

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Agentové simulace pohybu chodců

Diplomová práce

Autor: Jiří Linhart
Studijní obor: Informační management

Vedoucí práce: doc. RNDr. Kamila Olševičová, PhD.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

podpis

V Hradci Králové dne

Anotace

Multiagentové simulace jsou vhodným prostředkem k poznávání vlastností a dynamiky komplexních systémů reálného světa. Pro návrh a implementaci agentových modelů je k dispozici celá řada vývojových nástrojů. Tato práce se zaměřuje na využití softwarového nástroje AnyLogic při tvorbě simulací pohybu a kolektivního chování chodců. Součástí AnyLogicu je knihovna Pedestrian Library, která nabízí prvky usnadňující tvorbu modelů pohybu chodců. Uživatel je tedy odstíněn od problémů návrhu algoritmů řešících například výběr cesty nebo vyhýbání se kolizím.

Možnosti AnyLogicu byly kriticky zhodnoceny prostřednictvím pěti modelů typových situací pohybu davu, při nichž dochází k emergenci. Konkrétně se jednalo o modely tzv. zamrznutí přehřátím, formování řad, oscilace ve směru průchodu při obousměrném toku chodců úzkým průchodem, využití dvou průchodů v chodbě s obousměrným tokem chodců a průchod křižovatkou.

Výsledky simulací ukazují, že chování chodců řízených bloky z Pedestrian Library ne vždy dovoluje věrohodně simulovat pohyb reálných chodců. AnyLogic tedy nemusí být vhodným nástrojem pro simulace komplexního chování chodců ve všech případech.

Klíčová slova: AnyLogic, multiagentové systémy, modely chodců

Annotation

Agent simulations are a suitable tool for exploring properties and dynamics of non-linear systems of the real world. There are many development tools available to support designing and implementing multi-agent models. This thesis focuses on capabilities of development tool AnyLogic regarding simulations of collective pedestrian movement. AnyLogic Pedestrian Library offers developers elements designed for pedestrian simulations. Using these elements developers don't need to address problems like path finding algorithm or collision avoidance logic by themselves.

AnyLogic capabilities were evaluated through five pedestrian dynamics models with emergencies: freezing by heating, lane formation, oscillation of passing direction at bottleneck, two passages usage in hallway with pedestrian flow in both directions and passing through intersection.

Simulations results indicate that pedestrian behaviour produced by Pedestrian Library elements may not always be realistic. Therefore AnyLogic may not be a suitable tool for complex pedestrian simulation in all cases.

Keywords: AnyLogic, multi-agent systems, pedestrian simulation

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Cíl.....	7
1.2	Metodika	7
1.3	Struktura práce.....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Multiagentové modelování	9
2.1.1	Prostředí.....	10
2.1.2	Adaptace a evoluce	11
2.1.3	Emergence	12
2.1.4	Vnímání agentů	13
2.1.5	Predikce	13
2.1.6	Interakce.....	14
2.1.7	Stochasticita.....	14
2.1.8	Problém perspektivy pozorovatele	15
2.1.9	Reynoldsov model	16
2.1.10	Aplikace multiagentových modelů.....	17
2.2	Dynamika chodců.....	19
2.3	Vybrané emergence v dynamice chodců.....	22
2.3.1	Zamrznutí přehřátím	22
2.3.2	Formování řad	24
2.3.3	Oscilace při obousměrném toku chodců.....	25
2.3.4	Využití dvou průchodů při obousměrném toku chodců.....	26
2.3.5	Průchod křižovatkou	27
2.4	Simulační nástroje a AnyLogic	29
2.4.1	AnyLogic a Pedestrian Library.....	30
3	Praktická část	33

3.1	Model 1: Zamrznutí přehřátím	33
3.1.1	Popis modelu	33
3.1.2	Experimenty	34
3.2	Model 2: Formování řad	38
3.2.1	Popis modelu	38
3.2.2	Experimenty	41
3.3	Model 3: Oscilace při obousměrném toku chodců	47
3.3.1	Popis modelu	48
3.3.2	Experimenty	49
3.4	Model 4: Využití dvou průchodů při obousměrném toku chodců	51
3.4.1	Popis modelu	52
3.4.2	Experimenty	53
3.5	Model 5: Průchod křižovatkou	56
3.5.1	Popis modelu	56
3.5.2	Experimenty	59
4	Výsledky	65
5	Závěr	67
6	Citovaná literatura	68
7	Přílohy	70
7.1	Datové CD	70
7.2	AnyLogic - stručný model krok za krokem	70
7.3	AnyLogic - reprodukovatelnost výsledků	79

1 Úvod

Studium chování chodců pomáhá nejen rozšiřovat hranice lidského poznání, ale má i zcela praktické cíle. V první řadě se jedná o bezpečnost, což je patrné zejména při návrhu evakuačních plánů budov. Dále mají znalosti vzorců chování význam pro pořadatele davových akcí, jakými jsou například koncerty, demonstrace nebo sportovní události jako olympijské hry.

Pokud se zabýváme chováním člověka, zjišťujeme, že je těžko předvídatelné. Různá úroveň znalostí, rozdílné zkušenosti, motivy a další faktory způsobují, že se lidé ve zdánlivě stejných situacích zachovávají různě. Přesto je možné pozorováním odhalit vzorce chování, které se u chodců s určitou pravidelností opakují.

Multiagentový přístup nabízí prostředek k simulaci chování chodců. Zajímavá na něm je zejména možnost zohlednění individuality jedince. Výsledky dosavadních simulací naznačují, že i zdánlivě komplexní lidské chování lze často modelovat pomocí relativně jednoduchých reaktivních pravidel.

1.1 Cíl

Tato práce se zabývá vzorci chování chodců a jejich ztvárněním prostřednictvím multiagentového simulačního modelu v nástroji AnyLogic.

Simulační nástroj AnyLogic obsahuje Pedestrian Library, což je soubor elementů určených pro výstavbu simulačních modelů popisujících chování chodců. Cílem této práce je posouzení možnosti tohoto nástroje při pokusech realisticky simulovat chování chodců.

1.2 Metodika

K posouzení vlastností modelů chodců implementovaných prostřednictvím nástroje AnyLogic byly zvoleny následující typové situace:

1. Zamrznutí přehřátím
2. Formování řad
3. Oscilace při obousměrném toku chodců
4. Využití dvou průchodů při obousměrném toku chodců
5. Průchod křižovatkou

Možnosti nástroje AnyLogic byly hodnoceny porovnáním chování agentů v simulačním modelu s očekávaným chováním na základě studií daného fenoménu.

1.3 Struktura práce

Tato práce má dvě hlavní části - teoretickou a praktickou.

V teoretické části jsou popsány dosavadní poznatky o multiagentových systémech a multiagentovém modelování obecně a o dynamice chodců. V dalším oddíle teoretické části jsou popsány vybrané emergence v chování chodců. Na základě těchto jevů byla zpracována praktická část této práce. V závěrečném oddílu teoretické části je stručně popsána jediná situace na trhu simulačních nástrojů, jedním nástroj AnyLogic a jeho knihovna Pedestrian Library, jejíž vlastnosti jsou předmětem zkoumání této práce.

V praktické části jsou popsány simulační modely vybraných fenoménů chování chodců. Tyto modely jsem implementoval v nástroji AnyLogic za použití bloků Pedestrian Library. Prostřednictvím vizuálního i analytického hodnocení bylo zkoumáno, zda chování agentů odpovídá teoriím o chování chodců v daných podmínkách.

2 Teoretická část

2.1 Multiagentové modelování

Multiagentová simulace je počítačová simulace, která dovoluje zkoumat důsledky interakcí většího množství autonomních výpočetních agentů. Prostřednictvím simulace lze pozorovat komplexní systémy na makro-úrovni bez rizik a nákladů spojených s konstrukcí odpovídajícího systému v reálném světě. Multiagentová simulace spočívá ve vytvoření populace agentů, kteří fungují všichni současně (paralelně) a ovlivňují sdílené prostředí, svůj vnitřní stav, ale i sebe navzájem.

Koncept výpočetního agenta vychází z teorie umělé inteligence, kde se tento pojem vyskytuje ve smyslu jedince, entity, jež je schopná na základě podnětů z prostředí ovlivnit svůj stav či okolní prostředí. Takový agent využívá senzory ke sběru dat z prostředí. Výsledkem jejich zpracování je návrh odpovídající akce, kterou agent provede prostřednictvím aktuátorů. (RUSSEL, a další, 1995 str. 31)

Důležitým aspektem agenta je jeho chování, na jehož základě lze agenty rozlišovat na reaktivní a kognitivní (racionální, uvažující).

Reaktivní agent nemá k dispozici rozhodovací aparát. Jeho akce přímo odpovídá podnětu přicházejícímu z prostředí. Takový agent nemá vnitřní reprezentaci svého okolí, své akce si neplánuje a neumí se učit (modifikovat svoje chování). Jako typický příklad reaktivních agentů jsou uváděna hmyzí společenství.

Naproti tomu kognitivní agent se snaží dosáhnout určitého cíle. Své akce si plánuje tak, aby bylo cíle dosaženo jistě a efektivně. Podněty z prostředí neřídí jeho akce, ale pomáhají mu při rozhodování o následující akci. Kognitivní agent může také čerpat z předchozí zkušenosti a učit se. Příkladem kognitivního agenta je člověk.

Srovnání kognitivních a reaktivních agentů je uvedeno v tabulce 2-1:

Reaktivní agenti	Kognitivní agenti
Jednoduché chování	Komplexní chování
Malá složitost	Velká složitost
Neschopnost předvídat budoucnost	Očekávají, co se stane
Nemají cíle	Mají konkrétní cíle
Neplánují a své úsilí nekoordinují s ostatními	Plánují a své úsilí koordinují s ostatními
Nemají reprezentaci prostředí	Mapují své prostředí (vytváří vnitřní reprezentaci prostředí)
Neučí se, nepřizpůsobují se	Uplatňují naučené chování
Společnou činností mohou vyřešit komplexní problémy	Komplexní problémy mohou vyřešit společnou nebo samostatnou činností

Tabulka 2-1 **Reaktivní vs. kognitivní agenti** (TEAHAN, 2010 str. 12)

Oba přístupy - reaktivní a kognitivní - lze samozřejmě vzájemně kombinovat. Z hlediska počítačové simulace je výhodné, pokud agenti implementují reaktivní chování, které bývá výpočetně méně náročné. V praktické části této práce bude demonstrováno, že i agenti typicky kognitivní (lidé) mohou vykazovat reaktivní chování.

2.1.1 Prostředí

Prostředí je nositelem vlastností, které je možné ovlivňovat chováním agentů, má svůj stav a odehrávají se v něm procesy.

Pro agenty se prostředí často stává médiem umožňujícím vzájemnou koordinaci akcí. Dobrým reálným příkladem je komunikace prostřednictvím feromonové stopy. Jednotliví agenti (mravenci), neadresují informaci, kterou se snaží předat, konkrétním jedincům. Namísto toho využijí prostředí jako nositele informace (feromonové stopy) a dále se nezabývají tím, jak s ní ostatní agenti naloží či zda ji vůbec mohou vnímat.

Simulační experimenty směřují ke zkoumání okolností, za nichž nastane konkrétní stav prostředí. Zvláště při implementaci reaktivního chování totiž agenti nemívají cíl nebo úkol, který by plnili. Stav prostředí pak supluje závěrečnou podmínku pokusu, tedy zda modelové chování agentů vedlo k očekávanému efektu.

Výčet možných vlastností prostředí rozebírá např. (RUSSEL, a další, 1995 str. 46) a uvádí tyto možnosti:

- Přístupnost - prostředí je přístupné v případě, kdy veškeré jeho charakteristiky - nutné k rozhodnutí agenta - jsou v libovolný moment agentovi dostupné, a to bez ohledu na jeho stav, polohu, apod. V přístupném prostředí není nutné, aby si agent udržoval vnitřní reprezentaci prostředí.
- Deterministické/stochastické - prostředí je deterministické, pokud je jeho následující stav plně určen stavem současným a akcemi, které se rozhodli agenti provést. Ve stochastickém prostředí není výsledný efekt na prostředí závislý pouze na akci agenta. Zohledňujeme i pravděpodobnost úspěchu nebo neúspěchu zvolené akce.
- Epizodické/sekvenční - prostředí je epizodické, pokud lze agentovo chování rozdělit na "epizody". V každé epizodě agent nejprve vnímá své prostředí a na základě tohoto vjemu provede vybranou akci. Agentovo jednání v následující epizodě nijak nesouvisí s žádnou již absolvovanou epizodou.
- Statické/dynamické - prostředí je dynamické, pokud se jeho stav mění v čase, kdy agent plánuje své akce. Pokud agent nemusí soustavně vnímat své prostředí při provádění své akce, ani se nezajímá o běh času, pohybuje se v prostředí statickém.
- Diskrétní/souvislé - prostředí je diskrétní v případě, kdy existuje konečný počet odlišných a jasně definovaných vjemů a akcí, které lze v libovolném stavu prostředí provést.

2.1.2 Adaptace a evoluce

Pokud se změní prostředí, nemusí být stávající chování agentů účelné. Například netopýr používá echolokace k orientaci v prostoru. Objeví-li se v prostoru překážky z hypotetického materiálu, který nebude odrážet zvukové vlny, pohyb netopýra se nám nebude jevit jako úspěšný.

Schopnost agenta reagovat na změnu v prostředí se nazývá adaptace. Pokud agent není schopen se účelně adaptovat v dynamickém prostředí, může pozorovatel jeho chování hodnotit jako neracionální.

Pokud k přizpůsobení chování na změnu prostředí dochází až u následující generace agentů, mluvíme o evoluci. K evoluci v populaci dochází za působení dvou hlavních mechanismů - přirozeného výběru a genetického posunu. Přirozený výběr je proces,

kdy spíše přežijí jedinci s vlastnostmi přispívajícími k přežití nebo k reprodukci, než s vlastnostmi škodlivými. Vlivem dědičnosti se pak stanou prospěšné znaky v populaci běžnými, zatímco škodlivé znaky vzácnými. Změna v relativní frekvenci výskytu dědičných znaků v populaci daná vlivem náhody se nazývá genetický posun. (TEAHAN, 2010 str. 19)

2.1.3 Emergence

Působením mnoha agentů v prostředí může vést k emergenci. Rozumíme tím spontánní vznik vlastnosti nebo struktury na makro-úrovni, kterou nelze odvodit či předpovědět na základě znalosti chování jednotlivých agentů.

K tomuto jevu dochází nezářídka i v přírodě. Typickým příkladem je stavba termitišť, na níž se podílí nespočet termitích jedinců. Žádný z nich nekoordinuje své jednání s ostatními, ani neplánuje, jak bude výsledná stavba vypadat. Chování každého termita lze ve skutečnosti popsat jednoduchou sadou pravidel. Výsledná struktura vznikne samovolně jako důsledek chování mnoha jedinců.

V případě agentových simulací můžeme emergenci pozorovat častěji u reaktivních agentů. Ti totiž neplánují, neprovádějí činnosti s určitým cílem. Jakmile tedy můžeme pozorovat jev přesahující jednoduchost agenta - jedince, jsme svědky emergence. K emergentním jevům samozřejmě může docházet i na základě chování kognitivních agentů. V počítačových simulacích se obvykle používá menší počet kognitivních agentů, což není příznivé pro případnou emergenci.

Při klasifikaci konkrétního výsledku agentové simulace jako emergence můžeme posuzovat různá kvalitativní kritéria emergence u daného výsledku. O emergenci se nejedná v případě, kdy pozorovaný jev je pouhým součtem vlastností jednotlivců nebo se dá charakterizovat jako pouhá vlastnost jedince. Zároveň za emergenci nelze pozorovat jev, který lze jednoduše předpovědět na základě znalosti vlastností jednotlivců. (RAILSBACK, a další, 2012 str. 101)

2.1.4 Vnímání agentů

Schopnost agentů reagovat na prostředí je vždy závislá na informacích, které jsou pro daného jedince dostupné. Rozsah informací, které má agent k dispozici, je dán konkrétní modelovanou situací. V některých případech může být realističtější předpokládat nedokonalé vnímání, například zapracováním pravděpodobnosti chybného vjemu (získání informace). U dalších modelů je také důležité, jak agenti danou informaci získávají.

Při návrhu procesu vnímání agentů je třeba si rozmyslet, které proměnné ostatních entit modelu daný agent potřebuje znát, jak tato data získá a zda jejich vnímání bude bezchybné. Data může agent získat například pouze od agentů v bezprostřední blízkosti nebo od agentů, kteří jsou spolu nějakým způsobem propojeni. (RAILSBACK, a další, 2012 str. 127)

Sdružování agentů do sítí je jedním přístupem k předávání informací mezi agenty. Agent pak má rozšířené možnosti vnímání v rámci svých konexí. Tento přístup je vhodný například při modelování sociálních sítí. (RAILSBACK, a další, 2012)

2.1.5 Predikce

Očekávání důsledků akcí je základem pro rozhodování agenta. I při velmi jednoduchých rozhodnutích zvažujeme, jaké následky si s sebou volba jaké alternativy nese. Využití predikce při modelování chování je běžné, často se ovšem jedná o tzv. tacitní predikci (HOLLAND, 1995). Agent v takovém případě maximalizuje nebo minimalizuje nějakou hodnotu, za kterou se skrývá předpoklad, že vyšší, resp. nižší hodnota zvýší schopnost agenta dosáhnout stanoveného cíle.

K modelování predikcí je možné využít i teorie pravděpodobnosti (RAILSBACK, a další, 2012 str. 165). Například pokud víme, že pravděpodobnost selhání stroje během dne je 0,1, můžeme předpovědět nejen to, že stroj následujícího dne pravděpodobně neselže, ale také to, že do deseti dnů stroj nejspíš selže (za předpokladu, že jednotlivá selhání jsou nezávislá, je pravděpodobnost neselhání během 10 dnů rovna 0,35). Další komplexní techniky zahrnují statistické modely (regrese nebo Bayesovská statistika) schopné získat predikci na základě nedávné zkušenosti. K získání dalších relevantních informací mohou dopomoci i stochastické techniky.

2.1.6 Interakce

Termínem interakce v multiagentových simulacích rozumíme (RAILSBACK, a další, 2012):

- komunikaci mezi agenty
- vzájemné ovlivňování mezi agenty
- Agenti ovlivňují, resp. jsou ovlivněni svým prostředím.

V multiagentových simulacích lze interakce modelovat explicitně jako způsoby, kterými jedinci ovlivňují své prostředí a sebe navzájem. Efekt interakce nebo dokonce druh interakce pak závisí na stavu agenta (často včetně lokace) a jeho prostředí. V agentových simulacích se často jedná právě o místní interakci, kdy se ovlivňují pouze jedinci v bezprostřední blízkosti, což je v přímém kontrastu s mechanikou systémového modelování, kde všechny prvky systému ovlivňují všechny prvky.

V rámci modelování rozlišujeme dále interakci přímou a zprostředkovanou. Při přímé interakci se agenti ovlivňují přímo - vyměňují si informace, mění svůj stav, zasílají zprávy apod. Zprostředkovaně mohou agenti interagovat prostřednictvím sdíleného média. Tuto roli často zastává samo prostředí, ale nemusí tomu tak být.

2.1.7 Stochasticita

Tato kapitola byla zpracována dle (RAILSBACK, a další, 2012).

Stochastické jsou procesy, které alespoň částečně závisí na náhodných vlivech či událostech. Takový proces tedy produkuje různé výsledky při opakovaném provedení stejných kroků. Stochastické procesy jsou v modelování využívány, jelikož nám umožňují zjednodušení reprezentace variability modelovaného jevu.

Jedním z nejčastějších využití stochasticity je v multiagentových simulacích inicializace proměnných, které vyjadřují nějaký reálný stav. Můžeme při tom vycházet z reálných statistických dat (tvar rozdělení, průměr, směrodatná odchylka, apod.), která máme o daném jevu k dispozici.

Dalším běžným využitím stochasticity je modelování procesů s proměnlivým výsledkem, u nichž nechceme celý princip detailně rozebírat. Například může v našem modelu hrát významnou roli počasí. Místo toho, abychom modelovali tak komplexní proces jako je počasí, plně nám postačí, pokud prozkoumáme data související s poča-

sím. Můžeme zjistit například frekvenci deštivých dnů v jednotlivých měsících a pracovat s ní jako s pravděpodobností, s jakou tento stav počastí v daném období nastane.

Při využití stochastických principů se vždy jedná o zjednodušení reálných procesů. Dochází k opomíjení potenciálně důležitých závislostí. Tohoto zjednodušení se dopouštíme ve prospěch jednoduchosti modelu. Modely musí být natolik jednoduché, abychom byli schopni interpretovat výstupy a poučit se z nich.

2.1.8 Problém perspektivy pozorovatele

Je důležité nepřikládat chybná vysvětlení pozorovaným mechanismům v chování agentů v simulovaném prostředí. Problém zdůrazňuje rozdíl mezi perspektivou pozorovatele a pozorovaného. Tento rozdíl v porozumění bude nejpatrnější mezi různými druhy, například mezi lidmi a hmyzem. Člověk jako pozorovatel mívá často tendenci přisuzovat pozorovanému jevu lidské vlastnosti/motivy. Na první pohled může být těžko k uvěření, že se stavba mraveniště neodehrává podle předem připraveného plánu nebo že není úsilí mravenců centrálně řízeno a koordinováno. Ve skutečnosti se jedná jen o výsledek reaktivního chování velkého počtu jedinců. (TEAHAN, 2010)

Problém perspektivy pozorovatele se dá rozdělit na tři hlavní podproblémy: (PFEIFER, a další, 1999) dle (TEAHAN, 2010)

- Problém perspektivy - zabývá se potřebou rozlišit mezi perspektivou pozorovaného a pozorovatele, viz příklad výše.
- Problém chování vs. mechanismus - výsledné chování není jen přímým důsledkem vnitřních pochodů (mechanismu) agenta, ale z velké části se na něm podílí také prostředí, ve kterém agent působí.
- Problém komplexity - komplexní chování není nutně výsledkem komplexních vnitřních pochodů agenta.

2.1.9 Reynoldsův model

Tato kapitola byla zpracována dle (TEAHAN, 2010).

Craig Reynolds navrhl v roce 1986 distribuovaný model pro simulaci koordinovaného pohybu velkých skupin, jako jsou stáda dobytka, hejna ptáků nebo ryb. Tento model je vystavěn okolo agenta, využívá pouze informací získaných z prostoru definované výseče.

Chování agentů je rozděleno do tří vrstev - výběr akce, nasměrování a pohyb (Obrázek 2-1). Nejvyšší vrstva kontroluje takové chování jako výběr strategie, určování cílů nebo plánování. Toto chování se skládá z prvků chování nižší vrstvy, jako je sledování cesty, hledání nebo útěk, které jsou tvořeny již konkrétními projevy pohybu z nejnižší vrstvy.



Obrázek 2-1 Hierarchie chování (REYNOLDS, 1986) dle (TEAHAN, 2010, p.37)

Podle Reynoldse nejsou tyto vrstvy normou, je možné využít i alternativních struktur.

Reynoldsův model je principiálně aplikovatelný i na simulaci davového chování lidí.

Navrhované chování pro řízení pohybu agenta je uvedeno v tabulce 2-2.

Nasměrování	
Pro jednotlivce a páry:	Popis
<i>Seek and flee</i> ("hledej a uteč")	Agent se nasměruje k cíli v případě hledání nebo od cíle v případě útěku.
<i>Pursue and evade</i> ("pronásleduj a vyhýbej se")	Rozšíření principů hledání a útěku. V tomto případě je jiný agent pohybujícím se cílem.
<i>Wander</i> ("toulej se")	Jedná se o formu náhodného pohybu, kde následující krok je závislý na směru přecházejícího kroku.
<i>Arrival</i> ("příjezd")	Agent sníží svoji rychlost v závislosti na vzdálenosti od cíle.
<i>Obstacle Avoidance</i> ("vyhni se překážkám")	Agent se vyhýbá překážkám při udržení maximální možné rychlosti prostřednictvím změny směru a zpomalení.
<i>Wall Following</i> ("sleduj zed")	Agent si udržuje blízký kontakt se stěnou.
<i>Path Following</i> ("sleduj cestu")	Agent sleduje cestu. Reynolds aplikoval toto chování jako pronásledování cíle, který se nachází dále na cestě.
<i>Flow Field Following</i> ("sleduj tok")	Agent se snaží zarovnat směr svého pohybu s vektorem toku okolních agentů.
Kombinovaná chování a skupiny:	
<i>Crowd Path Following</i> ("sledování cesty davu")	Kombinace sledování cesty a oddělení, které má za cíl, aby do sebe agenti nevráželi.
<i>Leader Following</i> ("sledování vůdce")	Kombinace oddělení a příjezdu, která simuluje agenty snažící se sledovat vůdce.
<i>Unaligned Collision Avoidance</i> ("vyhnoutí se kolizím")	Agent se snaží vyhnout případným kolizím tak, že upravuje svůj směr, aby se vyhnul nejbližší možné kolizi.
<i>Queuing</i> ("zařazení do fronty")	Toto simuluje agenty, kteří zpomalují, aby se úspěšně protáhli omezeným prostorem (například dveřmi). Toto chování kombinuje hledání, vyhýbání a oddělení.
<i>Flocking</i> ("sdružení do hejna")	Skupiny agentů kombinují oddělení, zarovnání a soudržnost - sdružení do hejna se vynořuje jako důsledek této kombinace.

Tabulka 2-2 Návrh chování pro řízení pohybu agenta (RAYNOLDS, 1999) dle (TEAHAN, 2010 str. 39)

2.1.10 Aplikace multiagentových modelů

Následující část je věnována klasifikaci oblastí výzkumu s vazbou na multiagentové systémy tak, jak ji uvádí (ŠALAMON, 2011).

Multiagentové modely a systémy najdou využití v následujících oblastech:

- a) Robotika a kybernetika - Ročně jsou publikovány tisíce článků, které se zabývají mimo jiné robotickou navigací, spoluprací a koordinací robotů nebo robotickým vnímáním.

- b) Umělá inteligence a strojové učení - Multiagentové systémy jsou podoblastí výzkumu umělé inteligence a jsou úzce spjaty i s dalšími jejími obory jako jsou neuronové sítě, genetické algoritmy, fuzzy rozhodování a další. Výzkum v této oblasti, který souvisí s multiagentovými systémy, se zabývá například distribuovanou umělou inteligencí, multiagentovou podporou učení nebo automatizovaným rozhodováním.
- c) Softwarové inženýrství - Při vývoji multiagentových systémů se stále nejčastěji využívá objektových programovacích jazyků. Problém tohoto přístupu je ve zjevných rozdílech mezi agentem a objektem. Na rozdíl od objektů jsou agenti autonomní, aktivní a samo-řízené softwarové entity, které je nutno v rámci objektově orientovaného jazyka nejprve převést dle principů objektového přístupu. Z tohoto důvodu můžeme pozorovat iniciativu o vývoj nových agentově-orientovaných programovacích jazyků, jako například Agent0, GOAL, AgentSpeak a další.
- d) Síťování - Internet má mnoho charakteristik multiagentového systému: je složen z mnoha autonomních jednotek, tyto spolu komunikují a mají své vlastní motivy a cíle. Internet může růst teoreticky do nekonečna a je velmi stabilní. Výzkum v této oblasti se zabývá především routingem.
- e) Vyhledávače a analýza textu - S rozmachem internetu a stále rostoucím počtem publikací webových stránek roste význam vyhledávačů, které nám nabízejí relevantní obsah. Centralizovaná řešení jsou pro tento účel nevhodná, protože růst výkonu zařízení neudrží krok s nárůstem prohledávaného obsahu. Agentový přístup je využitelný například při prohledávání webu nebo při data miningu.
- f) Elektronické obchodování - Výzkum v oblasti elektronického obchodování zahrnuje například automatické a dynamické formování zásobovacího řetězce, agenty na elektronických tržištích, agenty pro elektronické aukce a automatizované vyjednávání.
- g) Simulace a modelování - Multiagentové simulace nabízí možnost zkoumat širokou škálu problémů. Populární jsou v této oblasti simulace dopravy (silniční, vzdušné i lodní) nebo právě modely chodců, kterými se zabývá následující oddíl této práce.

2.2 Dynamika chodců

Pomocí agentových modelů lze zkoumat i pohyb lidí v prostoru, například pohyb chodců po ulicích či v budovách. Tyto studie mají význam zejména při řešení evakuačních problémů.

K popisu proudění chodců lze využít zavedené matematické modely. Ty lze obecně rozdělit na:

- a) makroskopické - tyto modely přistupují k problematice provozu jako celku bez rozlišení jednotlivých chodců a popisují pohyb pěšího proudu, ne jednotlivých jedinců,
- b) mikroskopické - takové modely popisují chodce jako jedince a využívají zrychlení jako kontrolní proměnnou, která závisí na hustotě mezi chodci,
- c) mezoskopické - využívají kinetické modely. Některé mezoskopické modely modelují každé vozidlo individuálně, ale jejich chování je určeno pro skupinu vozidel na základě makroskopických ukazatelů provozu.

Rychlost chodců nezávisí jen na měřitelných podmínkách provozu, jakou je například jeho hustota, ale také na činnosti, kterou aktuálně provádějí. Například v muzeu se chodci budou vlivem aktuální činnosti (prohlížení exponátů) pohybovat jinou rychlostí, než při cestě do práce. Model chodců lze vyvinout rozšířením modelu vozidel a přidáním dalších směrů pohybu.

V určitých případech je nutné chování chodců cíleně ovlivňovat. Toho může být dosaženo mimo jiné za použití různých senzorů pro monitorování hustoty a rychlosti chodců v dané oblasti v reálném čase. S těmito informacemi je možné lidem předat instrukce například pro změnu směru případně pro úpravu rychlosti tak, aby byla zajištěna plynulost provozu.

Výsledné chování chodce jako jedince je určeno na základě jeho dílčích rozhodnutí. V multiagentových modelech se chodec bude rozhodovat na základě svého vnitřního stavu, vjemů, které získal z prostředí, případně stochasticky. Základní rozhodnutí, která chodci dělají, jsou následující (TIMMERMANS, a další, 2009):

- a) Výběr aktivity - obecné rozhodnutí, které není specifické pro agenty-chodce. Aktivita, resp. cíl, který daný chodec plní, hraje významnou roli při výběru dalších akcí.

- b) Výběr destinace - při pohybu chodců musí chodec učinit rozhodnutí, kam se pohybuje. Ani tento cíl není výlučně specifický daný pro chodce, toto rozhodnutí musí při svém provozu učinit každý mobilní agent. Výběr destinace a výběr aktivity jsou rozhodnutí, která spolu úzce souvisí a v některých případech implementace se mohou překrývat.
- c) Výběr režimu - existují dva způsoby jak na toto rozhodnutí nahlížet. Dle prvního se agent rozhoduje mezi typy transportu a chůze je jedním z nich. Z hlediska multiagentových simulací chování chodců má větší význam druhý náhled. Podle něj se za různými režimy skrývají prvky jako eskalátory, výtahy nebo schodiště, které může chodec za určitých podmínek využít.
- d) Výběr cesty - v případě, že k vytyčené destinaci vede více možných cest, se chodec musí rozhodnout, kterou využije. Při tomto rozhodnutí hraje zásadní význam zejména délka cesty. Mezi další faktory ovlivňující agenta v tomto případě můžeme uvést např. atraktivitu dané cesty, zaplněnost nebo množství potenciálních překážek, které bude muset chodec překonat.
- e) Výběr následujícího kroku - k řešení tohoto problému vedou chodce zpravidla vnější vlivy, jako jsou ostatní chodci, kteří mohou zapříčinit nedostupnost místa, které by bylo na nejkratší spojenci agenta a jeho destinace. Výsledná implementace může zahrnovat implementaci modelu celulárních automatů, které jsou založeny na diskretizaci spojitého prostoru, kde je dynamika chodců určena mírou přechodů mezi jednotlivými poli. Další přístup implementace je založen na sledování trajektorie. Další krok chodce pak vychází zejména z kroku předcházejícího. Jsou popsány i přístupy, ve kterých je pohyb chodců určován sociálními vlivy (HELBING, et al., 1995) dle (TIMMERMANS, a další, 2009).
- f) Výběr rychlosti - výběr rychlosti chodců je závislý zpravidla na statistické analýze reálných dat v konkrétním případě, např. na přechodu pro chodce. Konkrétní rychlost jedince je pak vztahována k toku a hustotě chodců v dané oblasti. Při modifikaci rychlosti daného agenta lze využít přístupu absolutního (+0,1 m/s) nebo relativního (x1,1). Relativní modifikace rychlosti by měla obsahovat mechanismus pro kontrolu, zda kalkulovaná rychlost odpovídá realitě. Nulová rychlost by měla být vysvětlována jiným způsobem. Po-

kud chodec zastavuje, bývá to na základě náhlých impulzů z prostředí nebo změny vnitřního stavu, například v důsledku naplnění cíle.

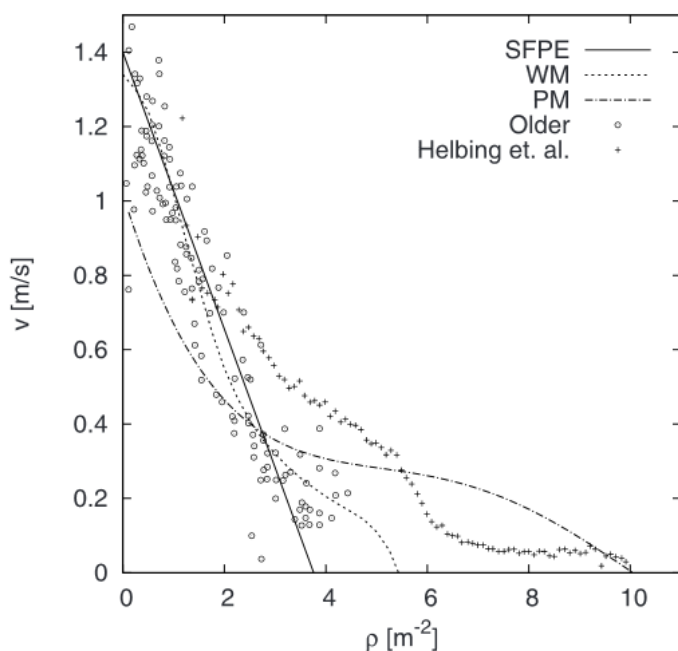
- g) Interakce - rozhodnutí týkající se skupinového chování chodců. To zahrnuje chování davu, principy vůdce - následovník nebo vyhýbání se kolizím. Zvláštní kapitolou jsou pak interakce s prostředím nebo s jinými typy agentů, např. chodci s řidiči. Běžným přístupem k řešení problému vyhýbání se kolizím je vyhnout se nejvíce hroící kolizi. Agent vyhledá nejbližší cíl, se kterým mu hrozí kolize, a upraví svůj směr a rychlost tak, aby ke střetu nedošlo. Pro výběr onoho bezprostředního nebezpečí slouží parametry jako vzdálenost, rychlost, vizuální kontakt a úhel, který svírají trajektorie zúčastněných agentů.

Dynamika chodců je v současnosti modelována zejména za využití tří přístupů: (TIMMERMANS, a další, 2009)

1. Multiagentové systémy
2. Systém postavený na principu celulárních automatů
3. Částicové modely

Multiagentové systémy jsou v poslední době prosazovány zejména díky schopnosti reprezentovat potenciálně heterogenní systém agentů v částečně známém prostředí. (KACHROO, 2009)

Významnou charakteristikou dynamiky chodců je vztah mezi rychlostí toku chodců a hustotou daného toku. Tento vztah je znázorňován zpravidla graficky prostřednictvím tzv. fundamentálního diagramu (Obrázek 2-2). Konkrétní podoba diagramu závisí na charakteru situace, podobě prostředí, kulturních zvyklostech chodců, ale jak uvádějí (SEYFRIED, a další, 2008) také na metodě měření. Tento diagram je často využíván pro srovnávání výsledků různých studií.



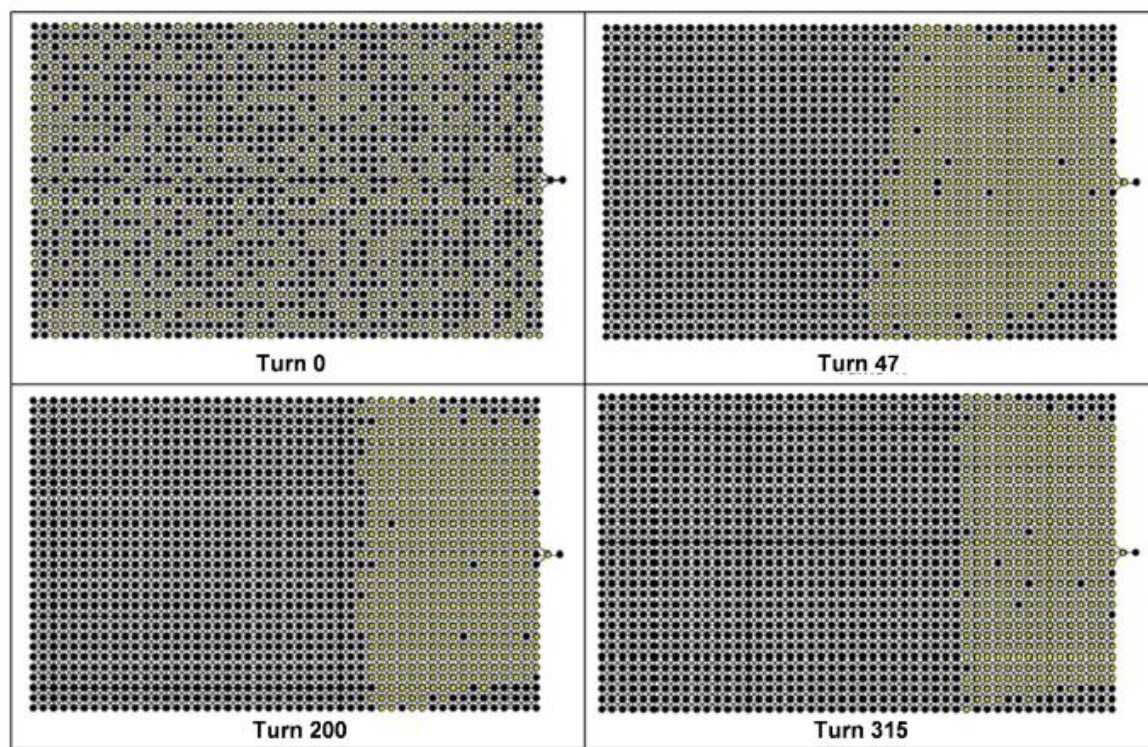
Obrázek 2-2 Fundamentální diagram pro pohyb chodců. (SEYFRIED, a další, 2008)

2.3 Vybrané emergence v dynamice chodců

Chování jednotlivých chodců se může zdát těžko předvídatelné, ale v chování davu lze pozorovat různé emergentní chování. Tato kapitola se zaměřuje na charakteristiku situací, ve kterých lze emergence pozorovat.

2.3.1 Zamrznutí přehřátím

K tzv. zamrznutí přehřátím (angl. Freezing by Heating) dochází, když vysoká hustota chodců vede ke zpomalení, až zastavení toku. Zastavení toku (zamrznutí) je způsobeno vůlí chodců (přehřátí) pohybovat se ke konkrétnímu cíli. Tento jev je možné pozorovat zejména ve zúžených cestách (angl. Bottleneck - hrdlo lahve), kdy zúžení již není schopno pojmout takovou hustotu toku chodců, jako předchozí část cesty. Chodci se začnou v kritickém místě hromadit a jejich tok se zastavuje. K tomuto jevu může přispívat i případné proudění chodců v protisměru. (TIMMERMANS, a další, 2009)



Obrázek 2-3 Vizualizace průběhu simulace zamrznutí přehřátím při hustotě chodců 40 %. (BANDINI, a další, 2007 str. 364)

Tento jev můžeme pozorovat i v jiných situacích, než ve zúžených cestách. K zamrznutí přehřátím vlivem vysoké koncentrace chodců v omezeném prostoru může dojít také v důsledku chování chodců za extrémních podmínek, například při vzniku paniky. V takových situacích mohou mít chodci například snížené možnosti vnímání a nejsou schopni se nasměrovat správným směrem. Přesto se usilovně snaží prodrat vpřed. Toto chování má za následek nárůst interakcí mezi chodci a zvyšování hustoty, a to až do úplného zastavení toku. Tento stav může vyústit v nebezpečnou situaci, při které může dojít k ušlapání chodců. (HELBING, a další, 2001)

Jako příklad tohoto fenoménu můžeme uvést katastrofu, která se udála 20. října 1982 při fotbalovém utkání Spartaku Moskva a holandského HFC Haarlem v Moskvě. Před koncem utkání začali diváci opouštět stadion. V tu chvíli byl vstřelen gól a hlasitý pokřik fanoušků přiměl odcházející diváky k pokusu o návrat do tribun. Došlo ke střetu s masivním počtem odcházejících fanoušků. Tento střet si nakonec vyžádal celkem 340 ztrát na životech. (HENEIN, a další, 2010 str. 4650)

2.3.2 Formování řad

Formování řad (angl. Lane Formation) popisuje situaci, kdy v jedné chodbě proudí oběma směry chodci. Tito se pak sami organizují do oddělených toků. Řady, které chodci tvoří, jsou proměnlivé a jejich počet závisí na šířce a délce chodby a na množství chodců. Tento fenomén je založen na pozorování, že pokud je hustota chodců vysoká, začnou mít chodci problém s pohybem v důsledku omezenosti sdíleného prostoru. (TIMMERMANS, a další, 2009) (HELBING, a další, 2001)



Obrázek 2-4 Fotografie znázorňující formování řad (HELBING, a další, 2001 str. 364)

Běžné interpretace formování řad uvádějí, že chodci mají tendenci chodit na straně, která je předepsaná v motorizovaném provozu. Jak ale uvádějí (HELBING, a další, 2001), simulačními prostředky lze reprodukovat vytváření řad i v případech, kdy chodci nemají preferenci k žádné ze stran. Výsledné chování chodce se tedy odvíjí od četnosti interakcí s jinými chodci. Při jeho kontaktu s jiným chodcem dochází ke korekci směru v rámci prevence srážky. Kontakt s chodci v opačném směru je častý, zatímco ke kontaktu s chodci proudícími ve stejném směru prakticky nedochází. Chodec tím pádem koriguje svůj směr tak dlouho, dokud jej k tomu nutí přítomnost chodců

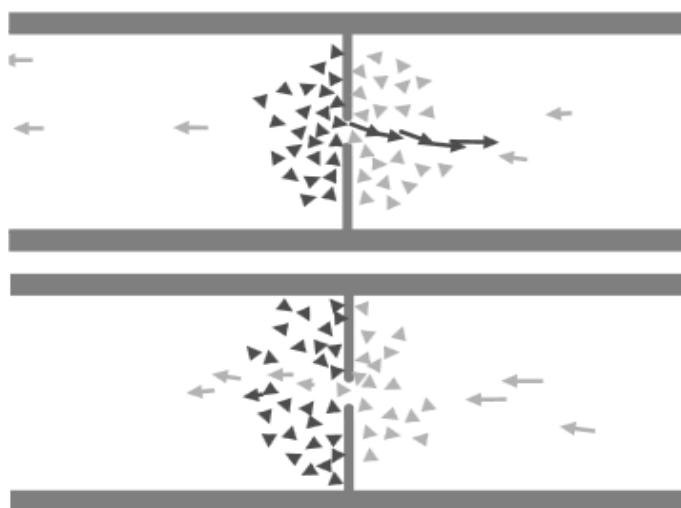
proudících opačným směrem. Pokud již chodec kráčí ve skupině, klesá počet situací, ve kterých má potřebu korigovat svůj směr pohybu. Při počátečním střetu protichůdných toků mají chodci tendenci vyhnout se protijdoucímu s pravděpodobností 0,5 doleva nebo doprava. Pokud se ale v průběhu mísení toků libovolná strana stane více preferovaná než druhá, stává se pro chodce více výhodné zvolit právě onu frekventovanější stranu. Nakonec by měla převážná většina chodců zvolit stejnou stranu. (HELBBING, a další, 2001) (HELBBING, a další, 2005)

Pokud hustota chodců překročí určitou úroveň, může dojít k zamrznutí přehřátím. (HELBBING, a další, 2001)

2.3.3 Oscilace při obousměrném toku chodců

Tato kapitola byla zpracována dle (HELBBING, a další, 2001)

Tento fenomén lze pozorovat při obousměrném průchodu chodců úzkým průchodem. Pokud není průchod dostatečně široký, aby pojal tok chodců v obou směrech najednou, dochází k relativně pravidelnému střídání směru toku. Chodci z jedné strany začnou procházet skrze průchod a tento proud je po čase vystřídán proudem chodců z druhé strany. Proudění z jedné a druhé strany se pak při dostatečném přísunu chodců k průchodu neustále střídají. Běžným vysvětlením tohoto jevu je, že chodec dá po určitém čase přednost chodci čekajícímu na druhé straně. To ale nevysvětluje zvýšení frekvence oscilace při rozšíření průchodu.



Obrázek 2-5 Oscilace směru průchodu (HELBBING, a další, 2001 str. 370)

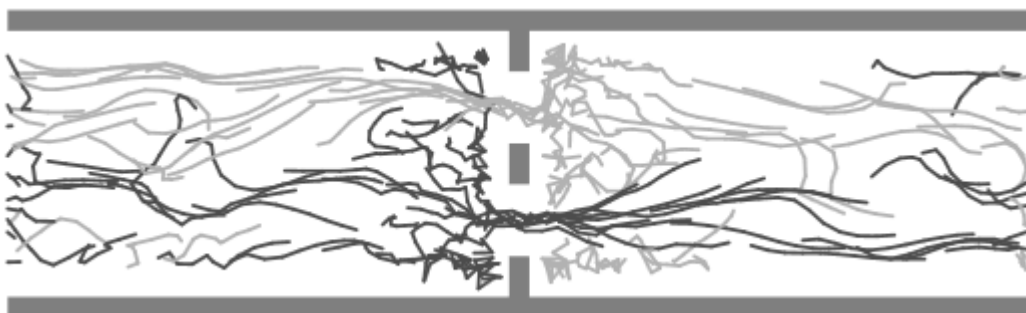
Pokud se chodci podaří projít průchodem, chodci, kteří chtějí projít stejným směrem, jej mohou jednoduše následovat. Jak chodci procházejí průchodem, jejich nátlak z dané strany klesá. Naopak nátlak chodců z druhé strany roste, jak se u průchodu hromadí další a další chodci. To vede k zablokování průchodu (angl. Deadlock), po němž následuje obdobný průchod chodců z druhé strany. Tento jev je lépe pozorovatelný v případě širokého a krátkého průchodu, kdy ke změnám směru průchodu dochází častěji.

2.3.4 Využití dvou průchodů při obousměrném toku chodců

Tato kapitola byla zpracována dle (HELBING, a další, 2001)

V situaci popsané výše (2.3.3) není tok chodců plynulý, dochází k zablokování průchodu. To je z hlediska chodců nežádoucí. Pro zlepšení toku chodců je možné tento průchod rozšířit. I v tomto případě však dochází k mnoha lokálním interakcím mezi chodci, opět dochází k situacím zablokování, i když se jejich trvání zkracuje.

Alternativním přístupem k řešení problému je nabídnout chodcům další průchod. Proudění chodců v různém směru využívají různé průchody (Obrázek 2-6). Toto je výsledkem reaktivního chování chodců na mikro-úrovni. Toto chování není plánované, kolektivně organizované, vázané na sociální konvence, ani jinak řízené z vnějšku, např. prostřednictvím ukazatelů.



Obrázek 2-6 Při existenci dvou průchodů v chodbě s obousměrným tokem chodců využívá každý tok chodců jiný průchod (HELBING, a další, 2001 str. 374)

Dva průchody jsou z hlediska toku efektivnější než jeden průchod dvojnásobně široký. Při rozšíření samostatného průchodu nemusí výsledný tok chodců růst propor-

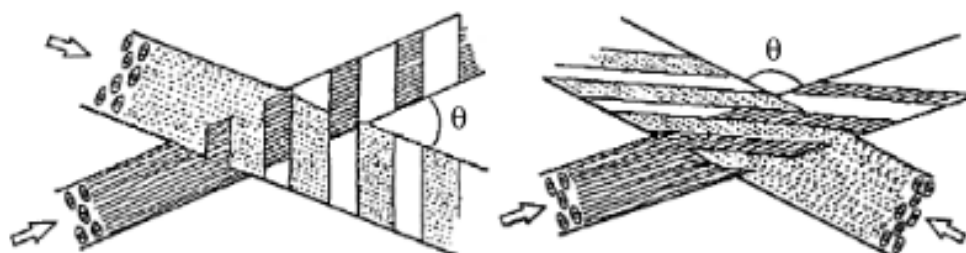
cionálně. Dojde ke zvýšení frekvence střídání směru průchodu. Tyto epizody jsou ale stále prokládány dočasným zablokováním.

2.3.5 Průchod křižovatkou

Tato kapitola byla zpracována dle (HELBING, a další, 2005).

Křížení toku chodců představuje potenciálně nebezpečnou situaci, neboť dochází k interakcím mezi chodci za velmi vysoké hustoty. Křížení chodců je sice možné zabránit oddělením toků, například prostřednictvím mostů, ale toto řešení není běžné.

V případě střetu dvou souvislých proudů chodců je možno pozorovat fenomén formování pruhů (angl. Stripe Formation), viz Obrázek 2-7. Výsledné pruhy jsou kolmé na součtový vektor směrových vektorů obou toků chodců.



Obrázek 2-7 Stripe Formation - pruhy jsou kolmé na součtový vektor směrových vektorů obou toků (HELBING, a další, 2005)

Tyto pruhy odpovídají vlnám hustoty chodců pohybujících se v určitém směru. Pruhy chodců se přirozeně rozšiřují do směru kolmého se směrem pohybu chodců, takže chodci se s pruhem pohybují vpřed a v rámci pruhu se pohybují do strany. Výsledkem je plynulé pronikání pruhů v různých směrech, bez nutnosti zastavení toku. Fenomén formování řad je vlastně pouze extrémním případem střetu dvou toků chodců, kdy úhel, který tyto toky svírají, je 180° .

Studie naznačují, že při střetu více toků chodců nelze pozorovat obdobně stabilní vzorec chování. Chování chodců vykazuje určité znaky organizace, ty mají ale krátké trvání, samy sebe narušují a výsledné chování je zdánlivě chaotické. Tyto dočasné znaky zahrnují:

- kruhové obcházení ve směru či v protisměru hodinových ručiček
- dominantní tok chodců s čekajícími chodci v jiném směru
- krátké formování pruhů v jednom ze čtyř možných diagonálních směrů

Vzájemná interakce vzorců chování vede k neefektivnímu toku chodců a dočasnému zablokování.

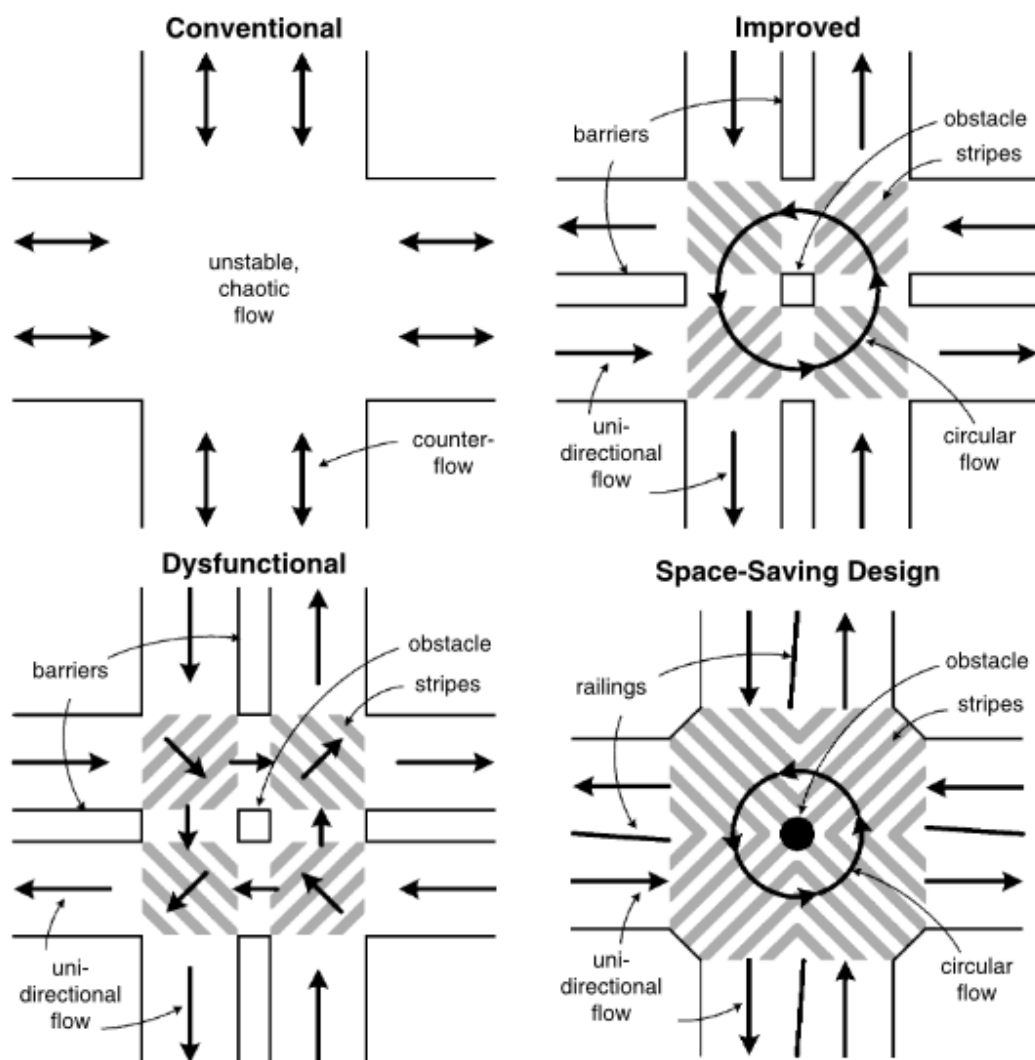
Proudy chodců v křižovatkách lze organizovat za účelem stabilizace výše popsaných vzorců chování. Nejvhodnější je taková organizace toků chodců, kdy se v jednom místě střetávají pouze dva proudy. Efektivita pohybu chodců v křižovatce může být například vylepšena umístěním překážky doprostřed křížení. Překážka sice zmenšuje prostor, který mají chodci k dispozici, ale podporuje u chodců tendenci ke kruhovému obcházení překážky.

Obrázek 2-8 ilustruje návrh pro řízení toků chodců v křižovatkách. Křižovatka nahoře vlevo představuje tradiční řešení. Všemi příchody ke křížení proudí chodci v obou směrech a v křížení samotném vzniká chaotický shluk chodců bez stabilního vzorce chování.

Křižovatka nahoře vpravo (Obrázek 2-8) představuje vylepšený návrh. Toky v jednotlivých chodbách jsou odděleny prostřednictvím překážky půlící danou chodbu. V samotném křížení uprostřed je umístěna překážka pro podporu kruhového obcházení chodců. Šedé pruhy ve schématu znázorňují očekávané formování pruhů, jelikož se v daných místech očekává střet pouze dvou toků chodců.

Křižovatka dole vlevo (Obrázek 2-8) znázorňuje situaci, kdy se jednotlivé proudy chodců střetávají ve špatném pořadí. Dá se očekávat, že výsledný tok nebude efektivní.

Tok chodců na křižovatce dole vpravo (Obrázek 2-8) je organizován stejným způsobem jako nahoře vpravo. Výhodou této varianty je úspora místa. Tento návrh je vystavěn s přihlédnutím k tendenci chodců preferovat pravou stranu, například v zemích střední Evropy. V jiných zemích, například v Japonsku, by bylo vhodné invertovat směr proudů pro otočení směru obcházení centrální překážky.



Obrázek 2-8 Ilustrace organizace toků chodců v křižovatce (HELHING, a další, 2005 str. 16)

2.4 Simulační nástroje a AnyLogic

Následující část byla zpracována dle (KRAVARI, a další, 2015).

Pro potřebu vývoje multiagentových simulací vznikla celá řada nástrojů a frameworků. (KRAVARI, a další, 2015) nabízí ve své studii přehled a srovnání 24 simulačních nástrojů, které jsou aktuálně dostupné. Autoři studie klasifikovali simulační nástroje na základě pěti evaluačních kritérií - vlastnosti platformy, využitelnost, operační schopnosti (kvalitativní vlastnosti jako výkon, robustnost, apod.), praktické atributy (popularita, cena, podpora, apod.) a bezpečnostní management. Tyto kritéria byla dále členěna do podkategorií.

Dominantním programovacím jazykem využívaným v nástrojích pro vývoj multiagentových systémů je Java, která je jako primární programovací jazyk využita u 80 % platforem. Javu využívají například JADE, AgentBuilder, EMERALD nebo AnyLogic. V některých nástrojích existuje možnost využití deklarativních principů programování (Repast, JADE). Na výběr je mnoho dalších programovacích jazyků. Po Javě zaujímá významné postavení také C/C++ (AgentBuilder, Swarm, Repast). Některé nástroje přichází s vlastním programovacím jazykem (NetLogo).

Mezinárodní organizace FIPA (The Foudation for Intelligent Physical Agents) vyvíjí a propaguje průmyslové standardy popisující multiagentové systémy a jejich aplikace. Plnou podporu standardů FIPA deklaruje JADE, Jadex, JACK a EMERALD. Některé nástroje nabízí podporu pouze vybraných standardů, například Agent Factory podporuje pouze specifikace týkající se komunikačních principů. Většina nástrojů tyto standardy nezohledňuje (Swarm, NetLogo, AnyLogic, a další).

Zatímco některé agentové platformy jsou určeny pro širokou škálu aplikačních domén, jiné jsou specificky navrženy pro danou doménu. Pokud je nástroj takto specializovaný, je také v těchto případech více efektivní. Například platforma AGLOBE je navržena pro simulace reálného světa za využití dat geografického informačního systému (GIS). Mnoho nástrojů cílí na velké množství aplikačních domén (JADE, AnyLogic, Jadex a další) a pro každou aplikační doménu je možné vybírat z více možných nástrojů podle dalších potřeb projektu.

2.4.1 AnyLogic a Pedestrian Library

Následující část byla zpracována dle (Anylogic, 2015).

AnyLogic je komplexní nástroj pro tvorbu simulačních modelů. Vyvíjí jej společnost The AnyLogic Company se sídlem v Petrohradě a poprvé byl tento nástroj představen v roce 2000.

AnyLogic je distribuován ve čtyřech různých edicích: Free AnyLogic PLE, AnyLogic Univerzity Reasercher, AnyLogic Advanced a AnyLogic Proffesional. Tyto edice se liší různou mírou omezení ve využití SW, stejně jako různými licenčními podmínkami.

Tento vývojový nástroj je vystavěn na technologii Java. Díky tomu je možné AnyLogic provozovat na libovolném operačním systému. Výsledné simulační modely je možné exportovat do samostatné Java aplikace a tím je zcela oddělit od vývojového nástroje.

Určujícím znakem tohoto nástroje je podpora všech tří základních přístupů v počítačových simulacích: diskrétní simulace, agentové simulace i simulace systémové dynamiky. Tyto přístupy lze v rámci jednoho modelu libovolně kombinovat.

Uživatelé libovolné verze AnyLogicu mají k dispozici základní nápovědu k používání programu s popisem jednotlivých stavebních bloků a omezeným počtem výukových modelů (obvykle jeden pro každý přístup k modelování). V případě placených edicí programu se uživatel může obrátit na online uživatelskou podporu. Výsledné modely je možné sdílet na webu www.runthemodel.com.

AnyLogic také poskytuje pokročilé možnosti vizualizace modelu. Tato může být dvoj- nebo trojrozměrná. AnyLogic nabízí také práci s mapovými podklady spolu s integrací geografického informačního systému (GIS). Součástí programu je i poměrně rozsáhlá knihovna 2D i 3D grafických objektů, které lze využít pro zobrazení potřebných prvků v rámci simulace. Uživatel si může i sám navrhnout nebo importovat grafické objekty například ve X3D formátu.

Vývojové prostředí AnyLogic se podobá jiným moderním vývojovým nástrojům. To napomáhá programátorům v rychlejší orientaci. Při vytváření modelu je upřednostňována grafická reprezentace - uživatel klade jednotlivé objekty na grafickou pracovní plochu. Výkonný kód má syntaxi jazyka Java, ale i při návrhu algoritmů je možné si pomoci standardní vizualizací cyklů, příkazů větvení apod.

Prvky, které má uživatel v AnyLogicu k dispozici, jsou v rámci nástroje rozděleny do logických skupin a knihoven. Zatímco ve skupinách logicky sdružených prvků se nacházejí elementy, které mají široké využití v modelování různých situací (analytické nástroje, řídicí prvky, prezentační prvky, stavové diagramy aj.), v knihovnách jsou elementy navržené pro specifickou oblast modelování. Ve verzi 7.1.* AnyLogic nabízí k využití následující knihovny: Process Modeling Library (prvky procesního modelování), Pedestrian Library (prvky modelování dynamiky chodců) a Rail Library (prvky modelování železniční přepravy). V jednom modelu je možné podle potřeby kombinovat prvky z různých knihoven. V následujícím oddíle se práce zaměřuje knihovnu k modelování pohybu chodců (Pedestrian Library) a elementy v ní obsažené.

Pedestrian Library je určena k simulaci toku chodců v budovách (např. stanice podzemní dráhy) i na ulicích. Modely umožňují například sledování hustoty chodců v různých oblastech, určení doby pobytu v konkrétních oblastech nebo sledování vlivu překážek v prostředí na tok chodců. Chodci se pohybují ve spojitém prostředí

a reagují na překážky (zdi, různé oblasti) a ostatní chodce. K definici modelu chodců v AnyLogicu dochází prostřednictvím rozhraní ve stylu vývojového diagramu.

Elementy Pedestrian Library lze rozdělit do dvou skupin - chování a prostředí. Prvky prostředí zahrnují zdi, oblasti, služby, fronty a další. Prvky chování zajišťují mimo jiné příchody a odchody chodců, pohyb, čekání, využití služeb, rozdělení toku nebo sdružování do skupin.

Pro ukázkou procesu návrhu modelu chodců v AnyLogicu a byl vytvořen návod, který popisuje výstavbu jednoduchého modelu chodců krok za krokem. Tento návod je připojen k této práci jako příloha (7.2).

3 Praktická část

K vytvoření následujících modelů chodců bylo využito simulačního nástroje Any-Logic a jeho knihovny Pedestrian Library. Tato knihovna je specificky navržena pro simulace chování chodců. Využití této knihovny řeší za uživatele základní procesy chování chodců (výběr cesty, pohyb, vyhýbání se překážkám a kolizím, atd.). Na druhou stranu má uživatel omezené možnosti v případě potřeby do tohoto chování zasáhnout.

Bloky Pedestrian Library byly použity pro simulaci vybraných fenoménů chování chodců. Proběhly simulace zamrznutí přehřátím, formování řad, oscilace směru průchodu při obousměrném toku chodců úzkým průchodem, obousměrného toku chodců dvěma průchody a průchodu křižovatkou. Na těchto simulacích bylo zkoumáno, zda chování agentů modelu odpovídá teoriím o chování chodců v daných podmínkách.

Vizuální hodnocení proběhlo za využití 2D i 3D vizualizace. Dále bylo využito analytické hodnocení - průměrná doba průchodu a frekvence oscilace směru průchodu. Tyto data byla získána prostřednictvím počítačové simulace a dále zpracována.

3.1 Model 1: Zamrznutí přehřátím

Následující simulační model jsem navrhl pro demonstraci fenoménu zamrznutí přehřátím (viz 2.3.1). Pro jeho konstrukci bylo využito pouze základních stavebních bloků Pedestrian Library a programově nebyly implementovány žádné mechanismy zajišťující dosažení očekávaného efektu.

3.1.1 Popis modelu

Simulační prostředí představuje část chodby široké 23m, která je ukončená stěnou s průchodem širokým 4m (Obrázek 3-1).



Obrázek 3-1 Model prostředí pro simulaci zamrznutí přehřátím

V simulaci je použit pouze jeden typ agenta chodce. Chování agentů je motivováno cílem dosáhnout oblasti za průchodem. Schéma tohoto chování znázorněné prostřednictvím bloků Pedestrian Library je vyobrazeno na Obrázku 3-2.



Obrázek 3-2 Schéma chování chodců v modelu Zamrznutí přehřátím

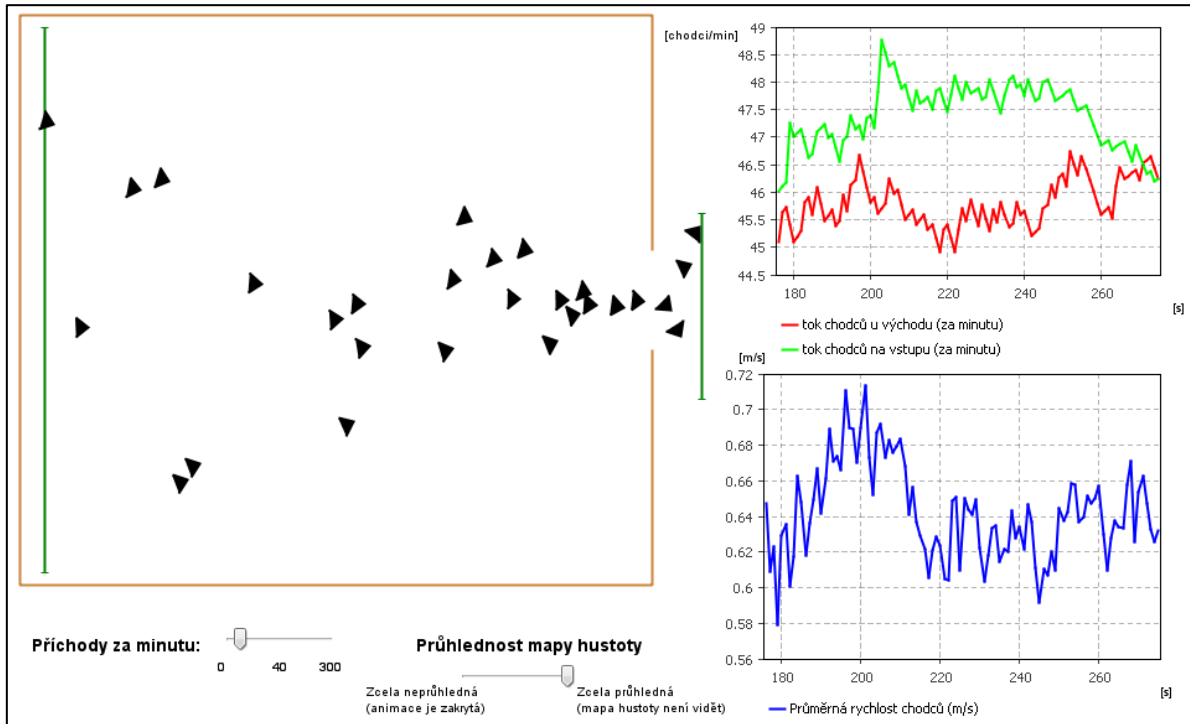
V bloku `umístiChodceVlevo` se vytvářejí instance chodců, které jsou umístěny do levé části výseče chodby. Následně přebírá řízení blok `projdiPrůchodem`, který řídí pohyb chodců k cílové oblasti, která se nachází za zúženým průchodem ve stěně. Po dosažení svého cíle jsou instance chodců zlikvidovány v bloku `odstraňChodce`.

Parametry, které lze během simulace ovlivňovat, jsou frekvence příchodů za minutu a průhlednost mapy zobrazující hustotu chodců.

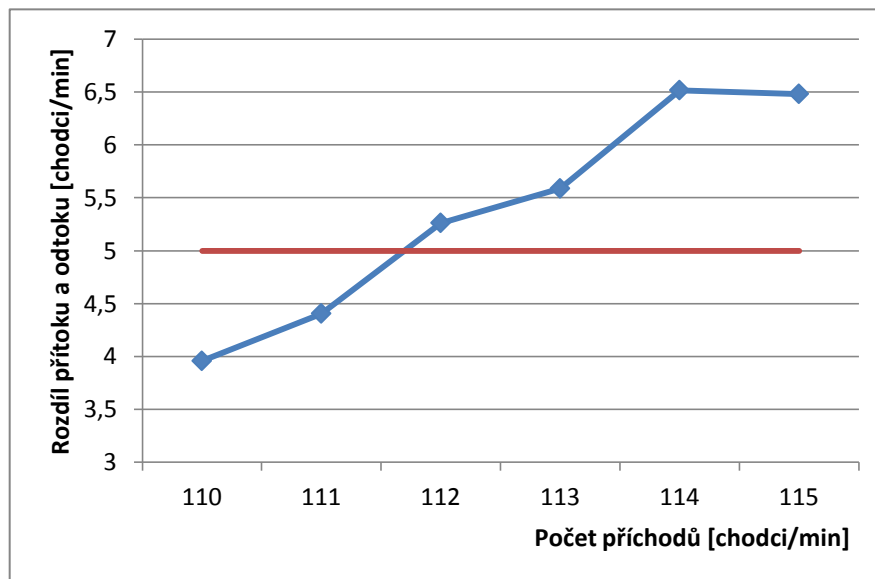
3.1.2 Experimenty

K zamrznutí přehřátím nedochází, dokud frekvence příchodu nepřekročí určitou hranici (Obrázek 3-3). Tato hranice závisí na šířce i délce průchodu. V daném simulacním prostředí proběhlo experimentální stanovení této hranice. Sledovaným parametrem byl rozdíl průměrného toku na vstupu a na výstupu modelu. Za hraniční byla označena taková frekvence příchodu, při které rozdíl hodnot obou toků přesáhl veli-

kost 5. Hodnota 5 představuje toleranci zohledňující časovou prodlevu mezi nárůstem hodnot příchodu a odchodu. Pro toto simulační prostředí byla hraniční frekvence příchodů stanovena na 111 chodců za minutu (Graf 3-1).



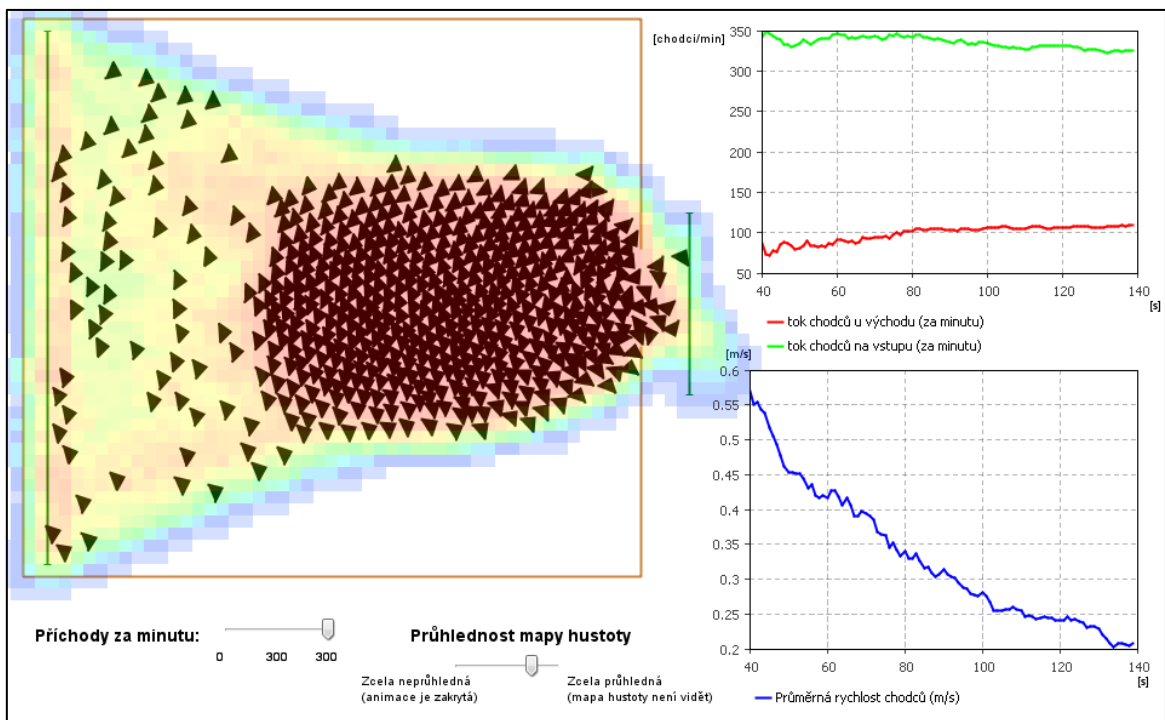
Obrázek 3-3 Simulace zamrznutí přehřátím, nízká frekvence příchodu



Graf 3-1 Vývoj rozdílu průměrných hodnot toku chodců na vstupu a výstupu z modelu

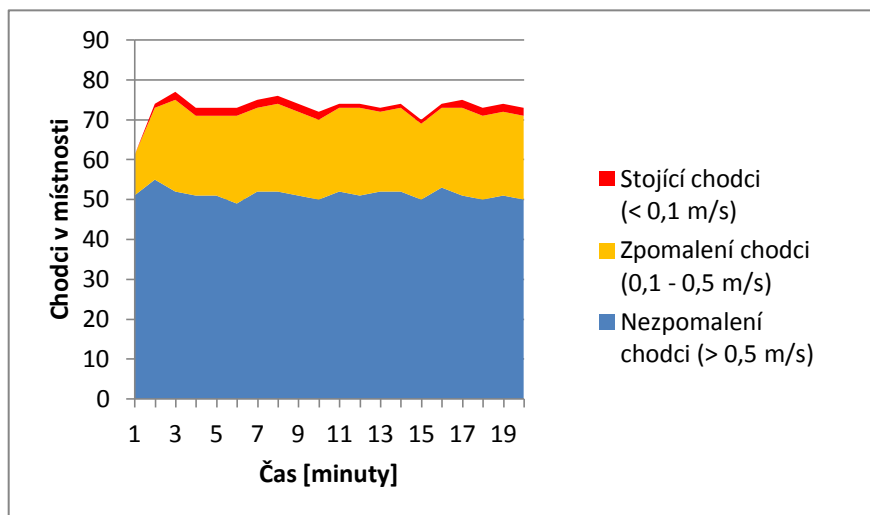
Při vyšších frekvencích příchodů není průchod dostatečně široký, aby umožnil plynulý průchod všem chodcům. Dochází k vytvoření kompaktní struktury chodců před průchodem, která se postupně zvětšuje (Obrázek 3-4). Uvnitř této struktury přesahu-

je hustota chodců kritickou úroveň (červená barva na mapě hustoty - Obrázek 3-4) a tok chodců se zastavuje.

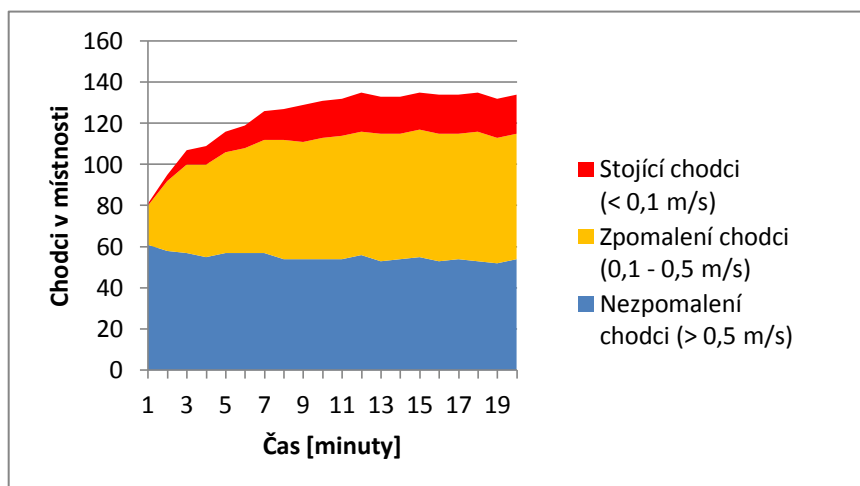


Obrázek 3-4 Simulace zamrznutí přehřátím - 300 chodců/min

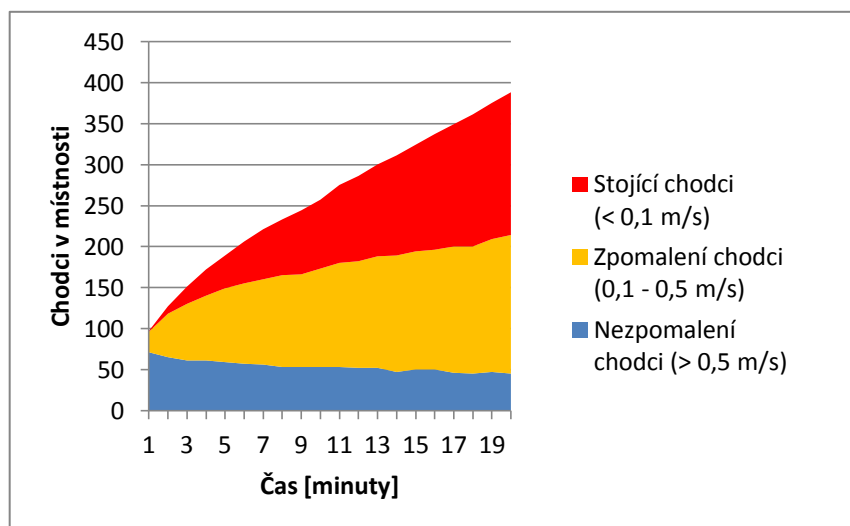
Prostřednictvím nastavení elementu Ped Source z Pedestrian Library byla chodcům vstupujícím do modelu přiřazena počáteční rychlost z rozmezí 0,3 - 0,7 m/s a preferovaná rychlost z rozmezí 0,5 - 1 m/s. Při interakci chodců dochází k jejich zpomalení, až zastavení v případě zablokovaných chodců. Grafy (Graf 3-2, Graf 3-3 a Graf 3-4) znázorňují, jak se vyvíjí složení chodců podle jejich aktuální rychlosti v čase. Grafy (Graf 3-2 a Graf 3-3) ukazují, že v případě frekvence příchodů pod hranicí 111 chodců za minutu dochází v čase k ustálení počtu chodců v jednotlivých kategoriích rychlosti. Graf 3-4 znázorňuje, jak při překročení této hranice podíl stojících chodců roste s lineární tendencí.



Graf 3-2 Populace chodců v místnosti dle rychlosti pohybu - 90 chodců/min

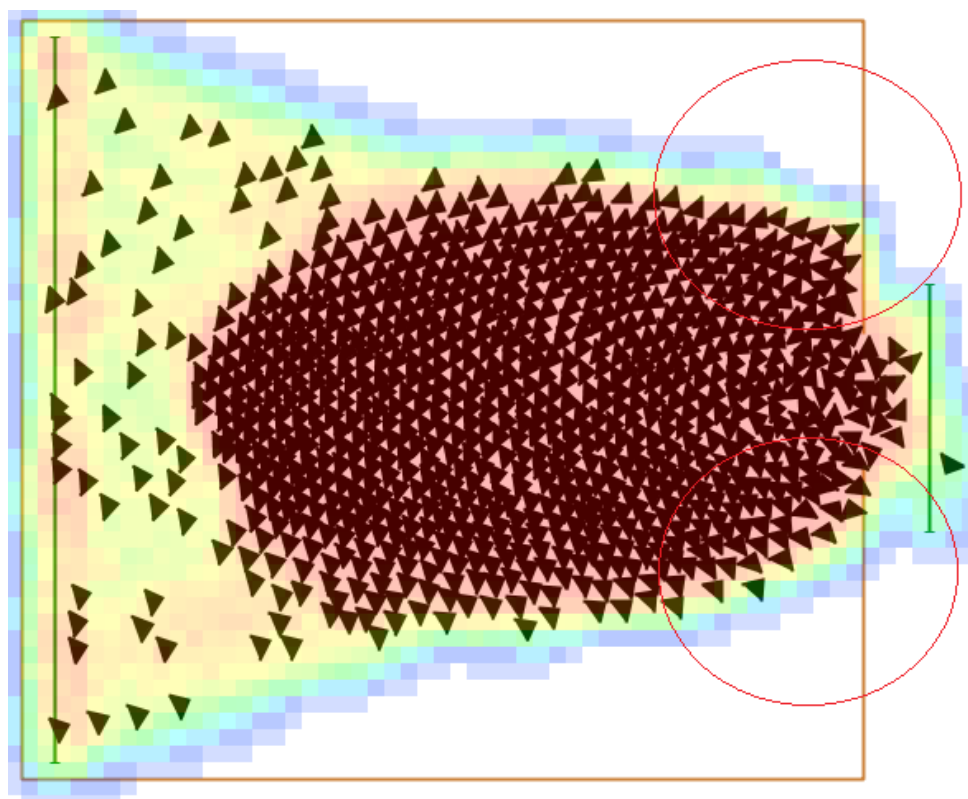


Graf 3-3 Populace chodců v místnosti dle rychlosti pohybu - 110 chodců/min



Graf 3-4 Populace chodců v místnosti dle rychlosti pohybu - 130 chodců/min

Na okrajích struktury chodců můžeme pozorovat nižší hustotu chodců a právě podél těchto okrajů může tok chodců dále pokračovat, než je zastaven při kontaktu se stěnou. K tomuto jevu v případě této simulace nedochází, struktura, kterou chodci vytvářejí, má nízkou tendenci narůstat podél stěny u východu (Obrázek 3-5).



Obrázek 3-5 Simulace zamrznutí přehřátím, nerovnoměrný nárůst struktury chodců

3.2 Model 2: Formování řad

Následující simulační model jsem navrhl pro demonstraci fenoménu formování řad (viz 2.3). Pro jeho konstrukci bylo využito pouze základních stavebních bloků Pedestrian Library a programově nebyly implementovány žádné mechanismy zajišťující dosažení očekávaného efektu.

3.2.1 Popis modelu

Prostředí simulačního modelu představuje úsek chodby plně ohraničené stěnou. Po jejích stranách nejsou přítomné žádné východy ani vchody. Simulovaná chodba má délku 25 m a šířku 10 m.

V simulaci jsou použity dva typy agentů chodců. Každý typ chodců proudí chodbou v jednom směru (zprava doleva - červená, zleva doprava - černá).

Chování chodců je definováno prostřednictvím základních bloků Pedestrian Library a jeho schéma je znázorněno na Obrázku 3-6.

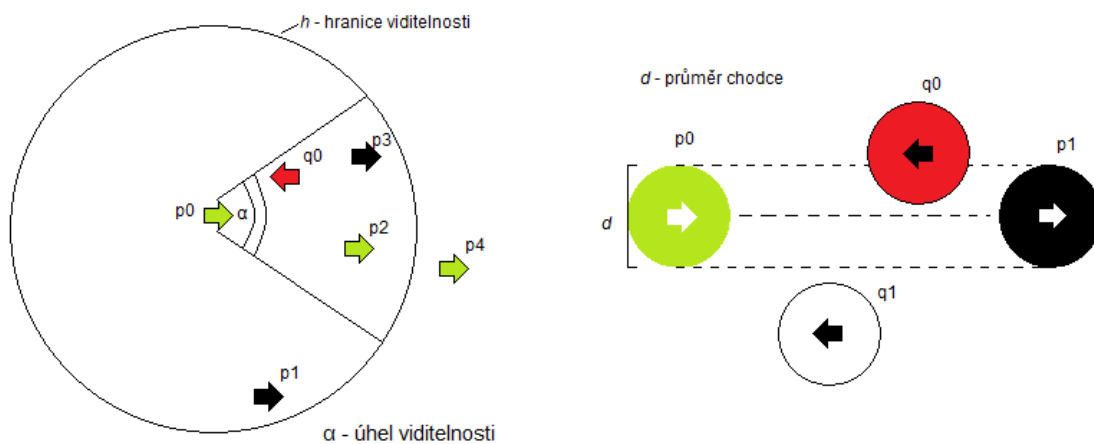


Obrázek 3-6 Schéma chování chodců v modelu Formování řad

Bloky `umístiChodceVlevo` a `umístiChodceVpravo` vytvářejí instance příslušného typu chodců a umísťují je do výchozí polohy v modelu. Ta se nachází na příslušné straně chodby (levá/pravá). Bloky `jdiDoleva` a `jdiDoprava` následně přebírají řízení nad chováním umístěného agenta a řídí jeho pohyb na opačnou stranu chodby. Po dosažení svého cíle je agent z modelu odstraněn v blocích `odstraňChodce` a `odstraňChodce2`.

Řada chodců je v tomto modelu definovaná jako skupina chodců (minimálně dvou), kteří mají stejný směr pohybu. Dva chodci tvoří řadu, pokud splňují následující podmínky:

1. Vzdálenost chodců nepřesahuje poloměr viditelnosti chodce h .
2. Umístění jednoho z chodců je obsaženo ve výseči viditelnosti určené úhlem α , pozicí druhého chodce a cílovým směrem pohybu druhého chodce.
3. Mezi těmito chodci není přítomen protijdoucí chodec.



Obrázek 3-7 Ilustrace podmínek, které splňují chodci tvořící řadu

Tyto podmínky ilustruje Obrázek 3-7. Nasměrování výseče viditelnosti není závislé na aktuální trajektorii chodce, ale na jeho cílové trajektorii. Výseč viditelnosti bude tedy v tomto modelu vždy symetrická podle vodorovné osy. Chodci v protisměru narušují třetí podmínku formování řady, pokud svým objemem narušují prostor mezi sledovanými chodci. Tento prostor je určen přímkou spojnici pozic obou chodců a má šířku odpovídající průměru chodců (Obrázek 3-7 vpravo). Vzdálenost chodce $p4$ na Obrázek 3-7 vlevo přesahuje poloměr viditelnosti chodce $p0$, přesto patří do stejné řady, protože splňuje všechny podmínky řady s chodcem $p2$, který tvoří řadu s $p0$.

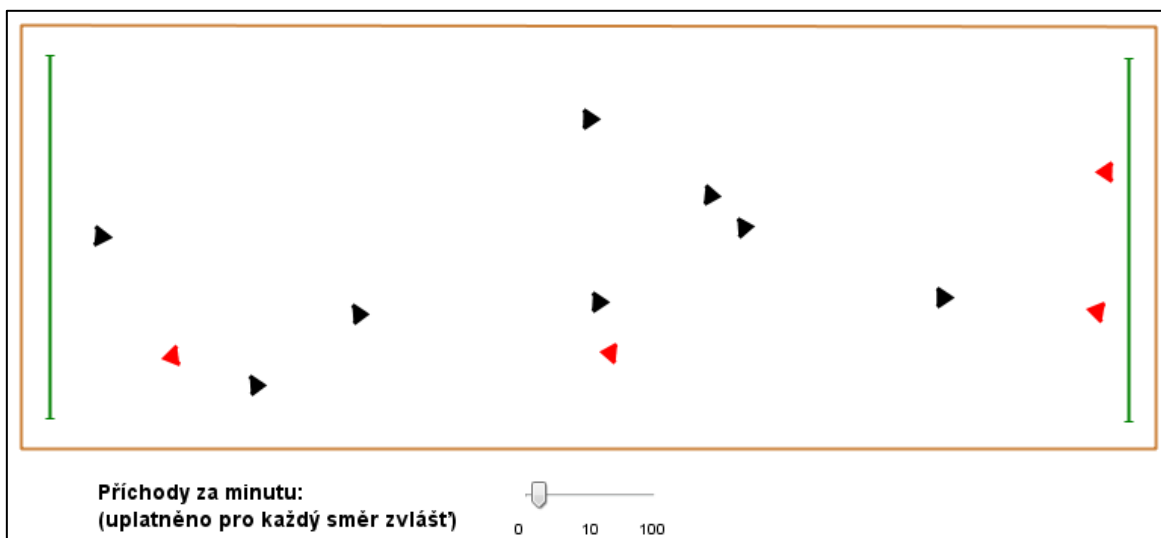
Parametry pro určení řady, úhel viditelnosti α a poloměr hranice viditelnosti, lze v rámci modelu nastavit v rozmezí $\alpha \in \langle 0^\circ, 180^\circ \rangle$, $h \in \langle 100 \text{ cm}, 300 \text{ cm} \rangle$.

Za běhu simulace probíhá automatická detekce zformovaných řad. Ve 2D zobrazení jsou chodci ve stejné řadě obarveni stejnou barvou. Zbylí chodci, kteří nepřísluší žádné řadě, mají výchozí barvu dle směru jejich pohybu (černou/červenou).

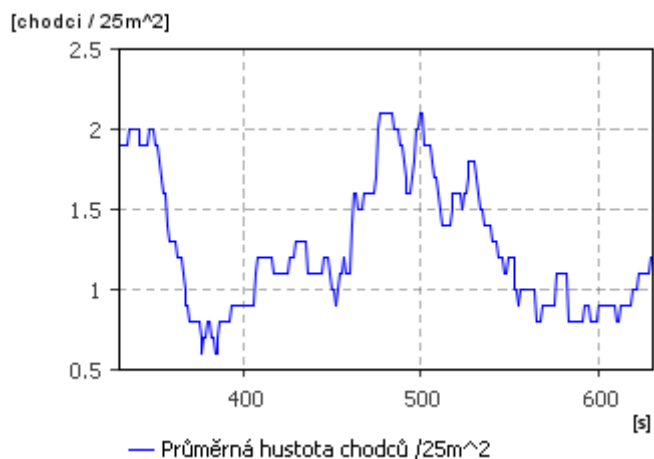
Dalším parametrem modelu je frekvence příchodů chodců do modelu. Tento parametr určuje množství přicházejících chodců z jedné ze stran. Na druhé straně je frekvence příchodů shodná. Výsledná hustota chodců v chodbě se odvíjí od tohoto parametru. Model umožňuje nastavení tohoto parametru v rozmezí 0 - 100 příchodů z jedné strany za minutu a to i za běhu simulace. Chování chodců bylo experimentálně vyhodnocováno při různých frekvencích příchodu.

3.2.2 Experimenty

Pro následující experimenty byly zvoleny následující hodnoty parametrů: poloměr viditelnosti $h = 150 \text{ cm}$, úhel viditelnosti $\alpha = 120^\circ$. Do výsledků byly zahrnuty pouze řady délky 3 a více chodců. Data prezentovaná v Tabulce 3-1 a grafech na Obrázku 3-14 pocházejí z experimentů, které trvaly 20 minut virtuálního času s periodou vzorkování 10 vteřin.



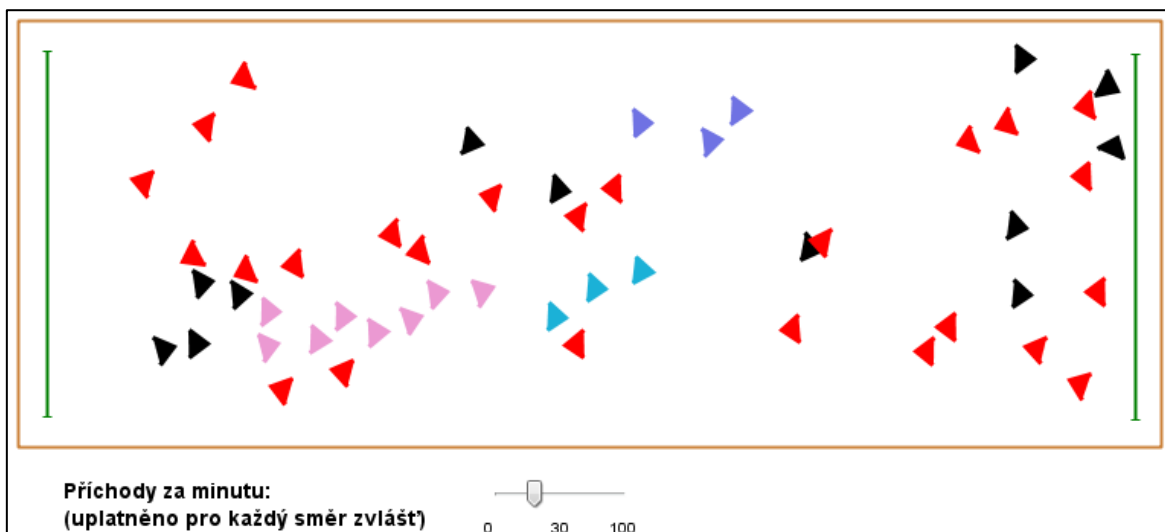
Obrázek 3-8 Simulace formování řad - 10 chodců /min



Graf 3-5 Vývoj průměrné hustoty chodců v simulaci formování řad - 10 chodců /min

Obrázek 3-8 znázorňuje pozice chodců v chodbě při frekvenci příchodů 10 chodců za minutu v obou směrech. Průměrná hustota chodců se pohybovala převážně v rozmezí 0,5 - 2 chodci/25m² (Graf 3-5). Tato hustota byla příliš nízká, než abychom mohli pozorovat fenomén formování řad. Pokud se řada chodců utvořila, jednalo se spíše

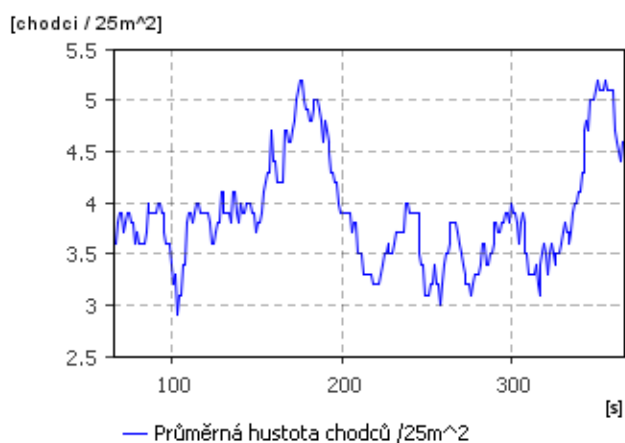
o náhodný jev než důsledek interakce chodců (Grafy 1 a 2 na Obrázku 3-14). Při takto nízké hustotě se chodci chovali jako izolované body.



Obrázek 3-9 Simulace formování řad -30 chodců/min

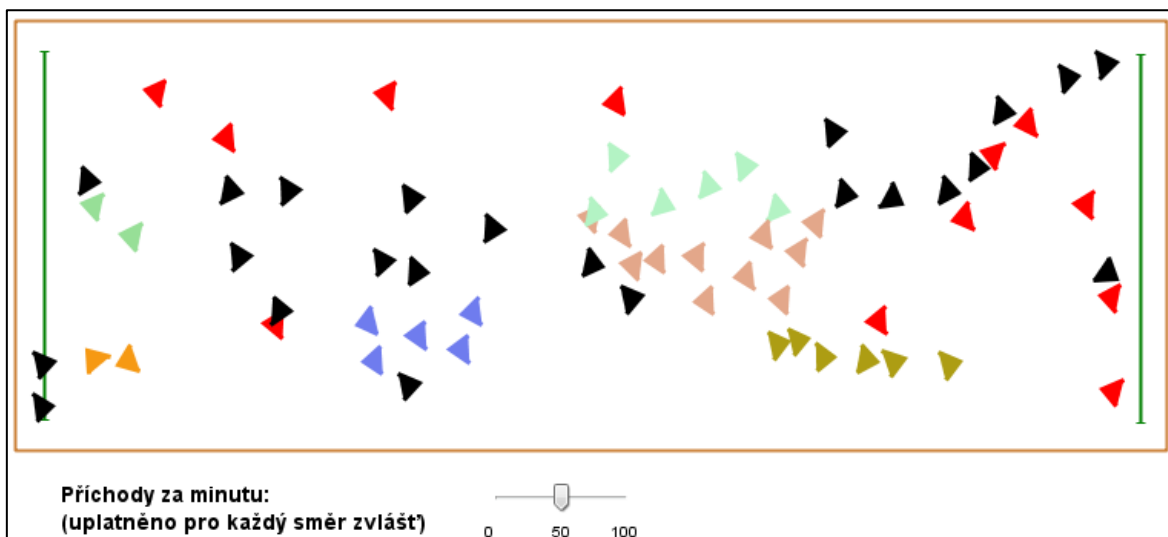


Obrázek 3-10 Simulace formování řad - 40 chodců/min



Graf 3-6 Vývoj průměrné hustoty chodců v simulaci formování řad - 30 chodců /min

Při frekvenci příchodů 30 - 40 chodců za minutu v každém směru můžeme pozorovat dostatek interakcí mezi chodci, aby došlo k formování oddělených toků (Grafy 3 a 4 na Obrázku 3-14). Obrázek 3-9 a Obrázek 3-10 znázorňují pozice chodců v simulaci při těchto frekvencích příchodu. Průměrná hustota chodců se pohybovala převážně v rozmezí 3-7 chodců/25m² (Graf 3-6).

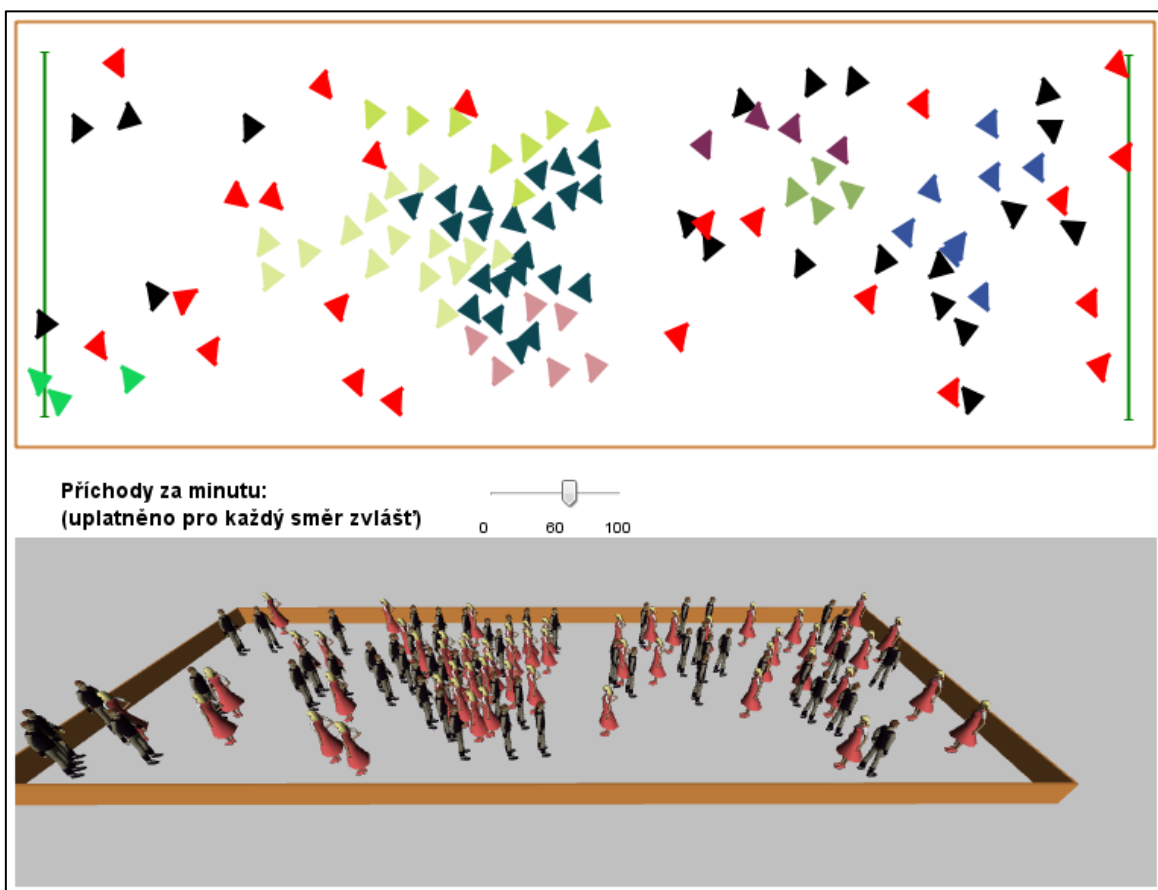


Obrázek 3-11 Simulace formování řad - 50 chodců/min

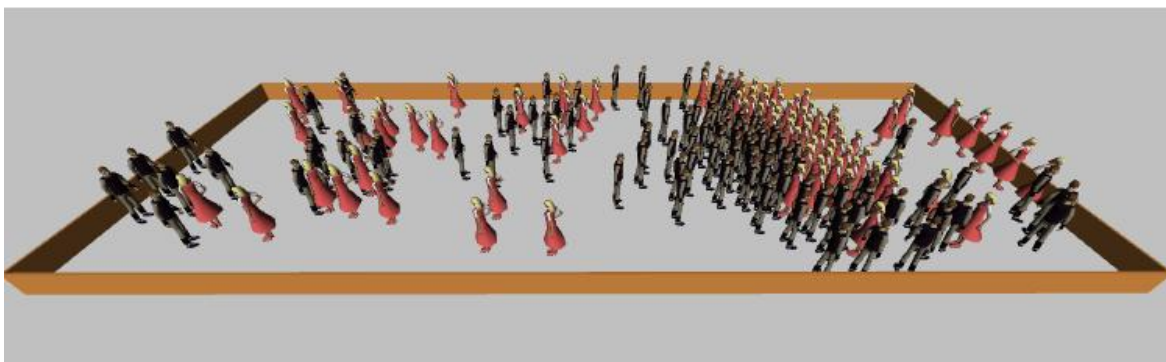


Graf 3-7 Vývoj průměrné hustoty chodců v simulaci formování řad - 50 chodců /min

Při frekvenci příchodů 50 chodců za minutu z každé strany se průměrná hustota chodců v chodbě pohybovala převážně v rozmezí 6-9 chodců/25m² (Graf 3-7). Většina chodců za této frekvence příchodů tvoří řadu (Graf 5 na Obrázku 3-14). Obrázek 3-11 znázorňuje, jak chodci na základě lokálních interakcí zformovali v pravé střední části tři oddělené proudy. Překvapivé zjištění je, že agenti v této simulaci preferovali formování úzkých řad, často o šířce jediného chodce. Takovéto řady jsou z hlediska plynulosti toku pro chodce nevýhodné, jelikož jsou snadno narušeny chodci z opačného směru. Zároveň dochází při existenci většího počtu oddělených toků k většímu počtu interakcí mezi agenty, než v případě, kdy existuje pouze jeden tok v každém směru.

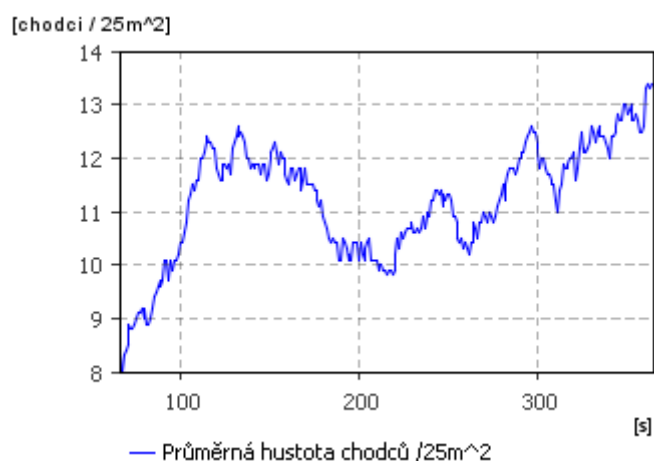


Obrázek 3-12 Simulace formování řad, formování shluku - 60 chodců/min



Obrázek 3-13 Simulace formování řad, zamrznutí přehřátím - 70 chodců/min

Při frekvenci příchodů 60 chodců za minutu v každém směru můžeme častěji pozorovat formování silnějších řad. Obrázek 3-12 ukazuje počáteční fázi formování shluku, který omezuje tok chodců (zamrznutí přehřátím). K tomuto jevu dochází v tomto modelu, pokud průměrná hustota po delší časový úsek přesáhne hodnotu 10 chodců/25m² (Graf 3-8). V případě zablokování jsou všichni chodci vyhodnoceni jako příslušníci nějaké řady (Graf 6 na Obrázku 3-14).



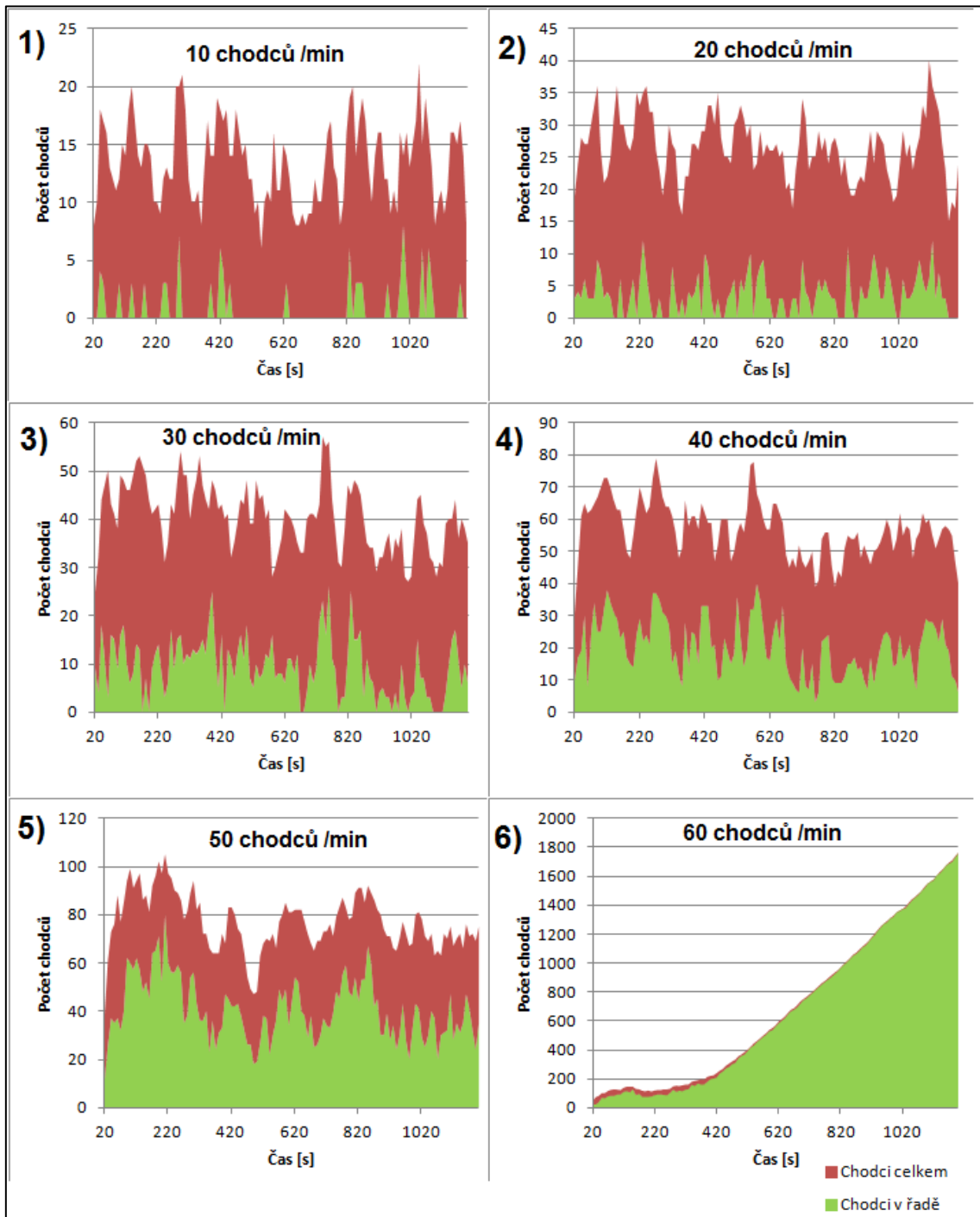
Graf 3-8 Vývoj průměrné hustoty chodců v simulaci formování řad - 60 chodců /min

Při vyšších frekvencích příchodu do modelu hustota chodců tuto hodnotu velmi rychle překračuje a dochází k úplnému zastavení toku chodců vlivem vytvoření kompaktní struktury agentů zaplňující celou šířku chodby, viz Obrázek 3-13.

Tabulka 3-1 znázorňuje hodnoty popisující vlastnosti řad, které chodci tvořili v různých simulacích podle frekvence příchodu. Průměrný počet chodců v řadě a medián počtu chodců v řadě naznačují, že většinu zaznamenaných řad tvořil velmi nízký počet chodců.

	Frekvence příchodů (chodci/min)					
	10	20	30	40	50	60
Maximální počet zaznamenaných řad	2	3	6	9	18	17
Minimální počet zaznamenaných řad	0	0	0	1	2	2
Průměrný počet zaznamenaných řad	0,26	1,06	2,45	4,76	7,93	5,72
Medián počtu zaznamenaných řad	0	1	2	5	8	4
Maximální počet chodců v jedné řadě	4	7	16	19	23	913
Průměrný počet chodců v jedné řadě	3,11	3,37	3,51	4,25	5,08	117,98
Medián počtu chodců v jedné řadě	3	3	3	4	4	6

Tabulka 3-1 Hodnoty popisující vlastnosti vytvořených řad v simulacích podle frekvence příchodu



Obrázek 3-14 Znázornění poměru chodců v řadách vůči celkovému počtu chodců v simulaci, frekvence příchodu 10 - 60 chodců/min, poloměr viditelnosti $h = 150\text{cm}$, úhel viditelnosti $\alpha = 120^\circ$

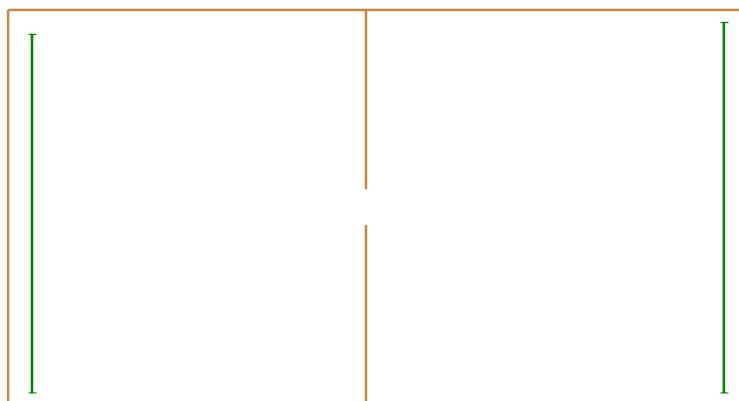
3.3 Model 3: Oscilace při obousměrném toku chodců

Následující simulační model jsem navrhl pro demonstraci chování chodců při obousměrném toku chodců úzkým průchodem (viz 2.3.3). Pro jeho konstrukci bylo využito pouze základních stavebních bloků Pedestrian Library. V simulačním modelu

byl kontrolován počet agentů tak, aby nedocházelo k situaci úplného zablokování (angl. deadlock). Další mechanismy zajišťující dosažení očekávaného efektu nebyly implementovány.

3.3.1 Popis modelu

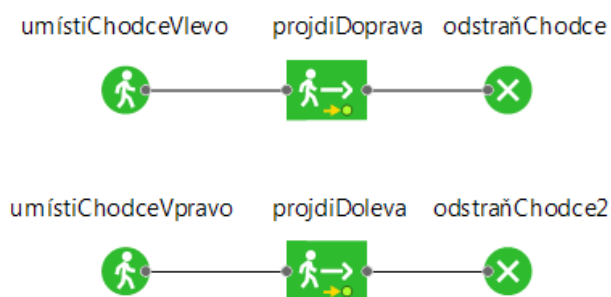
Prostředí simulačního modelu představují dvě místnosti o celkové délce 33 m a šířce 17 m, které jsou od sebe odděleny stěnou s průchodem (Obrázek 3-15).



Obrázek 3-15 Model prostředí pro simulaci oscilace směru průchodu

V simulaci jsou použity dva typy agentů chodců - směřující vlevo a směřující vpravo. Jediným rozdílem mezi těmito typy je jejich grafická reprezentace. Toto rozlišení umožňuje lepší orientaci mezi chodci proudícími chodbou v různém směru.

Chování chodců je definováno prostřednictvím základních bloků Pedestrian Library a jeho schéma je znázorněno na Obrázku 3-16.



Obrázek 3-16 Schéma chování chodců v modelu Oscilace směru průchodu při obousměrném toku chodců úzkým průchodem

Bloky `umístiChodceVlevo` a `umístiChodceVpravo` vytvářejí instance příslušného typu chodců a umísťují je do výchozí polohy v modelu (levá/pravá). Bloky `projdiDo-`

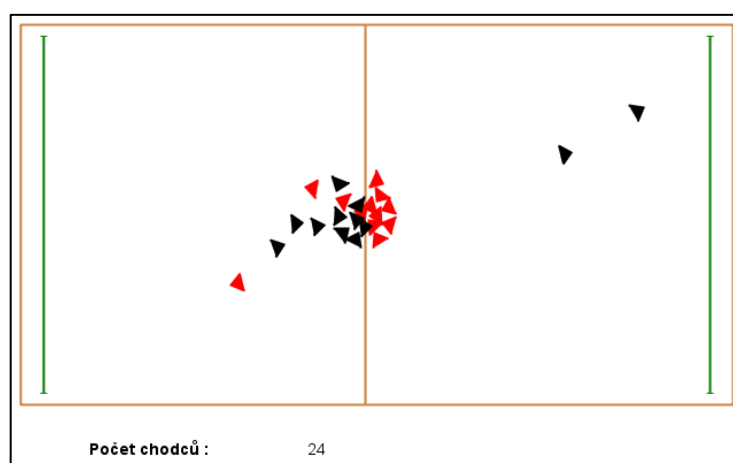
leva a projdiDoprava následně přebírají řízení nad chováním agenta a řídí jeho pohyb skrze průchod do druhé místnosti. Po dosažení odlehlého konce druhé místnosti je agent z modelu odstraněn v blocích odstraňChodce a odstraňChodce2.

Příchod chodců do modelu je kontrolován takovým způsobem, aby byl v simulaci konstantní počet chodců. Vždy, když je agent odstraněn z modelu, protože dosáhl svého cíle, nahradí jej nový agent. Současně je kontrolováno, aby oba typy agentů byly v simulaci zastoupeny rovnoměrně.

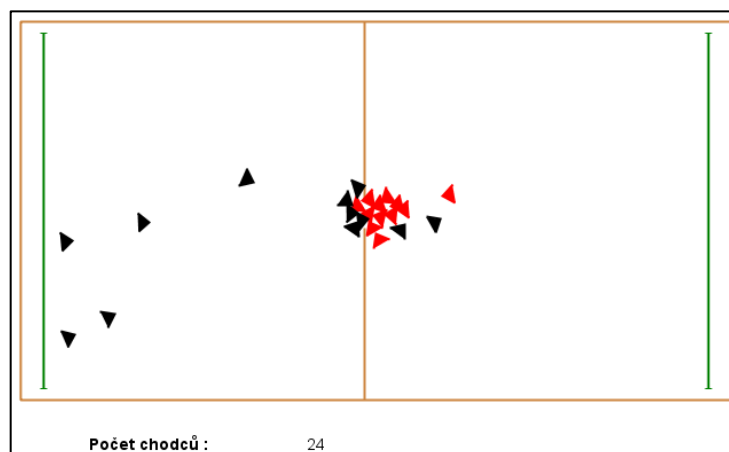
Parametry ovlivňující průběh simulace jsou celkový počet chodců v modelu (16 až 32 chodců) a šířka průchodu (1,25 m až 2 m). Počet chodců je možné měnit i v průběhu simulace.

3.3.2 Experimenty

Simulace je významně ovlivněna kombinací vstupních parametrů. Pokud je počet chodců v modelu nízký nebo je průchod příliš široký, je značně omezen počet interakcí chodců v průchodu a k viditelné oscilaci směru průchodu prakticky nedochází. Ve středních hodnotách daných parametrů dochází k opakovanému střídání stran průchodu (Obrázek 3-17 a Obrázek 3-18). Pokud se agentovi podaří projít na druhou stranu, obvykle jej následuje další agent proudící stejným směrem. Řada procházejících agentů je nakonec přerušena vlivem tlaku chodců v druhém směru.

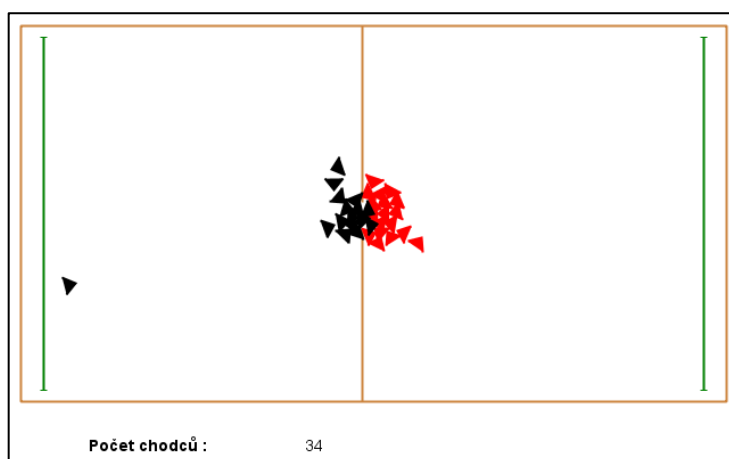


Obrázek 3-17 Simulace oscilace směru průchodu - 24 chodců, průchod 1,25 m



Obrázek 3-18 Simulace oscilace směru průchodu - 24 chodců, průchod 1,25 m

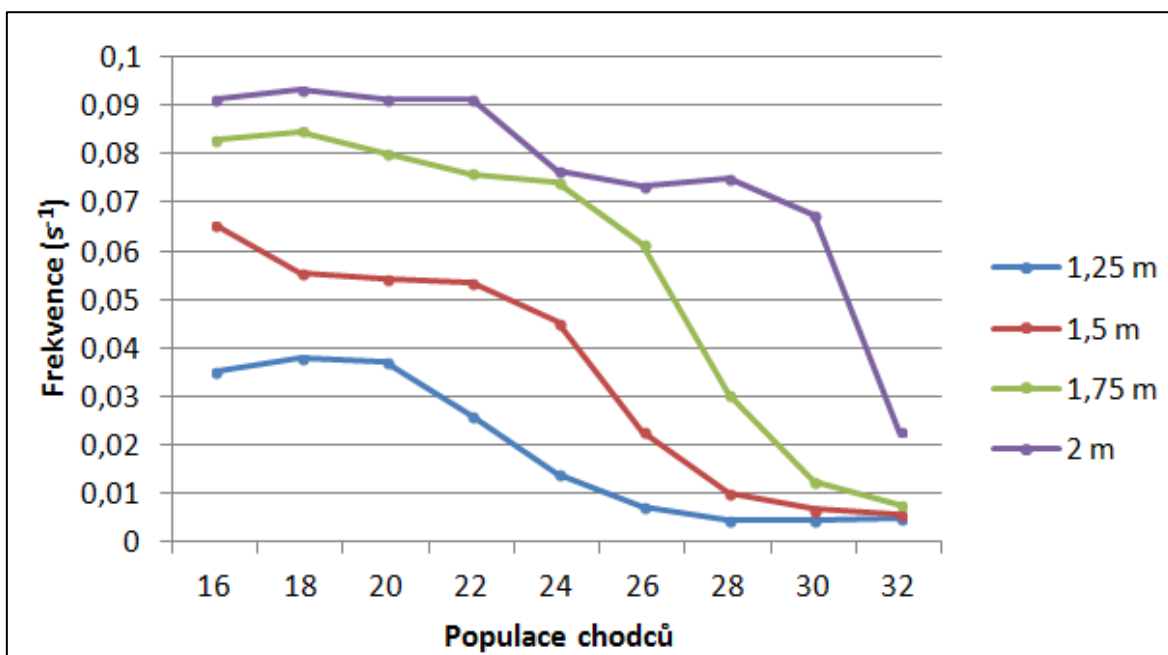
Mezi průchodem chodců na jednu a druhou stranu dochází k zablokování průchodu (angl. Deadlock) a nahromadění chodců na příslušných stranách průchodu (Obrázek 3-19). Ta skupina chodců, která čeká na průchod déle, časem vyvine dostatečný tlak a vynutí si průchod díky výhodnějšímu postavení chodců na začátku formování shluku.



Obrázek 3-19 Simulace oscilace směru průchodu, Deadlock - 34 chodců, průchod 1,25 m

Na základě délky trvání výše popsané situace zablokování průchodu byl navržen experiment sledující vývoj průměrné frekvence střídání stran průchodu v závislosti na počtu chodců v modelu a šířce průchodu. Počet agentů v modelu se v jednotlivých simulacích pohyboval mezi 16 - 32 chodci. Navýšení počtu probíhalo vždy po dvou, aby byl zachován stejný počet chodců na každé straně průchodu. Šířka průchodu nabývala v simulacích hodnot 1,25 m, 1,5 m, 1,75 m a 2 m. Pro každou kombinaci vstup-

ních parametrů bylo provedeno 100 simulací trvajících 30 minut virtuálního času. Výstupem z každé simulace byla průměrná frekvence střídání směru průchodu. Tyto hodnoty byly dále průměrovány mezi simulacemi se shodnými parametry modelu.



Graf 3-9 Vývoj frekvence změny směru průchodu za variace populace chodců a šířky průchodu

Z grafu (Graf 3-9) je patrné, že s rostoucí šířkou průchodu roste frekvence, tj. zkracuje se interval mezi změnami směru průchodu. Hodnoty frekvence menší než 0,01 naznačují velmi dlouhá trvání deadlocku. V těchto případech je pravděpodobné, že agenti nebyli v rámci časového limitu simulace schopni nastalou situaci vůbec vyřešit.

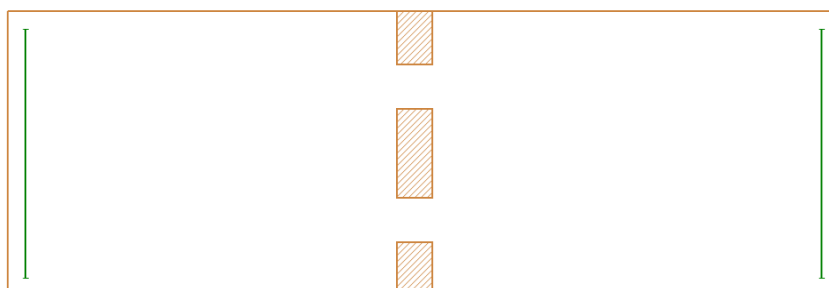
Dále je z grafu (Graf 3-9) patrné, že s rostoucím počtem chodců v modelu frekvence klesá, tj. interval mezi změnami směru průchodu se prodlužuje. Toto je důsledkem zvýšeného počtu interakcí mezi agenty.

3.4 Model 4: Využití dvou průchodů při obousměrném toku chodců

Následující simulační model jsem navrhl pro demonstraci chování chodců při obousměrném toku chodbou s dvěma průchody (viz 2.3.4). Pro jeho konstrukci bylo využito pouze základních stavebních bloků Pedestrian Library a programově nebyly implementovány žádné mechanismy ovlivňující chování chodců v modelu za účelem dosažení očekávaného efektu.

3.4.1 Popis modelu

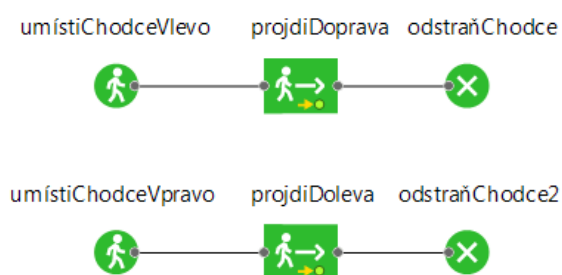
Prostředí simulačního modelu představuje chodbu o celkové délce 47 m, která je v polovině členěna přepážkou tlustou 2 m se dvěma průchody (Obrázek 3-20).



Obrázek 3-20 Prostředí simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným tokem chodců

V simulaci jsou použity dva typy agentů chodců - směřující vlevo a směřující vpravo. Jediným rozdílem mezi těmito typy je jejich grafická reprezentace. Toto rozlišení umožňuje lepší orientaci mezi chodci proudícími chodbou v různém směru. Pro zdůraznění trasy chodce, je v této simulaci přítomen mechanismus grafického znázornění trajektorie chodců. Barva trajektorie se liší v závislosti na typu chodců a její znázornění časem slábne, až zmizí.

Chování chodců je definováno prostřednictvím základních bloků Pedestrian Library a jeho schéma je znázorněno na Obrázku 3-21.



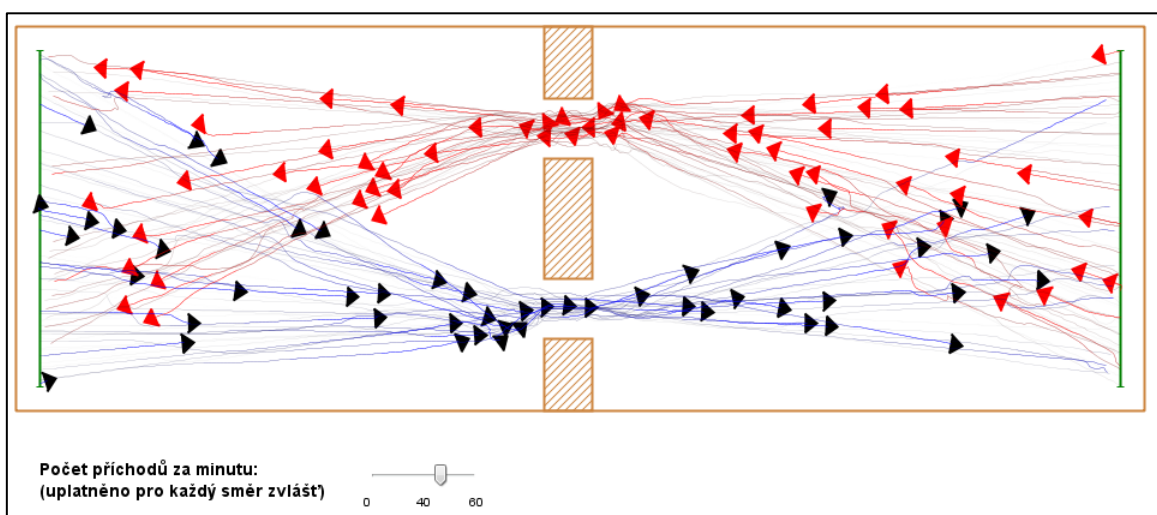
Obrázek 3-21 Schéma toku chodců v simulaci dvou průchodů v chodbě s obousměrným tokem chodců

Bloky `umístiChodceVlevo` a `umístiChodceVpravo` vytvářejí instance příslušného typu chodců a umísťují je do výchozí polohy v modelu (levá/pravá). Bloky `projdiDoleva` a `projdiDoprava` následně přebírají řízení nad chováním agenta a řídí jeho pohyb skrze průchody do druhé části chodby. Po dosažení odlehlého konce druhé místnosti je agent z modelu odstraněn v blocích `odstraňChodce` a `odstraňChodce2`.

Jediným sledovaným parametrem modelu je frekvence příchodů chodců do modelu. Tento parametr určuje množství přicházejících chodců z jedné ze stran. Na druhé straně je frekvence příchodů shodná.

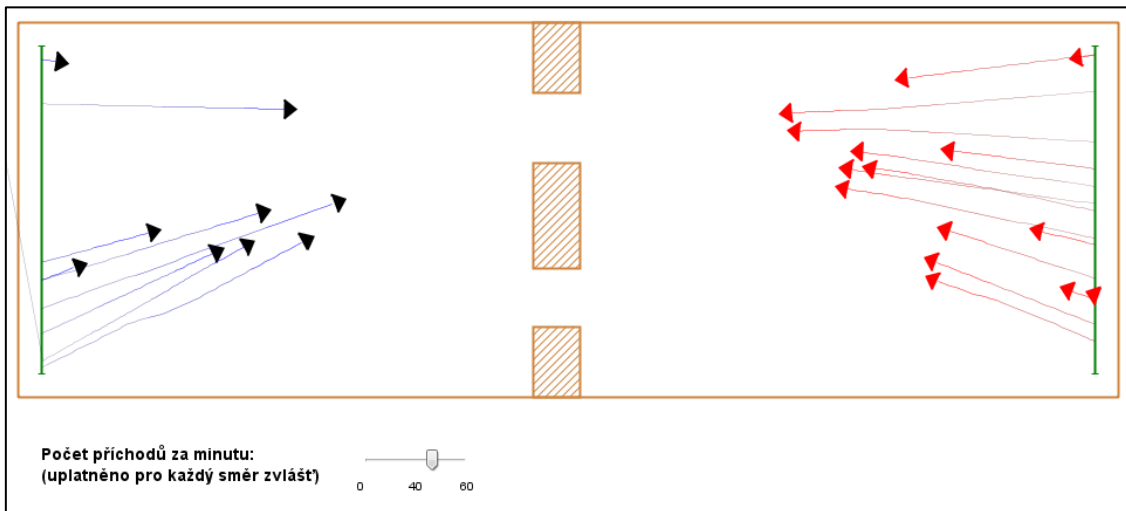
3.4.2 Experimenty

Obrázek 3-22 dokumentuje, jak se chovají chodci v simulaci, kde si vybírají cestu chodbou skrz dva průchody. Průchody jsou v tomto případě umístěné symetricky a jsou stejně široké. Využití pouze jedné z chodeb chodci proudícími stejným směrem není důsledkem vzájemných interakcí, ale výsledkem algoritmu plánování cesty. Jedná se o výchozí chování agentů řízených blokem Ped Go To z Pedestrian Library.

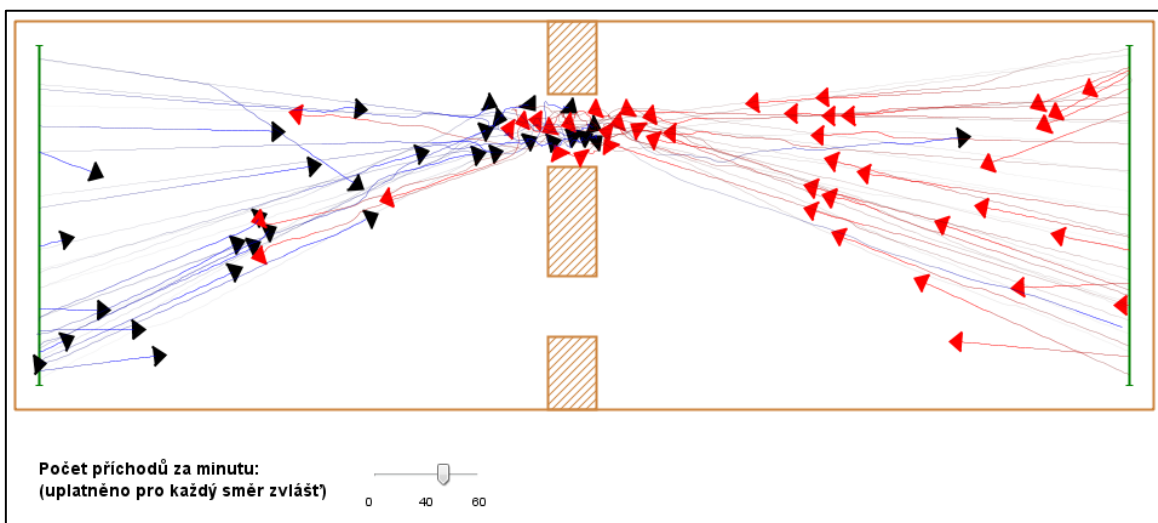


Obrázek 3-22 Simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným prouděním chodců - shodná šířka a umístění průchodů

V tomto prostředí nebyli agenti schopni interagovat reálným způsobem. Prostředí bylo upraveno rozšířením horního průchodu, šířka spodního průchodu byla zachována. V simulaci došlo ke změně chování agentů, oba dva typy agentů začaly preferovat při výběru cesty vrchní, širší průchod (Obrázek 3-23). Při střetu chodců v průchodu docházelo k vysokému počtu lokálních interakcí, což mělo za následek zpomalení toku (Obrázek 3-24).

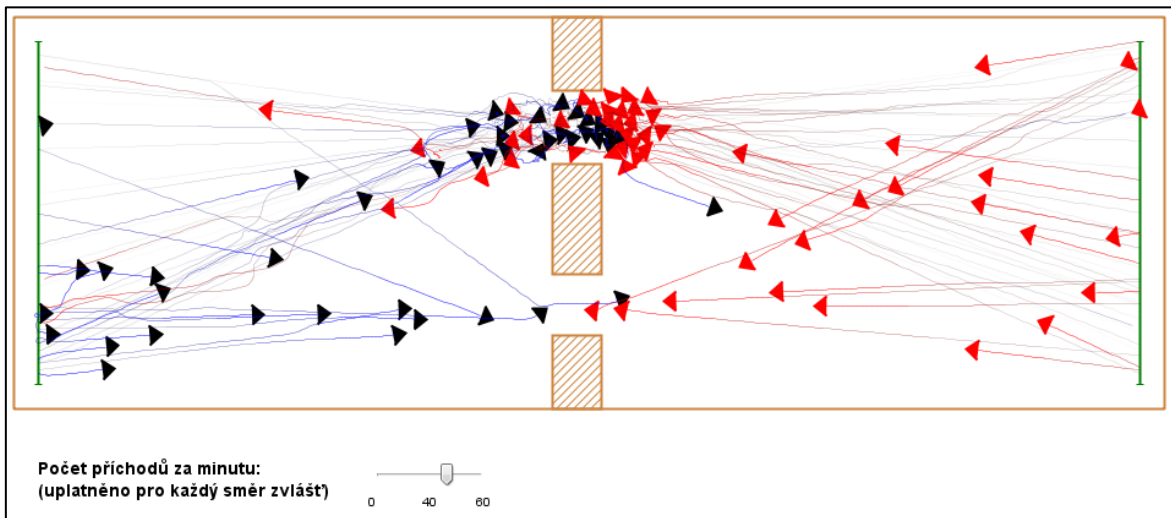


Obrázek 3-23 Simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným prouděním chodců - průchody s mírně odlišnou šířkou

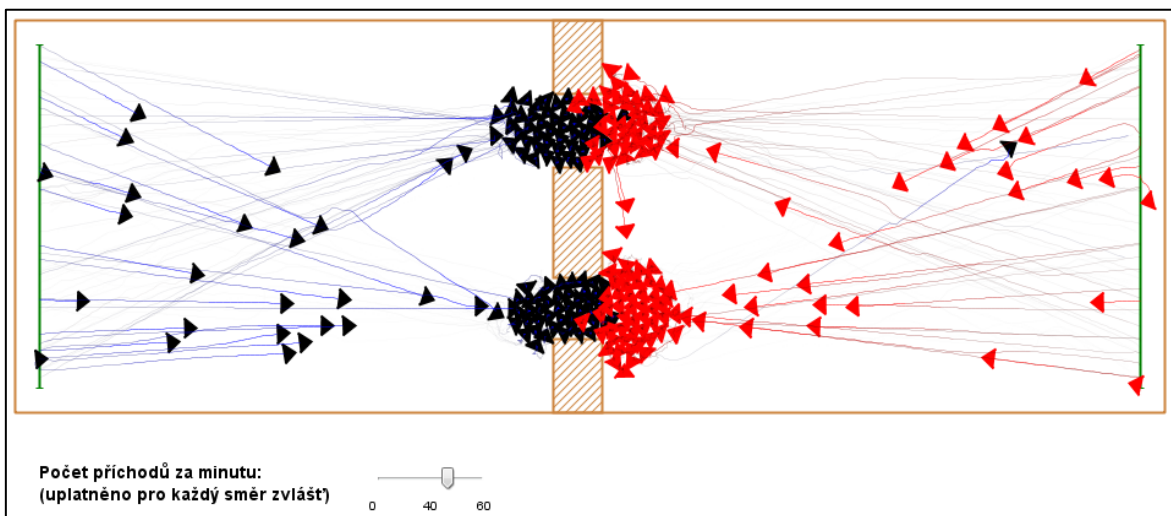


Obrázek 3-24 Simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným prouděním chodců - průchody s mírně odlišnou šířkou - zpomalení toku vlivem lokálních interakcí

Když v horním průchodu docházelo k formování deadlocku, přestali nově příchozí chodci tento průchod preferovat ve prospěch druhého, užšího průchodu. Chodci čekající před zablokovaným průchodem prozatím nereagovali změnou trajektorie skrz druhý průchod (Obrázek 3-25). Změna preference chodců rychle vyústila ve zformování deadlocku i ve druhém průchodu (Obrázek 3-26). Při vysoké hustotě chodců v obou průchodech dochází k výjimečným přesunům malých skupinek chodců mezi vzniklými shluky (Obrázek 3-26).



Obrázek 3-25 Simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným prouděním chodců - průchody s mírně odlišnou šířkou - změna preference ve volbě průchodu vlivem zablokování jednoho z průchodů



Obrázek 3-26 Simulace dvou průchodů v chodbě s obousměrným prouděním chodců - průchody s mírně odlišnou šířkou - deadlock

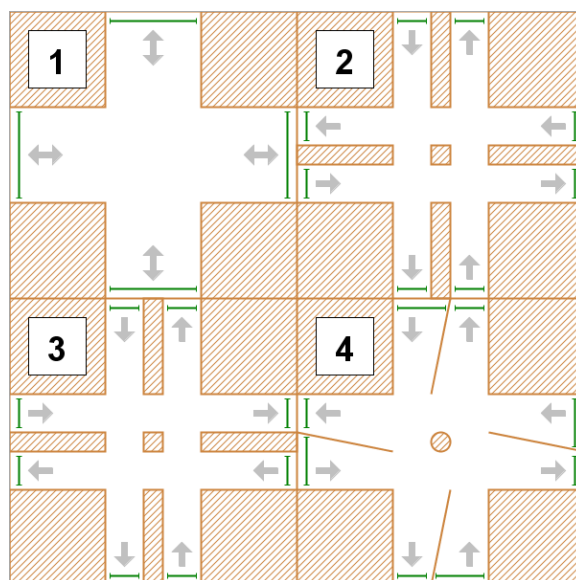
V této simulaci přítomnost druhého průchodu nijak neovlivňuje problém protichůdných toků chodců. Důvodem je nedostatečné zohlednění charakteristik reálného toku při řízení pohybu chodců blokem Ped Go To z Pedestrian Library. Chodci v modelu velmi neochotně mění již naplánovanou trasu a samotné plánování trasy vychází ze statické situace v momentě umístění agenta do modelu.

3.5 Model 5: Průchod křižovatkou

Následující simulační model jsem navrhl pro demonstraci pohybu chodců v křižovatce. Zároveň se zkoumá vliv navrhované organizace toku chodců (viz 2.3.5) na průchodnost křižovatkou. Pro jeho konstrukci bylo využito pouze základních stavebních bloků Pedestrian Library. V ideálním případě by každé ze čtyř modelovaných křižovatek příslušel jeden vývojový diagram toku chodců. Kvůli omezením plynoucích z licenčních podmínek AnyLogicu byly vývojové diagramy jednotlivých křižovatek sloučeny do jednoho, což snižuje jeho čitelnost. Ve vybraných křižovatkách bylo chování chodců dále programově upraveno za účelem dosažení očekávaného chování, tj. obcházení překážky ve středu křižovatkou zprava.

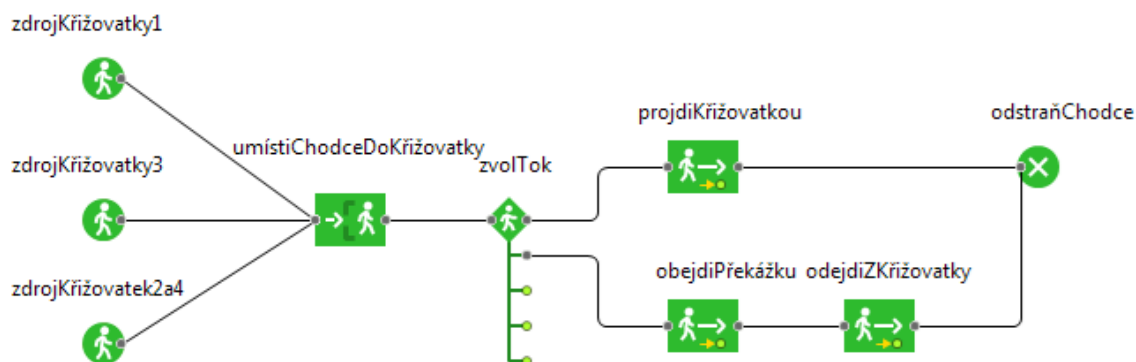
3.5.1 Popis modelu

Prostředí simulačního modelu představuje čtyři křižovatky s pravoúhlým křížením (Obrázek 3-27). Centrální prostor křižovatkou má rozměry 15m x 15m.



Obrázek 3-27 Prostředí simulace chování chodců na křižovatce

V simulaci je použit jeden typ agenta chodce. Jeho chování je definováno prostřednictvím základních bloků Pedestrian Library a jeho schéma je znázorněno na Obrázku 3-28.



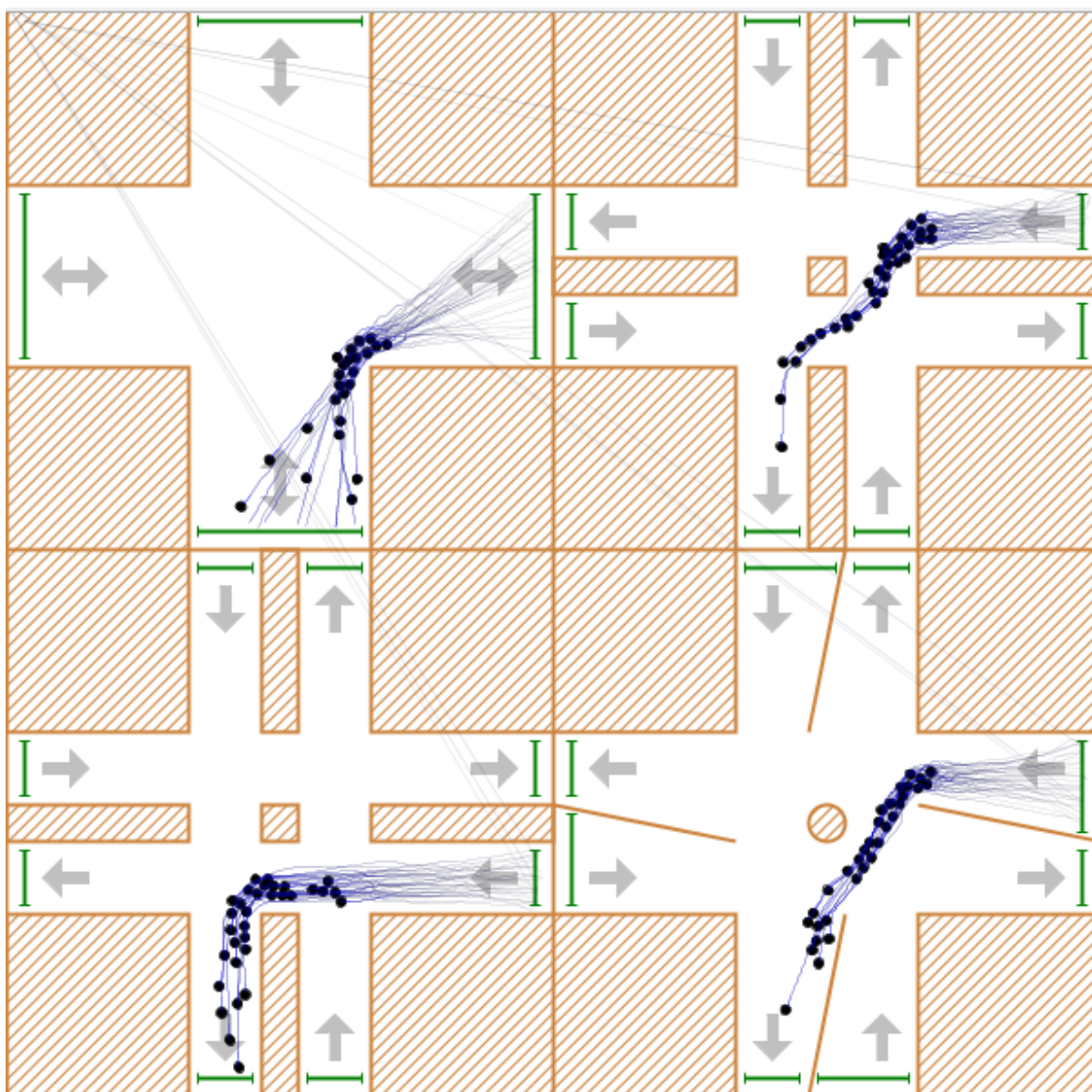
Obrázek 3-28 Schéma chování toku chodců v simulaci chování chodců v křižovatce

Bloky zdrojKřižovatky1, zdrojKřižovatky3 a zdrojKřižovatek2a4 vytvářejí instance chodců a inicializují je pro konkrétní křižovatku. Block umístiChodceDoKřižovatky umísťuje chodce do výchozí polohy v modelu, tedy do správného místa ve správné křižovatce. Dále se schéma chování větví v bloku zvolTok. Chodcům na křižovatkách 1 a 3 převezme řízení blok projdiKřižovatkou, který řídí celý jejich pohyb skrze křižovatkou. Chodcům na křižovatkách 2 a 4 přebírá řízení nejdříve blok obejdiPřekážku, který řídí obcházení překážky uprostřed křižovatky, a poté blok odejdiZKřižovatky, který řídí jejich pohyb pryč z modelu. Po dosažení svého cíle je agent z modelu odstraněn v bloku odstraňChodce.

Návrh křižovatek 2 a 4 předpokládá specifické chování chodců při obcházení překážky uprostřed křižovatky. Plánování cesty v rámci bloku Ped Go To z Pedestrian Library je ale ovlivněno zejména délkou cesty k cíli. Jak je patrné z Obrázku 3-29, chodci na druhé a čtvrté křižovatce neobcházejí středovou překážku zprava, jak návrh těchto křižovatek předpokládá. Z tohoto důvodu bylo schéma toku chodců rozšířeno o blok obejdiPřekážku. Tento blok vede chodce kolem překážky v očekávaném směru po cestě vytyčené elementem Pathway z Pedestrian Library.

Chodci v modelu vcházejí do křižovatek ze všech čtyř směrů a směr příchodu je určen náhodou. Chodec, který přichází na křižovatku, se může vydat libovolným směrem s výjimkou směru, ze kterého přišel. Výběr směru opouštění křižovatky je také řízen náhodou a všechny možné směry mají stejnou pravděpodobnost. Chodec přicházející na křižovatku 1 je duplikován do ostatních křižovatek se stejným výchozím

směrem a cílem cesty, takže jsou všechny křižovatky v simulaci zatíženy stejným to- kem chodců.



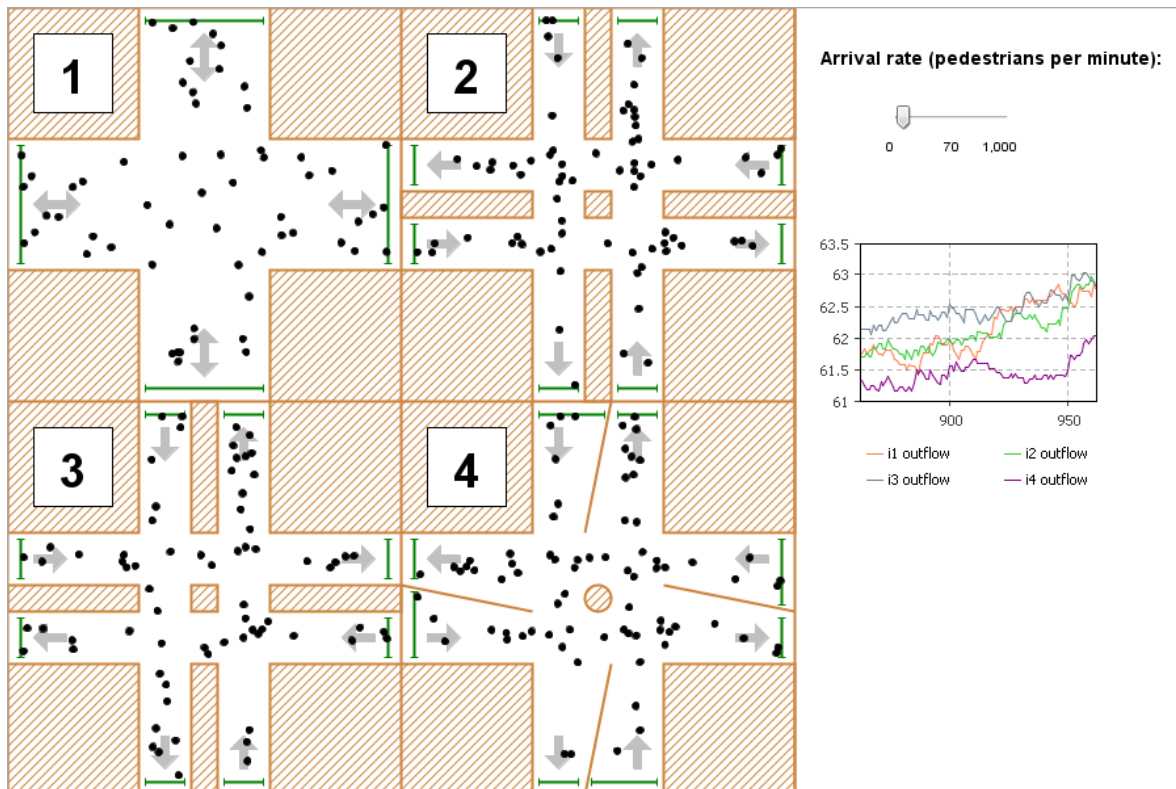
Obrázek 3-29 Chování chodců v křižovatkách bez specifikace chování při obcházení překážky

Jediným sledovaným parametrem modelu je frekvence příchodů v rozmezí 50 až 240 příchodů za minutu. Technicky se tento parametr vztahuje pouze na první křižovatku, ale jak už bylo zmíněno, příchozí chodec na křižovatku 1 je duplikován i do ostatních křižovatek. Frekvence příchodů se vztahuje na celkový počet příchozích do křižovatky ze všech směrů najednou a lze ji měnit i v průběhu simulace.

Vlastnosti toku v křižovatce jsou posuzovány na základě průměrné doby průchodu křižovatkou. Během simulace je také možné sledovat vývoj toku (počet chodců, kteří opustí křižovatku za 1 minutu).

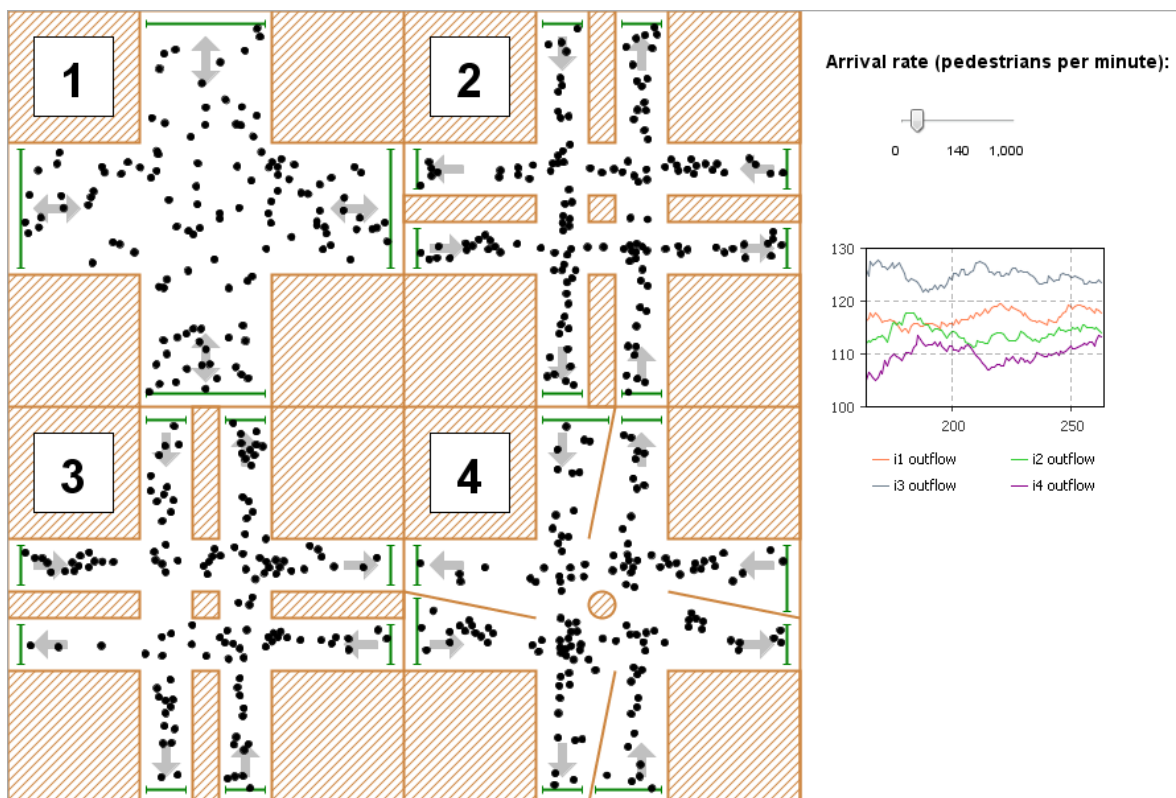
3.5.2 Experimenty

V případě nízké frekvence příchodů chodců do modelu (~ 70 chodců za minutu) fungují všechny křižovatky bezproblémově. Obrázek 3-30 ilustruje, že se v žádné křižovatce netvoří nežádoucí shluky chodců. Tok ve všech křižovatkách je plynulý a srovnatelný.



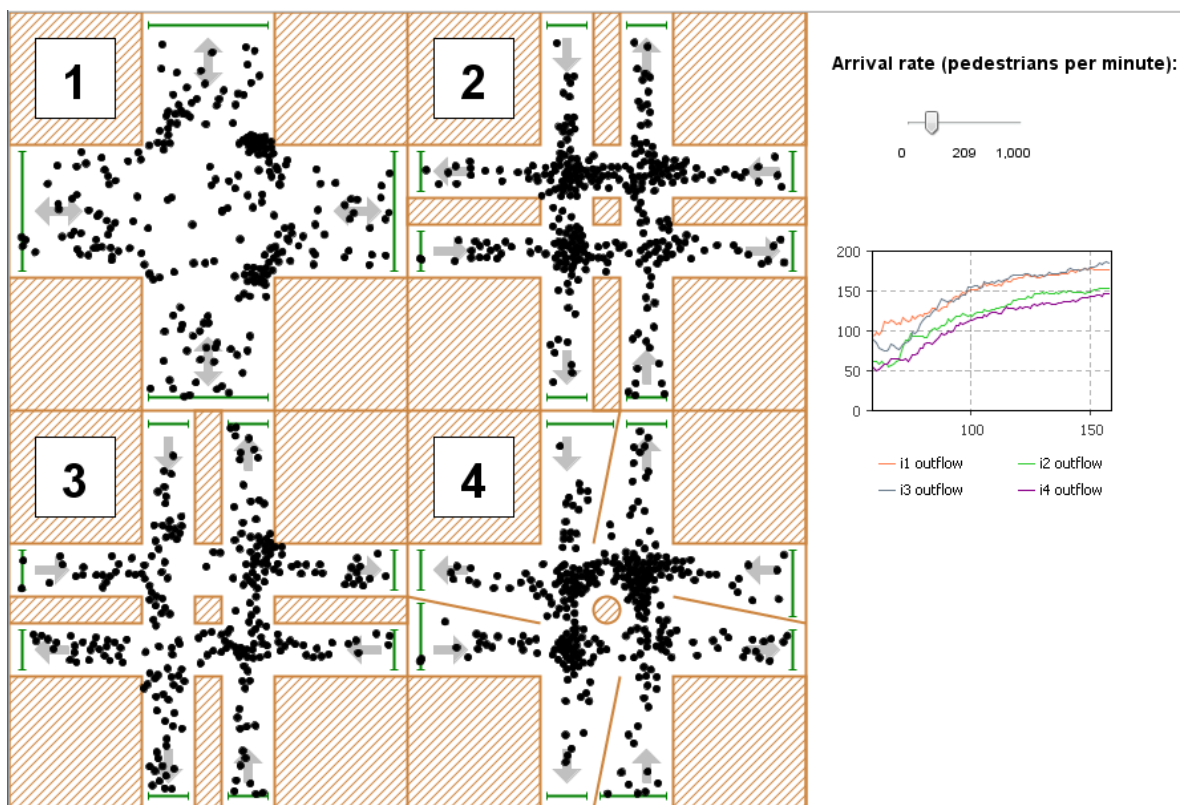
Obrázek 3-30 Simulace chování chodců v křižovatce - 70 příchodů za minutu

Při středních hodnotách frekvence příchodu (~ 140 chodců za minutu) můžeme pozorovat vyšší hustotu chodců v křižovatkách (Obrázek 3-31). K lokálním interakcím dochází častěji a zejména v křižovatkách 2 a 4 můžeme pozorovat dočasné shluky chodců v místech, kde dochází ke křížení různých proudů chodců. Tok je stále plynulý a konflikty ve křížení toků jsou vyřešeny rychle. Hodnoty toku pro jednotlivé křižovatky se od sebe více vzdalují. Nejlepších výsledků dosahuje v těchto úrovních frekvence příchodu navzdory očekáváním křižovatka 3. V křižovatce 1 můžeme pozorovat vzájemné vyhýbání chodců ve zvýšené míře. Některé výsledné trajektorie vypadají chaoticky. Přesto jsou výsledky křižovatky 1 jak z hlediska toku, tak z hlediska průměrné doby průchodu lepší než v případě křižovatek 2 a 4.



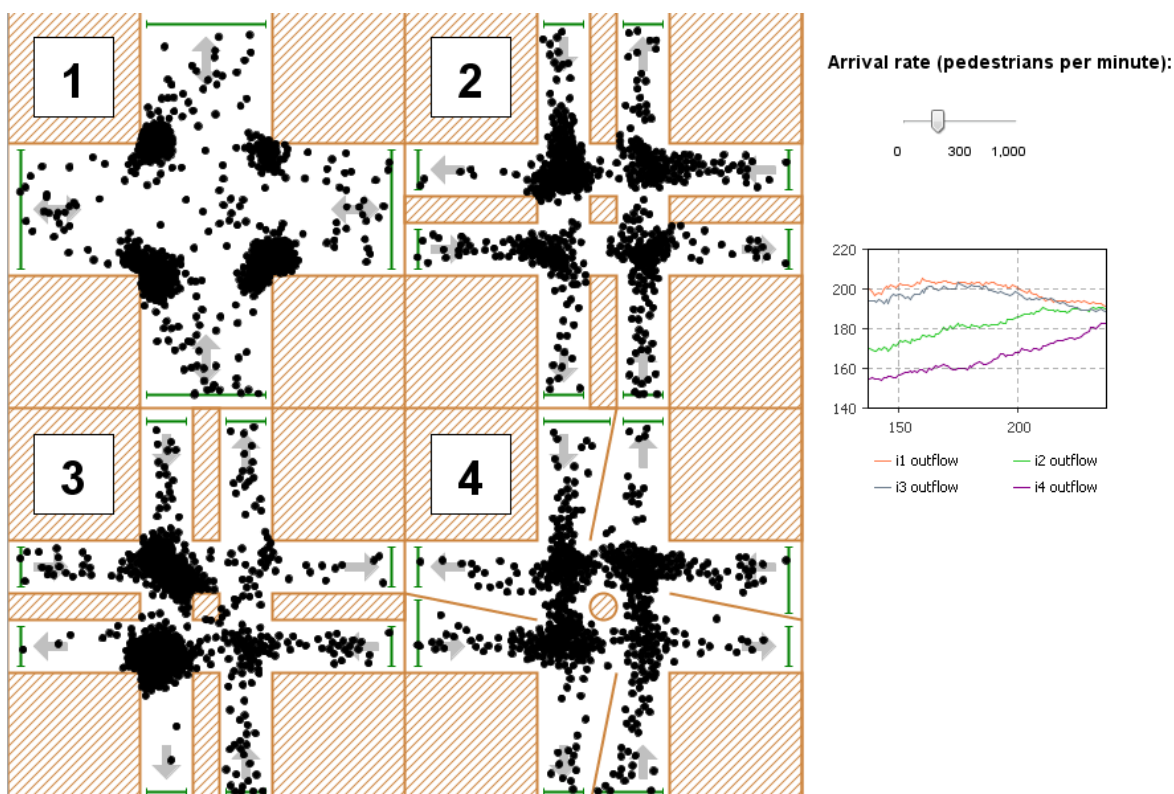
Obrázek 3-31 Simulace chování chodců v křižovatce - 140 příchoďů za minutu

Při vyšších hodnotách frekvence příchoďů chodců do modelu (~ 210 chodců za minutu) se situace na křižovatce mění. Hustota chodců stále roste, což má za následek vysoký počet lokálních interakcí a zvýšené formování shluků. Chodci na křižovatce 1 tvoří shluky chodců hlavně v rozích křižovatky, kde se přímo střetávají dva protichůdné toky chodců. V místech střetu dvou toků chodců v křižovatkách 2 a 4 trvá rozpuštění shluku déle než v nižších hustotách chodců. Tok v těchto křižovatkách je významně zpomalen vlivem vysoké hustoty chodců, ale nedochází k přímým střetům protichůdných toků a chodci stále opouštějí křižovatku dostatečně rychle, takže nedochází k úplnému zablokování. Při těchto hustotách je možné v simulaci pozorovat shluky chodců tvořící se v křižovatce 3. Stále ale nejsou tak výrazné jako v ostatních křižovatkách a nemají tak významný vliv na výsledný tok.



Obrázek 3-32 Simulace chování chodců v křižovatce - 209 příchoďů za minutu

Pro ještě vyšší hodnoty frekvence příchodu chodců (> 250 chodců za minutu) můžeme časem pozorovat výrazné zpomalení, až zastavení toku prakticky ve všech křižovatkách (Obrázek 3-33). V křižovatce 1 se shluky v rozích křižovatky zvětšují tak dlouho, až začnou omezovat i chodce proudící v jiných směrech. V křižovatce 3 dochází na rozdíl od ostatních křižovatek k zablokování asymetrickému. Díky tomu je křižovatka částečně propustná delší dobu. V křižovatkách 2 a 4 dochází k symetrickému zvyšování hustoty chodců v křižovatce. Tok chodců je po určitou dobu stále pozorovatelný ve všech směrech, ale příval nově příchozích chodců křižovatkou zahltlí, tok výrazně zpomalí a nakonec jej zcela zastaví. Křižovatka 1 dosahuje z hlediska hodnot toku nejlepších výsledků, protože chodci mají na realizaci svého přesunu nejvíce prostoru. Ačkoliv tedy dochází k zastavení dílčích toků v rozích křižovatky, chodci stále mají dostatek prostoru k přímému přechodu křižovatky.



Obrázek 3-33 Simulace chování chodců v křižovatce - 300 příchoďů za minutu

Byl navržen experiment sledující průměrnou dobu průchodu křižovatkou v závislosti na frekvenci příchoďů chodců do modelu. Počty příchoďů se v jednotlivých simulacích zvyšovaly o 10 chodců za minutu v rozmezí 50 až 240 chodců za minutu. Každá simulace trvala 20 minut. Pro konkrétní hodnotu frekvence příchoďů bylo provedeno 100 opakování. Výsledkem každé simulace byla průměrná doba průchodu pro každý typ křižovatkou zvlášť.

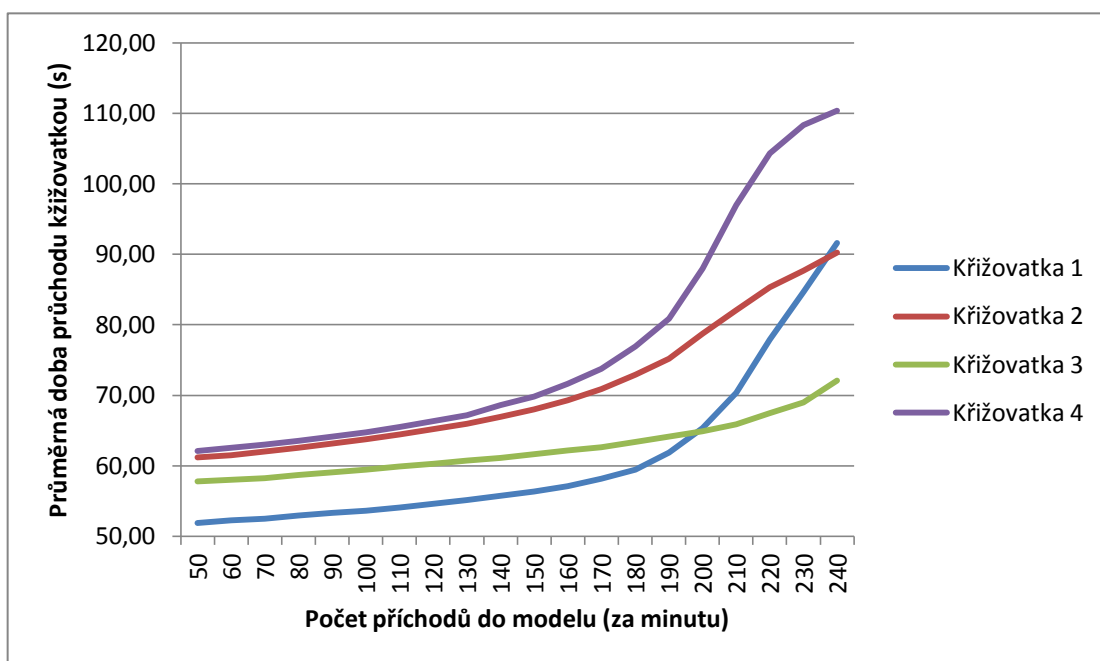
Průměrné hodnoty naměřené pro danou úroveň příchoďů do modelu a daný typ křižovatkou jsou uvedeny v Tabulce 3-2.

Počet příchodů (za minutu)	Křižovatka			
	1	2	3	4
50	51,87	61,15	57,76	62,13
60	52,22	61,49	58,03	62,56
70	52,51	62,03	58,27	63,01
80	52,94	62,53	58,68	63,55
90	53,28	63,14	59,08	64,14
100	53,61	63,74	59,46	64,75
110	54,09	64,45	59,89	65,51
120	54,57	65,20	60,28	66,31
130	55,10	65,97	60,70	67,20
140	55,74	66,96	61,12	68,60
150	56,33	68,01	61,66	69,85
160	57,12	69,26	62,17	71,61
170	58,17	70,90	62,62	73,77
180	59,45	72,93	63,36	76,93
190	61,86	75,19	64,11	80,85
200	65,38	78,76	64,93	87,99
210	70,34	82,06	65,91	97,01
220	77,95	85,34	67,49	104,33
230	84,68	87,66	69,01	108,33
240	91,63	90,24	72,10	110,37

Tabulka 3-2 Naměřené průměrné doby průchodu (s) křižovatkou dle typu křižovatky a úrovně frekvence příchodu chodců do modelu (chodců za minutu)

Na základě naměřených dat je možné konstatovat, že bez ohledu na typ křižovatky se průměrná doba průchodu křižovatkou zvyšuje s rostoucím počtem příchodů chodců do modelu. Jak je patrné z Grafu 3-10, při počtu příchodů v rozmezí 50 až 150 chodců za minutu se průměrná doba průchodu vyvíjí na všech typech křižovatek stejným způsobem. Průchod křižovatkami 1 a 3 je viditelně rychlejší, což je přímým důsledkem délky trasy, kterou musí chodci urazit.

Vlastnosti návrhu křižovatky na vývoj průměrné doby průchodu křižovatkou můžeme vyčíst z tvaru křivek na Grafu 3-10 zejména při příchodech vyšších než 150 příchodů za minutu. Doba průchodu křižovatkou 1 začala v těchto hodnotách velmi prudce stoupat a nic nenaznačuje tomu, že by se tento trend měl změnit. U křivek náležejících křižovatkám 2 a 4 můžeme pozorovat esovitě zakřivení. Prudký růst je ve vyšších hustotách zpomalen. To naznačuje, že se tok na křižovatce vyrovnává s rostoucí hustotou chodců lépe než u křižovatky 1. Průměrná doba průchodu křižovatkou 4 byla přesto i v těchto hodnotách výrazně vyšší, než u jiných křižovatek.



Graf 3-10 Vývoj průměrné doby průchodu křižovatkou v závislosti na počtu příchodů chodců do modelu

4 Výsledky

Experiment 3.1.2 ukázal, že kritické zvýšení hustoty chodců vede k zastavení toku a vytvoření kompaktní struktury chodců. Tato struktura má nízkou tendenci narůstat po stranách (do šířky) a rozrůstá se převážně směrem od zúženého místa (do délky). Chodci tvoří široký zástup, což nemusí být realistické chování.

V experimentu 3.2.2 je možné pozorovat formování řad v určitých úrovních hustoty, ale k zamrznutí přehřátím dochází poměrně brzy. Zároveň jsou řady, které agenti vytvoří, natolik úzké, že dochází k jejich narušení, aniž by se plně projevil jejich potenciál vylepšit vlastnosti toku chodců.

Chování chodců v experimentu 3.3.2 odpovídá teoretickým předpokladům (HELBING, a další, 2001). Limitujícím faktorem při pozorování oscilace směru průchodu se jeví jednak počet chodců v modelu a jednak šířka průchodu (jak naznačuje srovnání experimentů 3.3.2 a 3.4.2). Oba tyto faktory přispívají k neschopnosti agentů nastalé zablokování průchodu vyřešit.

Experiment 3.4.2 ukázal významné nedostatky algoritmu Pedestrian Library při plánování trasy. Pokud mají chodci k dispozici dva průchody, je v typických případech nežádoucí, aby všichni agenti zvolili stejný průchod. Nově příchozí chodci sice reagovali na zvýšenou hustotu v prvním průchodu změnou trasy skrze druhý průchod, ale prodleva mezi umístěním chodce do modelu a jeho příchodem k průchodu mohla mít za následek změnu situace, na kterou chodci přítomní v modelu převážně nereagovali. Nastalý deadlock v delším průchodu se ukázal problematickým, jelikož jej agenti nebyli schopni samostatnou interakcí vyřešit dříve, než příliš narostla hustota chodců kolem daného průchodu.

Výsledky simulace chování chodců při průchodu křižovatkou (experiment 3.5.2) se neshodují s teoretickými předpoklady. Dle studie (HELBING, a další, 2005) má být uspořádání proudů chodců v křižovatce 3 neefektivní. V rámci tohoto experimentu vychází doba průchodu touto křižovatkou velmi stabilní. Současně je průchod křižovatkou 3 ve vysokých hodnotách frekvence příchodu přesvědčivě nejnižší (v průměru o 18 s rychlejší průchod než skrze křižovátku 2 při frekvenci příchodu 240 chodců za minutu).

Z hlediska doby průchodu křižovatkou se zdá být pro simulaci klíčovým parametrem velikost prostoru, který mají chodci k dispozici pro vyhýbání. Organizování chodců do oddělených toků prostřednictvím předělů v chodbách a překážkou uprostřed

tento prostor výrazně omezuje. Zároveň jsou v případě křižovatek 2 a 4 agenti nuceni projít delší trasu, což je způsobeno obcházením středové překážky. Pokud tedy posuzujeme návrh křižovatky podle průměrné doby průchodu, je patrné, že organizování toků chodců prostřednictvím prostorových prvků v křižovatce nemusí být efektivní, což je zejména patrné pro málo a středně zatížené křižovatky.

Ze způsobu, jakým spolu chodci v křižovatce interagují, je jasné vidět, že oddělením toků proudících do křižovatky dochází k eliminaci střetu dvou zcela protichůdných toků. Právě ty představují pro chodce největší bezpečnostní riziko. Při pozorování chování chodců v křižovatce 4 vidíme, že vysoká hustota chodců sice vede k pomalejšímu toku, ale k vyřešení konfliktů uvnitř křižovatky je třeba kratšího času, protože trasy chodců v křižovatce mají podobný směr. Zároveň jsou chodci schopni tyto konflikty vyřešit i v omezeném prostoru.

AnyLogic deklaruje reprodukovatelnost výsledků simulace díky možnosti zvolit hodnotu seed generátoru náhodných čísel. Bylo zjištěno, že není možné reprodukovat simulace chodců, ve kterých dochází k interakcím mezi agenty. Je tedy pravděpodobné, že korekce pohybu prováděné v rámci bloku Pedestrian Library - Ped Go To využívají nezávislý generátor náhodných čísel. Každý běh simulace je tak jedinečný a experiment nelze opakovat s naprosto stejnými výsledky. Popis experimentu dokumentujícího tuto vlastnost nástroje AnyLogic je uveden jako příloha této práce (7.3).

5 Závěr

Simulační nástroj AnyLogic umožňuje prostřednictvím Pedestrian Library rychlý vývoj simulačních modelů chodců. Kontrola toku chodců a jejich umístění do modelu je při využití bloků Pedestrian Library jednoduché a přehledné. Knihovna efektivně odstiňuje uživatele od problémů spojených s návrhy algoritmů plánování cesty a vyhýbání kolizím, což je vhodné zejména pro uživatele s menší znalostí programování. Chodci řízení bloky z Pedestrian Library korektním způsobem reagují na překážky v prostředí, při zvýšené hustotě chodců snižují svoji rychlost.

Nedostatky v chování chodců je možné korigovat prostřednictvím různých mechanismů, které jsou v AnyLogicu k dispozici. Například v experimentu 3.5.2 bylo využito elementu Pathway pro řízení toku chodců. Tento element by bylo možné využít i v simulaci formování řad pro oddělení toků chodců. Využití takových mechanik ale není u komplexních simulací vždy možné nebo vyžaduje po uživateli pokročilé schopnosti v programování. Uživatel pak musí vzít na vědomí, že chování agentů nemusí vykazovat znaky samovolné organizace davu vlivem lokální interakce.

Tato práce v rámci praktické části zkoumala zejména výchozí chování agentů chodců v pohybu, jak jej definuje AnyLogic v bloku Ped Go To, který je součástí Pedestrian Library. Tato knihovna nabízí další prvky určené k modelování chování chodců, které by bylo vhodné podrobit obdobnému srovnání s reálným chováním lidí. Bloky vhodné pro takové zkoumání jsou mimo jiné Ped Group Assemble, Ped Group Change Formation a Ped Group Disassemble. Tyto bloky mají za cíl organizovat agenty do skupin pro situace, kdy to charakter simulace vyžaduje.

6 Citovaná literatura

Anylogic. 2015. [Online] Březen 2015. <http://www.anylogic.com>.

BANDINI, STEPHANIA, a další. 2007. Pedestrian and Crowd Dynamics Simulation: Testing SCA on Paradigmatic Cases of Emerging Coordination in Negative Interaction Conditions. *Parallel Computing Technologies*. 2007, stránky 360 -369.

HELBING, DIRK and MOLNÁR, PÉTER. 1995. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*. 1995, 51(5), pp. 4282-4286.

HELBING, DIRK, a další. 2005. Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions. *Transportation science*. 2005, 39(1), stránky 1-24.

HELBING, DIRK, a další. 2001. Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28(3). 2001, stránky 361 – 383.

HENEIN, COLIN MARK a WHITE, TONY. 2010. Microscopic information processing and communication in crowd dynamics. *Physica. A*. 2010, 389(21), stránky 4636 - 4653.

HOLLAND, J. H. 1995. *Hidden order: How addaptation builds complexity*. s.l. : Perseus Books, 1995.

KACHROO, PUSHKIN. 2009. *Pedestrian dynamics : mathematical theory and evacuation control*. Boca Raton : CRC Press, 2009.

KRAVARI, KALLIOPI a BASSILIADES, NICK. 2015. A Survey of Agent Platforms. *Jurnal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015, 18 (1) 11.

PFEIFER, ROLF a SCHEIER, CHRISTIAN. 1999. *Understanding Intelligence*. místo neznámé : MIT Press, 1999.

PROCHÁZKA, JAN a OLŠEVIČOVÁ, KAMILA. 2015. Monitoring Lane Formation of Pedestrians: Emergence and Entropy. *Lecture Notes in Comupter Science*. 2015, Sv. 9011, stránky 221-228.

RAILSBACK, STEVEN F. a GRIMM, VOLKER. 2012. *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. New Jersey : Princeton Univerzity Press, 2012.

RAYNOLDS, CRAIG. 1999. Steering Behaviors for Autonomous Characters. *Proceeding of the Game Developerds Conference*. 1999, stránky 763-782.

REYNOLDS, CRAIG. 1986. *Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model*. místo neznámé : Computer Graphics, 1986.

RUSSEL, STUART J. a NORVIG, PETER. 1995. *Artificial Intelligence -- A modern approach.* New Jersey : Prentice Hall, Inc.; A Simon & Schuster Company, 1995.

SEYFRIED, ARMIN a SCHADSCHNEIDER, ANDREAS. 2008. Fundamental Diagram and Validation of Crowd Models. *Lecture Notes in Computer Science.* 2008, Sv. 5191, stránky 563-566.

SHOHAM, YOAV. 1993. Agent-oriented programming. *Artificial Intelligence 60.1.* 1993, stránky 51-92.

ŠALAMON, TOMÁŠ. 2011. *Design of Agent-Based Models.* Řepín-Živonín : Tomáš Bruckner, 2011.

TEAHAN, WILLIAM JOHN. 2010. *Artificial Intelligence - Agent Behaviour I.* 2010.

TIMMERMANS, HARRY a kol. 2009. *Pedestrian behavior: models, data collection and application.* Bingley : Emerald Group Publishing, 2009.

7 Přílohy

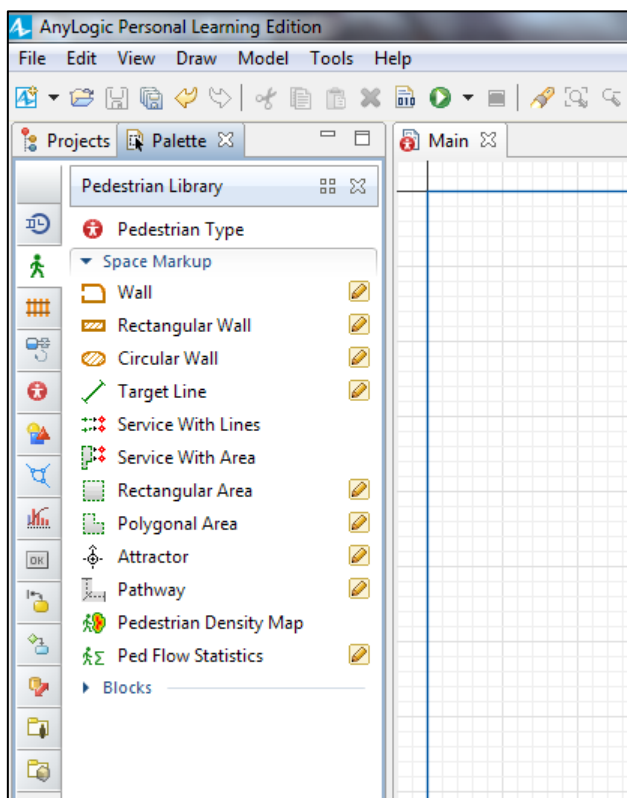
7.1 Datové CD

- Demo - AnyLogic model popsaný v 7.2
- Reprodukovatelnost - AnyLogic model popsaný v 7.3
- Zamrznutí přehřátím - AnyLogic model popsaný v 3.1
- Formování řad - AnyLogic model popsaný v 3.2
- Oscilace - AnyLogic model popsaný v 3.3
- Dva průchody - AnyLogic model popsaný v 3.4
- Křižovatka - AnyLogic model popsaný v 3.5
- Zamrznutí přehřátím - experimenty.xlsx - experimentálně získaná a zpracovaná data z experimentu 3.1.2
- Formování řad - experimenty.xlsx - experimentálně získaná a zpracovaná data z experimentu 3.2.2
- Oscilace - experimenty.xlsx - experimentálně získaná a zpracovaná data z experimentu 3.3.2
- Křižovatka - experimenty.xlsx - experimentálně získaná a zpracovaná data z experimentu 3.5.2

7.2 AnyLogic - stručný model krok za krokem

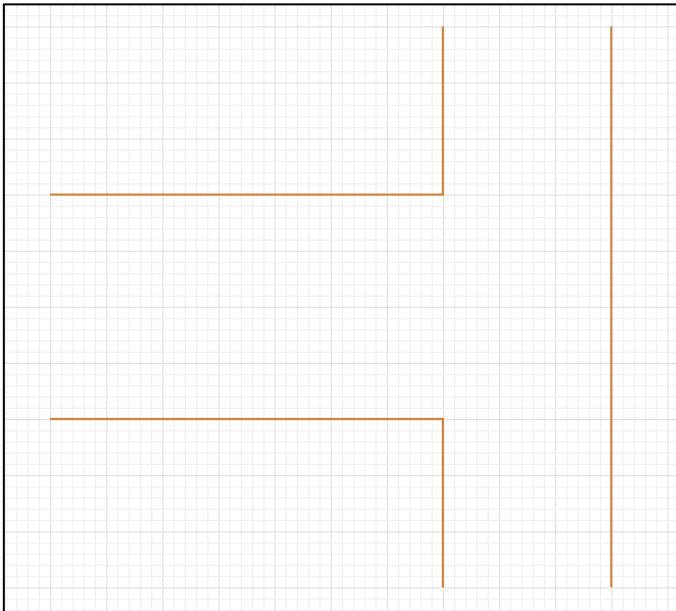
Tato část popisuje proces vytváření jednoduchého modelu chodců prostřednictvím základních bloků Pedestrian Library. Smyslem ukázky je demonstrovat chování toku chodců při jeho rozdělení do dvou směrů.

Po vytvoření nového modelu je třeba na panelu ovládacích prvků vyhledat záložku Pedestrian Library a otevřít rozbalovací nabídku *Space Markup* (Obrázek 7-1). Tato nabídka obsahuje dostupné elementy sloužící k definici prostředí.



Obrázek 7-1 Pedestrian Library - paleta prvků pro definici prostředí

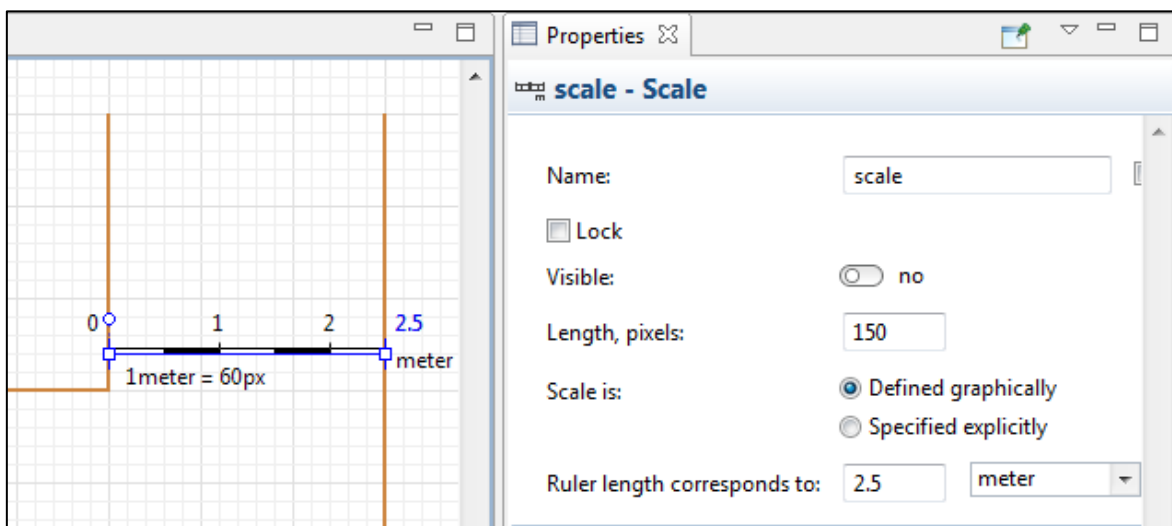
Dvojklikem na položku *Wall* (zeď) aktivujeme režim kreslení. Tento režim je dostupný pro všechny elementy, které mají na paletě ikonu tužky (Obrázek 7-1). V kreslícím režimu postupným klikáním do okna *Main* přidáváme navazující segmenty odpovídajícího elementu - v tomto případě zdi. Pro potřeby tohoto modelu načrtneme tímto způsobem jednoduchou křižovatku (Obrázek 7-2).



Obrázek 7-2 Náčrt prostředí simulačního modelu

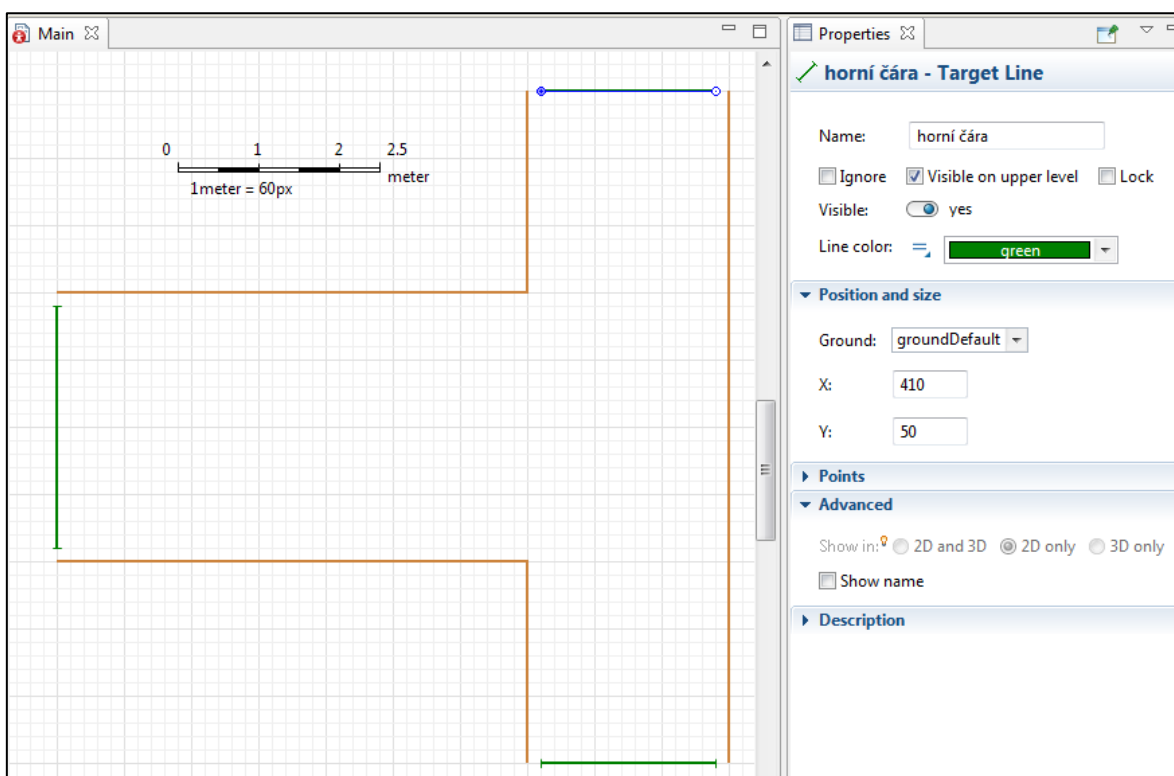
Element *Wall* je základní prvek pro definici prostředí modelu. Z pohledu chodců se jedná o statickou překážku, která omezuje možnosti jejich pohybu. Kromě šířky a tvaru zdi lze definovat i její výšku, což se projeví v případě 3-D zobrazení.

Nyní je vhodné si přizpůsobit měřítko modelu. V každé třídě AnyLogicu je přítomen element *Scale*, jehož vlastnosti lze upravovat. Nastavením tohoto elementu ve třídě *Main* určíme, že užší ramena definované křižovatky budou široká 2,5 m (Obrázek 7-3). Přepínač *Visible* určuje, zda je daný element po spuštění simulace modelu viditelný, či nikoliv. Hodnota *Visible* je u elementu *Scale* implicitně nastavena tak, aby se tento prvek v simulaci nezobrazoval. Měřítko lze nastavit také explicitním nastavením počtu pixelů na metr, pokud ale chceme měřítko vztáhnout k existující definici prostorových elementů, není tento způsob příliš vhodný.



Obrázek 7-3 AnyLogic - Definice měřítka

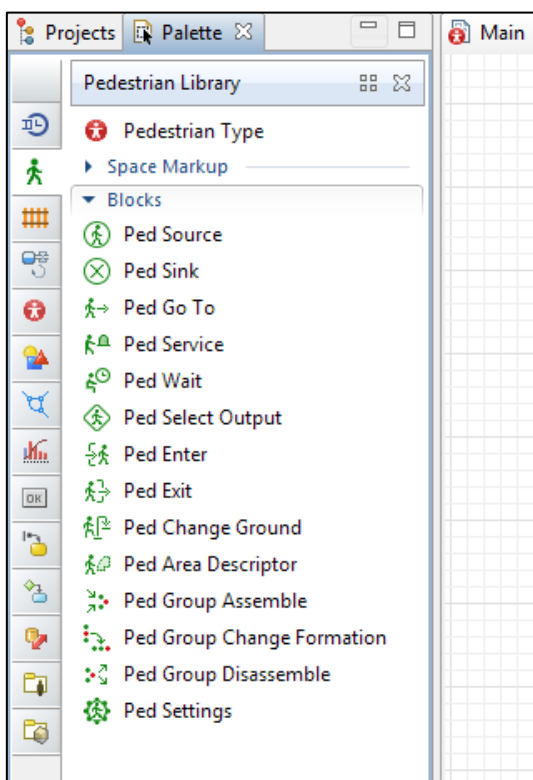
Na konec každého ramena křižovatky umístíme element Target Line (Cílová čára). Na tento element se lze odkazovat v blocích Pedestrian Library definujících chování chodců. Pro snadné rozlišení definovaných čas je vhodné si tyto elementy pojmenovat. V tomto modelu je pojmenuji *leváČára*, *horníČára* a *dolníČára* podle jejich umístění v křižovatce (Obrázek 7-4). Po přidání cílových čar je hotová definice prostředí.



Obrázek 7-4 Pedestrian Library - cílová čára Target Line

Přetažením elementu *Pedestrian Type* (Obrázek 7-1) do okna *Main* vytvoříme nový typ agenta - chodce. AnyLogic automaticky umožní nastavení základních vlastnosti tohoto agenta jako je jeho název, grafická reprezentace a datové proměnné. Po vytvoření nového agenta se vedle okna *Main* otevře i okno tohoto typu. Zde je možné přidat další proměnné, nebo změnit grafickou reprezentaci daného agenta. V tomto modelu je nový typ pojmenován *Chodec* a nemá žádné přidáné vlastnosti.

Nyní je třeba definovat chování chodců prostřednictvím vytvoření vývojového diagramu z prvků v rozbalovací nabídce *Blocks* (Obrázek 7-5).

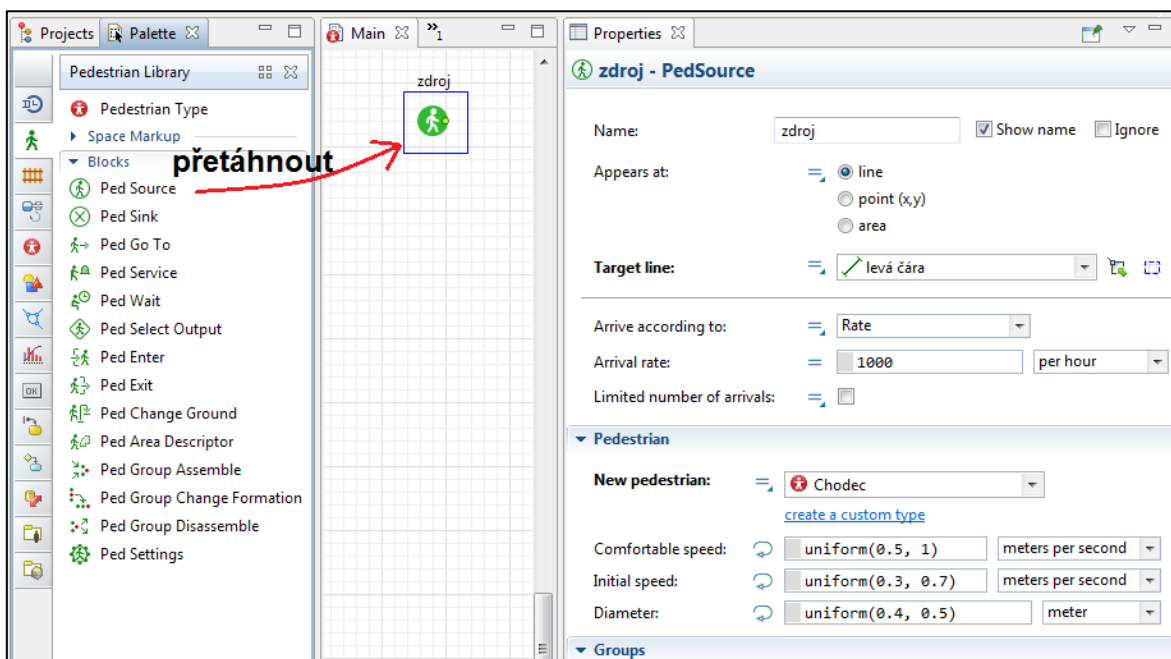


Obrázek 7-5 Pedestrian Library - paleta prvků pro definici chování chodců

Jednotlivé prvky z této nabídky lze přetahovat do okna *Main*. Při pečlivém umístování se prvky budou automaticky napojovat jeden na druhý. Pro vytvoření dodatečných propojení lze využít element *Connector*, který je přítomen na panelu nástrojů v záložce Agent.

Nejdříve je třeba vytvořit instance chodců a umístit je do modelu. K tomu slouží element *Ped Source*. Stejně jako u předchozích elementů jej přetáhneme do okna *Main* a v pravé části nastavíme jeho vlastnosti (Obrázek 7-6). Element pojmenujeme *zdroj*. Dále nastavíme, kde se mají chodci objevit. V našem případě vybereme přepínač *line*,

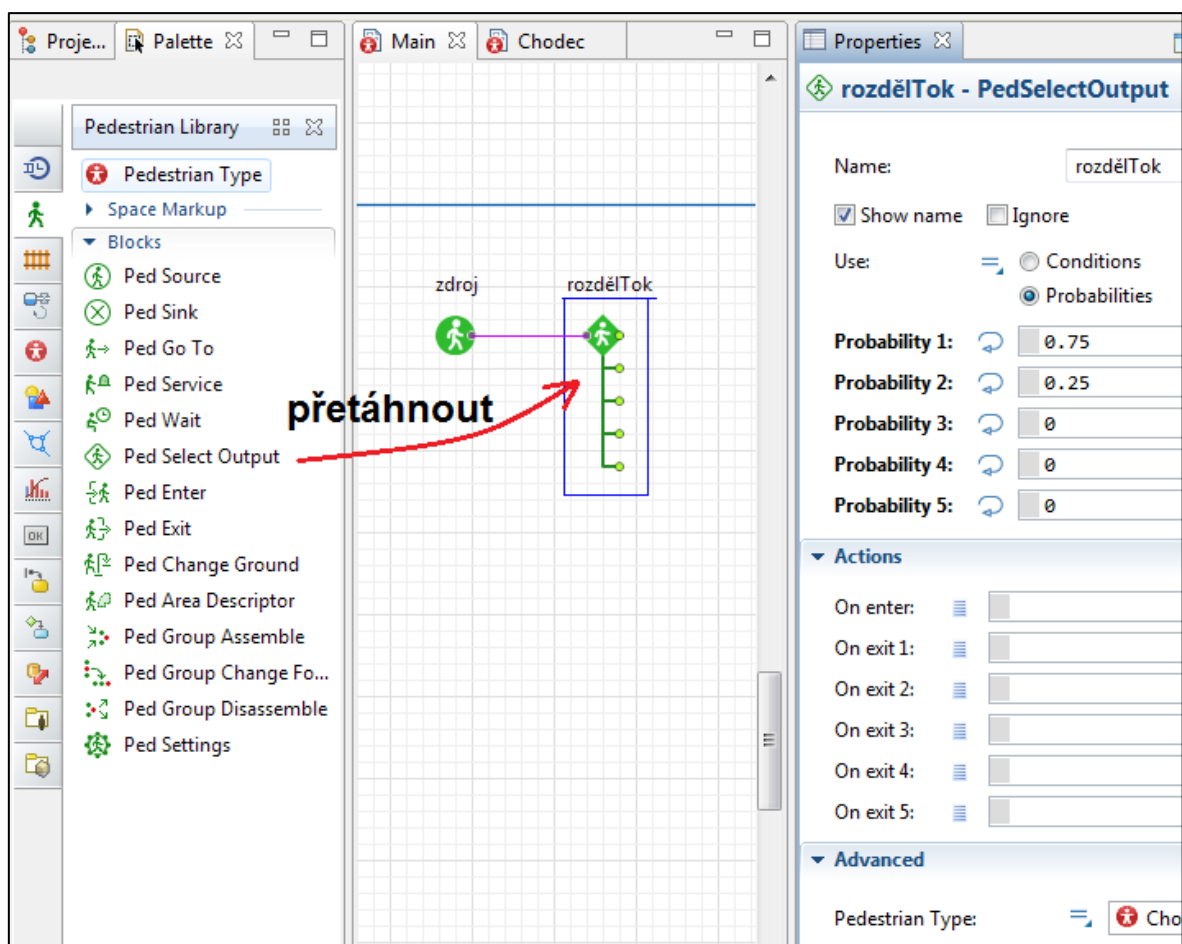
jelikož se chceme odkázat element *Target Line*, a z nabídky vybereme cílovou čáru odpovídající širší chodbě. AnyLogic umožňuje umisťovat nové instance chodců také na konkrétní bod (možnost *point*) nebo do oblasti definované elementem *Area* (možnost *area*). Příchody chodců do modelu lze řídit hned několika způsoby. Pro potřeby tohoto modelu plně vyhovují příchody dle očekávané frekvence (*Rate* - v tomto modelu 1000 chodců za hodinu). Dále je možné tyto příchody řídit na základě prodlevy mezi jednotlivými příchody, podle definovaného rozvrhu/řádu nebo na základě explicitního volání funkce *inject*. V nabídce Pedestrian nám element *Ped Source* umožňuje nastavit typ chodce (v našem případě *Chodec*) a jeho základní vlastnosti. Těmi jsou běžná rychlost (*Comfortable Speed*), výchozí rychlost (*Initial Speed*) a poloměr (*Diameter*). Ve výchozím nastavení jsou tyto hodnoty náhodná čísla rovnoměrně rozdělená na intervalech 0,5 - 1 m/s (běžná rychlost), 0,3 - 0,7 m/s (výchozí rychlost) a 0,4-0,5 (poloměr). Pro mnoho simulačních úloh včetně této není třeba tyto výchozí hodnoty měnit.



Obrázek 7-6 Pedestrian Library - Ped Source

Po umístění do prostředí se musí agent rozhodnout, jaký je cíl jeho cesty. Při výstavbě vývojového diagramu toku chodců využijeme element *Ped Select Output* (Obrázek 7-7). Opět jej přetáhneme do okna *Main* a to tak, aby se napojil na výstupní port elementu *zdroj*. Poté jej pojmenujeme *rozdělTok*. Tento element umožňuje rozdělit tok až do pěti výsledných skupin. Určení výsledné skupiny pro daného chodce mů-

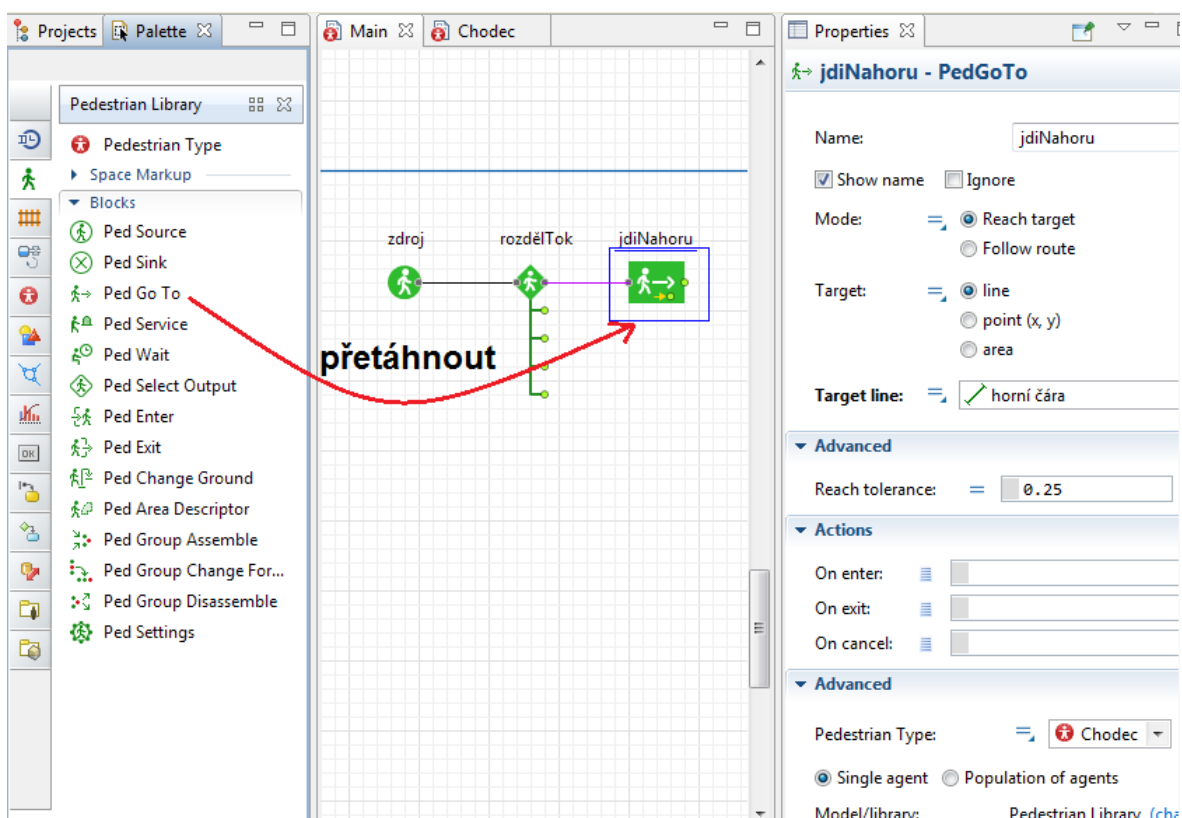
že probíhat na základě pravděpodobnosti každého z možných portů (možnost *Probabilities* - výsledný součet všech pravděpodobností musí být 1 pro korektní běh programu) nebo na základě podmínek (možnost *Conditions*). V obou případech je možné zadat pravděpodobnost, resp. podmínku explicitně nebo zavolat funkci, která příslušnou hodnotu vrátí dynamicky. My chceme tok rozdělit jen do dvou skupin, a proto nám stačí nastavit pravděpodobnosti pouze u dvou výchozích portů. Výchozí tok chodců rozdělíme v tomto příkladu v poměru 3:1 ve prospěch chodců jdoucích v křižovatce směrem nahoru (pravděpodobnost 0,75 pro první port a pravděpodobnost 0,25 pro druhý port). V záložce *Actions* je možné definovat dodatečný kód/funkci ke spuštění při vstupu nebo opouštění tohoto bloku chodcem.



Obrázek 7-7 Pedestrian Library - Ped Select Output

Nyní je potřeba přimět chodce k pohybu. K tomuto účelu slouží element *Ped Go To* z *Pedestrian Library*. Opět jej standardním způsobem přetáhneme do okna *Main* a dáme pozor, aby se napojil na první výstupní port předchozího elementu (Obrázek

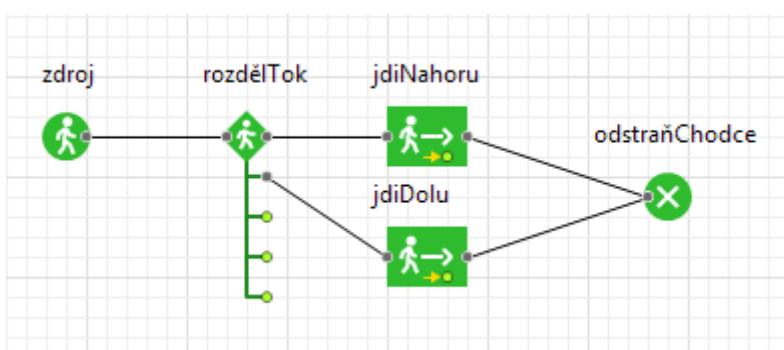
7-8). Tento element má dva režimy - dosáhni cíle (*Reach Target*) a sleduj cestu (*Follow Route*). V první variantě je možné definovat cíl jako cílovou čáru (*line*), konkrétní bod (*point*) nebo jako oblast (*area*). V případě režimu sledování cesty je potřebné, aby v prostředí byla tato cesta definovaná prostřednictvím elementu *Pathway*. V tomto příkladu jsme do prostředí umístili cílové čáry. Protože jsme element napojili na první výstupní port předchozího elementu, určíme jako cíl element, který jsme pojmenovali *horníČára*. V nabídce *Advanced* můžeme u tohoto elementu definovat toleranci k dosažení cíle v libovolných délkových jednotkách. V záložce *Actions* je opět možné umístit dodatečný kód, resp. funkci, které se zavolají při vstupu do elementu, při výstupu z elementu nebo při zrušení akce. Pro libovolného chodce aktuálně řízeného tímto elementem je možné prostřednictvím tohoto elementu programově zavolat funkci *cancel*. Chodec, pro kterého je tato funkce volána opouští tento element portem umístěným dole na grafickém znázornění elementu. V tomto příkladu nebudeme funkci *cancel* volat a proto není nutné na tento port napojit další bloky vývojového diagramu. *Ped Go To* za uživatele řeší výběr cesty i vyhýbání se kolizím s ostatními agenty.



Obrázek 7-8 Pedestrian Library - Ped Go To

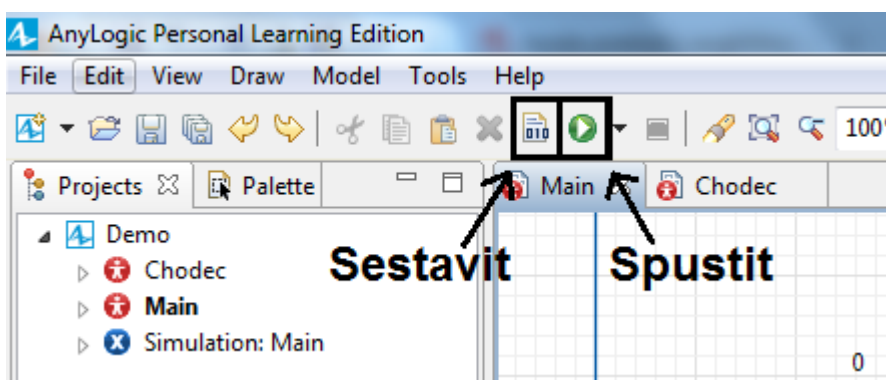
Po dosažení cíle je vhodné chodce z modelu odstranit. K tomu slouží element *Ped Sink*. Obvyklým způsobem jej napojíme na konec vývojového diagramu v okně *Main*. V tomto elementu je možné opět vykonat dodatečný kód ve chvíli příchodu agenta do bloku.

Analogicky k postupu definice prvního elementu *Ped Go To* přidáme do vývojového diagramu druhý, který napojíme na druhý výstupní port bloku *rozdělTok* a jako cílovou čáru mu nastavíme element *dolníČára*. Pro odstranění chodce z této části toku můžeme využít již existující element. Výsledný vývojový diagram je znázorněn na Obrázku 7-9.



Obrázek 7-9 Výsledný vývojový diagram toku chodců v ukázkovém příkladu

Hotový model je třeba nejdříve sestavit (angl. Build), následně je možné spustit simulaci (Obrázek 7-10).

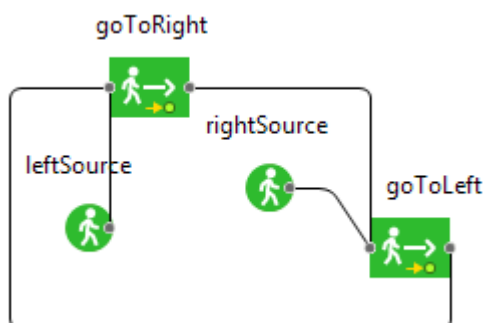


Obrázek 7-10 Anylogic - sestavení modelu a spuštění simulace

Tento návod ukazuje pouze základy návrhu modelu chodců. Do modelu lze přidat dále kupříkladu proměnné parametry modelu, ovládací prvky pro nastavení parametrů nebo bloky určené pro sběr dat jako jsou v *Pedestrian Library* elementy *Ped Flow Statistics* nebo *Pedestrian Density Map*.

7.3 AnyLogic - reprodukovatelnost výsledků

Tento experiment byl navržen pro ověření reprodukovatelnosti výsledků simulace v AnyLogicu s využitím Pedestrian Library. Konstantní počet agentů (50 chodců) se pohybuje ve smyčce ze strany na stranu. Schéma jejich toku je znázorněno na Obrázku 7-11.



Obrázek 7-11 Schéma toku chodců v experimentu ověřujícím reprodukovatelnost výsledků

Generátoru náhodných čísel byla pro danou simulaci nastavena fixní hodnota seed a délka simulace byla stanovena na konstantních 300 vteřin virtuálního času (viz Obrázek 7-12)

▼ Model time

Execution mode: Virtual time (as fast as possible)
 Real time with scale

Use calendar

Stop:

Start time: Stop time:

Start date: Stop date:

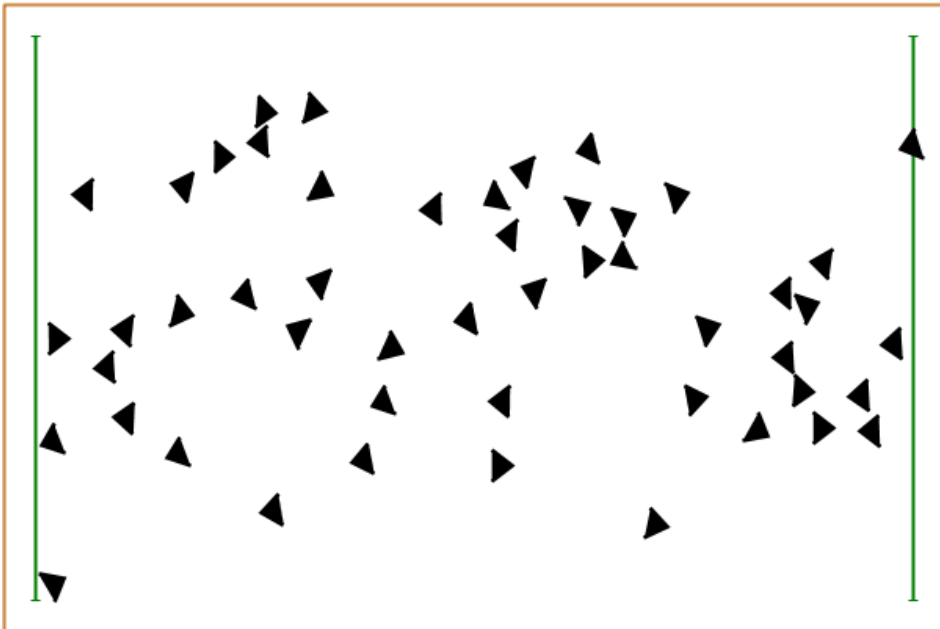
▼ Randomness

Random number generation:
 Random seed (unique simulation runs)
 Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value:
 Custom generator (subclass of Random):

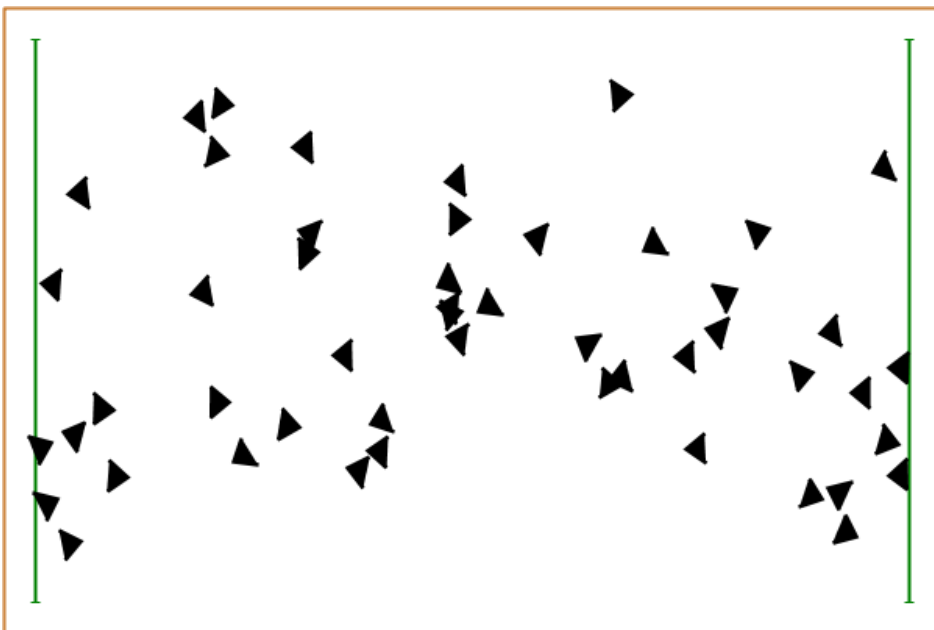
Selection mode for simultaneous events:

Obrázek 7-12 Nastavení parametrů experimentu ověřujícího reprodukovatelnost výsledků simulace

Simulace s tímto nastavením byla spuštěna dvakrát po sobě. Po jejím ukončení došlo k porovnání výsledných pozic agentů. Jak je patrné z porovnání Obrázku 7-13 a Obrázku 7-14, výsledné pozice agentů nejsou navzdory očekávání shodné. Příčinou rozdílných výsledků není počáteční umístění chodců prostřednictvím bloků leftSource a rightSource. K diferencím mezi pozicemi agentů v různých průchodech dochází až vlivem vyhýbání se ostatním chodcům. Je pravděpodobné, že bloky goToLeft a goToRight (element Ped Go To z Pedestrian Library) využívají při výpočtu korekce směru agenta při vyhýbání nezávislý generátor náhodných čísel.



Obrázek 7-13 Experiment reprodukovatelnosti simulace - 1.průběh - čas 300 s



Obrázek 7-14 Experiment reprodukovatelnosti simulace - 2.průběh - čas 300 s



UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ
Fakulta informatiky a managementu
Rokitanského 62, 500 03 Hradec Králové, tel: 493 331 111,
fax: 493 332 235

Zadání k závěrečné práci

Jméno a příjmení studenta: Jiří Linhart

Obor studia: Informační management (S)

Jméno a příjmení vedoucího práce: Kamila Olševičová

Název práce:

Agentové simulace pohybu chodců

Název práce v AJ:

Agent simulations of pedestrian behaviour

Podtitul práce:

Podtitul práce v AJ:

Cíl práce: Posouzení možností simulačního nástroje AnyLogic při pokusech realisticky simulovat chování chodců

Osnova práce:

1. Úvod
 - o Cíl
 - o Metodika
 - o Struktura práce
2. Teoretická část
 - o Multiagentové simulace
 - o Modely chodců
 - o Simulační nástroje a AnyLogic
3. Praktická část
 - o Návrh a implementace modelů chodců
 - o Experimenty
4. Shrnutí výsledků
5. Závěr

Projednáno dne: 10.10.2014

Podpis studenta

Podpis vedoucího práce