů hledání cest a dalších metod lze simulovat průběh různých scénářů evakuací a na základě těchto pozorování určit, která metodika se do daného scénáře hodí nejvíce.

Tato práce se zaměřuje na simulace evakuace pomocí hierarchického rojení. Motivací jsou mi evakuace ve školním prostředí a v letadlech. Mým úkolem je tyto situace realisticky modelovat a určit, jaký postup by při takové situaci bylo nejvhodnější zaujmout. Ukážu několik modelů, které se budou lišit chováním agentů. Tyto modely budu porovnávat a ladit parametry chování agentů, abych určila nejúspěšnější průběh evakuace.

Navazuji na práci Bc. Róberta Selveka, *Engineering Smart Behavior in Evacuation Planning using Local Cooperative Path Finding Algorithms and Agent-based Simulations*. Na rozdíl od této práce se však zabývám modely, kdy mezi agenty existuje jistá hierarchie. Agenti s vyšším postavením – řídicí agenti navzájem komunikují a postupují pomocí globálně zaměřených algoritmů, přičemž kolem sebe udržují roj agentů s nižším postavením – agentů následníků, které lokálně řídí a navádí do bezpečné oblasti.

Tento postup doposud nebyl podrobně prozkoumán a doufám, že vyústí v přínos ve zvýšení efektivity evakuací ve specifických situacích, kde se takový model jeví jako realistický – pro příklad uvádím již výše zmíněné prostředí školy.

V teoretické části práce se budu zabývat vysvětlením teoretických východisek práce – problému multiagentního hledání cest, důležitých algoritmů a principů evakuace samotné. Na to navážu popisem experimentálního prostředí, návrhu agentů a modelů evakuace. Poté již vysvětlím provedené modifikace užitých algoritmů a budu se věnovat prováděným experimentům a porovnávání jednotlivých modelů.

Cíl práce

Hlavním cílem práce je realisticky simulovat evakuace při scénáři, jehož motivací je evakuace ve školním prostředí či v letadlech. Tohoto bude dosaženo za pomoci algoritmů pro multiagentní hledání cest a metod hierarchického řízení rojů.

Budou prozkoumány existující algoritmy multiagentního hledání cest a řízení rojů a navržen systém simulující průběh evakuace. Tento systém bude implementován jako softwarový prototyp.

Na základě vytvořených modelů evakuace budou provedeny experimenty, podle nichž bude navrženo nastavení parametrů evakuace, které bude mít za výsledek co neúspěšnější evakuaci.

Teoretická východiska

2.1 Multiagentní model

Multiagentní model se skládá ze souboru autonomních entit – agentů, kteří na základě daných pravidel zpracovávají přicházející vjemy z prostředí kolem sebe a v závislosti na tom konají rozhodnutí. [1]

Agent se skládá ze dvou základních částí – architektury a agentního programu. Architektura ukládá informace o prostředí okolo agenta. Vnímá prostředí pomocí senzorů a tyto vjemy odesílá agentnímu programu. Agentní program pak implementuje agentní funkci, která na základě přijatých vjemů rozhodne o akci, kterou by měl daný agent provést. Tuto akci pak předá zpátky architektuře, která pomocí svých aktuátorů danou akci provede. [2]

2.2 Problém multiagentního hledání cest

Problém multiagentního hledání cest je problém rozhodnutí existence posloupnosti pohybů – cest pro množinu agentů pohybujících se na neorientovaném grafu $G = (V, E)$, kde V je množina vrcholů a E je množina neorientovaných hran. [3] Tato množina cest je nekonfliktní, tedy se ve stejném vrcholu grafu nesejde najednou více agentů – kromě cílového vrcholu. V tomto případě se graf tvoří na základě dvou-rozměrné mřížky, po níž se agenti pohybují.

Definice 1 Multiagentní hledání cest Nechť $G = (V, E)$ je neorientovaný graf a $R = \{r_1, r_2, \dots, r_v\}$ množina agentů, $v < |V|$.

Počáteční konfiguraci agentů nazveme prostou funkcí $S_R^0 : R \rightarrow V$, $S_R^0(r) \neq S_R^0(s)$ pro každé $r, s \in R, r \neq s$.

Cílovou konfiguraci agentů nazveme prostou funkcí $S_R^+ : R \rightarrow V$, $S_R^+(r) \neq S_R^+(s)$ pro každé $r, s \in R, r \neq s$.

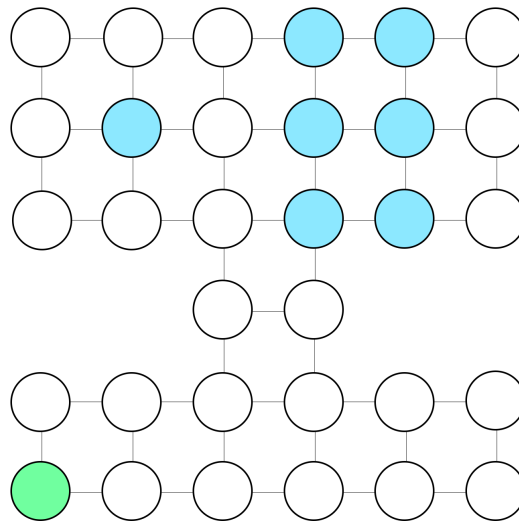
Problém multiagentního hledání cest je problém nalezení čísla ζ a posloupnosti $S_R = [S_R^0, S_R^1, \dots, S_R^\zeta]$, kde $S_R^k : R \rightarrow V$ je prostá funkce pro každé $k = 1, 2, \dots, \zeta$. Pro posloupnost platí následující podmínky:

- (i) $S_R^\zeta = S_R^+$; tedy všichni agenti dorazí do svých cílových vrcholů.
- (ii) Bud' $S_R^k(r) = S_R^{k+1}(r)$, nebo $\{S_R^k(r), S_R^{k+1}(r)\} \in E$ pro každé $r \in R$ a $k = 1, 2, \dots, \zeta - 1$; tedy agent může mezi dvěma časovými kroky buď zůstat ve vrcholu, nebo se přesunout do sousedního vrcholu.
- (iii) Jestliže $S_R^k(r) \neq S_R^{k+1}(r)$ (agent r mezi časovými kroky k a $k + 1$ provede pohyb) a $S_R^k(s) \neq S_R^{k+1}(r) \forall s \in R$ takové, že $s \neq r$ (tedy žádný jiný agent s se v časovém kroku k nenachází v cílovém vrcholu), pak pohyb agenta r v časovém kroku k se nazývá povolený (agent r se přesouvá do neobsazeného sousedního vrcholu - je vedoucím agentem).

Jestliže $S_R^k(r) \neq S_R^{k+1}(r)$ a existuje $s \in R$ takové, že $s \neq r \wedge S_R^k(s) = S_R^{k+1}(r) \wedge S_R^k(s) \neq S_R^{k+1}(s)$ (agent r se přesouvá do vrcholu, který právě opouští agent s) a pohyb agenta s v časovém kroku k je povolený, potom pohyb agenta r v časovém kroku k je také povolený.

Všechny pohyby agentů ve všech časových krocích musí být povoleny. Analogicky tato podmínka spolu s podmínkou prostoty zobrazení funkcí tvořících S_R implikuje, že žádní dva roboti nesmí ustoupit do stejného vrcholu ve stejném časovém kroku.

Instance problému multiagentního hledání cest je uspořádaná čtveřice $\Sigma = (G, R, S_R^0, S_R^+)$. Řešení problému Σ lze označit jako $\mathcal{S}_R(\Sigma) = [S_R^0, S_R^1, \dots, S_R^\zeta]$. [4]



Obrázek 2.1: Vizualizace grafu, na kterém probíhá multiagentní hledání cest

Na obrázku je vizualizace grafu, na kterém multiagentní hledání cest probíhá. Vrcholy označené modře představují vrcholy, v nichž se nachází právě jeden agent. Bílé jsou označeny vrcholy volné a zelený vrchol představuje cílový vrchol, do kterého se agenti mají za úkol dostat.

Problém nalezení optimálního řešení pro multiagentní hledání cest je NP-úplný. [4]

Agenti V této práci rozeznávám dva typy agentů pohybujících se po grafu. Prvním typem jsou řídicí agenti, kteří provádějí plánování pohybu s ohledem na ostatní řídicí agenty. Druhým typem jsou agenti následníci, kteří se pohybují v rojích kolem řídicích agentů a tyto agenty následují.

2.3 Problém evakuace

Evakuaci lze rozumět anonymizovanou formou problému multiagentního hledání cest. Probíhá na neorientovaném grafu $G = (V, E)$, jehož vrcholy se dělí na bezpečné vrcholy S a nebezpečné vrcholy D , tedy $V = S \cup D$. Cílem agenta není pouze jeden určitý vrchol, ale libovolný vrchol z množiny bezpečných vrcholů.

Cílem problému je nalézt množinu cest pro množinu agentů $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$. Agenti jsou naváděni z nebezpečných vrcholů D do bezpečných vrcholů S . Každý agent z A začíná v jiném vrcholu, tak, aby se v každém čase v každém vrcholu nacházel nanejvýš jeden agent. Řešením multiagentní evakuace je plán $\pi = [c_0, c_1, \dots, c_m]$, $c_m(a) \in S \forall a \in A$ a $c_t : A \rightarrow V$ je konfigurace agentů v čase t .

Definice 2 *Diskrétní multiagentní evakuace je pětice $\mathcal{E} = [G = (V, E), A, c_0, D, S]$, kde G představuje prostředí, A množinu agentů, $c_0 : A \rightarrow V$ je počáteční konfigurací agentů a D a S takové, že $D \subseteq V$, $S \subseteq V$, $V = D \cup S$ s $D \cap S \neq \emptyset$ a $|S| \geq k$ představují množinu nebezpečných a množinu bezpečných vrcholů. [5]*

Neformálně lze evakuaci definovat jako akt přesunu osob z nebezpečného místa do místa bezpečného. [6] Zaměřuji se tedy na efektivitu přístupu k evakuaci tak, aby v daném čase – počtu kroků – bylo přesunuto co nejvíce osob z počáteční nebezpečné oblasti do bezpečí. Jako důležité faktory stanovím procento přeživších a rychlost evakuace – podle nich mohou jednotlivé přístupy hodnotit a porovnávat jejich úspěšnost.

Motivací této práce je scénář evakuace ve školním prostředí [7] s agenty reprezentujícími učitele a žáky, kde se žáci shlukují kolem učitelů, kteří je eskortují do bezpečí. Mohu tedy také sledovat úspěšnost přístupů na základě chování těchto agentů, například co se týče poslušnosti žáků, kooperace učitelů či organizovanosti jednotlivých shluků.

Jako další scénáře evakuace mohu uvést například evakuace nemocničních zařízení [8], letadel [9], měst [10], obchodů [11], obytných či kancelářských budov [12], nebo evakuace při katastrofách – např. tsunami [13].

V této práci rozeznávám několik základních modelů evakuace. Zabývám se evakuacemi v prostředí budovy, kde motivací je evakuace školy, a evakuacemi v letadlech. Každý z navržených modelů vyžaduje rozdílné chování agentů.

Zaměřuji se pouze na evakuaci, která probíhá primárně skupinově, přičemž v každé takové skupině existuje vedoucí agent, který rozhoduje o pohybech své skupiny – roje.

Účelová funkce Účelovou funkcí tohoto problému je čas evakuace, jehož hodnotu se snažím minimalizovat. Časem evakuace se rozumí celkový počet kroků od začátku evakuace do chvíle, kdy poslední agent dorazí do bezpečného vrcholu.

2.4 Konfliktové prohledávání

Jedním z algoritmů, které lze pro řešení problému evakuace použít, je konfliktové prohledávání. Konfliktové prohledávání neboli Conflict-Based Search (CBS) je algoritmus pro multiagentní prohledávání, kdy pro každého agenta je nalezena nejkratší cesta ze startovní pozice do cílové pozice tak, aby v průběhu nekolidoval s jinými agenty, tedy aby se dva agenti nenacházeli najednou na stejném místě. Algoritmus je optimální vzhledem k součtu cen jednotlivých řešení a úplný. [14] Cenou řešení se rozumí délka cesty agenta.

Algoritmus se skládá ze dvou úrovní – ve vyšší úrovni probíhá konstrukce stromu konfliktů, kde jednotlivé vrcholy obsahují množinu konfliktů pro dané agenty po určitém počtu kroků. Strom konfliktů se větví pokaždé na dva vrcholy – jeden za každého z dvojice agentů v konfliktu. V nových vrcholech pro daného agenta na základě omezení vzniklého z konfliktu proběhne prohledávací algoritmus určující novou cestu pro tohoto agenta, avšak již bez právě vyřešeného konfliktu.

V nižší úrovni probíhá pro každého agenta lokální prohledávací algoritmus – v mém případě A^* [15]. Zvolený prohledávací algoritmus při svém běhu pracuje s omezeními, které mu uloží vyšší úroveň konfliktového prohledávání.

Nižší úroveň odesílá nejlepší řešení pro daného agenta vyšší úrovni, která na základě těchto řešení vyhodnocuje proběhlé konflikty a konstruuje strom konfliktů.

Pozice konfliktu je první pozice, kdy si dva agenti navzájem vejdou do pole působnosti. Toto by mohlo způsobit, že by si začali navzájem brát agenty následníky. Tomu je třeba se vyvarovat stanovením omezení, která zajistí právě konfliktové prohledávání.

Popis Algoritmu 1:

- *R.constraints* ... prázdná množina omezení vrcholu R
- řádek 3 – výpočet ceny řešení jako součet počtu kroků vykonaných v řešeních všech řídicích agentů ve vrcholu R
- řádek 4 – inicializace množiny otevřených (doposud neprohledaných) vrcholů – na začátku obsahuje pouze kořen stromu R, který představuje řešení bez jakýchkoliv omezení
- řádek 6 – prohledávání vrcholů probíhá vždy od vrcholu P s nejnižší cenou mezi vrcholy z *OPEN* – tento vrchol je z množiny otevřených vrcholů vyjmut a stává se z něj pracovní vrchol

Algoritmus 1: Vyšší úroveň konfliktového prohledávání [14]

Input: MAPF instance

- 1 R.constraints = \emptyset
- 2 R.solution = set of individual agent paths
- 3 R.cost \leftarrow compute_cost(R.solution)
- 4 OPEN \leftarrow R
- 5 **while** OPEN not empty **do**
- 6 P \leftarrow lowest_cost_node(OPEN)
- 7 *first_conflict* \leftarrow validate(P)
- 8 **if** *first_conflict* = \emptyset **then**
- 9 **return** P.solution
- 10 **for** *agent_i* in *first_conflict* **do**
- 11 N \leftarrow new_node
- 12 N.constraints \leftarrow P.constraints \cup new_constraint(*agent_i*, vertex, time)
- 13 N.solution \leftarrow P.solution
- 14 N.solution.update(new_constraint())
- 15 N.cost \leftarrow compute_cost(N)
- 16 Insert N to OPEN

- řádek 7 – nalezení prvního konfliktu, který se v řešení vrcholu P vyskytne
- řádek 8 – jestliže nebyly nalezeny žádné konflikty, *P.solution* je validní řešení
- řádek 10 – jestliže byl nalezen nový konflikt, pro každého agenta *i*, který v konfliktu figuruje, je vytvořen nový vrchol N, jehož množina omezení je rozšířena o omezení představující pole *vertex*, na které nesmí agent *i* po počtu provedených kroků *time* vstoupit. Řešení ve vrcholu N se pak aktualizuje, aby vyhovovalo novému omezení, poté se aktualizuje cena vrcholu N a následně se vrchol N vloží do množiny otevřených vrcholů OPEN

2.5 Algoritmus A*

A* je prohledávací algoritmus, který je optimální vzhledem k délce nalezené cesty, která je vždy nejkratší. Dosahuje toho kombinováním expanze vrcholů na základě jejich vzdálenosti od počátečního vrcholu a heuristické funkce, která odhaduje vzdálenost daného vrcholu od cílového vrcholu. [15]

Algoritmus 2: Určení priority vrcholů v prioritní frontě

Input: *node₁*, *node₂*

- 1 **return** *node₁*.distance_from_start + heuristics(*node₁*)/2 < *node₂* + heuristics(*node₂*)/2

2. TEORETICKÁ VÝCHODISKA

Vyšší prioritu má ten vrchol, který má nižší hodnotu součtu vzdálenosti od počátečního vrcholu a poloviny hodnoty heuristické funkce.

Hodnotu heuristické funkce v této práci určují pomocí přímé vzdálenosti.

Algoritmus 3: Heuristická funkce algoritmu A*

Input: Coordinates of node N and exit E

1 **return** $|x_N + y_N - x_E - y_E|$

Algoritmus 4: A*[16]

Input: MAPF instance

```
1 open_nodes ← init_priority_queue()
2 predecessor_table ← init_table()
3 starting_node.distance ← 0
4 push(open_nodes, starting_node, heuristics(starting_node))
5 while open_nodes not empty do
6   node ← pop(open_nodes)
7   if node ∈ end_nodes then
8     return reconstruct_path(node, predecessor_table)
9   for neighbour ∈ neighbours(node) \ closed_nodes do
10    new_distance ← node.distance + 1
11    if neighbour ∉ open_nodes or neighbour.distance > new_distance then
12      neighbour.distance ← new_distance
13      predecessor_table[neighbour] ← node
14      if neighbour ∉ open_nodes then
15        push(open_nodes, neighbour, new_distance +
16          heuristics(neighbour))
17      else
18        update_node(open_node, neighbour, new_distance +
19          heuristics(neighbour))
18 closed_nodes ← closed_nodes ∪ {node}
```

Popis Algoritmu 4:

- řádek 1 – inicializace prioritní fronty otevřených vrcholů. Z fronty je jako první vždy vybrán ten vrchol, který má nejvyšší prioritu (viz. Algoritmus 2)
- řádek 2 – inicializace tabulky předchůdců, kde se pro každý expandovaný vrchol nachází údaj o vrcholu, ze kterého byl daný vrchol expandován
- řádek 3 – inicializace vzdálenosti počátečního vrcholu na 0
- řádek 4 – vložení počátečního vrcholu do prioritní fronty otevřených vrcholů

- řádek 5 – dokud prioritní fronta není prázdná, jsou z ní postupně vybírány vrcholy, které jsou poté expandovány
- řádek 7 – je-li nově vybraný vrchol jedním z cílových vrcholů, dojde na základě tabulky předchůdců k rekonstrukci nalezené nejkratší cesty a algoritmus končí
- řádek 9 – probíhá expanze vrcholu – navštěvují se všechny sousední vrcholy, které doposud nebyly expandovány
- řádek 10 – výpočet vzdálenosti daného sousedního vrcholu od počátečního vrcholu při cestě vedoucí právě expandovaným vrcholem
- řádek 11 – jestliže sousední vrchol nebyl doposud navštíven nebo z právě expandovaného vrcholu vede do tohoto souseda kratší cesta, než byla doposud známa, vzdálenost souseda od počátečního vrcholu je aktualizována a jako jeho předchůdce je přiřazen právě expandovaný vrchol
- řádek 14 – jestliže soused není ve frontě otevřených vrcholů, je do ní vložen
- řádek 16 – jestliže je soused ve frontě otevřených vrcholů, ale byla k němu nalezena kratší cesta, jeho údaje jsou aktualizovány
- řádek 18 – po expanzi je daný vrchol přidán do množiny uzavřených vrcholů

Související práce

Simulace evakuace Tato práce navazuje na práci R. Selveka, *Engineering Smart Behavior in Evacuation Planning using Local Cooperative Path Finding Algorithms and Agent-based Simulations*[5], který se v práci taktéž zabývá simulací evakuace v budovách pomocí multiagentního systému. Autor v práci navrhuje lokální algoritmus pro plánování evakuace LC-MAE, který je založen na kooperativním hledání cest. V práci také studuje, jak průběh evakuace ovlivňuje přítomnost neinformovaných agentů mezi agenty informovanými.

Simulací evakuace pomocí agentního modelu se také zabývají E. Mas, S. Koshimura, F. Imamura, A. Suppasri, A. Muhari a B. Adriano v práci *Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru* [13], ve které se zaměřují na evakuace měst při vlnách tsunami. Autoři představují přínos, kterým jsou simulace evakuací během tsunami pomocí agentního modelování. Také zmiňují překážky, které pro úspěšnou simulaci pomocí agentního modelování představuje realistické modelování lidského chování. Autory navržený model slouží mimo simulaci evakuace k odhadu počtu obětí, analýze chování evakuovaných, odhaluje limity použití úkrytů či hodnotí použití dopravních prostředků.

Také považuji za vhodné zmínit práci A. Tsurushimy [17] *Reproducing Evacuation Behaviors of Evacuees during the Great East Japan Earthquake using the Evacuation Decision Model with Realistic Settings*, ve které autor zakládá svůj model na video záznamu¹ skutečné evakuace během zemětřesení v Japonsku v roce 2011. Na základě videa je chování agentů, které je také reprodukováno jako skupinové, rozděleno na prchání a padání k zemi v závislosti na vzdálenosti od východu. Autor provádí simulace v prostředí a nastavení, které odpovídá zkoumanému videoklipu.

Evakuační model, jehož motivací je evakuace letounů představují E. R. Gales, S. J. Blake a P. J. Lawrence v práci *The airEXODUS evacuation model and its application to aircraft safety*. [18] V této práci autoři popisují pravidla pro evakuaci letounů a navrhnou evakuační model airEXODUS, který je modifikací softwarového nástroje EXODUS, který slouží k simulaci evakuace velkého množství osob z komplexních prostředí. Tento model je

¹<https://www.youtube.com/watch?v=tejlDDKeg8s>

dle autorů schopen s vysokou přesností předpovídat výsledky certifikačních testů letounů, ale také předvídat sled událostí, které se během těchto testů mohou udát.

Hierarchické roje Problematikou hierarchického řízení rojů se věnují H. Chen, X. Wang, L. Shen a Y. Cong v práci *Formation flight of fixed-wing UAV swarms: A group-based hierarchical approach* [19]. Tuto techniku aplikují na roje autonomních bezpilotních letounů, v nichž platí hierarchie letounů vedoucích a letounů následníků. Autoři se v práci zabývají problémem kontroly formací bezpilotních letounů. Navrhují řešení pomocí skupinového hierarchického řízení rojů, kterým dosahují koordinace vně i uvnitř jednotlivých skupin letounů. Autory navržená architektura snižuje komplexitu koordinovaného plánování, jelikož není třeba plánovat cesty pro všechny letouny v jednotlivých rojích. Autoři dále navrhují pravidla pro kontrolu formace pro řídicí letoun a letoun následník v každé skupině, která garantují stabilitu celého roje i s možnými omezeními.

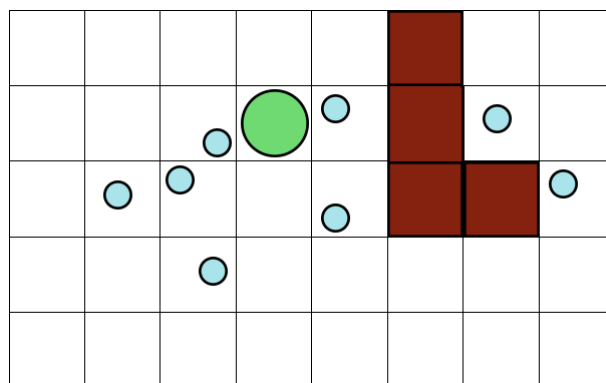
Evakuace ve školním prostředí Evakuaci a chování dětí ve školním prostředí, které je také hlavní motivací této práce, se zabývají L. Chen, T. Tang, Z. Song, H. Huand a R. Guo v práci *Child behavior during evacuation under non-emergency situations: Experimental and simulation results*[7]. Na základě experimentů na skupinách dětí autoři odhalují několik typických chování týkajících se vnímání vzdálenosti, překážek či ucpanosti prostoru. Také zkoumají scénáře skupinového chování, které dále porovnávají s chováním jednotlivců. Odhalují problémy při skupinové evakuaci, kdy děti zastavují a během evakuace si hrají, či místo vlastní evakuace čekají na své kamarády. Poukazují také na fakt, že skupinové chování má efekt na volbu cesty dítěte. Pozorování však neprobíhalo během krizové situace a dětem nepomáhali a neovlivňovali jejich chování učitelé.

Návrh evakuačního modelu

4.1 Informovanost agentů

4.1.1 Návrh architektury evakuačního multiagentního systému

Multiagentní systém, který modeluje evakuační scénář, udržuje informace v architektuře. Prostředí, kde probíhá evakuace, je vyjádřeno pomocí diskrétní mřížkové mapy. Architektura udržuje její stav a předává ho agentům, kteří se na základě toho rozhodují, jaký krok vykonat. Podle jejich rozhodnutí architektura zajišťuje samotný pohyb agenta.



Obrázek 4.1: Vizualizace mapy s agenty

Na obrázku 4.1 lze vidět reprezentace prostředí a agentů. Agenti následníci jsou označeni modře, řídicí agent zeleně a červeně jsou vyznačeny zdi.

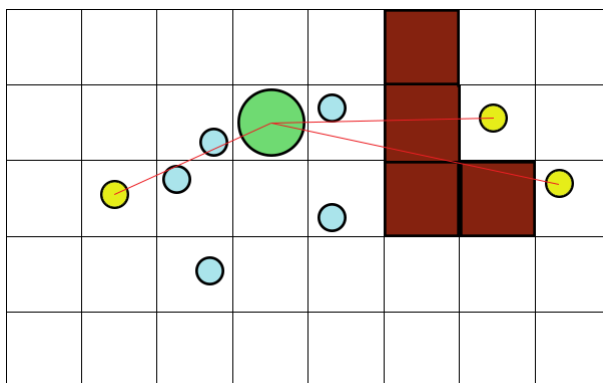
Pokud přímka daná středy kruhů definujících daného agenta následníka a řídicího agenta protíná jiného agenta následníka nebo stěnu, agent následník nevidí řídicího agenta a nesnaží se k němu tedy přiblížit.

Na obrázku 4.2 jsou žlutě vyznačeni agenti následníci, kteří řídicího agenta nevidí. Agenti na sebe mohou vidět, pouze pokud je vzdálenost jejich souřadnic menší

jejich dohledové vzdálenosti. Vzdálenost agentů se počítá jako Euklidovská vzdálenost

$$\rho(F, L) = \sqrt{(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2} \quad (4.1)$$

kde $[x_F, y_F]$ a $[x_L, y_L]$ jsou souřadnice agentů F a L.



Obrázek 4.2: Agenti následníci nevidí řídicího agenta

Agentu následníkovi F_1 může ve výhledu na řídicího agenta L bránit jiný agent následník F_2 . Tento agent tvoří překážku, jestliže protíná přímku p , na níž leží agenti L a F_1 . Agent F_2 přímku protíná, pokud je vzdálenost jeho středu $S_{F_2}[x_{F_2}, y_{F_2}]$ od přímky p menší rovna poloměru agenta F_2 , tedy

$$v(F_2, p) = \frac{|ax_{F_2} + by_{F_2} + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \leq r_{F_2} \quad (4.2)$$

kde

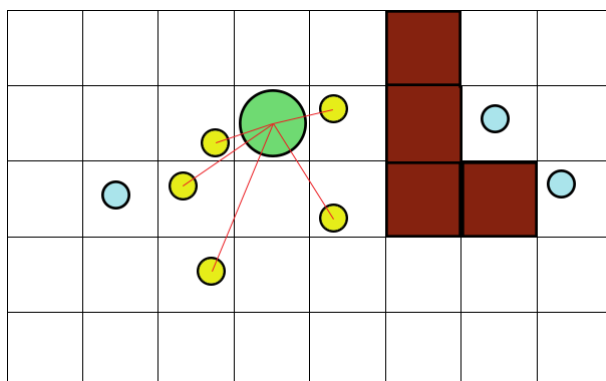
$$p : ax + by + c = 0 \quad (4.3)$$

je obecná rovnice přímky p a r_{F_2} je poloměr agenta F_2 .

Dalším typem překážky jsou zdi – čtverce zabírající celou plochu jedné buňky. Prostor mapy představuje rovinu, kterou přímka p rozděluje na dvě poloroviny. Jestliže přímka p protíná danou zeď, je tato zeď překážkou. Znamená to také, že se zeď z části nachází v obou polorovinách. Jestli toto platí, zjistíme dosazením jednotlivých vrcholů čtverce do obecné rovnice přímky a pokud se znaménka všech výsledků nerovnaj, znamená to, že přímka p čtverec protíná.

Pokud na přímce p neleží žádná překážka a agenti jsou v dostatečné blízkosti, agent následník řídicího agenta vidí.

Na obrázku 4.3 jsou žlutě vyznačeni agenti následníci, kteří řídicího agenta vidí.



Obrázek 4.3: Agenti následníci vidí řídicího agenta

4.1.2 Typy agentů

Motivací pro rozdělení agentů na dva typy je situace evakuace v prostředí školy. Agenti tedy mohou reprezentovat učitele a žáky. Rozdělují je tedy na tyto dva typy:

- Řídicí agenti – agenti s modelem prostředí reprezentující učitele
- Agenti následníci – reflexní agenti bez modelu prostředí představující žáky, kteří se kolem řídicích agentů rojí

Řídicí agenti hledají cestu k východu z budovy a agenti následníci se kolem řídicích agentů shlukují, následují je a s jejich pomocí se evakuují.

4.1.3 Návrh geometrie prostředí

S pozicemi agentů pracuji jako se souřadnicemi v kartézské soustavě souřadnic, přičemž pozice každého agenta značí „roh“ celočíselné čtvercové buňky o velikosti 1x1. Celá mapa je tedy tvořena sítí takovýchto buněk.

Agenti jsou vyjádřeni jako kruhy s poloměrem 0.15. Tato volba je podpořena předběžnými experimenty. Hodnota byla zvolena z důvodu, že je dostatečně velká na to, aby byla schopná efektivně vyjádřit přítomnost agenta v síti, ale nezabírala celý prostor buňky.

V případě, kdy byl poloměr zvolen jako příliš velký, se vyskytl problém, kdy agent následník neviděl o jednu buňku vzdáleného řídicího agenta, když přímo před ním stál jiný agent následník, i když v realitě by agent na tuto téměř zanedbatelnou vzdálenost měl být schopen řídicího agenta zaregistrovat.

Při volbě menšího poloměru si pak agenti příliš nevěšovali jeden druhého a agenti jako překážky tak ztráceli na smyslu.

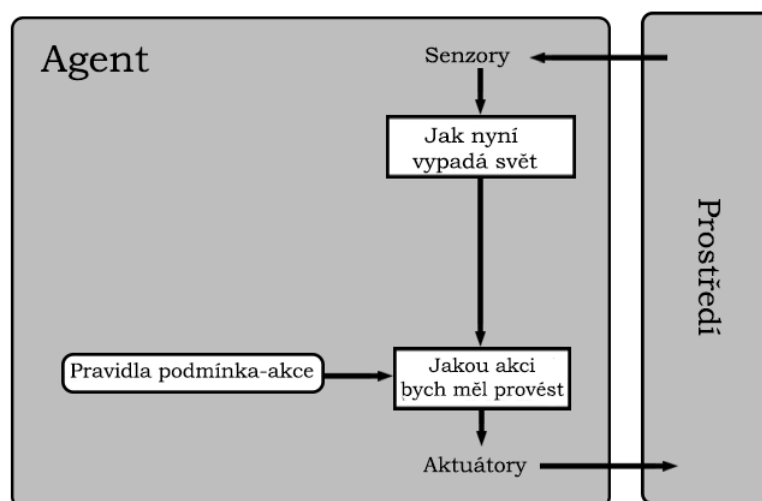
Pozice každého agenta je dána také odchylkou, která zajišťuje, že nedojde k výše zmíněnému scénáři. Odchylka leží v rozmezí 0.15–0.85, aby části agentů nepřesahovaly do vedlejších buněk.

4.2 Návrh agenta následníka

4.2.1 Analýza návrhu

Od agenta následníka požadují, aby byl schopen zpozorovat řídicího agenta ve svém blízkém okolí, pokud mu v tom nebrání žádná překážka. Pokud je řídicích agentů více, je schopen si rozmyslet, který z nich je blíže. Tohoto řídicího agenta následuje. Pokud se mu agent ztratí z dohledu, snaží se dostat na poslední pozici, na které se řídicí agent nacházel, dokud na něj agent následník viděl.

4.2.2 Návrh



Obrázek 4.4: Obr. 4 - Návrh reflexního agenta (přepřacováno na základě [2])

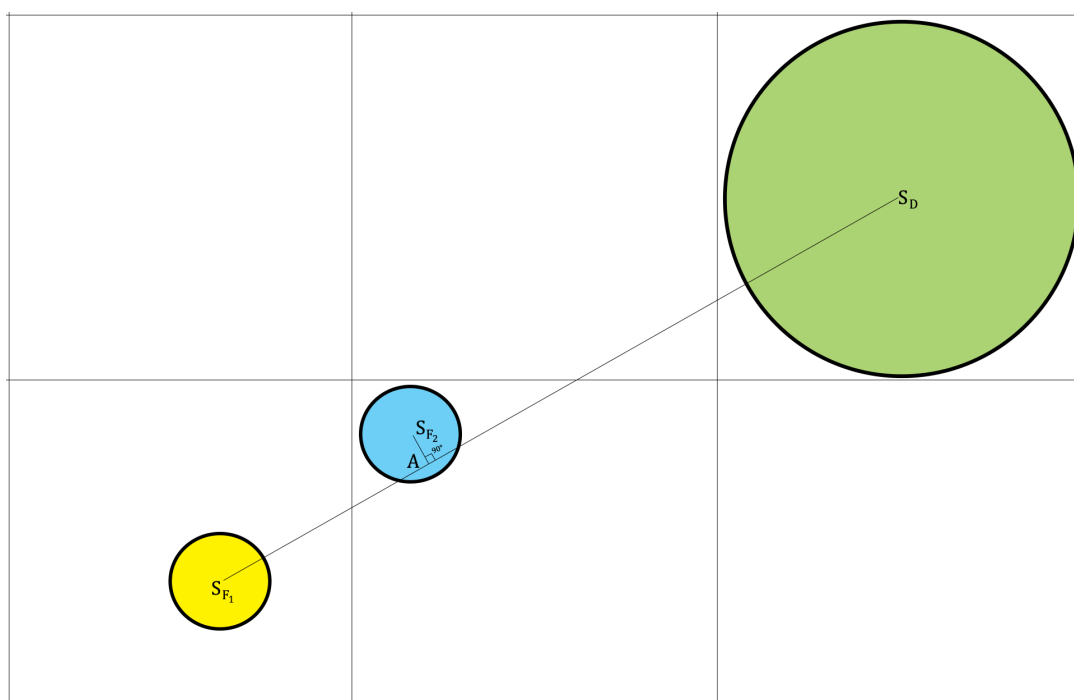
Agent následník je v základu navržen jako čistě reflexní agent [2]. Byl takto zvolen, jelikož po vzoru evakuace ve školním prostředí by měl následovat příkazy autority – v mém případě řídicího agenta. Agent následník se tedy nesnaží evakuovat sám, musí pouze nalézt řídicího agenta, který ho již k východu dovede. Má přehled pouze o svém bezprostředním okolí ve své dohledové vzdálenosti. Pokud v okolí vidí řídicího agenta a rozhodne se být poslušný a následovat ho, postoupí na volnou buňku, která je řídicímu agentovi blíže. V opačném případě se snaží vzdálit. Výchozí hodnota pravděpodobnosti, že bude řídicího agenta následovat, je 90% – experimenty ukázaly, že tato hodnota je vhodná volba. Návrh umožňuje tuto hodnotu měnit, lze ji tedy přizpůsobovat, aby odpovídala reálným scénářům.

Pokud agent nenalezne ve svém okolí řídicího agenta, přemístí se na náhodnou vedlejší volnou buňku či setrvá na svém místě.

4.2.3 Nalezení překážky v zorném poli agenta

Agenti jsou dvěma body, které leží na jedné přímce. Jejich vzdálenost je tedy určena jako euklidovská vzdálenost. Pokud má agent na druhého agenta vidět, nesmí úsečku, kterou agenti ohraničují, protínat žádné překážky, přes které by daný agent neviděl, tedy v obou případech zeď a v případě agenta následníka jiný agent následník.

Abych našla body, které úsečku a_1a_2 protínají, vytvořím v síti obdélník, v němž dva z vrcholů jsou souřadnice agentů (bez odchylek). V tomto obdélníku poté pomocí vzdálenosti bodu a přímky zjistím, zda úsečka a_1a_2 danou buňku protíná. Pokud je onou buňkou zeď, agent přes ni nevidí. Pokud se v buňce nachází jiný agent následník a vzdálenost středu tohoto agenta od úsečky a_1a_2 je menší rovna jeho poloměru, agent přes buňku nevidí.



Obrázek 4.5: Agent následník F_1 nevidí na řídicího agenta L přes agenta následníka F_2

4.2.4 Pohyb agenta následníka

Pokud agent následník vidí na řídicího agenta, může se snažit přiblížit nebo být „neposlušným“ agentem a snažit se vzdálit. Před každým jeho pohybem se tedy rozhoduje, zda bude „poslušný“.

Pokud agent následník na řídicího agenta nevidí, pohne se na náhodné volné sousední pole, či setrvá na místě.

Algoritmus 5: Agentní funkce agenta následníka

Input: MAPF instance, list of leaders' positions

```

1 follower.leader ← choose_nearest(leaders)
2 geometry ← compute_geometry(agenti, agentj, stepn)
3 if distance(follower, leader) < follower.sight_length or not
   geometry.follower_sees_leader() then
4   return random_free_neighbour
5   if not follower.obeyes() then
6     return move(follower, leader, away)
7   else
8     return move(follower, leader, towards)

```

Popis Algoritmu 5:

- řádek 1 – nalezení nejbližšího řídicího agenta pro daného agenta následníka – agent následník v tomto případě počítá euklidovskou vzdálenost, což simuluje reálnou situaci, kdy je člověk schopen vzdálenost odhadnout. [20]
- řádek 2 – inicializace geometrického vnímání vztahu mezi řídicím agentem a agentem následníkem
- řádek 3 – Pokud jsou si agenti příliš vzdálení nebo na sebe nevidí, agent následník vstoupí na náhodné vedlejší volné pole. Agenti na sebe vidí, jestliže jsou v dostatečné blízkosti danou parametrem *sight_length* a zároveň se na přímce, na níž leží středy agentů, nevyskytují mezi agenty žádné překážky. Jestliže jsou agenti v dostatečné blízkosti a vidí na sebe, agent následník má možnost poslechnout řídicího agenta a následovat ho (po experimentech byla základní pravděpodobnost této volby zvolena na 90%).
- řádek 5 – Probíhá rozhodnutí agenta, zdali poslechne řídicího agenta a bude ho tedy následovat. Jestliže agent následník neposlechne, snaží se pohnout na pole s větší vzdáleností od řídicího agenta, než je pole, na kterém právě stojí.
- řádek 7 – v opačném případě se agent následník posune na políčko blíže řídicímu agentovi.

Tento algoritmus je základem pro funkce agentů následníků, které byly pro potřeby jednotlivých modelů příslušně modifikovány.

4.2.5 Problémy při návrhu

Při návrhu agenta následníka byly vyzkoušeny různé verze algoritmu. Postupně vývoj návrhu agenta rozeberu.

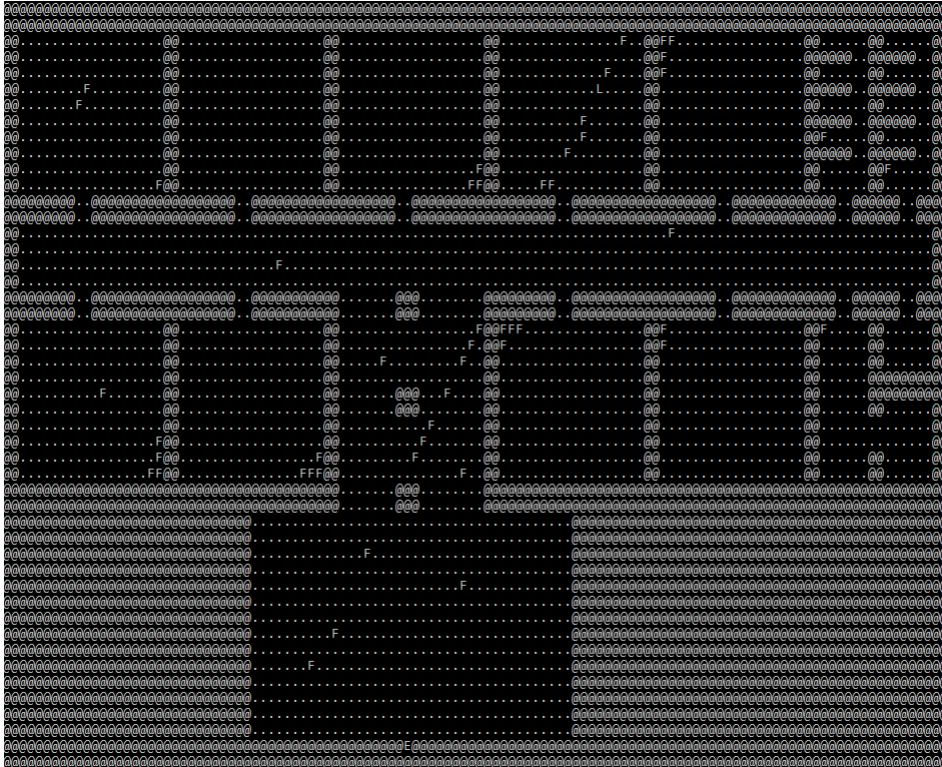
Jako první byl agent velmi jednoduchý a pohyboval se v diskrétním prostředí, ukázalo se to však jako nevhodné. Toto vedlo ke geometrickému návrhu prostředí.

Diskrétní prostředí, přímá vzdálenost Začala jsem s čistě diskrétním prostředím a mřížkou, kde agenti zabírali celou plochu buňky. Vznikly však problémy – agenti přes sebe vůbec neviděli a použití přímé vzdálenosti vedlo k fenoménu následníků stavějících se do „diagonály“ vzhledem k řídicímu agentovi bez motivace pohnout se reálně blíže.

Algoritmus 6: Výpočet vzdálenosti agentů pomocí přímé vzdálenosti

Input: Coordinates $[x, y]$ of follower F and leader L

1 return $|x_F + y_F - x_L - y_L|$



Obrázek 4.6: Shlukování agentů následníků v diskretním prostředí s přímou vzdáleností

Diskrétní prostředí, manhattanská vzdálenost Použití Manhattanské vzdálenosti již vedlo ke kompaktnějšímu shlukování agentů následníků kolem řídicího agenta, toto řešení však také nebylo vhodné, jelikož výpočet neodráží způsob, jakým člověk reálně odhaduje vzdálenost.

Algoritmus 7: Výpočet vzdálenosti agentů pomocí manhattanské vzdálenosti

Input: Coordinates $[x, y]$ of follower F and leader L

1 return $\max(|x_L - x_F|, |y_L - y_F|)$

V této verzi bylo stále použito diskretní prostředí s mřížkou a agenti zabírali celou buňku, to však opět vedlo k neschopnosti agentů vidět přes sebe na řídicího agenta,

i když byl velmi blízko. Diskrétní prostředí tedy bylo nahrazeno geometrickým spojitým prostředím.

Spojité prostředí, euklidovská vzdálenost Finální použitá možnost byla euklidovská vzdálenost – tato možnost vnímá vzdálenost jako vzdálenost dvou bodů v rovině. Toto se v kombinaci s využitím analytického pojetí stavového prostoru ukázalo jako vhodné řešení.

Algoritmus 8: Výpočet vzdálenosti agentů pomocí euklidovské vzdálenosti

Input: Coordinates $[x, y]$ of follower F and leader L

1 return $\sqrt{(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2}$

Agent v této verzi řešení je brán jako kruh, který zabírá pouze část buňky a jeho pozice v buňce je pseudonáhodná, čímž byl odstraněn problém, kdy agenti přes sebe neviděli i v případech, kdy to nebylo žádoucí.

4.3 Návrh řídicího agenta

4.3.1 Analýza návrhu

Od řídicího agenta požaduji, aby nalézal nejkratší cestu k východu z nebezpečné oblasti a dbal přitom na rozestupy mezi ním a ostatními řídicími agenty. Každý řídicí agent má kolem sebe shluk agentů následníku, které odvádí k východu. Po každém kroku musí reagovat na změny v prostředí, ať už to jsou překážky, či ostatní řídicí agenti. Pokud řídicímu agentovi brání v pohybu agenti následníci, je schopen je z jejich pozice posunout tak, aby měl prostor vykonat následující krok.

4.3.2 Návrh

Řídicí agent je navržen jako agent s cílem a modelem prostředí. [2] Má tedy neustálý přehled o stavu mapy. V mapě hledá nejkratší cestu k východu, ke kterému vede agenty následníky.

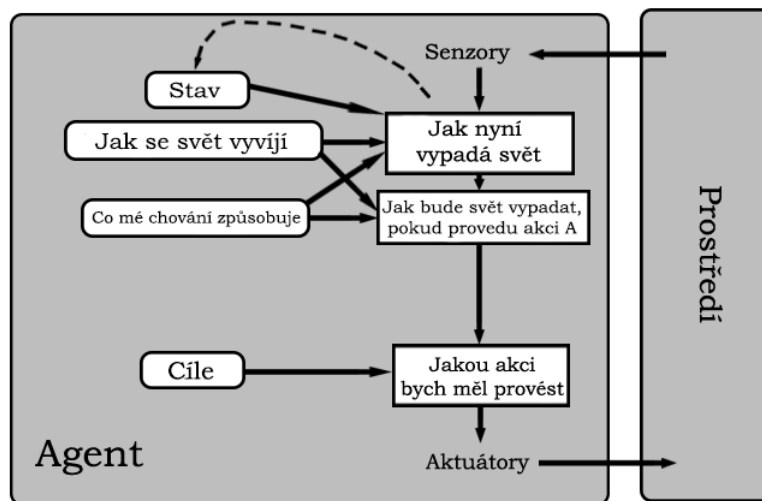
Řídicí agent v nižší úrovni konfliktového prohledávání hledá vlastní cestu bez ohledu na ostatní řídicí agenty. Využívá přitom algoritmu A^* [15], který je modifikovaný, aby agent respektoval omezení stanovená algoritmem konfliktového prohledávání.

4.3.3 Prohledávací algoritmy pro řídicí agenty

4.3.3.1 Hledání konfliktů

Při stanovení konfliktu dvou řídicích agentů se nemohu spoléhat jen na konkrétní souřadnice, ale na oblast kolem obou agentů, která je definovaná jejich polem působnosti.

Konflikt je definován jako pětice ($agent_1, agent_2, pozice\ konfliktu\ agenta_1, pozice\ konfliktu\ agenta_2, číslo\ kroku$). Součástí konfliktu jsou dvě různé pozice, jedna pro



Obrázek 4.7: Návrh agenta s cílem a modelem prostředí (přepřacováno na základě [2])

každého agenta. Byl takto zvolen, protože konflikt může pro agenty nastat, i když se ne nacházejí v bezprostřední blízkosti vedle sebe. Stačí pouze, aby se jeden z agentů dostal do pole působnosti druhého agenta, pro každého z nich však bude souřadnice, jíž by se do této oblasti dostali, rozdílná. Každému řídicímu agentovi se tedy v omezení projeví jiná souřadnice, na kterou nesmí vstoupit.

Algoritmus 9: Nalezení konfliktů v řešení

```

Input: Node N
1 conflicts = ∅
2 for  $i \in \{1, 2, \dots, \text{len}(N.\text{solution})\}$  do
3   for  $j \in \{i + 1, i + 2, \dots, \text{len}(N.\text{solution})\}$  do
4     steps  $\leftarrow \min(\text{len}(\text{solution}[i], \text{len}(\text{solution}[j]))$ 
5     for  $n \in \{1, \dots, \text{steps}\}$  do
6       geometry  $\leftarrow \text{compute\_geometry}(\text{solution}[i], \text{solution}[j], N.\text{state})$ 
7       if  $\text{geometry.in\_sight}(\text{agent}_i, \text{agent}_j, n)$  then
8         conflicts  $\leftarrow \text{conflicts} \cup \{(i, j, \text{solution}[i][n], \text{solution}[j][n], n)\}$ 
9 return conflicts
  
```

Popis Algoritmu 9:

- N ... uzel stromu konfliktů konfliktového prohledávání
- conflicts ... prázdná množina konfliktů
- $N.\text{solution}$... seznam řešení pro jednotlivé agenty, tj. na pozici i se nachází cesta nalezená agentem i a na pozici $j > i$ leží cesta nalezená agentem j . Cesta je

reprezentovaná jako posloupnost vrcholů nalezená algoritmem A^* , kde každý vrchol reprezentuje pozici agenta i po k krocích. Hledání konfliktu probíhá pro každou dvojici agentů i a j .

- řádek 4 – výpočet počtu kroků, v nichž může dojít ke konfliktu, tedy čísla značícího poslední krok, kdy se oba řídicí agenti stále neevakovali a nacházejí se na mapě
- řádek 5 – pro každý krok probíhá výpočet, zda se agenti nachází v poli působnosti toho druhého a tím pádem mají konflikt
- řádek 6 – inicializace geometrického vnímání vztahu mezi agenty. Dochází k určení koeficientů obecné rovnice přímky, na které oba agenti leží a bodů mezi agenty, které tato přímka protíná.
- řádek 7 – jestliže jsou agenti vzájemně v poli působnosti jeden druhého, tedy se nachází v dostatečné vzdálenosti od sebe a nedělí je překážka (zeď), mají konflikt
- řádek 8 – do množiny konfliktů je přidán nový konflikt

Tento algoritmus je výchozí algoritmus, který lze pomocí různých datových struktur optimalizovat.

4.3.3.2 Algoritmus A^*

A^* slouží jako prohledávací algoritmus pro nalezení nejkratší cesty pro každého jednotlivého řídicího agenta. Je modifikován, aby agent při každém kroku kontroloval, zdali nemá v daném čase na daném místě konflikt. Pokud ano, bere tuto buňku jako překážku a vyhýbá se jí.

4.4 Modely chování agentů při evakuaci

Pomocí multiagentního modelování zkoumám průběh evakuace a určuji, který z následujících modelů evakuace je nejlepší. Jednotlivé modely se liší chováním řídicích agentů či chováním agentů následníků. Všechny modely sice pracují s hierarchickým shlukováním, liší se však metody udržování a navádění těchto shluků.

4.4.1 Model A – Jednoduché následování

V tomto modelu si agenti následníci vybírají vždy toho nejbližšího řídicího agenta v dohledu a toho následují. V základním návrhu tohoto modelu se po oddělení od řídicího agenta agenti následníci o vlastní evakuaci nesnaží.

Řídicí agenti se pouze snaží nekonfliktně a co nejrychleji dostat do bezpečné oblasti, nemají však přiřazenou skupinu agentů následníků a tedy nekontrolují, jestli se žádní agenti po cestě neoddělili. Toto může vést k významným ztrátám agentů následníků v jednotlivých shlucích.

4.4.1.1 Hypotéza chování

Předpokládám, že se v tomto modelu nebudou tvořit velké roje, jelikož řídicí agenti narozdíl od agentů následníků v každém kroku postupují k východu. Řídicí agenti by se měli evakuovat velmi rychle, agenti následníci by však měli být o dost pomalejší a pokud budou čistě reflexní, drtivá většina se neevakuuje.

4.4.2 Model B – Přiřazené skupiny

Pro zabránění významným ztrátám agentů následníků má každý agent následník přiřazeného právě jednoho řídicího agenta, kterého se musí po celou dobu evakuace držet. Zároveň se v základním návrhu modelu nikdy nesnaží evakuovat na vlastní pěst.

Řídicí agenti se o svůj shluk starají, pravidelně kontrolují, jestli nějaké agenty následníky neztratili a pokud počet ztracených agentů stoupne nad danou přijatelnou mez, řídicí agent se zastaví a čeká po dobu k kroků, aby měli ztracení agenti možnost připojit se zpět ke shluku.

Řídicí agent tak při konfliktovém prohledávání odesílá algoritmu jako svoji cestu pouze svoji současnou polohu a neplánuje další cestu, jelikož není jasné, jak dlouho bude na místě čekat. Toto má za následek zrychlení běhu programu. Je však možné, že se díky nemožnosti pohnout dostane do konfliktu s jiným řídicím agentem.

O to více je však potřeba efektivního plánování jednotlivých kroků, jelikož díky častému zastavování a čekání se doba evakuace oproti modelu A zvyšuje. Platí, že čím méně agentů následníků si řídicí agent může dovolit ztratit, tím pomaleji bude probíhat jeho evakuace. Zároveň se tím ale zvyšuje konečný počet úspěšně evakuovaných agentů.

4.4.2.1 Hypotéza chování

Jelikož se řídicí agenti starají o udržení roje, měl by tento model být úspěšnější než model A co se týče počtu evakuovaných agentů, alespoň co se týče verzí s neinformovanými agenty následníky. Evakuace by však mohla probíhat pomaleji, protože se řídicí agenti často zastavují a čekají na agenty následníky ze svého roje.

4.4.3 Částečná informovanost agenta následníka

Pokud je počáteční pozice čistě reflexního agenta následníka nevýhodná (žádný řídicí agent není na dohled a pozice se nenachází blízko východu) nebo se svému agentovi ztratí, je pravděpodobné, že jeho evakuace skončí neúspěchem. Proto je vhodné zavést mechanismus, který agentu následníkovi šanci na přežití zvýší.

Agenti následníci neví o probíhající evakuaci, a tedy se samovolně nesnaží dostat k východu. Je však možné nechat jim k náhodných kroků, po jejichž provedení se začnou snažit dostat se k východu. Neberou přitom v potaz žádné dynamicky vznikající překážky, kterými jsou pro ně ostatní agenti, jelikož na rozdíl od řídicích agentů nespolupracují a nemají jak informaci o poloze ostatních agentů získat.

Protože se jedná pouze o agenty následníky, jako jejich prohledávací algoritmus postačí algoritmus jednodušší než A^* používaný řídicími agenty.

Ve chvíli, kdy se po nějakém počtu kroků v zorném poli agenta následníka objeví žádoucí řídicí agent, daný agent následník se stane součástí shluku tohoto řídicího agenta a sám již cestu do cíle nehledá.

Zavedla jsem tedy modifikaci modelu A i modelu B, která umožňuje agentům následníkům mimo roj vykonávat plánovaný pohyb. Pokud se v jejich zorném poli již po 30 časových kroků nevyskytne řídicí agent (v modelu A jakýkoliv, v modelu B jeden konkrétní), mohou získat možnost evakuovat se sami. Pomocí algoritmu prohledávání do šířky (BFS) hledají cestu k východu. Hodnota 30 byla zvolena na základě předběžných experimentů.

4.4.4 Model C – Letadlo

Motivací pro tento model je evakuace v letadle či na lodi. Řídicí agenti se prioritně nesnaží evakuovat sami sebe, vedou agenty následníky, ale sami opouštějí prostor jako poslední poté, co se již všichni agenti následníci evakovali. Stejně jako v modelu B si řídicí agenti na počátku evakuace rozdělí jednotlivé agenty následníky do skupin, které se v průběhu evakuace nemění. Řídicí agent tak udržuje přehled o tom, zda se již jeho přiřazený roj evakoval a pokud ano, teprve poté opouští prostor on sám.

V každém kroku tedy daný řídicí agent nejdříve určí směr, kterým je nejlepší se pohnout. Tuto informaci pak sdělí agentům následníkům ve svém shluku a ti podle tohoto pokynu vykonají pohyb. Sám řídicí agent se pohne až jako poslední.

Agenti následníci rozeznávají tři základní typy svého umístění – mohou být v uličce, na sedadle či v blízkosti východu. Na základě toho vykonávají specifické pohyby.

- Ulička – v tomto případě se agent následník pohybuje ve směru zadaném svým řídicím agentem. Agent následník se v tomto případě primárně pohybuje doprava/doleva, ale pokud by mu v pohybu bránila stěna, sedadlo či řídicí agent, má možnost ho obejít. Agenti následníci v tomto modelu jsou také částečně informováni, pokud tedy na svého řídicího agenta po danou dobu nevidí, snaží se dostat k některému z východů, který však pro něj nemusí být nejbližší.
- Sedadlo – sedadlo je úzký prostor ohraničený z alespoň dvou stran řadami sedadel. Pokud se agent následník nachází na sedadle, snaží se přesunout do nejbližší uličky.
- Prostor u východu – jestliže se agent následník nachází v blízkosti východu, přestává poslouchat pokyny řídicího agenta a pohybuje se přímo k východu.

4.4.4.1 Hypotéza chování

Protože mapy v tomto modelu neobsahují takové množství překážek, přes které by se nedalo vidět, jako předchozí modely, a díky rozdílnému chování jak agentů následníků, tak řídicích agentů předpokládám, že evakuace v tomto modelu bude probíhat úspěšněji než v předchozích modelech, je však nutno podotknout, že tento model nemusí být vhodný do situací, které reprezentují modely A a B, jelikož sám představuje evakuaci ve velmi specifickém prostředí.

Experimentální vyhodnocení

5.1 Volby způsobu realizace konfliktového prohledávání

5.1.1 Omezení hloubky stromu konfliktů

Algoritmus je modifikován, aby prohledával pouze prvních n vrcholů stromu konfliktů, jelikož v počátečním stavu může mít strom vzniklý algoritmem i tisíce vrcholů, což vede k velmi dlouhému výpočetnímu času, který se pohybuje v řádech desítek minut i více, v závislosti na počtu řídicích agentů a velikosti mapy. V experimentech bylo konfliktové prohledávání značně omezeno pro ušetření výpočetního času. Toto mohlo také přispět ke vzniku konfliktů a zácp.

Tento přístup nemusí vrátit optimální výsledek, je pouze suboptimální. Jelikož je však prostor mapy velmi rozsáhlý, nemusím se obávat, že by algoritmus nenašel žádné řešení.

Pokud se tak však stane, agent, který nenašel řešení, se ze svého místa nepohne. Když v dalším kroku proběhne přeplánování, pozice, na které měl předtím konflikt s jiným agentem, může již být odblokována a agent tak může pokračovat v cestě.

Po provedení kroku každým agentem nastává přeplánování – algoritmus konfliktového prohledávání se tedy spouští opakovaně. Lze tak reagovat na nově vyvstávající překážky na mapě, kterými mohou být ostatní řídicí agenti.

5.1.2 Zpracování výsledného vrcholu

Původní algoritmus konfliktového prohledávání vrací vrchol, který je bez konfliktů. Jelikož jsem ale provedla modifikaci omezující hloubku prohledávání, v mnoha případech vrchol určený jako nejlepší řešení obsahuje konflikty. Algoritmus konfliktového prohledávání do množiny konfliktů zahrnuje pouze ty konflikty, na které narazí jako první. Nemusí se však dostat ke všem konfliktům, které se v následujícím kroku mají odehrát. Proto je pro výsledné řešení opět nalezena množina všech konfliktů, které se v něm nachází a na základě tohoto je řešení pro každého agenta s konfliktem přeplánováno. Výsledkem je pak toto modifikované řešení.

Je možné, že vyhnutím se jednomu konfliktu se agenti dostanou do konfliktu jiného, toto řeší nemodifikovaná verze konfliktového prohledávání. Jelikož je však kvůli výpočetnímu času moje verze značně omezená, řešení není úplné a ke konfliktům může při některých příležitostech docházet, i když ve značně menší míře, než kdybych konfliktové prohledávání nepoužila.

Experimenty ukázaly, že existují případy, kdy se blízko východu sejde několik řídicích agentů najednou, žádný z nich se však nemůže k východu dostat a evakuovat se, aniž by se dostal do konfliktu s ostatními blízkými řídicími agenty. Toto způsobuje neřešitelnou zácpu a tito řídicí agenti spolu s agenty následníky, které mohou svým stáním zablokovat, se nikdy neevakuují.

Proto jsem algoritmus modifikovala tak, aby stačilo, aby se agenti přiblížili k východu alespoň na vzdálenost 2 a poté se evakuují. Experimenty však ukázaly, že toto nebyla dostatečná modifikace a k zácpám pořád docházelo. Modifikovala jsem tedy vyhledávání konfliktů mezi agenty. Pokud se dva řídicí agenti dostanou do konfliktní situace, nebude se tato situace počítat jako konflikt, jestliže budou oba dva agenti na pozicích, které jsou od východu vzdáleny méně, než 6.

5.2 Scénáře počátečních pozic agentů

Vzhledem k motivaci práce scénářem evakuace ve školním prostředí zavádím několik základních výchozích scénářů, podle nichž se budou odvíjet počáteční pozice jednotlivých agentů. Můžu tak sledovat, jak se bude úspěch a rychlost evakuace měnit, pokud budou řídicí agenti rovnoměrně rozprostřeni mezi agenty následníky či pokud budou řídicí agenti ve vzájemné blízkosti, mimo dosah agentů následníků.

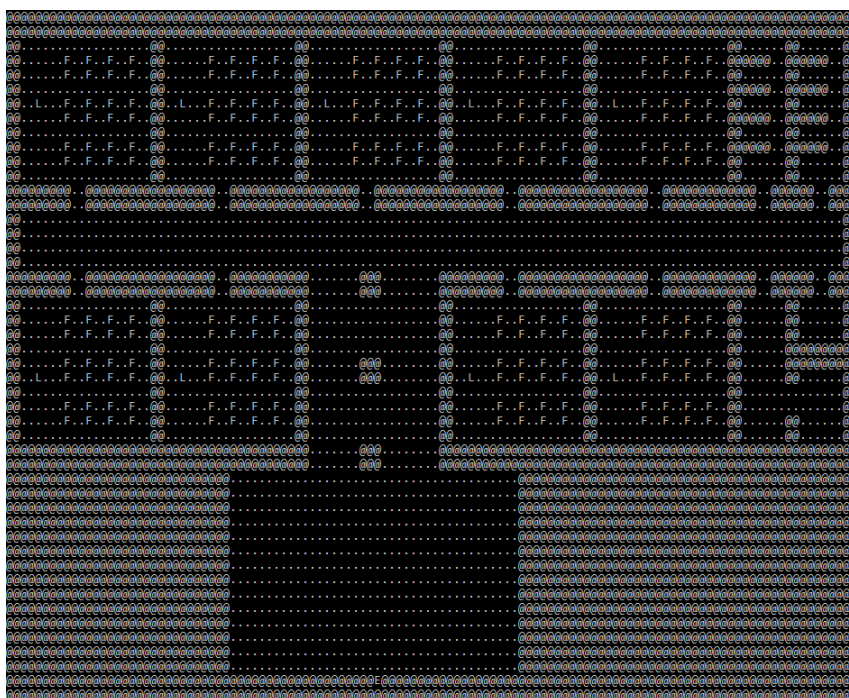
5.2.1 Vyučovací hodina

Při tomto scénáři jsou všichni řídicí agenti rovnoměrně rozprostřeni mezi agenty následníky a všichni se nachází v uzavřených prostorech – ve třídách, kde probíhá vyučování. Velká část agentů následníků se tedy nachází v roji a při nastalé evakuaci mají na dohled řídicího agenta, který je vede.

5.2.2 Přestávka

O přestávce jsou agenti následníci rozmístěni po chodbách i v učebnách, většinová část řídicích agentů se však nachází pospolu v uzavřené místnosti představující sborovnu či kabinet. Menší část řídicích agentů se pohybuje po chodbách – agenti následníci v dostatečné vzdálenosti se tedy nachází v jejich rojích.

V tomto případě však dochází ke komplikaci, jelikož někteří agenti následníci, obzvláště pak ti nacházející se v uzavřených místnostech, nemají přehled o evakuaci a nesnaží se dostat pryč. Jelikož se v jejich dohledu nenachází žádný řídicí agent, nemají se ani koho držet.



Obrázek 5.1: Rozmístění agentů při scénáři „vyučovací hodina“

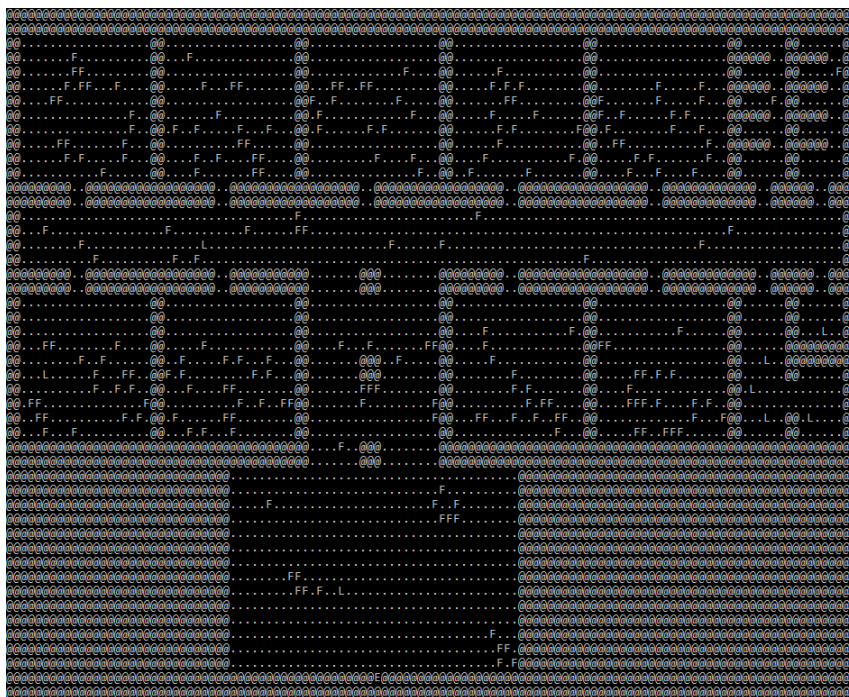
Vzniká také vyšší šance, že počáteční pozice řídicích agentů bude znamenat, že již od kroku 0 budou ve vzájemném konfliktu a žádný z okamžitých kroků tuto situaci nevyřeší.

5.2.3 Náhodné rozdělení agentů

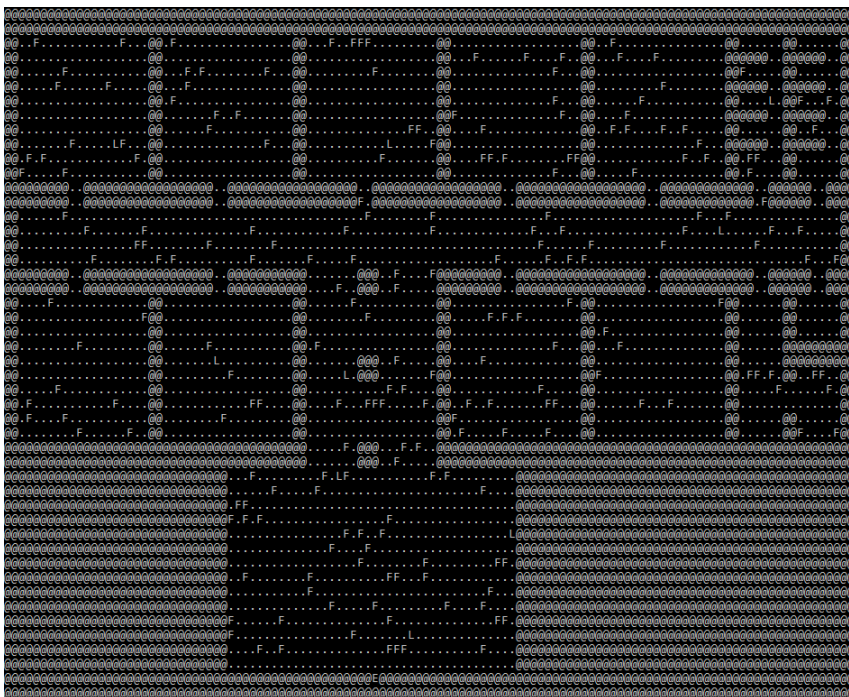
Řídicí agenti i agenti následníci se náhodně rozmístí na volná místa mapy. Vzhledem k počátečnímu vysokému počtu volných míst je nízká pravděpodobnost, že by se jako v předchozím případě vytvořila oblast, ve které by se najednou nacházela většinová část řídicích agentů. Zároveň se však mohou do odlehlých míst mapy dosadit agenti následníci, kteří budou mimo dosah kteréhokoli řídicího agenta a nedojde k jejich evakuaci.

5.2.4 Letadlo

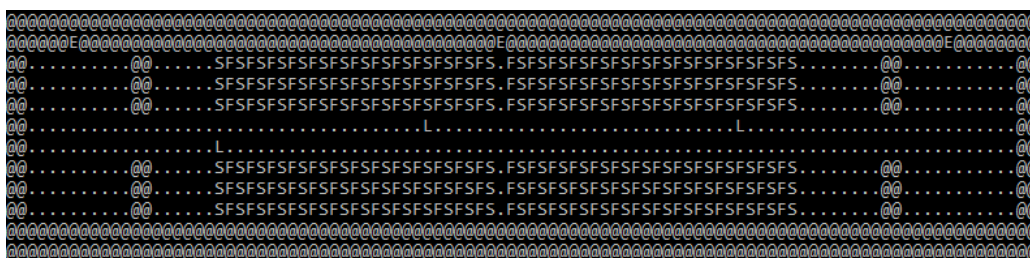
Tento scénář je speciální pro model C, který nevyužívá předchozích scénářů, jelikož je motivován specifickou situací s velmi rozdílnou mapou a způsobem evakuace. Touto motivací je evakuace letadla. Zavádím zde nový typ překážky, kterou je sedadlo – přes tuto překážku všichni agenti včetně agentů následníků vidí, ale nemůžou skrze ni projít.



Obrázek 5.2: Rozmístění agentů při scénáři „přestávka“



Obrázek 5.3: Náhodné rozmístění agentů



Obrázek 5.4: Rozmístění agentů při scénáři „letadlo“

Na počátku jsou všichni agenti následníci usazeni na sedadlech. Jejich prvotním úkolem je dostat se do uličky mezi sedadly, odtud jsou pak naváděni řídicími agenty, kteří jim předávají údaj o směru, kterým se mají vydat k východu. Řídící agenti jednotlivé roje navádí, ale hýbají se až jako poslední a neodcházejí z mapy, dokud neodešli všichni agenti následníci v jejich roji.

5.3 Experimentální úpravy parametrů

- α – % informovaných řídicích agentů – může nastat situace, kde bude daný řídicí agent odříznut od ostatních řídicích agentů a nebude s nimi moct spolupracovat. V takovémto případě se nebude účastnit konfliktového prohledávání a bude určovat svůj pohyb pouze na základě lokálního prohledávacího algoritmu A*. Základní hodnotou tohoto parametru je 100%, tedy pracuji s případem, kdy jsou všichni řídicí agenti informovaní a spolupracují.
- β – míra poslušnosti agenta následníka – od agenta následníka se očekává, že bude následovat řídicího agenta a poslouchat jeho rozkazy, každý agent následník se však může rozhodnout, že řídicího agenta neuposlechne a bude se snažit svému roji naopak vzdálit. Základní hodnota je nastavena na 90%.
- γ – Zorné pole agentů – hodnota parametru se liší pro řídicí agenty a agenty následníky. U agentů následníků je nastaven typicky na vyšší hodnotu, jelikož jsem experimentálně zjistila, že překážky v podobě ostatních agentů či zdí dostatečně blokují výhled agenta následníka a často není schopen svého řídicího agenta najít. Základní hodnotou pro agenty následníky byla zvolena hodnota $\gamma_F = 40$. Oproti tomu pro řídicí agenty byla za základní hodnotu zvolena hodnota $\gamma_L = 15$, jelikož řídicí agenti nevnímají agenty následníky jako překážky, a tedy přes ně vidí. Dále také musí v případě modelu B dbát na velikost svého roje a blízkost agentů v roji. Nižší hodnotu γ_L jsem nezvolila, aby nedocházelo ke zbytečným zácpám a příliš častému zastavování řídicích agentů. Při určení γ_L je také nutné vzít v úvahu mapu a počáteční konfiguraci agentů, příliš nízká hodnota γ_L by mohla způsobit, že někteří z agentů následníků nebudou přiřazeni k roji.

- ϵ – Částečná informovanost agentů následníků – na ϵ závisí, zda budou mít všichni agenti jistotu, že se dokáží evakuovat. Pokud agenti následníci budou plně neinformovaní, nebudou se snažit evakuovat, ani když budou dlouhý čas mimo roj.
- ϕ – Konfliktní vzdálenost řídicích agentů – pokud by se dva řídicí agenti dostali od sebe na vzdálenost nižší, než je konfliktní vzdálenost, vyhodnotí se při konfliktovém prohledávání, že mají na těchto pozicích spolu konflikt.

5.3.1 Parametry speciální pro model B

- η – Minimální velikost roje – při každém kroku řídicí agent kontroluje, kolik agentů z jeho roje se pořád nachází v jeho blízkosti. Klesne-li tato hodnota pod určenou hranici, řídicí agent se zastaví a čeká, dokud ho dostatečné množství agentů následníků nedožene, či dokud jeho doba čekání nepřekoná určenou hranici.

Je-li hodnota η zvolena jako příliš nízká, řídicí agent po cestě spoustu agentů následníků poztrácí. Pokud je však zvolena jako příliš vysoká, může to vést k zastavení všech agentů, pokud řídicí agent vejde do úzké uličky, kdy přes rohy nevidí na agenty následníky, kteří jsou však velmi blízko. Čeká tedy na ně, ale ulička se může ucpat jím i dalšími agenty následníky a daní skrytí agenti zpoza rohu nikdy nevyjdou, tedy dojde k zácpě.

5.4 Zkoumané prvky mapy

- θ – počet únikových východů – vyšší počet vhodně rozmístěných únikových východů může dle mých předpokladů znamenat urychlení evakuace. Agenti se nemusí snažit dostat k jedinému východu a může dojít k omezení situací, kdy vznikají zácpy, i ke zkrácení času evakuace.
- ι – šířka chodeb – tento parametr může ovlivnit vznikající zácpy, a tedy i čas evakuace, užší chodby mohou způsobit situace, kdy jeden roj bude blokovat celou chodbu a pokud se nebude dostatečně rychle pohybovat, může dojít k zácpě.

5.5 Hodnocení úspěšnosti pro jednotlivé modely

Nejdůležitějším kritériem stanovím rychlost evakuace, tedy počet kroků m , po kterých se zvládnou evakuovat všichni agenti nebo daná hraniční hodnota. Často se totiž u modelů bez částečné informovanosti agentů následníků může stát, že se někteří agenti následníci „zatoulají“ a bez řídicího agenta v dohledu se jim v přijatelném čase nepodaří opustit nebezpečnou oblast.

Jako další přístup k hodnocení můžu zvolit například procento evakuovaných agentů po počtu kroků n . N zvolím jako přirozené číslo stejné pro všechny modely, které se bude chovat jako hraniční hodnota, po níž se evakuace zastaví a budu moci vyhodnotit, jaké procento agentů se zvládlo evakuovat.

5.6 Experimenty

5.6.1 Počáteční experiment

V tomto základním experimentu porovnávám modely A (jednoduché následování) a B (přiřazené skupiny). Model A pracuje s částečnou informovaností agentů následníků, kdežto v modelu B jsou agenti následníci neinformovaní.

Nastavení parametrů Uvedené hodnoty byly u obou modelů nastaveny stejně, pokud není uvedeno jinak. Jedná se o počáteční hodnoty, které budou v průběhu dalších experimentů testovány a laděny.

Parametr	Hodnota parametru
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Částečná informovanost agentů následníků	model A ano, model B ne
Minimální počet agentů následníků v roji (pouze model B)	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

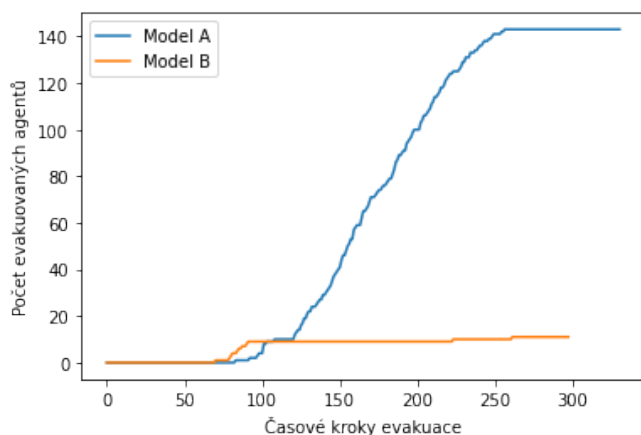
Sledovaná data V experimentu sleduji, jak se vyvíjí počet evakuovaných agentů v závislosti na čase (počtu kroků). Jako úspěšnější vyhodnotím model, kde se agenti zvládnou evakuovat rychleji a ve větším počtu.

Mou hypotézou je, že díky větší sofistikovanosti chování řídicího agenta v modelu B bude tento model co do rychlosti evakuace úspěšnější než model A. Předpokládám však, že na rozdíl od modelu A nedojde v modelu B k evakuaci všech agentů, jelikož agenti následníci v modelu B nejsou informovaní a po ztrátě svého řídicího agenta neprovedou vlastní pokus o evakuaci.

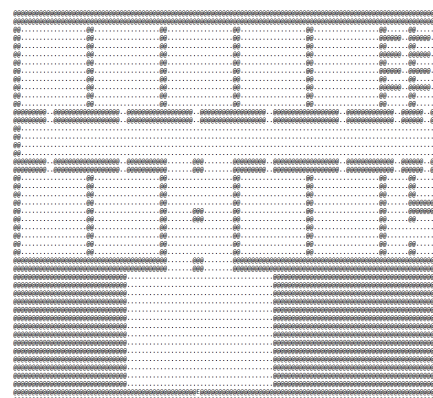
Popis grafu Z grafu na obrázku 5.5 lze vidět, že model A ve všech ohledech překonal model B. Křivka modelu B končí okolo kroku 300, jelikož v tomto čase se na mapě vytvořila zácpa, která nemohla být agenty odstraněna – několik řídicích agentů v úzkém prostoru čekalo na objevení dalších agentů následníků, ti však měli zacpanou cestu jinými agenty následníky, a tak se do roje nikdy nedostali.

Křivka modelu A během počátečních 300 kroků prudce stoupá, v těchto krocích se evakuují řídicí agenti a agenti následníci, kteří se těchto agentů zvládli držet. Poté dochází k dočasnému přerušení evakuace, nastává totiž evakuace agentů následníků, kteří se pomocí algoritmu BFS snaží evakuovat sami. Tito agenti jsou oproti rojům však pozadu.

Výsledky



Obrázek 5.5: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B



Obrázek 5.6: Mapa použitá při experimentu

Interpretace výsledků V modelu A došlo u východu k zácpě, která zabraňovala agentům v evakuaci, a proto se nemohli všichni evakuovat. Na základě tohoto zjištění jsem provedla příslušné modifikace, které se projeví v následujících experimentech.

Ač je model B co do chování řídicích agentů sofistikovanější, model A si v tomto experimentu vedl viditelně lépe, moje hypotéza se tedy nepotvrdila. Toto je způsobeno rozdíly v chování agentů následníků, kteří se v modelu A po jisté době strávené mimo dohled řídicího agenta snaží o vlastní evakuaci a oproti tomu v modelu B se tito agenti pohybují pouze náhodně a nesnaží se o vlastní evakuaci. Kvůli tomu je nepravděpodobné, že by se v modelu B agenti následníci evakovali všichni.

V modelu B došlo také k neřešitelné zácpě způsobené čekáním řídicích agentů na agenty následníky. Na základě tohoto zjištění byl model modifikován, aby řídicí agenti po jisté době, kdy jim již do roje nepřibývají agenti následníci, vykonali pohyb směrem k východu a bylo tak zabráněno nekonečnému čekání.

Protože v modelu A díky zapojení částečné informovanosti agentů následníků vždy nakonec dojde k evakuaci všech agentů a oproti tomu v modelu B je takový výsledek takřka nemožný, bylo by vhodné také porovnat tyto modely nastavené tak, aby v obou byli agenti následníci buď částečně informováni či nikoliv, chovali by se však pro oba modely stejně. Těmto experimentům se budu věnovat dále.

Tento počáteční experiment ukázal extrémní rozdíly mezi modely, což se nezdá být realistické. Posloužil mi tedy jako východisko k modifikaci jednotlivých modelů.

5.6.2 Porovnání vývoje evakuace v modelech A a B s částečně informovanými následníky

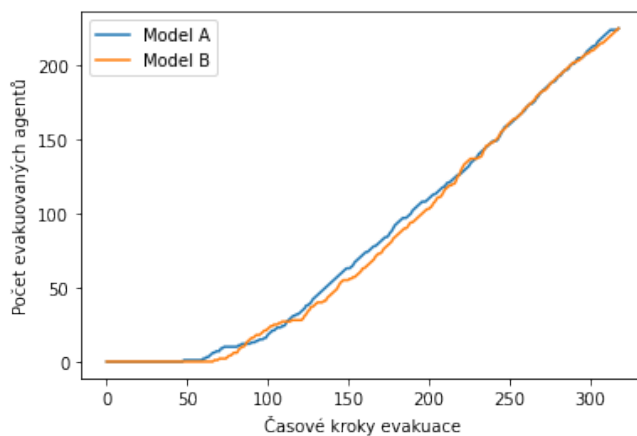
Nastavení experimentu Na základě prvotního experimentu byly algoritmy modifikovány, aby lépe odpovídaly reálnému chování. Předpokládám, že se toto výrazně odrazí na výsledcích.

Uvedené hodnoty byly u obou modelů nastaveny stejně, pokud není uvedeno jinak.

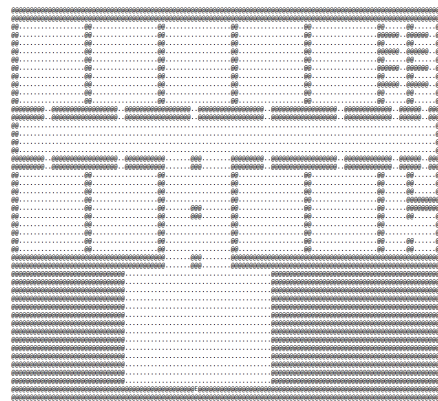
Parametr	Hodnota parametru
Použitá mapa	building_1.4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Minimální počet agentů následníků v roji (pouze model B)	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji zde, jak se vyvíjí evakuace, pokud jsou v obou modelech agenti následníci částečně informovaní. Toto by mělo mít za následek stoprocentní počet evakuovaných na konci evakuace, která není nijak časově omezená. Předpokládám, že navrch bude mít model B, jelikož je sofistikovanější a na rozdíl od prvotního experimentu již nemá oproti modelu A nevýhodu spočívající v neinformovanosti agentů následníků.

Výsledky



Obrázek 5.7: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B



Obrázek 5.8: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu Z grafu vyplývá, že v obou modelech probíhá evakuace velmi podobně, s malými odchylkami ve prospěch modelu A.

V modelu B se roje sestávají z alespoň $\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil + 1$ agentů, kdežto v modelu A se často řídící agent od svých následníků odtrhne a evakuuje se sám, proto se v modelu A začínají evakuovat první agenti dříve než v modelu B, jedná se o tyto osamocené řídící agenty.

V modelu B tedy na rozdíl od modelu A k cíli typicky dorazí najednou větší počet agentů. Projevuje se to i grafu, kde se u tohoto modelu střídají místa s rychlejším a pomalejším růstem, přičemž v místech s rychlejším růstem model B dohání počty evakuovaných modelu A, kde evakuace po prvních 130 krocích probíhá již téměř lineárně.

Interpretace výsledků – jak určit, který z modelů je úspěšnější, pokud jsou si výsledky natolik podobné? Mohu stanovit, že nejdůležitější je pro mě průběh např. první poloviny evakuace – typicky platí, že čím dříve se agenti evakuují, tím lépe, jelikož na evakuaci nikdy není nekonečné množství času[21].

Pokud se nyní podívám na výsledky, vidím, že model A v první části experimentu počty evakuovaných agentů převažuje model B – není to extrémní rozdíl, je ale znatelný. Jak jsem ale již výše zmínila, model B občasné nedostatky rychle dohání a odchylky v počtu agentů jsou po zbytek experimentu minimální. Co se týče rychlosti, agenti v modelu A se evakovali za stejný počet časových kroků, jako v modelu B.

Model A by se podle první metriky dal považovat za úspěšnější, co do rychlosti evakuace jsou si pak modely rovny, což nepotvrzuje moji hypotézu. Je však nutné vzít v úvahu i realističnost těchto modelů. Model B také na základě [22, 23] považuji za realističtější. K dalším experimentům budu využívat převážně model B, právě kvůli jeho vyšší realističnosti a srovnatelnými výsledky s modelem A.

Na rozdíl od počátečního experimentu si lze povšimnout, že u modelu A již nenastává zlom, po kterém by došlo k přerušení evakuace. Toto je způsobeno modifikací algoritmu, která byla na základě prvního experimentu provedena. Po modifikaci stačí, aby se agent přiblížil k východu alespoň na vzdálenost 2 a poté opouští budovu a je evakuován. Také byla zvolena oblast u východu, ve které se již příliš nízké vzdálenosti řídících agentů nepočítají jako konflikty. Tyto modifikace předchází neřešitelným zácpám, kdy se blízko východu sejde několik řídících agentů, avšak žádný z nich se nemůže k východu dostat, aniž by se dostal do konfliktu s jinými řídícími agenty.

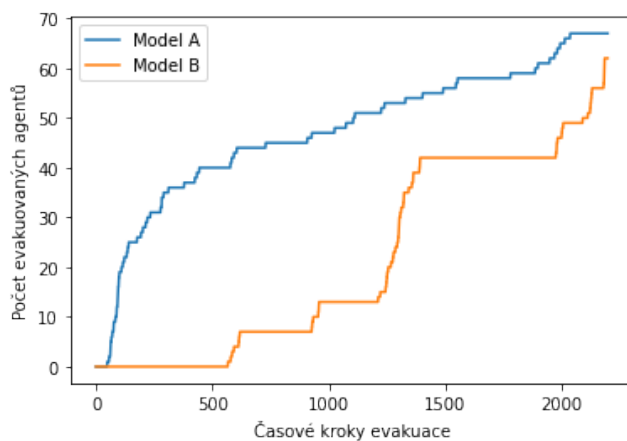
5.6.3 Porovnání vývoje evakuace v modelech A a B s neinformovanými agenty následníky

Nastavení experimentu Uvedené hodnoty byly u obou modelů nastaveny stejně, pokud není uvedeno jinak.

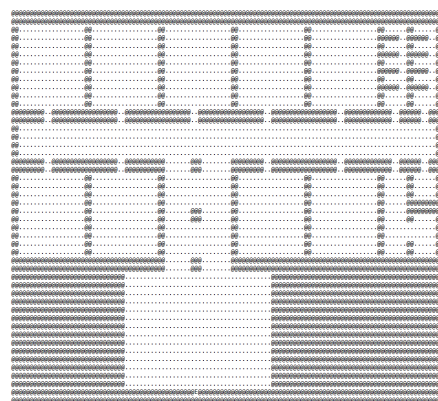
Parametr	Hodnota parametru
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Částečná informovanost agentů následníků	ne
Minimální počet agentů následníků v roji (pouze model B)	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji vývoj evakuace v případě, že agenti následníci v obou modelech jsou neinformovaní a v případě odtržení od roje se sami evakuovat nesnaží. Proto předpokládám nízkou úspěšnost obou modelů, jelikož je pravděpodobné, že se části agentů následníků od rojů odtrhnou a neevakuují se. Předpokládám, že co do počtu evakuovaných agentů povede B, jelikož v tomto modelu si řídicí agenti hlídají minimální počet agentů následníků v roji. Zároveň je toto však bude zpomalovat oproti modelu A, kde se řídicí agenti a agenti následníci, kteří se zvládnou v roji udržet, evakuují rychleji.

Výsledky



Obrázek 5.9: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase v modelech A a B



Obrázek 5.10: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu V grafu je vidět, že během celého průběhu evakuace v počtu evakuovaných agentů vede model A. V modelu B dochází k velkým prodlevám v postupu evakuace. Dochází vždy k evakuaci celé části roje najednou, což se v grafu projevuje výraznými skoky v počtu evakuovaných agentů.

Interpretace výsledků Jelikož jsou roje v modelu A mnohem více roztroušené, což je dáno chováním řídicích agentů, nevznikají místa, kdy by se po delší dobu – v řádech jednotek až desítek kroků – žádní agenti neevakovali. Poté, co se však evakuují všichni agenti, kteří byli součástí roje, může u obou modelů dojít k evakuaci části opuštěných agentů pouze poté, co se posloupností svých náhodných kroků přiblíží na dostatečnou vzdálenost k východu.

Převahu jasně získává model A, má hypotéza se tedy nepotvrdila.

5.6.4 Porovnání modelů A a B v závislosti na částečné informovanosti agentů následníků

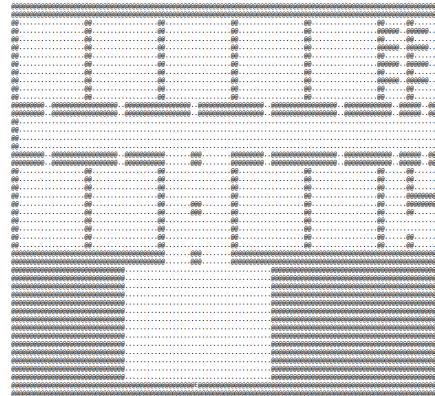
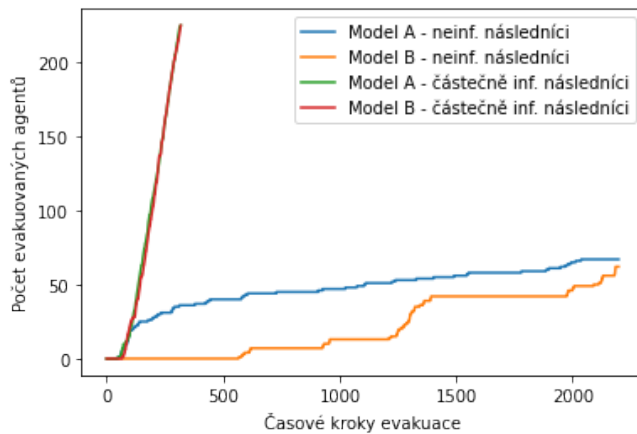
Nastavení experimentu Uvedené hodnoty byly u obou modelů nastaveny stejně, pokud není uvedeno jinak.

Parametr	Hodnota parametru
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji (pouze model B)	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji, jak se mění průběh evakuace v modelech A i B podle chování agentů následníků. Předpokládám, že rychlost evakuace bude vyšší při částečné informovanosti, protože jelikož se budou agenti sami snažit evakuovat, mohou se tím i zpátky připojit ke svému roji. Zároveň se díky částečné informovanosti evakuují všichni, což se nedá říct o evakuaci s neinformovanými agenty následníky, kteří po ztrátě řídicího agenta mohou nanejvýš „zmateně pobíhat“.

Popis grafu Jak vyplývá z Obrázku 5.11, modely s částečnou informovaností agentů následníků mají viditelnou převahu nad modely pracující s neinformovanými agenty následníky, jak co se týče rychlosti evakuace, tak co se týče počtu evakuovaných. Model A s neinformovanými agenty následníky začíná viditelně ztrácet na modely s částečně informovanými agenty následníky po cca 100 krocích, kdy růst počtu evakuovaných agentů začíná zpomalovat až místy úplně zastavovat.

Výsledky



Obrázek 5.11: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase

Obrázek 5.12: Mapa použitá při experimentu

Interpretace výsledků Je nepravděpodobné, že u modelů s neinformovanými agenty následníky může dojít k úplné evakuaci, jelikož se neinformovaní agenti následníci o evakuaci aktivně nesnaží. Pokud se podaří některým zbloudilým agentům se evakuovat i po ztrátě řídicího agenta, znamená to, že se díky vykonané posloupnosti náhodných kroků dostali do pozice, kdy mají výhled na východ, jímž jejich řídicí agent odešel.

5.6.5 Vliv počtu agentů na úspěšnost evakuace

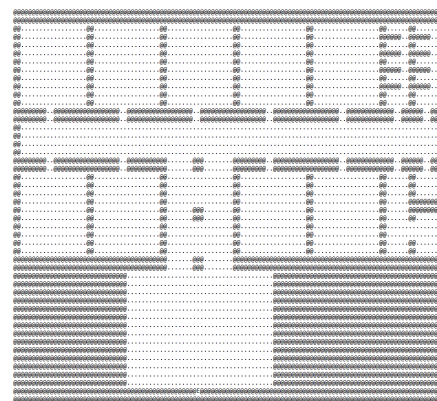
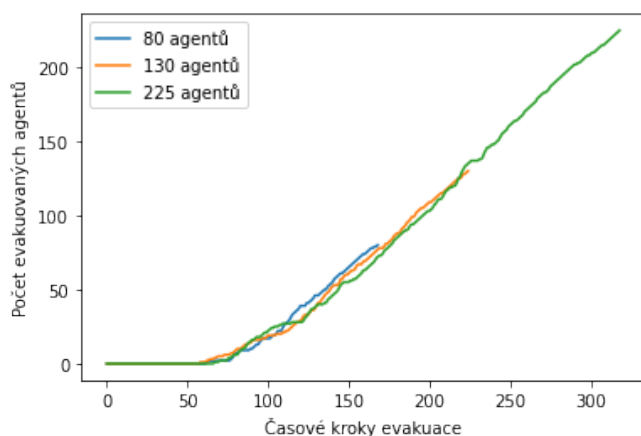
Pro tento a další experimenty volím na základě výsledků předchozích experimentů model B s částečnou informovaností agentů následníků.

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji vývoj evakuace v závislosti na počtu evakuovaných agentů následníků. Vždy se evakuuje 9 řídicích agentů, počet agentů následníků se však mění. Sleduji evakuaci 80, 130 a 225 agentů. Předpokládám, že evakuace bude rychlejší pro nižší počet agentů. Jelikož nebude potřeba dostat takové množství agentů skrze úzké prostory, nedojde k zácpám a odtržení většinové části agentů následníků od jejich rojů.

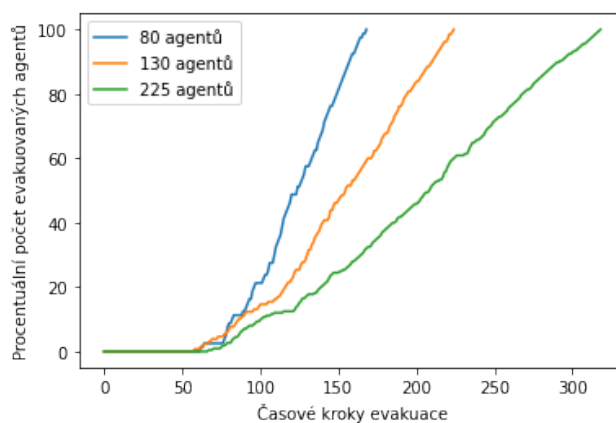
Výsledky



Obrázek 5.13: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase

Obrázek 5.14: Mapa použítá při experimentu

Popis grafu Evakuace v prvních 100 krocích probíhají u všech případů srovnatelně, poté získává mírnou převahu případ, kde se evakuuje 80 agentů. Všechny případy se zdají srovnatelné, často se však střídají v rychlosti – například případ s 80 agenty zpočátku mírně ztrácí, okolo kroku 100 již však předhání případ s 225 agenty.



Obrázek 5.15: Graf závislosti procent evakuovaných agentů na čase

Popis grafu V grafu ukazujícím procentuální počet evakuovaných agentů v závislosti na čase jsou rozdíly mezi modely znatelné, nejlépe si podle očekávání vede případ s nejmenším počtem agentů. U tohoto případu je znatelný ostřejší růst než u ostatních dvou případů.

Evakuace 80 agentů byla provedena za 53% času evakuace 225 agentů, evakuace 130 agentů pak zabrala 70% času evakuace 225 agentů.

Interpretace výsledků Má hypotéza se tedy potvrdila, snížením počtu agentů došlo k nárůstu rychlosti evakuace. Ač se ztracení agentů v úzkých spletitých prostorech nedá plně předejít, zmenšení počtu agentů mělo za následek, že se větší části agentů následníků dokázaly držet v roji a pokud došlo ke ztrátě řídicího agenta, mnohdy se byli schopni zpět k němu připojit, jelikož se omezil vznik zatarasěných úzkých prostor agenty následníky, kteří byli ztraceni a nebyli sto úzké prostory opustit.

5.6.6 Vývoj účelové funkce v závislosti na počtu evakuovaných agentů

Nastavení experimentu

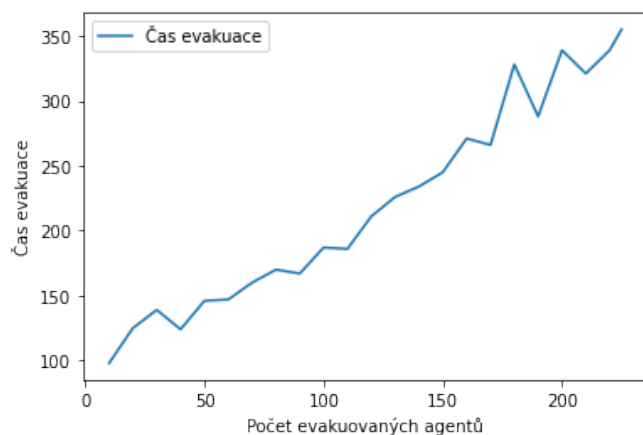
Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji vývoj účelové funkce – času evakuace – v závislosti na počtu agentů. Řídicích agentů je vždy 9, agentů následníků je však 1–216. Pozorované počty se liší vždy o 10 agentů. Předpokládám růst hodnoty účelové funkce s vyšším počtem agentů.

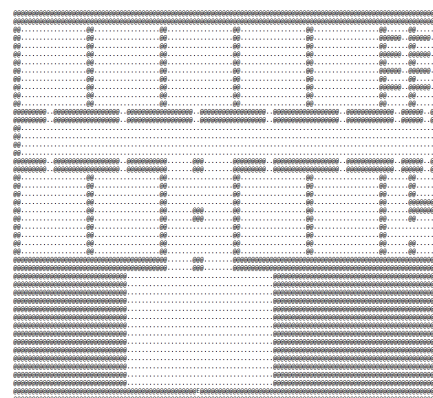
Popis grafu V grafu na obrázku 5.17 převažuje trend rostoucího času evakuace s rostoucím počtem evakuovaných agentů. Lze si všimnout několika prudkých nárůstů času evakuace vyskytujících se nepravidelně při různých počtech evakuovaných agentů.

Lze si však také povšimnout, že kromě těchto výjimečných případů, se čas evakuace nezvýší pokaždé, když se zvýší počet agentů následníků, rozdíly jsou však jasně znatelné při rozdílech v počtu o několik desítek agentů.

Výsledky



Obrázek 5.16: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů



Obrázek 5.17: Mapa použitá při experimentu

Interpretace výsledků Experimenty, při nichž čas evakuace oproti experimentům s podobným počtem agentů prudce vzrostl, při svém průběhu narazily na chování řídicích agentů, kdy vznikla zácpa způsobená několika roji, které se najednou setkaly v úzké chodbě. Jelikož roje čekající na připojení ztracených agentů zablokovaly východy z místností, kde se tito ztracení agenti nacházeli, řídicí agenti čekali po dobu 26 kroků, kdy se i přes malou velikost roje mohli pohnout. Takto byla jejich evakuace sice zpomalena, nebyla však zastavena úplně a agenti se tak po prodlevě evakovali.

Lze si také povšimnout, že zácpy jsou frekventovanější s větším počtem agentů. Toto souvisí s dříve zmíněným blokováním východu při čekání rojů, které může vzniknout pouze, pokud je chodba úzká nebo se na ní vyskytuje takový počet agentů, že agenti zaberou většinu volných míst. Při nižším počtu agentů k této situaci dochází méně často, jelikož jsou požadavky na minimální velikosti rojů nižší a řídicí agenti se pohybují rychleji. Díky tomu se i roje kolem nich pohybují dále od východu a neblokují jej.

V případech, kdy k žádné zácpě nedošlo, lze pozorovat trend narůstajícího času evakuace zároveň s rostoucím počtem agentů. Toto je způsobeno jak již výše zmíněným zkráceným čekáním řídicích agentů v případech s nižším počtem agentů následníků, kdy řídicí agenti čekající na nižší počet agentů následníků provádějí plynulejší pohyb. Zároveň také nižší počet evakuovaných agentů do jisté míry zabraňuje vzniku front před východem. Tyto fronty vznikají v závěru evakuace, kdy se k východu dostávají hlavně opoždilí agenti odtržení od svého roje, kteří již využívají svého prohledávacího algoritmu.

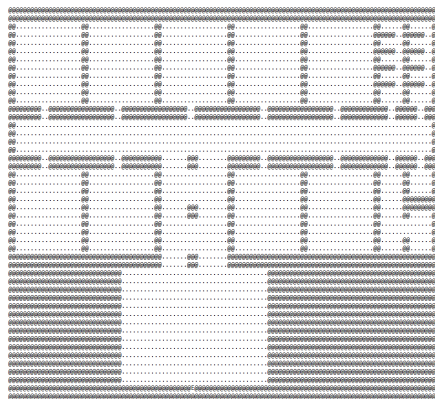
Mohu prohlásit, že se hypotéza potvrdila, a s rostoucím počtem evakuovaných agentů narůstá i čas evakuace.

5.6.7 Vývoj účelové funkce a jejích odchylek v závislosti na počtu evakuovaných agentů

Nastavení experimentu Sledovaný počet agentů jsem inkrementovala kromě nejvyšší hodnoty vždy po deseti agentech a pro každou tuto hodnotu bylo provedeno 10 experimentů. Nejnižší počet agentů byl 10, nejvyšší pak 225. Při všech experimentech byl počet řídicích agentů 9, počet agentů následníků se pak pohyboval mezi 1–216.

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

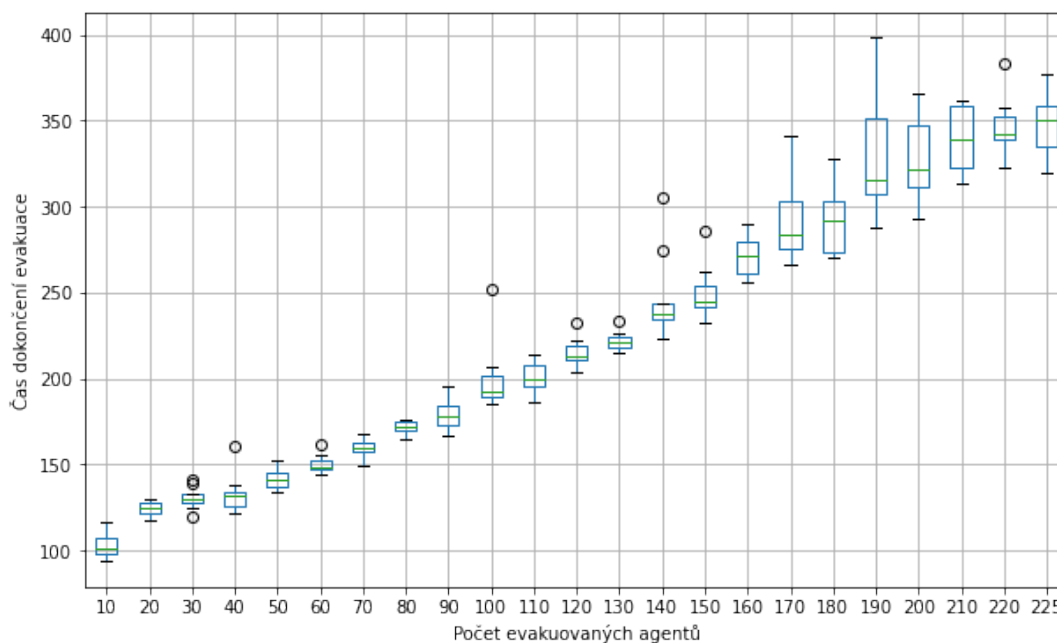
Sledovaná data V závislosti na pozorovaných odchylkách v předchozím experimentu zde věnuji pozornost variabilitě dat znázorněných pomocí krabicového diagramu. Mou hypotézou je, že se s vyšším počtem evakuovaných agentů bude zvyšovat i průměrný čas evakuace, a při vyšším počtu evakuovaných agentů bude častěji docházet k zácpám.



Obrázek 5.18: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu Na obrázku 5.19 je vidět, že u experimentů s 10–150 agenty se až na výjimky rozdíl časů evakuace při jednotlivých počtech pohybují pouze v řádech jednotek. Znatelný rozdíl nastává v případech s 160–225 agenty, kdy jsou hodnoty rozprostřeny v řádech desítek. Také pozoruji postupný růst minimální hodnoty času evakuace.

Výsledky



Obrázek 5.19: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů

Interpretace výsledků Odlehlé body v grafu jsou způsobeny zácpami, ke kterým při daných experimentech došlo. K zácpám, které by prodloužily průměrný čas evakuace docházelo jak při nižším počtu agentů (např. při 40 agentech), tak při vyšším počtu (např. 220 agentů). Platí však, že k takovým případům docházelo nejčastěji v rozmezí 100–225 agentů.

Hodnota průměrného času evakuace s přibývajícím počtem agentů roste, roste však i variabilita těchto časů. Při vyšším počtu agentů častěji dochází k zácpám, protože se do úzkých chodeb může dostat několik rojů najednou a navzájem si cestu blokovat. Také je hodnota η pro řídicí agenty vyšší, a tedy musí čekat na více agentů, což se opět jeví jako problematické, pokud únik agentů z úzkých prostor blokují jiné roje či agenti následníci ze stejného roje, kteří v danou chvíli čekají na pohyb stojícího řídicího agenta. Tento jev je při nižším počtu agentů následníků částečně eliminován, jelikož se v chodbách nevyskytuje najednou tolik agentů a neblokují si navzájem cestu. Nelze však očekávat úplnou eliminaci jisté odchylky v časech evakuace, protože agenti následníci mohou svým neposlušným chováním čas evakuace značně prodloužit.

Díky problémům pozorovaným počínaje 100 evakuovanými agenty mohu konstatovat, že použitá mapa se pro počet agentů 100 či více stává nebezpečnou.

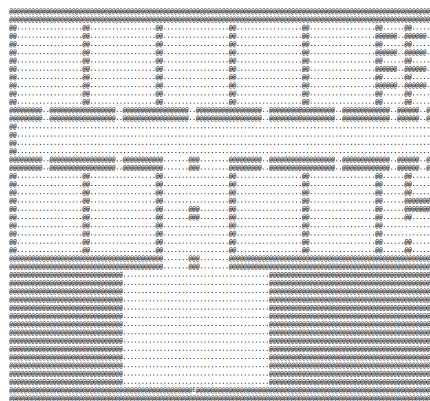
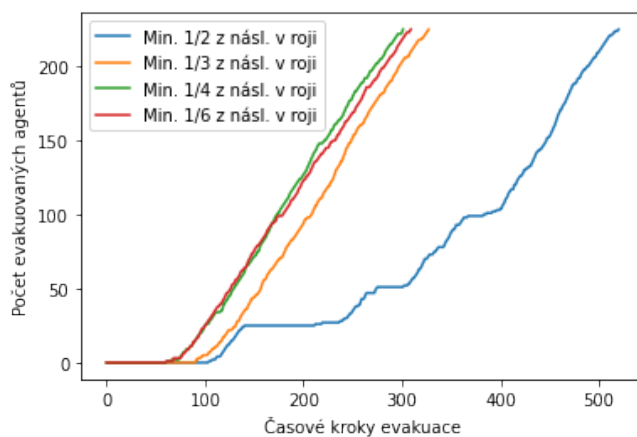
5.6.8 Vliv minimální velikosti roje η na rychlost evakuace

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\eta \in \left\{ \left\lceil \frac{n_agentu}{2} \right\rceil, \left\lceil \frac{n_agentu}{3} \right\rceil, \left\lceil \frac{n_agentu}{4} \right\rceil, \left\lceil \frac{n_agentu}{6} \right\rceil \right\}$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Pozoruji vývoj evakuace v závislosti na parametru η . Předpokládám, že se zvyšující se velikostí η bude klesat rychlost evakuace, protože řídicí agenti budou muset čekat na větší počet agentů následníků, a tedy častěji zastavovat a čekat, což může mít za následek i zvýšený výskyt zácp.

Výsledky



Obrázek 5.20: Graf závislosti počtu evakuovaných agentů na čase

Obrázek 5.21: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu V grafu lze vidět, že přestože je znatelný rozdíl v rychlosti evakuace $\eta = \left\lceil \frac{n_agentu}{2} \right\rceil$ proti ostatním případům, rychlost evakuace $\eta = \left\lceil \frac{n_agentu}{3} \right\rceil$, $\eta = \left\lceil \frac{n_agentu}{4} \right\rceil$ a $\eta = \left\lceil \frac{n_agentu}{6} \right\rceil$ je srovnatelná po celou dobu evakuace, přičemž $\eta = \left\lceil \frac{n_agentu}{3} \right\rceil$ za

dvěma nejrychlejšími případy mírně zaostává. Zároveň si lze povšimnout, že v případě $\eta = \lceil \frac{n_agentu}{2} \rceil$ došlo v průběhu evakuace k zácpě, která zvýšila konečný čas evakuace tohoto případu.

Interpretace výsledků Z grafu vyplývá, že existuje hranice minimální velikosti roje, pod kterou se již rychlost evakuace příliš neliší. Pro provedené experimenty jsou výsledky evakuace téměř totožné pro $\eta \leq \lceil \frac{n_agentu}{4} \rceil$, a to po celý průběh evakuace. Pro nižší hodnoty η se rychlost evakuace zvýšila, což bylo zapříčiněno i vzniklou zácpou, pomalejší průběh evakuace oproti ostatním případům však pozorují i v části evakuace předcházející tuto komplikaci. Vzhledem k podobnosti části výsledků se však moje hypotéza nepotvrdila.

Parametr η sám o sobě má vliv na rychlost evakuace, pouze však, pokud jeho hodnota překoná jistou hranici. Předpokládám, že na rychlost evakuace může mít větší vliv změna parametru η zároveň se změnami parametru γ určujícího velikost zorného pole agentů. Této hypotéze se budu věnovat v následujícím experimentu.

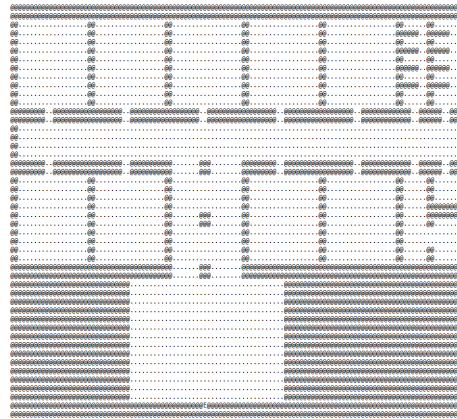
5.6.9 Vliv kombinace parametrů η a γ na rychlost evakuace

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\eta \in \{ \lceil \frac{n_agentu}{2} \rceil, \lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil, \lceil \frac{n_agentu}{4} \rceil, \lceil \frac{n_agentu}{6} \rceil \}$
Zorné pole agenta následníka	$\gamma_F \in \{10, 25, 40, 55\}$
Zorné pole řídicího agenta	$\gamma_L \in \{15, 35, 55\}$
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

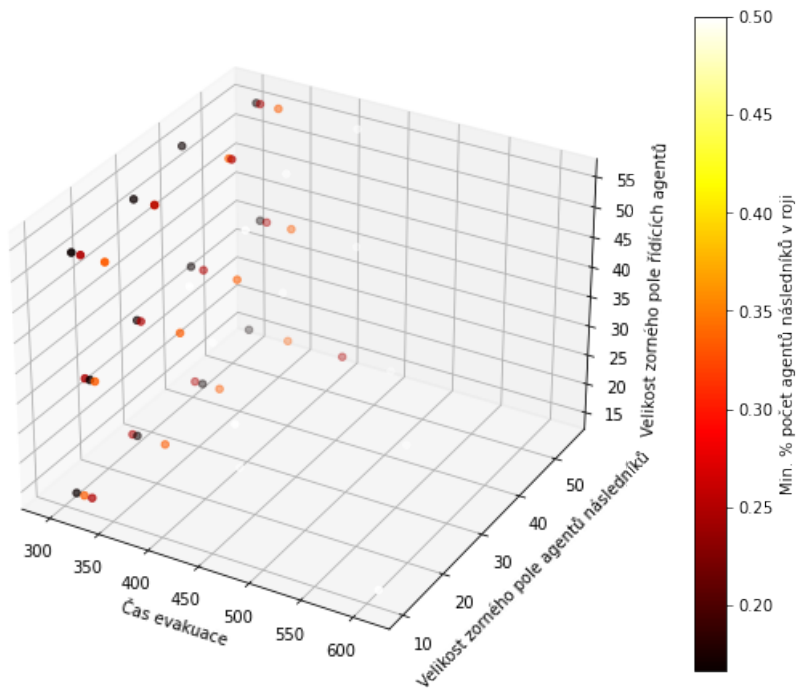
Sledovaná data V tomto experimentu sleduji, jak kombinace parametrů η , γ_L a γ_F ovlivní rychlost evakuace. Mou hypotézou je, že se zvyšující se hodnotou parametru γ_F rychlost evakuace poroste. Také předpokládám, že vyšší nastavení γ_L společně s nízkým η povede k rychlejší evakuaci řídicích agentů. Pokud však bude zároveň nastavena nízká hodnota γ_F , agenti následníci budou rychleji opuštěni a sníží se tak jejich rychlost evakuace, což povede k celkovému zvýšení času evakuace.

Je tedy třeba dbát na vhodné nastavení všech třech parametrů zároveň, neboť nevhodné zvolení byť jen jednoho z nich by mohlo vést ke značnému zvýšení času evakuace.



Obrázek 5.22: Mapa použitá při experimentu

Výsledky

Obrázek 5.23: Graf závislosti času evakuace na parametrech η , γ_L a γ_F

Popis grafu V grafu lze vidět, že nejvyšší časy evakuace, které nejsou tolik vychýlené, aby je šlo považovat za zácpu, se nacházejí v oblasti s vysokou hodnotou γ_L , vysokým γ_F a vysokou hodnotou η .

Interpretace výsledků Z experimentu vyplývá, že nejhorší časy evakuace skýtají kombinace vysokého γ_L a vysokého η . Jedná se totiž o případy, kdy řídicí agenti ve svém širokém zorném poli vidí dostatek agentů následníků a nemusí tak stát a čekat, ovšem zorné pole agentů následníků může být příliš úzké na to, aby daného řídicího agenta zachytilo, a tak se za ním nepohybují, což prodlužuje délku jejich evakuace. Z grafu je patrné, že tyto případy ovlivňuje η , kdy větší hodnoty parametru vedou k vyššímu času evakuace, stále je však nejpatrnější vliv nastavení $\eta = \lceil \frac{n_agentu}{2} \rceil$, které stojí za nejvyššími dosaženými časy evakuace.

Na základě výsledků tedy mohou vyhodnotit, že vhodné nastavení parametrů γ_L a γ_F je takové, kde se hodnota γ_L přibližuje hodnotě γ_F . Zároveň se ukazuje jako vhodnější zvolit nižší hodnotu γ_L , například 15, v kombinaci s nižší hodnotou γ_F , podle experimentů například 10–20. Za vhodné nastavení parametru η s ohledem na výsledky předchozího i tohoto experimentu považují $\eta \in \{\lceil \frac{n_agentu}{4} \rceil, \lceil \frac{n_agentu}{6} \rceil\}$.

5.6.10 Vývoj evakuace v závislosti na parametru ϕ

Nastavení experimentu

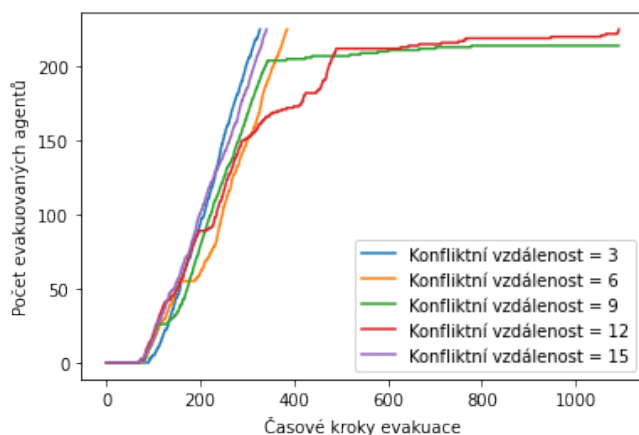
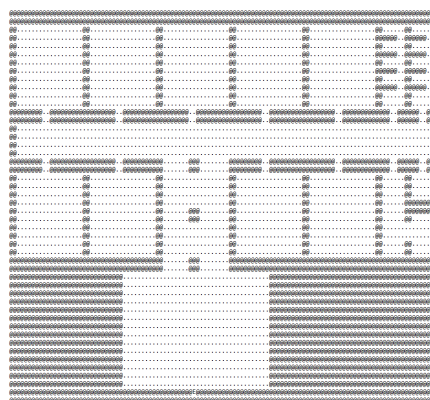
Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	$\phi \in \{3, 6, 9, 12, 15\}$

Sledovaná data Sleduji, jak se bude vyvíjet čas evakuace v závislosti na konfliktní vzdálenosti řídicích agentů.

Předpokládám, že rychlost evakuace se s vyšší konfliktní vzdáleností sníží, protože agenti budou se vzrůstajícím ϕ vnímat jako konfliktní pozice stále rozsáhlejší části mapy, což jim bude značně omezovat pohyb, a tedy je brzdit.

Popis grafu Na obrázku 5.24 je vidět, že při evakuaci s vyšší hodnotou ϕ docházelo k problémům, které v případě $\phi = 9$ vedly k tomu, že se do konce experimentu neevakovali všichni agenti. Při $\phi = 9$ se do konce experimentu evakovalo 214 agentů. Při ostatních experimentech se evakovali všichni agenti, pozorují však převážně narůstající čas evakuace s rostoucím ϕ , s výjimkou $\phi = 15$.

Výsledky

Obrázek 5.24: Vývoj evakuace v závislosti na konfliktní vzdálenosti řídicích agentů ϕ 

Obrázek 5.25: Mapa použitá při experimentu

Interpretace výsledků Problémy, které vznikly při evakuacích s vyšším ϕ , způsobili řídicí agenti, kteří se v případech $\phi = 9$ a $\phi = 12$ dostali do patové situace, kdy nemohli provést žádný krok, aniž by se dostali do konfliktu. Došlo například k situaci, kdy se agenti poprvé dostali na dohled, přičemž oba dva stáli u východu z místnosti. Ani jeden však nemohl postoupit o krok dopředu, aniž by se dostal do konfliktu. Díky tomuto se daní řídicí agenti s částí svých agentů následníků nebyli schopni v případě $\phi = 9$ evakuovat.

Někteří agenti následníci z příslušných rojů se však evakovali, pokud se díky náhodným pohybům uvnitř roje způsobeným jejich neposlušností dostali ven z místnosti a za roh, kde již neviděli na svého řídicího agenta. Cestu zpátky na místo, kde jej posledně viděli, jim pak mohli blokovat jiní agenti následníci. Mohlo se tak stát, že daný agent následník zůstal mimo dohled řídicího agenta natolik dlouho, že se začal snažit o vlastní evakuaci. Z tohoto důvodu proběhla i částečná evakuace rojů, jejichž řídicí agent byl zastaven v místnosti či na místě, kde se mu přes zeď mohli agenti následníci ztratit.

S narůstajícím ϕ narůstal i počet konfliktů. To je dáno neúplností algoritmu. Ač to vede ke zvýšení času evakuace, paradoxně to pomohlo některým řídicím agentům, které konflikt zachránil od patové situace popsané výše, například v případě $\phi = 12$. Pořád však platí, že vznikly konfliktů negativně ovlivňují evakuaci za předpokladu vhodně nastaveného ϕ , často totiž vznikají zácpy, které čas evakuace zvyšují. Moje hypotéza se tedy potvrdila a za nejvhodnější hodnotu volím $\phi = 3$.

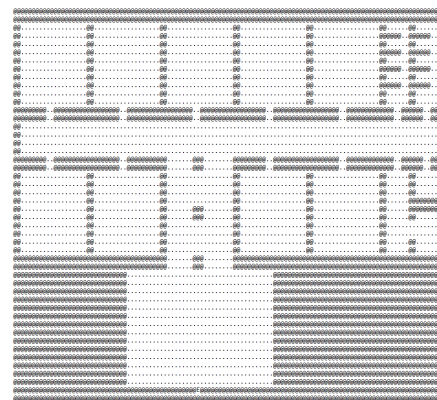
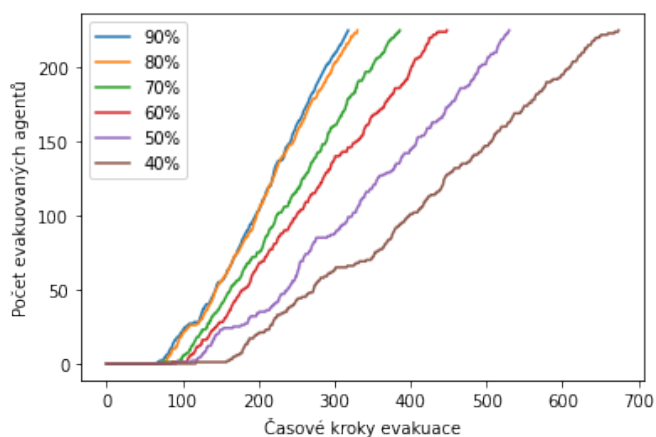
5.6.11 Vývoj evakuace v závislosti na parametru β

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	{40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%}
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji, jak se bude vyvíjet evakuace v závislosti na β . Předpokládám, že nižší β bude mít za následek zvýšený čas evakuace, protože se agenti následníci budou častěji snažit odtrhnout od svých rojů a nebudou postupovat nejkratší cestou k východu.

Výsledky



Obrázek 5.26: Graf vývoje evakuace v závislosti na parametru β

Obrázek 5.27: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu Z grafu je patrné, že se snižujícím se β narůstá čas evakuace, a to v řádech stovek časových kroků. Časy evakuace se vyvíjely následovně:

β	Čas evakuace
90%	320
80%	332
70%	381
60%	450
50%	532
40%	676

Interpretace výsledků Agenti následníci s nižším β častěji nenásledují kroky svého řídicího agenta a tím, jak vypovídají experimenty, skutečně zbrzdí evakuaci. Moje hypotéza se tedy potvrdila.

Při nižším β se následkem své neposlušnosti agenti následníci častěji odtrhávají svému roji a více se mu úmyslně vzdalují. Díky tomu pak své řídicí agenty ztratí z dohledu a do doby, než se začnou snažit o samostatnou evakuaci, získají na svůj roj velkou ztrátu. Právě toto vede ke zvyšujícímu se času evakuace se snižujícím se β . Nižší β může vést také ke zvýšenému výskytu zácp.

5.6.12 Vývoj průměrného času evakuace v závislosti na parametru α

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% pravděpodobnost informovanosti řídicích agentů	{40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%}
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

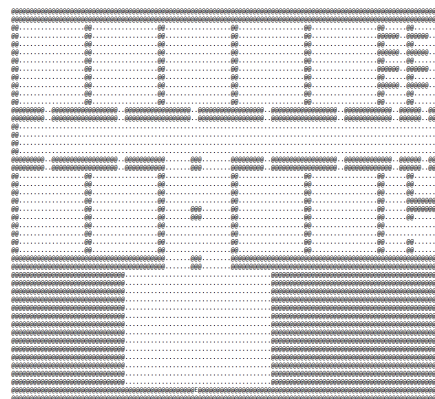
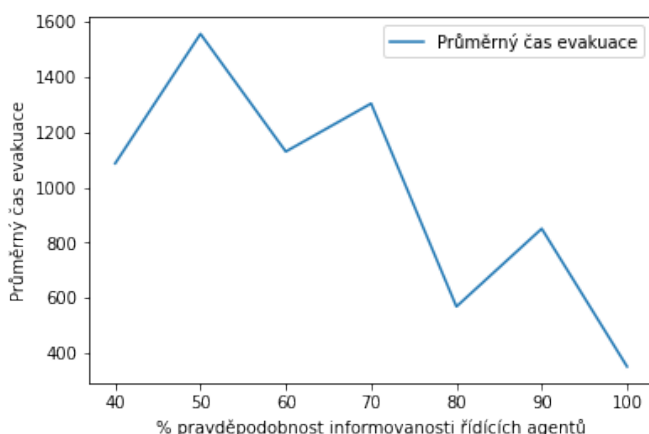
Sledovaná data Sleduji, jak se vyvíjí průběh evakuace v závislosti na procentuální pravděpodobnosti informovanosti řídicích agentů α .

Na rozdíl od agentů následníků se o informovanosti řídicích agentů rozhoduje pouze jednou, před počátkem plánování cest. Konfliktového prohledávání se tedy pokaždé zúčastní stejní řídicí agenti. Proto jsem zvolila provedení více experimentů pro stejné hodnoty, aby výsledky pravdivě reprezentovaly dopad různých hodnot pravděpodobnosti informovanosti řídicích agentů, neboť i při nízkém α může dojít k situaci, kdy většina řídicích agentů bude informovaná či naopak při vysokém α může dojít k situaci, kdy většina řídicích agentů bude neinformovaná.

Předpokládám, že při nižších hodnotách α bude docházet k většímu množství konfliktních situací, jelikož se část řídicích agentů nebude účastnit konfliktového prohledávání. Předpokládám, že toto bude mít za následek vyšší časy evakuace, protože konfliktní situace mohou způsobit zácpy, které na čas zabrání daným rojům pokračovat v evakuaci.

Jak je patrné z předchozích experimentů, k zácpám dochází často v situaci, kdy se dva či více řídicích agentů dostanou do konfliktu. Díky tomu předpokládám, že tento problém bude znatelný při tomto experimentu.

Výsledky



Obrázek 5.28: Graf průměrného času evakuace v závislosti na parametru α

Obrázek 5.29: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu Pro každou zkoumanou hodnotu α proběhlo 6 experimentů, v grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty těchto experimentů. Je vidět, že při nižším α značně stoupá průměrný čas evakuace. Rozdíl průměrného času evakuace mezi $\alpha = 40\%$ a $\alpha = 100\%$ činí 735 časových kroků.

Interpretace výsledků Se snižující se hodnotou α skutečně docházelo k vyššímu počtu konfliktů, mnohdy i několikanásobných, což značně prodlužovalo časy evakuace, jelikož vznikly těchto konfliktů vyvolávaly zácpy, které při konfliktu třech či více rojů trvaly i stovky časových kroků, než byly vyřešeny. Průměr $\alpha = 90\%$, který převyšuje $\alpha = 80\%$ či $\alpha = 70\%$ převyšující $\alpha = 60\%$ naznačuje, že i nižší počet neinformovaných agentů může způsobit značné problémy.

Tento experiment tedy ukázal výhodu konfliktového prohledávání – $\alpha = 100\%$ má nad nižšími hodnotami znatelnou výhodu a ač i při této hodnotě může dojít k zácpám, jejich výskyt je vzácnější. Je tedy důležité, aby spolu řídicí agenti komunikovali a snažili se vzájemným střetům vyhnout.

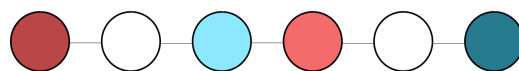
5.6.13 Vývoj evakuace v závislosti na počtu únikových východů θ

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Experiment odhalil nevhodné chování agentů následníků, které bylo modifikováno a výsledné experimenty odráží tuto modifikaci. Agenti následníci mají náhodně určen jeden východ, ke kterému směřují, pokud se dostatečně dlouho ocitnou mimo roj. Tento východ nemusí nutně být nejkratší možnou cestou k východu. Díky tomu docházelo k situacím, kdy se vedle sebe octli dva agenti následníci, kteří chtěli vykonat pohyb opačným směrem, jejich další krok by však vedl přes pozici, na které se zrovna nacházel druhý agent (viz. obrázek 5.30). Protože agenti následníci nebrali pozice ostatních agentů v potaz při plánování své cesty, nemohli se vzájemně vyhnout. V předchozích experimentech takový problém nenastal, protože všichni agenti směřovali k pouze jednomu východu.

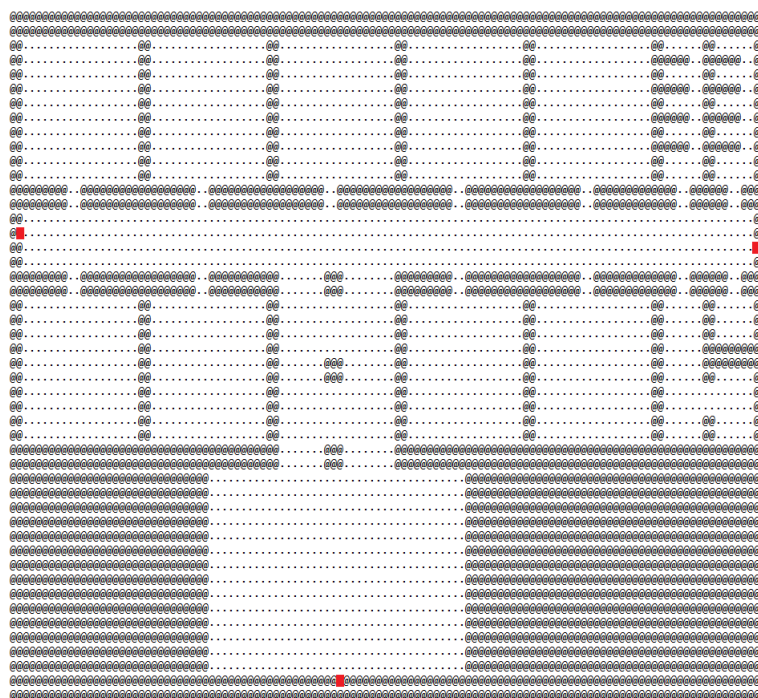
Abych předešla těmto nevhodným situacím, ale zároveň příliš nezvýhodnila agenty následníky, kteří by měli být co nejméně informovaní, zvolila jsem modifikaci jejich plánovacího algoritmu tak, aby se při plánování cesty vyhledali jiným agentům následníkům, ale pouze pokud se tyto agenti nacházejí od následníků na vzdálenost maximálně 2. Takto jsou agenti v bezprostřední blízkosti schopni navzájem se obejít, aniž by znali pozice všech agentů na mapě.



Obrázek 5.30: Vizualizace nastalého problému

Na obrázku lze vidět zjednodušená vizualizace vzniklého problému na neorientovaném grafu. Agent ve vrcholu vyznačeném světle modře se snaží dostat do bezpečného vrcholu vyznačeného tmavě modře. Oproti tomu agent ve světle červeném vrcholu putuje do tmavě červeného vrcholu. Plánované cesty obou agentů se tedy kříží.

Také jsem modifikovala agentní funkci agentů následníků. Pokud již vykonávají samostatné plánování, uvidí svého řídicího agenta a poté ho opět ztratí, nemohou hned pokračovat v plánování, ale znovu po dobu 30 kroků musí čekat, než začnou plánování provádět. Tuto modifikaci jsem zvolila, abych eliminovala situace, kdy byl agent následník



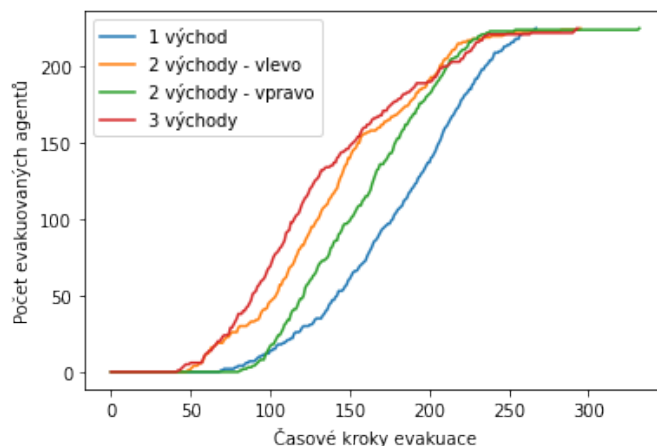
Obrázek 5.31: Použitá mapa s vyznačenými možnými únikovými cestami

zaveden do blízkosti východu řídicím agentem, poté ale svého řídicího agenta ztratil a vyhodnotil, že se vydá k jinému východu. Po několika provedených krocích ale mohl na řídicího agenta znovu uvidět a vydat se opět za ním. Mohl takto oscilovat po dobu i několika stovek kroků, což vedlo k prodloužení času evakuace. Tato modifikace této situaci do jisté míry zabránila, pro experimenty využívající pouze jeden východ je však nevhodná, protože agenty následníky i tak zpomaluje a čas evakuace prodlužuje.

Při experimentu měli agenti na výběr z 1, 2 nebo 3 východů, přičemž experimenty s dvěma východy byly provedeny dva, pokaždé byl použit jiný z východů nacházejících se v chodbě. Na obrázku výše jsou všechny možné východy vyznačeny červeně.

Sledovaná data V tomto experimentu sleduji, jak se bude evakuace vyvíjet v závislosti na počtu únikových východů. Předpokládám, že se bude čas evakuace snižovat s rostoucím počtem únikových východů.

Výsledky



Obrázek 5.32: Vývoj evakuace v závislosti na počtu únikových východů

Popis grafu Výsledné časy evakuace se příliš neliší, lze však pozorovat znatelný rozdíl v samotných průbězích evakuace. V případech s dostupným levým východem dochází k evakuaci prvních agentů dříve než v ostatních případech, ve všech případech s dostupným více než jedním východem je pak znatelné zrychlení průběhu evakuace.

Interpretace výsledků Konečný čas evakuace se příliš neliší, při experimentech s více východy dochází k pozdní evakuaci ojedinelých odtržených agentů následníků, kteří tak prodlužují čas evakuace. Mohu však pozorovat zvýšenou rychlost evakuace u případů s více dostupnými východy, které do jisté míry zabraňují kolizím většího počtu řídicích agentů najednou. Východy v chodbě se také pro některé roje nachází v blízkosti jejich počátečních pozic, tyto roje se tak evakuují první, přestože při pouze jednom dostupném východu by se evakovaly mezi posledními. Více únikových východů tedy evakuaci zefektivňuje, je důležité, aby se agenti začínali evakuovat co nejdříve.[21]

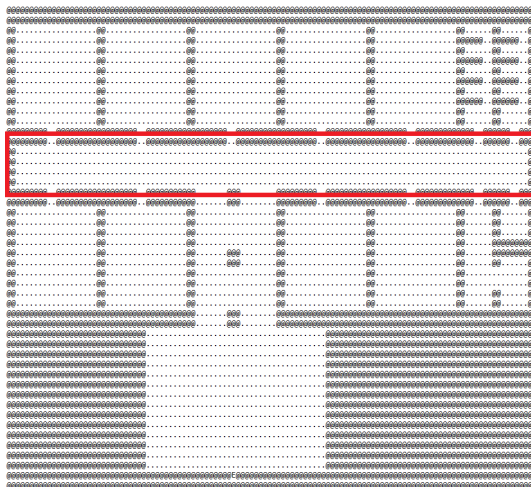
Musím také vyzdvihnout dopady provedené modifikace, díky které jsou agenti následníci schopni jeden druhého obcházet. Dochází tak ke zrychlení jejich pohybu a celkovému zrychlení evakuace. Aby však agenti následníci nebyli příliš zvýhodněni, tuto modifikaci nebudu používat pro jiné experimenty, než je tento.

5.6.14 Vývoj evakuace v závislosti na šířce únikových cest ι

Nastavení experimentu

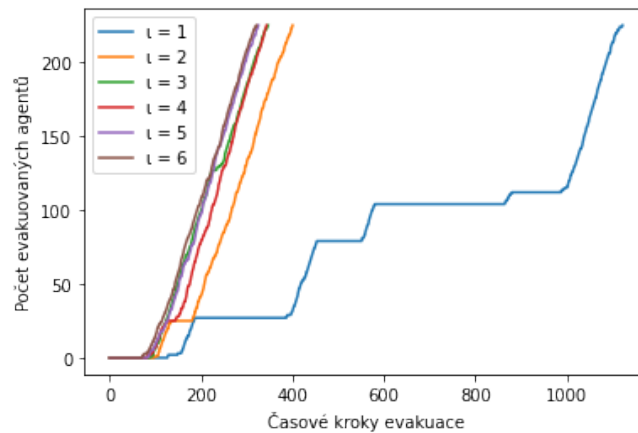
Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji, jak se bude vyvíjet průběh evakuace v závislosti na šířce únikových cest, tedy chodby, ve které v předchozích experimentech nejčastěji vznikaly zácpy. Předpokládám, že užší chodba bude mít efekt srovnatelný s vyšším nastavením parametru konfliktní vzdálenosti – mohly by vznikat patové situace, kdy se ani jeden z rojů nemůže dostat z jejich místnosti, aniž by se dostali do konfliktu, a tak zůstanou stát a neevakuují se.



Obrázek 5.33: Použitá mapa s vyznačenou chodbou, jejíž šířka byla testována

Výsledky



Obrázek 5.34: Vývoj evakuace v závislosti na parametru ι

Popis grafu Nejhůře evakuace proběhla při $\iota = 1$. O několik desítek kroků pak zastává $\iota = 2$. Dvojice $\iota = 3$, $\iota = 4$ a $\iota = 5$, $\iota = 6$ dosáhly srovnatelného času evakuace.

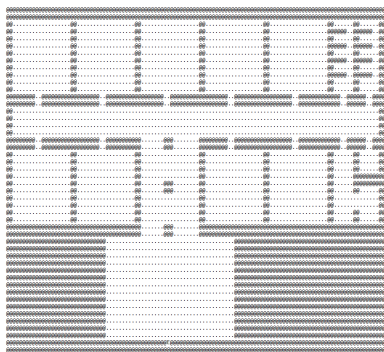
Interpretace výsledků S klesající hodnotou ι roste čas evakuace. Nedošlo však k výskytu předpokládaných patových situací, jejichž následkem by bylo znemožnění evakuace části agentů, tato část hypotézy se nepotvrdila. Lze vidět, že největší problémy způsobuje $\iota = 1$, toto nastavení je tedy nevhodné. Za vhodné nastavení tohoto parametru volím $\iota \geq 3$.

5.6.15 Vývoj evakuace v závislosti na prostředí

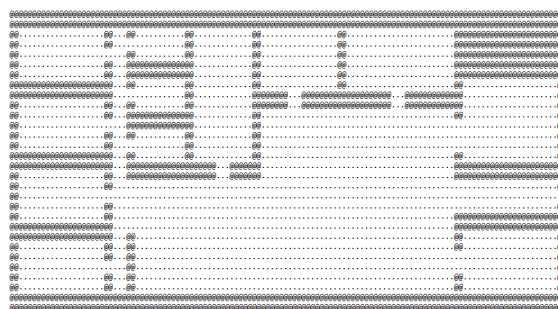
Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použité mapy	m_1 – building_1_4.map, m_2 – building2.map, m_3 – building3.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

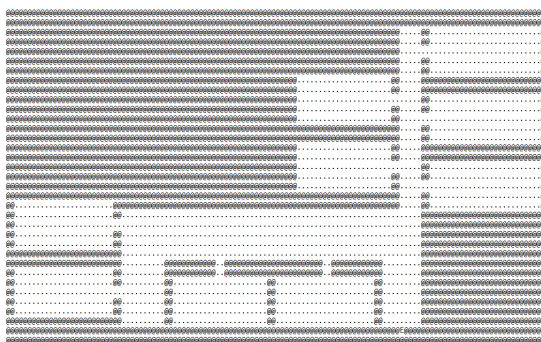
Pro experiment používám tři různé mapy. V mapě m_1 se všechny roje setkávají v jediné chodbě, z ní se pak dostávají do širokého prostoru, ve kterém se nachází východ. Oproti tomu v mapě m_2 v úzké chodbě evakuaci začínají pouze 4 roje, zbylých 5 rojů se nachází v blízkosti otevřeného prostranství. Východ se však v této mapě nachází v úzké chodbě, ve které může dojít ke kolizi rojů. V mapě m_3 se nenachází žádné široké prostranství, pouze chodby.



Obrázek 5.35: Mapa building1_4.map



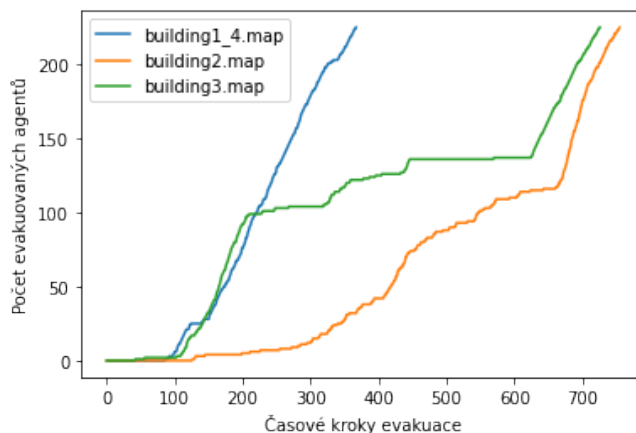
Obrázek 5.36: Mapa building2.map



Obrázek 5.37: Mapa building3.map

Sledovaná data Sleduji vliv prostředí – třech různých map na průběh evakuace. V těchto mapách probíhá evakuace vždy stejného počtu agentů, tedy 225 agentů seskupených do 9 rojů. Předpokládám, že evakuace bude probíhat nejpomaleji v mapě m_3 , kvůli absenci širokých prostranství.

Výsledky



Obrázek 5.38: Vývoj evakuace v závislosti na prostředí

Popis grafu Nejrychleji evakuace probíhá v mapě m_1 . V tomto případě dochází k téměř lineárnímu růstu počtu evakuovaných. Evakuace v mapě m_3 se mapě m_1 v prvních 200 krocích evakuace podobá a místy probíhá i rychleji, poté však značně zpomaluje a konečný čas evakuace se přibližuje tomu dosaženému v mapě m_2 . V této mapě evakuace probíhá ze zkoumaných map nejpomaleji.

Interpretace výsledků V mapách m_2 a m_3 dochází ke vzniku zácp, které evakuaci výrazně zpomalují. Tyto zácpy jsou způsobeny kolizemi rojů v blízkosti východů, které se nachází v úzkých chodbách. Kolize v takové blízkosti východu pak mohou dočasně zabránit v evakuaci všem doposud neevakuovaným agentům. Oproti tomu v mapě m_1 k zácpě při tomto experimentu nedošlo a díky šířce prostoru, ve kterém se na této mapě východ nachází, se mohly roje více rozprostřít a nedocházelo k výrazným kolizím.

Tento experiment ukazuje, že je pro plynulou evakuaci důležité, aby byly prostory v blízkosti bezpečné oblasti dostatečně velké tak, aby nedocházelo k ucpání únikových východů, a tedy znemožnění jejich využití.

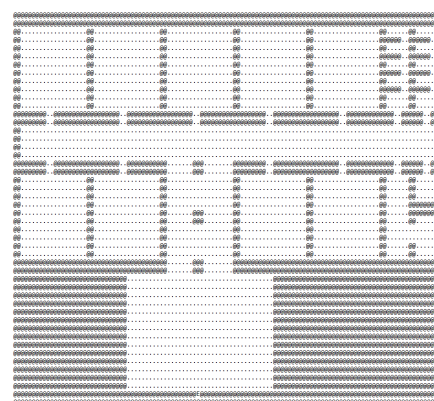
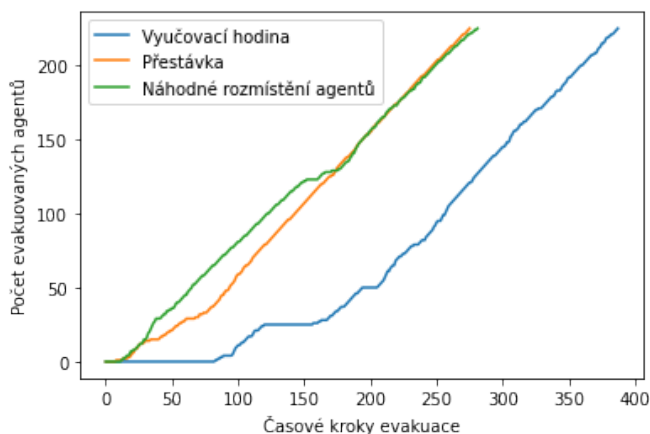
5.6.16 Vývoj evakuace v závislosti na scénáři

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	B – přiřazené skupiny
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina, Přestávka, Náhodné rozmístění agentů
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data V tomto experimentu porovnávám scénáře počátečních pozic agentů. Předpokládám, že nejúspěšnější bude scénář Vyučovací hodina. Jedná se o jediný scénář, kdy mají všichni agenti následníci jistotu přiřazeného řídicího agenta a všichni řídicí agenti se na počátku nacházejí na vzájemně nekonfliktních pozicích, což nemusí platit pro ostatní scénáře.

Výsledky



Obrázek 5.39: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů

Obrázek 5.40: Mapa použitá při experimentu

Popis grafu Scénáře Přestávka a Náhodné rozmístění agentů měly téměř totožné koncové časy evakuace i srovnatelnou část průběhu, přičemž v první polovině evakuace měl náskok scénář Náhodné rozmístění agentů. Scénář Vyučovací hodina za těmito scénáři zaostává.

Interpretace výsledků Scénář Vyučovací hodina je nejméně úspěšný scénář, moje hypotéza se tedy nepotvrdila. Ve zbylých dvou modelech se část agentů již od počátku evakuace nachází v blízkosti východu, což má za výsledek, že se první agenti začínají evakuovat dříve než ve scénáři Vyučovací hodina. Také se v těchto případech může stát, že řídicí agenti nemají od začátku evakuace ve svém roji žádné agenty, tedy nemusí na nikoho čekat a působit riziko zácp. Oproti tomu ve scénáři Vyučovací hodina musí každý řídicí agent udržovat roj o počátečním počtu 24 agentů následníků. Jak je z grafu patrné, ve scénáři Vyučovací hodina k zácpě došlo, což mělo za následek zpomalení evakuace.

Při scénářích Přestávka a Náhodné rozmístění agentů se na mapě také mohou nacházet agenti následníci, kteří jsou od samotného začátku evakuace mimo jakýkoliv roj. Díky tomu začnou velmi brzy plánovat vlastní cestu, což také může přispět k nižším časům evakuace.

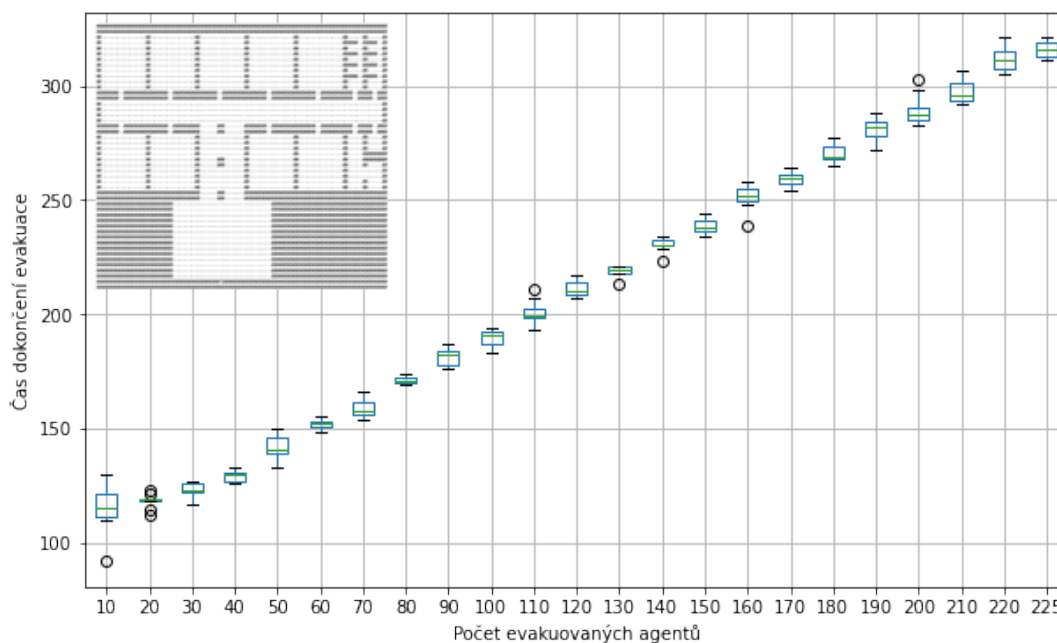
5.6.17 Vývoj času evakuace v závislosti na počtu agentů – model A

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	A – jednoduché následování
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénář	Vyučovací hodina
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji vývoj času evakuace v závislosti na počtu agentů. Jako u modelu B předpokládám rostoucí čas evakuace s rostoucím počtem agentů.

Výsledky



Obrázek 5.41: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů a mapa použitá při experimentu

Popis grafu Z grafu vyplývá, že čas evakuace s rostoucím počtem evakuovaných agentů roste. Na rozdíl od stejného experimentu s modelem B však nedochází ke vzniku zácp a při téměř všech testovaných počtech agentů se odchylky časů evakuace pohybují pouze v řádech jednotek.

Interpretace výsledků Oproti stejnému experimentu s modelem B je znát několik rozdílů – nedochází ke vzniku zácp ani ke zvyšování variability evakuačních časů s rostoucím počtem evakuovaných agentů. Toto je způsobeno chováním řídicích agentů, kteří po celou dobu trvání evakuace pouze plynule postupují k východu a nezastavují se, aby čekali na agenty následníky. Díky tomu nedochází ke kumulaci rojů na jednom místě, a tedy ani k výskytu zácp.

Průměrné časy evakuace jsou v tomto modelu nižší než u modelu B, kromě případu s pouze 10 agenty, tedy 9 agenty řídicími a jedním agentem následníkem. V tomto případě čekání příslušného řídicího agenta na svého následníka evakuaci pomohlo, jelikož měl následník větší šanci svého řídicího agenta dostihnout a nemusel tak čekat na vlastní plánování cesty, k čemuž mohlo dojít v modelu A.

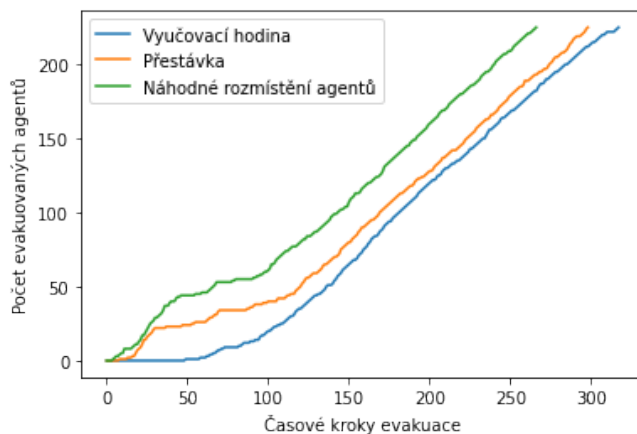
5.6.18 Vývoj evakuace v závislosti na scénáři – model A

Nastavení experimentu

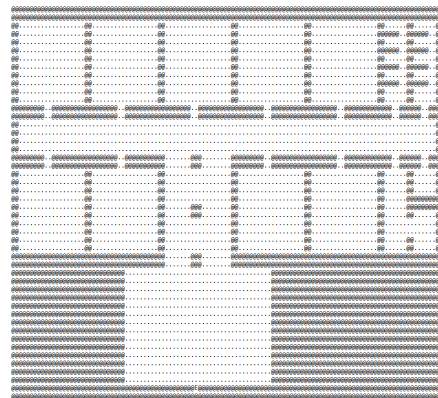
Parametr	Hodnota parametru
Model	A – jednoduché následování
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	building_1_4.map
Scénáře	Vyučovací hodina, Přestávka, Náhodné rozmístění agentů
Poslušnost agentů následníků	90%
% informovaných řídicích agentů	100%
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji, jak se bude vyvíjet evakuace agentů v závislosti na scénáři – tedy počátečních pozicích agentů. Na základě obdobného experimentu s modelem B předpokládám, že kratšího času evakuace dosáhnou oproti scénáři Vyučovací hodina scénáře Přestávka i Náhodné rozmístění agentů.

Výsledky



Obrázek 5.42: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů



Obrázek 5.43: Mapa použitá při experimentu

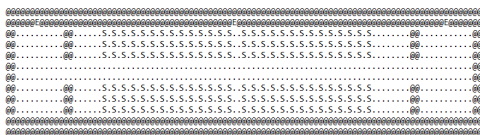
Popis grafu Po celou dobu evakuace v počtu evakuovaných agentů vede scénář Náhodné rozmístění agentů. Evakuace ve scénáři Vyučovací hodina probíhá nejpomaleji.

Interpretace výsledků Moje hypotéza se potvrdila. Ač je ale evakuace ve scénáři Vyučovací hodina nejpomalejší, poté, co se ve scénáři Přestávka evakuují agenti umístění blízko k východu, jsou výsledky těchto dvou scénářů srovnatelné. Toto je způsobeno chováním řídicích agentů, kteří v modelu A na své roje nečekají a brzy je opouští, tedy snižují riziko vzniku zácp, ale zároveň opuštěním následníků tyto agenty brzy nutí plánovat vlastní cestu.

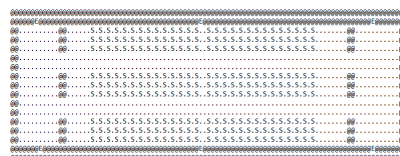
5.6.19 Vývoj evakuace v závislosti na prostředí – model C

Nastavení experimentu

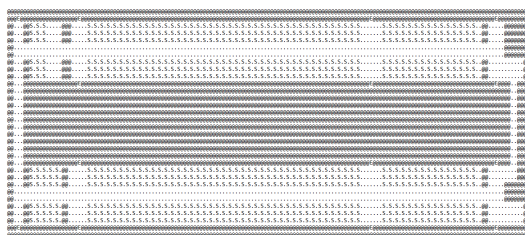
Parametr	Hodnota parametru
Model	C – letadlo
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použité mapy	m_1 – plane1.map, m_2 – plane2.map, m_3 – plane3.map
Scénář	Letadlo
Poslušnost agentů následníků	90%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_{agentu}}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3



Obrázek 5.44: Mapa plane1.map



Obrázek 5.45: Mapa plane2.map



Obrázek 5.46: Mapa plane3.map

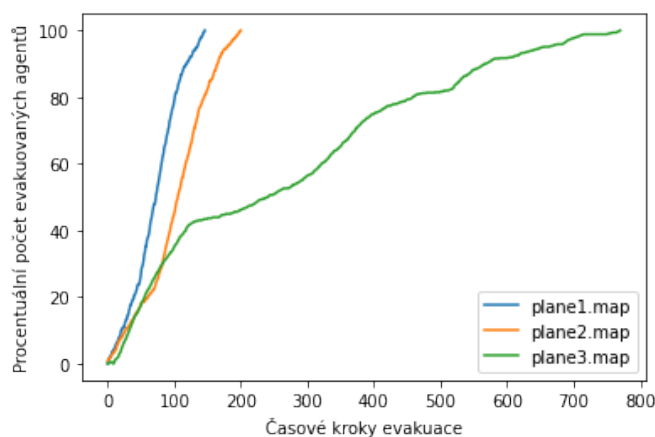
Pro experiment jsem použila tři různé mapy, na každé mapě probíhala evakuace jiného počtu agentů. Také se lišily počty řídicích agentů a únikových východů.

Parametr	m_1	m_2	m_3
Počet agentů	165	249	770
Počet řídicích agentů	3	6	14
Počet únikových východů	3	6	14

Každá z map má vlastní specifika – v případě mapy m_1 se jedná o základní návrh letadla s jednou uličkou, v mapě m_2 se pak již vyskytují uličky dvě. Mapa m_3 představuje dvoupatrové letadlo, přičemž úzké prostory po stranách mapy představují schodiště.

Sledovaná data Sleduji vývoj procentuálního počtu evakuovaných agentů v závislosti na čase. Předpokládám, že nejpomalejší bude evakuace mapy m_3 , kde probíhá evakuace trojnásobku agentů mapy m_2 . Na všech mapách ovšem může docházet k zácpám u únikových východů i v uličkách, které jsou velmi úzké.

Výsledky



Obrázek 5.47: Graf závislosti procent evakuovaných agentů na čase

Popis grafu Nejpomaleji probíhá evakuace na mapě m_3 . Koncový čas evakuace se u map m_1 a m_2 liší o 54 kroků, zatímco rozdíl m_2 a m_3 činí 561 kroků.

Interpretace výsledků Evakuace na mapě m_3 se rychlostně podobá evakuaci mapy m_2 po dobu prvních 100 kroků, poté však nastává situace, kdy je již většina agentů v uličkách či v prostorech u východů a vzniká zácpa umocněná faktem, že se mohou setkávat roje mířící k různým východům, které mohou být umístěny ve vzájemné blízkosti. Tyto roje pak mohou navzájem představovat překážky brzdící průběh evakuace. K těmto problémům ve zbylých mapách nedochází díky počtům agentů, rozdělení rojů či umístění únikových východů, které na mapě m_1 neumožňuje vznik výše popsané situace. Mohu tedy říct, že problémová místa na mapě jsou takové prostory, kde se nachází více východů ve vzájemné blízkosti.

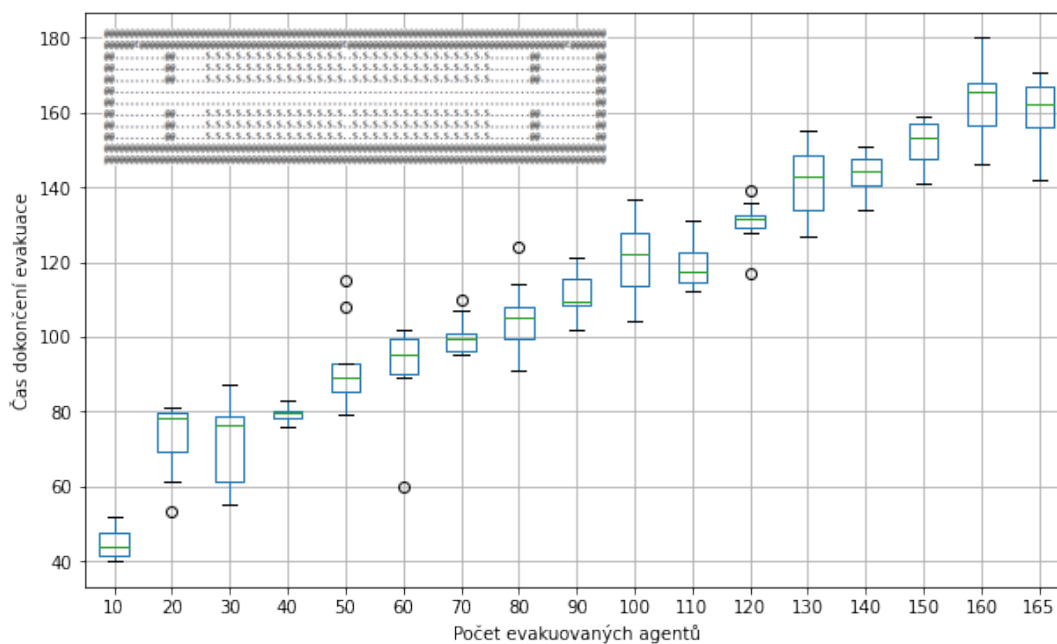
5.6.20 Vývoj evakuace v závislosti na počtu agentů – model C

Nastavení experimentu

Parametr	Hodnota parametru
Model	C – letadlo
Částečná informovanost agentů následníků	ano
Použitá mapa	plane1.map
Scénář	Letadlo
Poslušnost agentů následníků	90%
Minimální počet agentů následníků v roji	$\lceil \frac{n_agentu}{3} \rceil$
Zorné pole agenta následníka	40
Zorné pole řídicího agenta	15
Konfliktní vzdálenost řídicích agentů	3

Sledovaná data Sleduji vývoj času evakuace v závislosti na počtu agentů. Předpokládám rostoucí čas evakuace s rostoucím počtem agentů.

Výsledky



Obrázek 5.48: Graf závislosti času evakuace na počtu evakuovaných agentů a mapa použitá při experimentu

Popis grafu Z grafu vyplývá, že s počtem evakuovaných agentů roste i čas evakuace. Mezi nižšími i vyššími počty agentů však vznikají odchylky v čase evakuace až v řádu desítek kroků.

Interpretace výsledků Na rozdíl od stejných experimentů s modely A i B se vyšší rozptyl hodnot mezi jednotlivými počty agentů objevuje u většiny zkoumaných počtů. Toto může být způsobeno povahou prostředí, ve kterém se nachází pouze úzké uličky, které podporují vznik zácp.

S vyšším počtem evakuovaných agentů čas evakuace viditelně roste, což potvrzuje mou hypotézu.

5.6.21 Shrnutí výsledků

Experimenty ukázaly důležitost koordinovaného chování agentů. Konfliktové prohledávání se ukázalo jako efektivní nástroj pro evakuaci oproti evakuaci rojů, které spolu nekomunikují. Také je důležité dbát na udržování pořádku uvnitř roje, což ovlivňuje evakuaci roje jako celku. Je tedy nutné, aby agenti následníci poslouchali své řídicí agenty.

Dále se ukázalo, že počty evakuovaných agentů ovlivňují čas evakuace nejen z důvodu, že je potřeba evakuovat více agentů, ale také protože větší počet agentů vede k vyššímu riziku vzniku zácp, jelikož dochází k jednoduššímu zaplnění prostor, což může bránit jednotlivým rojům v evakuaci.

Z experimentů také vyplývá, že je k co nejrychlejší evakuaci důležité, aby řídicí agenti brali ohled na agenty následníky, kteří se za nimi mohou zpozdit, a čekali na ně. Pokud se však agenti následníci ztratí a nemohou se k roji zpátky připojit, měli by se pokusit o vlastní evakuaci.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout techniku pro hierarchické řízení rojů při evakuaci. Navrhla jsem softwarový prototyp, který simuluje evakuační scénáře za pomoci hierarchického multiagentního modelu. V návrhu jsem zkombinovala centrální a lokální přístup k multiagentní evakuaci. Agenti byli rozděleni na dva typy – řídicí agenti, kteří lokálně řídili své roje a za pomoci modifikovaného globálního algoritmu konfliktového prohledávání vedli roje do bezpečné oblasti, a agenti následníky, kteří měli za cíl řídicí agenty do bezpečné oblasti následovat.

Porovnála jsem různé modely chování obou druhů agentů a experimentálně ověřila jejich vliv na úspěšnost evakuace. Výsledky mé práce poukázaly na důležitost komunikace mezi řídicími agenty v tomto typu evakuace. Také jsem ukázala, jak chybování či neposlušnost agentů průběh evakuace ovlivňuje a poukázala jsem na problémy, které tímto chováním mohou při evakuaci nastat. Navržené modely mohou být využity například při testování efektivity evakuačních plánů či bezpečnosti budov.

V budoucnosti by bylo možné model rozšířit o pokročilejší algoritmus pro hledání konfliktů, který by snížil výpočetní čas programu. Dále by bylo vhodné rozšířit experimenty či navrhnout další modifikace mnou navrženého modelu, aby mohla být myšlenka hierarchického řízení rojů při evakuaci prozkoumána pro větší škálu situací.

Literatura

- [1] Bonabeau, E.: Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. 2002. Dostupné z: https://www.pnas.org/content/99/suppl_3/7280
- [2] Russell, S.; Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, třetí vydání, 2010.
- [3] Nebel, B.: On the Computational Complexity of Multi-Agent Pathfinding on Directed Graphs. 2019. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1911.04871>
- [4] Surynek, P.: An Optimization Variant of Multi-Robot Path Planning Is Intractable. In *AAAI*, 2010. Dostupné z: http://surynek.net/publications/files/SurynekPavel_Intractable_AAAI-2010.pdf
- [5] Selvek., R.; Surynek., P.: Engineering Smart Behavior in Evacuation Planning using Local Cooperative Path Finding Algorithms and Agent-based Simulations. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management - Volume 2: KEOD,, INSTICC, SciTePress*, 2019, ISBN 978-989-758-382-7, s. 137–143, doi:10.5220/0008071501370143.
- [6] EVACUATION: meaning in the Cambridge English Dictionary. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/evacuation>
- [7] Chen, L.; Tang, T.-Q.; Song, Z.; aj.: Child behavior during evacuation under non-emergency situations: Experimental and simulation results. 2018. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X18301539>
- [8] Wabo, N. C.; Örténwall, P.; Khorram-Manesh, A.: Hospital evacuation; planning, assessment, performance and evaluation. *Journal of Acute Disease*, ročník 1, č. 1, 2012: s. 58 – 64, ISSN 2221-6189, doi:<https://doi.org/10.1016/>

- S2221-6189(13)60013-X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S222161891360013X>
- [9] Group, R. F. O.: Specialist Paper: Emergency Evacuation of Commercial Passenger Aeroplanes (Second Edition). 2020. Dostupné z: <https://www.aerosociety.com/publications/specialist-paper-emergency-evacuation-of-commercial-passenger-aeroplanes-second-edition/>
- [10] Sousa, N. M.: Design of evacuation plans for densely urbanised city centres. Dostupné z: https://www.academia.edu/36925433/Design_of_evacuation_plans_for_densely_urbanised_city_centres
- [11] Albis, K. A.; Gawad, A. F. A.; Radhwi, M. N.: Fire Dynamics Simulation and Evacuation for a Large Shopping Center (Mall), Part II, Evacuation Scenarios. 20. Dostupné z: <http://www.journalenergy.org/article/168/10.11648.j.ajee.s.2015030401.15>
- [12] APM. Adams, E. G.; HB. Amor, J. M.; K. Andrée, S. B.; aj.: Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. 1970. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1186/2193-0414-2-7>
- [13] Mas, E.; Koshimura, S.; Imamura, F.; aj.: Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru. 2015. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-015-1105-y>
- [14] Sharon, G.; Stern, R.; Felner, A.; aj.: Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. 2014. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370214001386?via%3Dihub>
- [15] Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, ročník SSC-4(2), 1968: s. 100–107.
- [16] Surynek, P.; Řehořek, T.: Heuristické prohledávání stavového prostoru. Březen 2020. Dostupné z: https://courses.fit.cvut.cz/BI-ZUM/media/lectures/BI-ZUM_lecture-03_heuristic.pdf
- [17] Tsurushima, A.: Reproducing Evacuation Behaviors of Evacuees during the Great East Japan Earthquake using the Evacuation Decision Model with Realistic Settings. In *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2021, Volume 1, Online Streaming, February 4-6, 2021*, editace A. P. Rocha; L. Steels; H. J. van den Herik, SCITEPRESS, 2021, s. 17–27, doi:10.5220/0010167700170027. Dostupné z: <https://doi.org/10.5220/0010167700170027>
- [18] Galea, E.; Blake, S.; Lawrence, P.; aj.: The airEXODUS evacuation model and its application to aircraft safety. 2003. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096965280300013X>

- [//www.semanticscholar.org/paper/The-airEXODUS-evacuation-model-and-its-application-Galea-Blake/e95b278e3a6ad355b8376802199d32d08aee1240](http://www.semanticscholar.org/paper/The-airEXODUS-evacuation-model-and-its-application-Galea-Blake/e95b278e3a6ad355b8376802199d32d08aee1240)
- [19] Chen, H.; Wang, X.; Shen, L.; aj.: Formation flight of fixed-wing UAV swarms: A group-based hierarchical approach. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, ISSN 1000-9361, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.006>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120301205>
- [20] Chen, L.; Tang, T.-Q.; Huang, H.-J.; aj.: Elementary students' evacuation route choice in a classroom: A questionnaire-based method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 492, č. C, 2018: s. 1066–1074, doi: 10.1016/j.physa.2017.11.0. Dostupné z: <https://ideas.repec.org/a/eee/phsmap/v492y2018icp1066-1074.html>
- [21] Ng, C.; Chow, W.: A BRIEF REVIEW ON THE TIME LINE CONCEPT IN EVACUATION. 2006. Dostupné z: https://www.bse.polyu.edu.hk/researchcentre/fire_engineering/summary_of_output/journal/IJAS/V7/p1-13.pdf
- [22] Bohuslav, V.: Základní škola profesora Josefa Brože Vlachovo Březí POŽÁRNÍ EVAKUAČNÍ PLÁN. 2012. Dostupné z: http://www.zs-vlachovobrezi.net/wp-content/data/skolni_dokumenty/BOZP/sm_BOZP_8.pdf
- [23] Peroutka, B.: Požádní evakuační plán. 2010. Dostupné z: https://www.pedgym-kv.cz/images/soubory/Pozarni_evakuacni_plan.pdf

Seznam použitých zkratk

CBS Conflict-Based Search – Konfliktové prohledávání

BFS Breadth-First Search – Prohledávání do šířky

MAPF Multi-agent Path Finding – Multiagentní hledání cest

Obsah přiloženého média

readme.txt.....	stručný popis obsahu média
src	
├─ impl	zdrojové kódy prototypu
├─ thesis.....	zdrojová forma práce ve formátu \LaTeX
text	text práce
├─ thesis.pdf.....	text práce ve formátu PDF