

**Univerzita Hradec Králové**  
**Fakulta informatiky a managementu**  
**Katedra informatiky a kvantitativních metod**

**Částicové systémy**

Simulace davu

Bakalářská práce

Autor: Tomáš Bulíček

Studijní obor: aplikovaná informatika

Vedoucí práce: Mgr. Jan Vaněk, Ph.D.

Hradec Králové

Duben 2015

Prohlášení:

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

V Hradci Králové dne 28.4.2015

Tomáš Bulíček

## *Poděkování*

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Mgr. Janu Vaňkovi, Ph.D. za odborné vedení a užitečné rady při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Richardu Cimlerovi za pomoc a ochotu při seznamování s nástrojem AnyLogic. Zvláštní poděkování patří mé přítelkyni, přátelům a rodině za podporu při vypracování práce i mimo něj.

*Anotace:*

Bakalářská práce se zabývá simulováním davu založeným na principu multiagentních systémů. Teoretická část je zaměřena na rekapitulaci existujících přístupů k rozhodovacím procesům agenta a řešení kolizí. V praktické části jsou zkoumána experimentální data poskytnutá Jülich Supercomputing Centre, na jejichž základě je zkoumáno chování lidí v primitivních prostředích. Výsledky zkoumání jsou dále porovnávány s výstupem simulace stejných prostředí pomocí nástroje AnyLogic.

*Klíčová slova:*

Simulace davu, dav, multiagentní systém, reálná data, AnyLogic

*Anotation:*

This bachelor thesis deals with crowd simulation based on multi-agent systems. The theoretical part is focused on listing and describing existing approaches to agent decision making and dealing with collisions. The practical part focuses on evaluating experimental data acquired from Jülich Supercomputing Centre and examining human behaviour in simple environments based on these data. The results are being compared with the output of simulation using AnyLogic software.

*Key words:*

Crowd simulation, crowd, multi-agent system, real data, AnyLogic

## Obsah:

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DAV A JEHO SIMULACE .....</b>	<b>2</b>
2.1	ZÁKLADNÍ PŘÍSTUPY K SIMULACI DAVU .....	3
2.1.1	<i>Social Forces Model</i> .....	4
2.1.2	<i>Rule Based Model</i> .....	5
2.1.3	<i>Cellular Automata Model</i> .....	5
2.1.4	<i>Částicový systém</i> .....	6
2.2	KOLIZE .....	6
2.2.1	<i>Globální plánování</i> .....	7
2.2.2	<i>Lokální plánování</i> .....	7
2.2.3	<i>Přřazení potenciálu</i> .....	8
2.2.4	<i>Prostor (x,y,t)</i> .....	9
2.3	POKROČILEJŠÍ MODELY SIMULACE DAVU.....	10
2.3.1	<i>HiDAC</i> .....	10
2.3.2	<i>PMF Server</i> .....	12
2.3.3	<i>Boids</i> .....	13
2.3.4	<i>PLEdestrans</i> .....	13
2.4	ANYLOGIC.....	14
2.4.1	<i>Využití AnyLogic pro simulaci davu</i> .....	14
<b>3</b>	<b>DATA.....</b>	<b>16</b>
3.1	EXPERIMENTY JSC .....	16
3.1.1	<i>Jednosměrný průchod chodbou</i> .....	16
3.1.2	<i>Obousměrný průchod chodbou</i> .....	17
3.1.3	<i>Křižovatka tvaru T</i> .....	18
3.1.4	<i>Průchod rohem</i> .....	18
3.1.5	<i>Stadion</i> .....	19
<b>4</b>	<b>METODIKA.....</b>	<b>20</b>
4.1	ZPRACOVÁNÍ DAT .....	20
4.1.1	<i>Vyhlazení</i> .....	20
4.1.2	<i>Podvzorkování</i> .....	21
4.1.3	<i>Featury</i> .....	22
4.1.3.1	<i>Na člověka v každé sekundě</i> .....	22
4.1.3.2	<i>Na člověka</i> .....	24
4.1.3.3	<i>Na sekundu</i> .....	24
4.1.3.4	<i>Celkové</i> .....	24
4.1.3.5	<i>Další informace</i> .....	24
4.2	EXPERIMENTY .....	24

4.2.1	Vstupní parametry .....	24
4.2.2	Způsoby generování.....	25
4.2.2.1	Experiment 1 .....	25
4.2.2.2	Experiment 2 .....	29
4.2.2.3	Experiment 3 .....	32
4.2.2.4	Experiment 4 .....	35
4.2.2.5	Experiment 5 .....	39
4.2.2.6	Zvolený způsob generování.....	42
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>43</b>
5.1	CHOVÁNÍ LIDÍ PODLE REÁLNÝCH DAT.....	43
5.1.1	Průchod jednosměrnou chodbou.....	44
5.1.1.1	Rychlost .....	44
5.1.1.2	Budoucí směr .....	49
5.1.1.3	Další silné korelace .....	51
5.1.2	Průchod obousměrnou chodbou.....	51
5.1.2.1	Rychlost .....	52
5.1.2.2	Budoucí směr .....	55
5.1.2.3	Další silné korelace .....	56
5.1.3	Křižovatka typu T.....	56
5.1.3.1	Rychlost .....	56
5.1.3.2	Budoucí směr .....	60
5.1.3.3	Další silné korelace .....	61
5.2	POROVNÁNÍ VÝSTUPU REÁLNÝCH DAT A SW ANYLOGIC .....	61
5.2.1	Průchod jednosměrnou chodbou.....	61
5.2.1.1	Porovnání featur .....	62
5.2.1.2	Porovnání korelací .....	64
5.2.2	Průchod obousměrnou chodbou.....	66
5.2.3	Křižovatka typu T.....	69
5.3	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ .....	72
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM LITERATURY.....</b>	<b>75</b>
<b>PŘÍLOHA</b>	<b>.....</b>	<b>78</b>
	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD .....	78

# 1 Úvod

Simulace davu je oblast informatiky, která je využívána v mnoha jiných oborech v širokém rozsahu aplikací od simulací rozsáhlých davových scén ve filmovém či videoherním průmyslu až po simulace evakuací ve stavebnictví či davové paniky v sociologii a bezpečnostním výzkumu. Požadavky na simulaci se liší podle oboru, pro který je tvořena. Zatímco u filmu je důraz na vizuální stránku simulace, počítačové hry vyžadují simulaci probíhající plynule a v reálném čase, a v případě evakuačních simulací jde hlavně o reálné chování agentů a vizuální stránka může být naopak naprosto zanedbatelná.

V každém z těchto případů se jedná o důraz na realismus simulace, ať už ze stránky vizuální, či s důrazem na chování agenta. Existuje několik přístupů a mnoho jednoduchých i komplexních modelů, které poskytují možnost simulace davu s určitou úrovní realistické reprezentace. S rostoucími výpočetními možnostmi a zdokonalujícími se modely se zvedá i úroveň realismu a existují modely, které jsou pomocí vhodných rozhodovacích mechanismů v kombinaci s uvážením psychiky a dalších parametrů agenta schopné reprezentovat dav velmi realisticky.

Cílem práce je zpracovat data snímaná při experimentech s reálnými lidmi v různých jednoduchých prostředích a vyhodnotit chování lidí v těchto experimentech, tj. vzájemné vztahy různých proměnných odvozených z pohybů jedince a okolního prostředí, a tyto výsledky dále porovnat s výstupem simulací provedených v nástroji AnyLogic.

Práce je rozdělena do čtyř částí. První je zaměřena na teoretické základy vztahující se k simulaci davu a na seznámení s existujícími přístupy a modely, které jsou pro simulování davu využívány. Konec této části je věnován nástroji AnyLogic. V další části jsou popsány experimenty, ze kterých jsou v práci čerpána data. Další část je věnována metodice práce, zejména zkoumaným odvozeným proměnným a výběru způsobu generování agentů v simulaci. Poslední část se zabývá vyhodnocením výsledků a porovnáním experimentálních dat s daty simulovanými.

## 2 Dav a jeho simulace

Dav je v [Le Bon, 1994] popsán obecně jako „shromáždění většího počtu libovolných lidí, bez ohledu na vlastnosti jedinců, nebo na okolnosti, které ke shromáždění vedly“. Z psychologického hlediska představuje autor pro dav jiný význam, a to, že takové shromáždění má společný cíl, a v jistém smyslu i společné myšlenky a společné city. Takový dav nazývá psychologický (organizovaný) dav a hovoří o něm jako o jediné bytosti, nikoli o seskupení bytostí.

Podobně je dav definován v [Petrusek, 1996], tedy jako seskupení osob, které spojuje prostor, v němž se nacházejí, a cíl či zájem, jenž sdílejí. Autor se zmiňuje o rozdělení davu podle R. W. Browna na

- aktivní
  - útočný (lynčující, terorizující, dav vzpoury),
  - únikový (panický, vzniká panikou),
  - získávací (např. dav lidí v obchodním domě),
  - výrazový (expresivní, vzniká při demonstracích),
- pasivní (divácké davy, posluchači).

V simulaci davu se pak často řeší dav aktivní, obvykle únikový a získávací. Není podmínkou, že v davu musí vládnout panika, evakuace může být i klidná (například dav opouštějící stadion po skončení zápasu).

K simulaci je možné přistupovat několika způsoby modelování. Podle [Banks, 1998] se simulace může dělit na spojitou, kde je čas navyšován pravidelně, a přepočítávají se změny, které v systému nastaly, a diskrétní, kde je čas navyšován při změně v systému. Další možné dělení je na stochastické (prediktivní) modelování, které využívá pravděpodobnosti nebo náhody pro určení výsledku, a deterministické modelování, kde výsledek závisí na vstupních parametrech. Pro simulaci davu je typicky používáno deterministické i stochastické spojitě modelování. Podle [Bernon et al., 2007] jsou v současnosti stále častějším přístupem používaným k simulaci davu multiagentní systémy (Multi-Agent Systems, dále MAS), kde množina agentů spolupracuje na dosažení cíle a výsledek skupinového chování je daný interakcí mezi jednotlivými agenty v simulaci. Využitím MAS lze dosáhnout pohybové simulace spolupracujících geometrických entit v geometrickém prostředí.

Multiagentní systémy podle [Uhrmacher et al., 2009] sestávají z množiny entit zvaných agenti, které v daném prostředí interagují za účelem dosažení individuálního či společného cíle. Tento



typ modelování může být kromě simulace chování davu také využit v ekonomii a sociologii, dále v dopravních simulacích nebo v tržních modelech, kde agentem myslíme zákazníka. Jednou z definic agenta je

"Agent je entita zkonstruovaná za účelem kontinuálně a do jisté míry autonomně plnit své cíle v adekvátním prostředí na základě vnímání prostřednictvím senzorů a prováděním akcí pomocí aktuátorů. Agent přitom ovlivňuje podmínky v prostředí tak, aby se přibližoval k plnění cílů."  
[Kubík, 2004]

Podobně říkají autoři [Russell et al., 1995], že agent je cokoli, o čem můžeme říci, že vnímá okolí pomocí senzorů a vykonává v něm činnost pomocí aktuátorů. Senzory lidského agenta jsou oči, uši, ostatní orgány a jeho aktuátory jsou ruce, nohy, ústa a další části těla. Softwarová implementace lidského agenta je potom agentem, který vystupuje v simulaci davu.

Specifickým případem agenta je agent racionální. V [Netrvalová, 2005] je uvedeno, že o racionálním agentovi můžeme hovořit, pokud se rozhoduje na základě svých znalostí, je schopen logické dedukce, reaguje na podněty, plánuje, je schopen analýzy prostředí a svého vlivu na něj, je schopen se učit a především všech těchto vlastností využívá pro svůj maximální užitek.

Jak uvádí [Uhrmacher et al., 2009], agenti jsou využíváni pro simulaci, ale simulace je také využívána pro agenty. Simulace pro agenty je využita například v rozhodovacích procesech agenta a predikci vlivu jeho činů na prostředí, což napomáhá výběru optimální akce. Využitím agentů pro simulaci je například simulace davu (pokud je dav uvažován jako množina jedinců a ne jako jediná entita - v takovém případě by se nejednalo o MAS), která může být využita pro predikci plynutí davu či pozorování vlivu změn parametrů a prostředí na agenty, atp.

## **2.1 Základní přístupy k simulaci davu**

K simulování davu existují podle [Pelechano et al., 2007] tři základní přístupy: Social Forces Model, který využívá vzájemného působení sil ve formě vektorů a na kterém je založeno velké množství rozšířených modelů (podrobněji v podkapitole 2.1.1); Rule-Based Model, založený na čistě reaktivních agentech reagujících dle předepsaných pravidel (viz podkapitola 2.1.2) a Cellular Automata Model, který je založen na reprezentaci prostředí jako mřížky (viz podkapitola 2.1.3). V [Pelechano et al., 2007] je zmíněno, že přes snahu přiblížit všechny přístupy k realistickému zobrazení žádný z nich neumožňuje plně realistickou simulaci v davech vysoké hustoty. Dalším ze základních přístupů je princip částicového systému popsany v [Feurtey, 2000], podrobněji viz podkapitola 2.1.4.

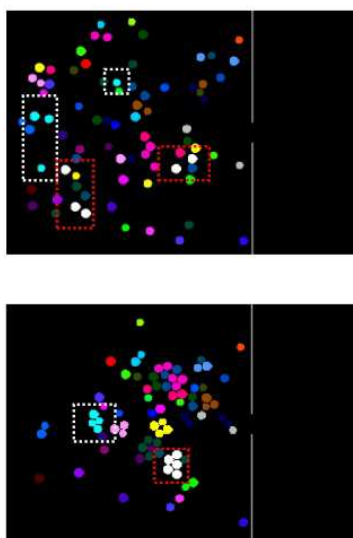
### 2.1.1 Social Forces Model

V modelu představeném v [Helbing et al., 1995] každý agent vnímá své okolí a své cíle a zájmy reprezentované pomocí sil (vektorů), které následně vyhodnocuje jako celek. Po vyhodnocení je získána množina alternativ, které jsou ohodnoceny a jejichž užitek je maximalizován, tedy je zkoumáno, která cesta k cíli je nejrychlejší a nejefektivnější. Výslednou alternativu, tedy tu s nejvyšším užitekem, agent provede, čímž se změní původní vjemy a celý proces se opakuje.

Protože se ale jedná o homogenní agenty, spíše celkový vzhled simulace spíše k pohybu částic a nikoli simulaci reálného davu. Proto se tento model často rozšiřuje různými parametry, které diferencují chování agentů. [Helbing et al., 2000] rozšiřuje svůj model o prvek paniky. Výsledný model sociálních sil tak funguje kombinací fyzických a psychologických sil, které jsou dosazeny do akcelerační rovnice.

Autoři [Braun et al., 2003] ve své práci obohacují model sociálních sil o tzv. rodiny, skupiny lidí, kteří se vzájemně znají a tedy mají tendence si pomáhat a během simulace se seskupovat (viz Obrázek 1). V jejich modelu závisí chování agenta na pěti parametrech, kterými jsou:

- Id - jednoznačný identifikátor agenta,
- IdFamily - identifikátor rodiny,
- DE - závislost agenta (jak moc potřebuje pomoc ostatních),
- AL - úroveň altruismu (jak moc je agent ochoten pomáhat, autoři počítají s nulovou úrovní altruismu mimo rodiny),
- v - rychlost, kterou se agent chce pohybovat.



Obrázek 1 - Seskupování rodin z rozděleného stavu (nahore) těsně k sobě (dole). Převzato z [Braun et al., 2003]

Extended Social Forces Model (rozšířený model sociálních sil, ESFM) je další z modelů založených na Helbingově modelu sociálních sil a byl představen v [Xi et al., 2011]. Oproti původnímu modelu přináší vylepšení, která dopomáhají realistickému vzhledu a chování simulace. Prvním vylepšením je zrušení působení sil mezi agenty, kteří jsou od sebe výrazně daleko (zatímco v původním modelu síly působí mezi každými dvěma agenty). Oblast působení agentů v ESFM je místo globální omezena na 5 m. Další vylepšení, řešené i v [Braun et al., 2003], je odstranění odpuzujících sil mezi všemi agenty. Tyto síly by neměly účinkovat mezi skupinami (přátelé, rodiny), se kterými původní model nepočítá. ESFM tedy upravuje psychologické síly mezi členy skupin. Další úpravou je omezení působení objektů, které agent nevidí. Zatímco v původním modelu ovlivňují agenta všechny objekty v simulaci, v ESFM ho ovlivňují pouze ty objekty, které jsou v jeho zorném poli, tj.  $\pm 90$  stupňů od jeho současného směru.

### **2.1.2 Rule Based Model**

Tento přístup spočívá v předepsaných pravidlech pro možné situace. V každém kroku jednotlivec vyhodnotí svůj stav a stav svého okolí a vybere a aplikuje pravidlo, které odpovídá těmto stavům. Systém založený na pravidlech se většinou skládá ze tří částí [Ireson-Paine, 1993]:

- sada pravidel
- odvozovací nástroj
- pracovní prostor

V sadě pravidel je pak uložena znalostní báze pomocí pravidel ve formě IF-THEN-ELSE. Odvozovací nástroj vybírá a aplikuje pravidla do pracovního prostoru, který interpretuje výsledky pomocí uživatelského rozhraní.

### **2.1.3 Cellular Automata Model**

Tento model, překládaný do češtiny jako model buňkových automatů, spočívá v tom, že prostředí je reprezentováno jako mřížka složená z buněk, nejčastěji čtvercových, kde každá buňka je buď obsazena, nebo je volná. Podle vjemů z okolí má každý jednotlivec určité preference, co se týče směru jeho příštího pohybu, tedy přesněji cílové buňky pro příští krok. To je řešeno tak, že je v mřížce každý jednotlivec reprezentován tzv. preferenční maticí. Nejčastěji se jedná o matici 3x3, která je buď plně vyplněná preferencemi, nebo jsou vynechány rohové hodnoty - rozlišuje se tedy von Neumannovo čtyřkolí a Moorovo osmiokolí (podrobněji viz [Deng, 2014] a Obrázek 2), může se však počítat i s většími maticemi.

Rychlost za krok může být nastavena na pohyb maximálně o jednu buňku, často se však pracuje s maximální rychlostí větší kvůli efektivitě a plynulosti pohybu. V každém kroku se paralelně provedou všechny pohyby a proces se opakuje. Ve velkých davech ale tento přístup polohou jedinců zviditelňuje pomyslnou mřížku v prostředí.

<b>X</b>	$P_{(-1, 0)}$	<b>X</b>
$P_{(0, -1)}$	$P_{(0, 0)}$	$P_{(0, 1)}$
<b>X</b>	$P_{(1, 0)}$	<b>X</b>

$P_{(-1, -1)}$	$P_{(-1, 0)}$	$P_{(-1, 1)}$
$P_{(0, -1)}$	$P_{(0, 0)}$	$P_{(0, 1)}$
$P_{(1, -1)}$	$P_{(1, 0)}$	$P_{(1, 1)}$

Obrázek 2 - Pravděpodobnostní matice von Neumannova (vlevo) a Moorova okolí (vpravo).

### 2.1.4 Částicový systém

Obvykle jsou částicové systémy užívány k animaci a modelování mraků, vody, ohně apod. Skládají se z množin fyzikálních primitiv (částic) s určitými vlastnostmi (které podléhají fyzikálním zákonům). Tento systém se však, jak je zmíněno v [Feurtey, 2000], používá i pro simulaci pohybu v davu s více než 50,000 lidmi a je vhodný pro zkoumání výskytu bodů přelidnění nebo šíření paniky. Na druhou stranu se v tomto modelu chovají lidé poměrně jednoduše - neplánují. Také není možné v tomto přístupu mluvit o heterogenních agentech - částice se převážně chovají všechny stejně, není-li do částicového systému zapojen jiný model.

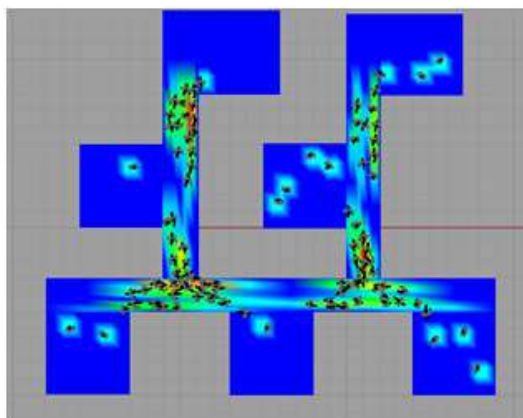
## 2.2 Kolize

Detekce kolizí a následné vyhýbání se jim hrají velkou roli hlavně v oblastech, jako jsou řízení automobilu pomocí umělé inteligence či řízení bezpečného letového provozu, kde je bezchybnost algoritmů nutností. Jsou však důležité i pro reálně vypadající a plynule běžící simulace davu. Dle [Feurtey, 2000] se detekce kolizí a vyhýbání se jim rozděluje na dva přístupy: globální plánování (viz podkapitola 2.2.1), kde je na dav nahlíženo jako na celek a plánování je prováděno globálně pro celý dav, a lokální plánování (podkapitola 2.2.2), kde se každý agent rozhoduje sám za sebe na základě jím pozorovaného prostředí. Dále je v podkapitole 2.2.3 zmíněn přístup přiřazení potenciálu (přitažlivého a odpudivého) objektům v simulaci

a podkapitola 2.2.4 popisuje prostor, který přenáší řešení kolizí na plánování cesty ve statickém prostředí pomocí předpovídání pozic překážek.

### 2.2.1 Globální plánování

Ve své práci přirovnává autor [Feurtey, 2000] dav ke kapalině, respektive říká, že jsou davu při globálním (makroskopickém) plánování připisovány vlastnosti podobné kapalině. Obvykle se v tomto přístupu počítá s vyčíslením rychlosti v závislosti na hustotě davu (čím více lidí, tím častější kolize a pomalejší pohyb). Existují přístupy, které uvažují i individuální vlastnosti agentů (věk, fyzický stav, motivace), které tuto rychlost ovlivňují a mají tak přesah tak do lokálního plánování. Jednoduchý model globálního plánování však vždy počítá s průměrnými hodnotami. V modelu [Feurtey, 2000] je rychlost na hustotě závislá lineárně dle vzorce  $U = A - B \cdot d$ , kde  $U$  je vypočítávaná rychlost,  $A$  je teoretická maximální rychlost pohybu,  $B$  je zpomalení za osobu na  $m^2$  a  $d$  je současná hustota. Tento přístup sice podle autora funguje dobře pro simulace s velkým počtem lidí, ale kvůli globálnímu přístupu je nemožné zkoumat, jak opravdu jednají jedinci. Obrázek 3 zobrazuje, jak je v takovém přístupu na dav nahlíženo v porovnání s lokálním plánováním.



Obrázek 3 - Pohled na pohyb davu globálně (jako na kapalinu - barevné plochy) a lokálně (jednotlivé osoby). Obrázek pochází z nástroje SMART Move VIZ.

### 2.2.2 Lokální plánování

S lokálním plánováním je úzce spjat pojem heterogenní agent. Zatímco u globálního plánování, kde je dav přirovnáván ke kapalině, nejsou známy vlastnosti jednotlivých entit (stejně jako u simulace proudění vody nebývá známa každá její molekula), u lokálního plánování je na vlastnosti jednotlivých agentů brán často velký ohled.

Pro lokální plánování je třeba nadefinovat vlastnosti každého agenta. Většinou jsou vlastnosti přidávány jako výsledky funkcí nebo pomocí rozdělení pravděpodobnosti. Spolu s atributy

uvedenými výše v modelu sociálních sil (identifikátory, závislost agenta na ostatních, ochota pomáhat ostatním, preferovaná rychlost) je možné u agentů definovat atributy, které jsou řešeny v modelu [Pelechano et al., 2007], v kategoriích:

- psychologie člověka
  - sklony k panice
  - samostatnost
  - netrpělivost
  - arogance
- fyzický stav člověka
  - zranění
  - pády
  - síla (průbojnost)
- zkušenost

Agent se pak liší od ostatních svými atributy, díky kterým se ve stejných situacích zachová jinak - je tedy heterogenní. Navíc takový agent, na rozdíl od částic, je schopen interakce se svým okolím, ať už negativně (prorážení davu v panice), nebo pozitivně (pomoc ostatním lidem dostat se k cíli).

U vzájemného vyhýbání se při využití lokálního plánování je těžké měřit, kdy se začít vyhýbat, aby nakonec ke kolizi nedošlo. Podle [Feurtey, 2000] z pozorování vyplývá, že se vzdálenost vyhýbání snižuje se zvyšující se hustotou davu, přesněji od 2,1m při nízké hustotě až po 1,5m v přelidněné situaci. Z pozorování také vyplývá, že když se blíží kolize, nastává jistý druh komunikace - osoby naznačují svůj záměr až do bodu, než ho obě strany uznají. Tato komunikace však může selhat - v takové situaci oba vstupují do stavu zvaného vzájemný tanec ("reciprocal dance"), ve kterém mohou několik pokusů setrvat. Otázkou je, zda jde o nežádoucí stav, či běžný stav realistické simulace.

### **2.2.3 Přiřazení potenciálu**

V [Chang et al., 2003] je popsána asi jedna z nejjednodušších metod simulace davu - přiřadit cílové destinaci přitažlivý potenciál, zatímco překážkám odpuzivý. Cestu je potom možné vypočítávat skládáním těchto sil. Mezi nedostatky tohoto přístupu však patří potřeba znalosti celé scény, všech objektů, jejich tvarů a potenciálu - jedná se tedy částečně o typ globálního

plánování. Dále může docházet k uvěznění agenta, např. v úzké chodbě. Navíc je tento algoritmus často výpočetně složitý.

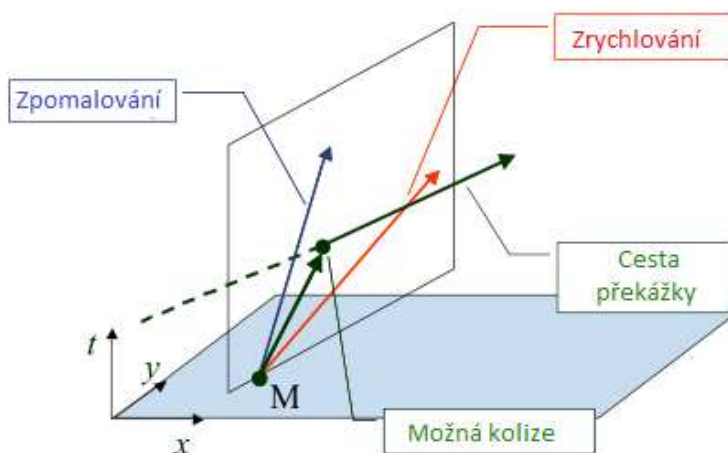
Do algoritmu se dle [Chang et al., 2003] dají vedle přitažlivých a odpuzivých přidat další síly, a to gyroskopické (gyroscopical) a brzdící (braking). Gyroskopické síly mohou být chápány jako řídicí síly vždy působící kolmo ke směru pohybu. Brzdící síly jsou přidány, protože v simulaci s velkým počtem agentů mají samotné gyroskopické síly problémy s vyhýbáním kolizím. Brzdící síla tedy říká agentům, kdy zpomalit (jsou-li příliš blízko dalšího agenta či překážky). Obě síly svým působením však připomínají spíše pohyby vozidla, než chůzi člověka.

#### 2.2.4 Prostor (x,y,t)

V [Feurtey, 2000] je představen algoritmus založený na předpovídání budoucí pozice všech viditelných překážek. Tento model využívá několika vlastností:

- každý agent je schopen naplánovat si vlastní bezpečnou cestu na základě předpovědi pozice překážek
- vyhýbání se a změna rychlosti jsou oboje započítávány
- využití (x,y,t) prostoru pro řešení vyhýbání se kolizím

V prostoru (x, y, t) je vypočítávána pozice každého objektu v každý časový úsek a tato informace je reprezentována ve 3D. Všechny objekty jsou nehybné, statické, a problém přechází na pouhé plánování cesty. V grafickém znázornění prostoru (viz Obrázek 4) je překážka zobrazena jako souřadnice možné kolize a cesta agenta jako přímka. Pokud přímka protíná překážku, agent se snaží svou přímku sklopit (projít dříve, na obrázku označeno červeně) nebo zvednout (projít později, na obrázku modře).



Obrázek 4 - Znázornění hledání cesty v (x, y, t) prostoru. Převzato z [Feurtey, 2000]

## 2.3 Pokročilejší modely simulace davu

Většina současných modelů je založená na jednom ze základních principů, který obohacuje o heterogenitu agenta, tedy přiřazuje agentům atributy, ve kterých se liší, a úpravami, které mají zlepšit průběh simulace. V této kapitole jsou popsány modely HiDAC (viz podkapitola 2.3.1), což je dvouúrovňový model se silným důrazem na psychiku agenta, PMF Server (v podkapitole 2.3.2), což je model zaměřující se na psychiku agenta hlavně po stresové stránce, využívající Yerkes-Dodsonova zákona, Boids (viz podkapitola 2.3.3), který je založen na principech fungování hejna, a PLEdestrians (v podkapitole 2.3.4), který heterogenizuje agenty a vypočítává cestu na základě minimalizace vydané biomechanické energie.

### 2.3.1 HiDAC

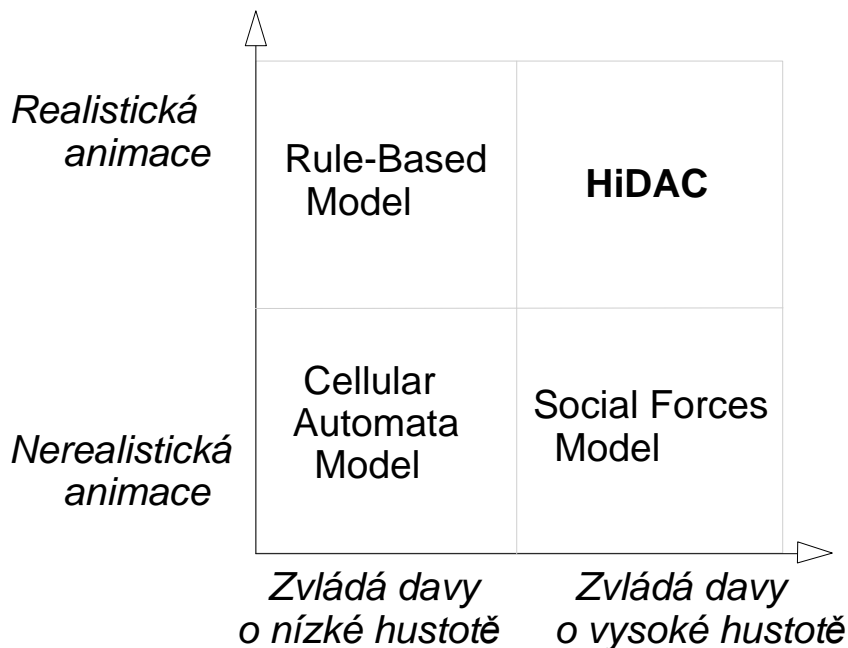
HiDAC model, jak je představen v [Pelechano et al., 2007], je schopen realisticky simulovat velké davy. Zatímco Rule Based Model vypadá realisticky pro menší davy, ale nezvládá simulovat velké, a Social Forces Model zvládá velký počet lidí, ale jeho výstup je poměrně nerealistický, nemluvě o Cellular Automata Model, který zvládá pouze malé počty a navíc ani jeho výstup příliš realistický není, HiDAC umožňuje kombinovat realistickou simulaci a velký počet lidí (viz Obrázek 5). Jedná se vlastně o vylepšený, parametrizovaný Social Forces Model. Pohyb agenta ovlivňují geometrická pravidla (vzdálenost, okolí) a psychologické vlastnosti (panika, netrpělivost), což odstraňuje nerealistické výstupy. Mimo jiné model HiDAC počítá s organizovaným chováním (stavění se do fronty, seskupování) a prodírání se davem silou a s tím spojené padání agentů, ze kterých se tak stávají překážky.

Základním principem modelu HiDAC je dvouúrovňové fungování (viz Obrázek 6), kde nižší úroveň (převážně založena na Helbingově modelu sociálních sil) má za úkol dostat agenta ze startu do cíle. Vyšší úroveň potom slouží k navigaci globálně, k řízení rozhodování a psychiky agentů a ke komunikaci mezi agenty. Model sociálních sil už sám o sobě byl schopen implementovat jevy, které vyplynuly z pozorování davu a studování jeho psychologie. Mezi tyto patří:

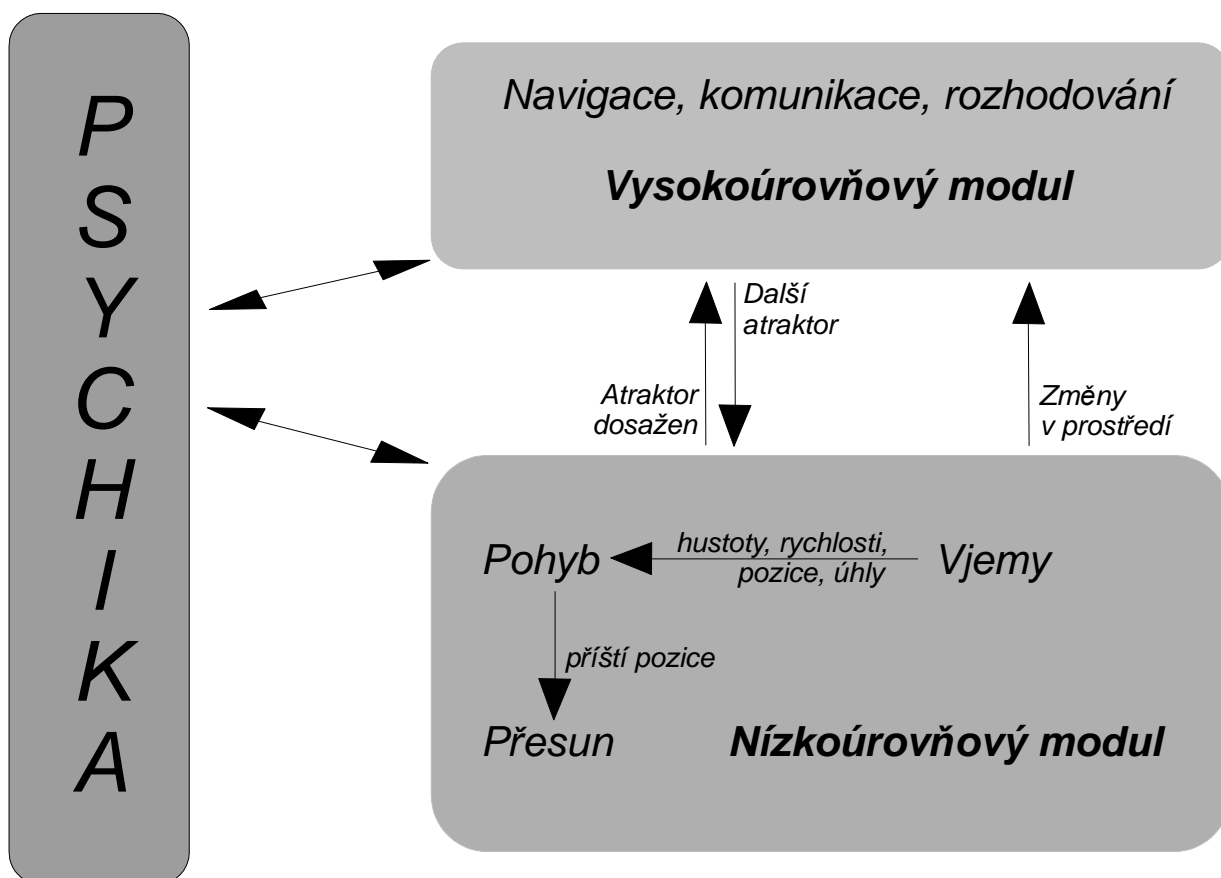
- Lidé se pohybují rychleji v krizových situacích.
- Agenti začnou mezi sebou působit fyzickou silou.
- Pravidlo zipu, kdy se střídavě lidé řadí do fronty, přestane fungovat v krizové situaci. Místo toho se děje opak (lidé panikaří, tlačí se a zpomalují si průchod).
- U východů se vytvářejí oblouky z agentů, které je ucpávají.
- S časem narůstá počet ucpaných cest.



- Lidé mají tendence chovat se kolektivně.
- Východy, které nejsou hlavními, jsou často ignorovány.



Obrázek 5 - HiDAC oproti základním přístupům. Zpracováno dle [Pelechano et al., 2007]



Obrázek 6 - Jednotlivé moduly modelu HiDAC a jejich funkce. Zpracováno dle [Pelechano et al., 2007]

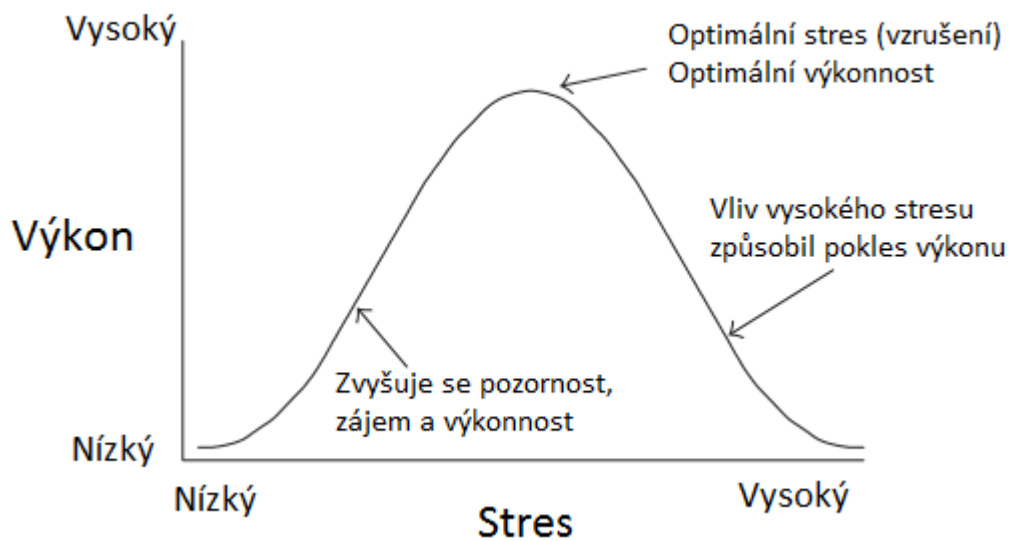
HiDAC přinesl možnost implementace dalšího chování.

- Simulace bezpečné evakuace, tj. když lidé nejsou ohroženi na životech (odchod z divadla). Toto je v modelu HiDAC řešeno tzv. influence diskem, který zkoumá oblast před agentem. Je-li zde jiný agent, který jde podobným směrem, pak se tento řadí do fronty.
- Utlumení vibrování, které v modelu sociálních sil vznikalo kvůli jeho částicové povaze.
- Agent, který upadne, se stává překážkou.
- Simulace strkání mezi agenty pomocí osobního prostoru. Agent, který má osobní prostor menší, spíše odstrčí druhého agenta.
- Implementace paniky a psychického stavu agenta.
- Změna cíle (pokud čeká dlouho, zkusí delší cestu).

### 2.3.2 PMF Server

Autoři [Pelechano et al., 2005] a [Silverman et al., 2006] zmiňují PMF Server (Performance Moderated Functions Server) jako další alternativu realistické simulace davu, která se zaměřuje na psychiku, paniku, motivaci apod. Konkrétně PMFS funguje na několika modulech, které se vzájemně ovlivňují. Tyto moduly jsou modul stresu, emocí, vnímání, moduly sociální a modul rozhodovací.

Moduly fungují na principu rezervoárů (podobně jako v počítačových hrách např. životy nebo únava), které se podle akcí agenta buď naplňují, nebo vyprazdňují. Stav rezervoárů ovlivňuje rozhodování agenta pomocí funkce, tzv. Performance Moderated Function (PMF). Nejznámější takovou funkcí je inverted-U pro stres, kterou zmiňují [Diamond et al., 2007]. Vztah je znám jako Yerkes-Dodsonův zákon a říká, že s rostoucí mírou stresu roste naše výkonnost až do určitého bodu, kdy začne s vyšším stresem naopak opět klesat (viz Obrázek 7).



Obrázek 7 - Yerkes-Dodsonův zákon v grafu. Převzato z [Diamond et al., 2007]

### 2.3.3 Boids

Tento model popisuje ve své práci [Feurtey, 2000]. Název boids vychází z podobnosti chování skupin v davu k chování hejna ryb, stáda koní nebo hejna ptáků - podobní ptákům anglicky bird-like, odtud "bird-oids" - boids. Celý model je založen na velmi primitivním zavedení lokálních pravidel, která musí dodržovat a prosazovat každý člen skupiny, což vede k velmi harmonickým výsledkům. Pravidla jsou pouze 3:

- Separace ("separation") - vyhýbání se kolizi s blízkými členy "hejna"
- Adjustace ("alignment") - snaha každého člena srovnat rychlost a směr s ostatními
- Soudržnost ("cohesion") - snaha blížít se k centru "hejna"

Boidi spolupracují a sdílejí jeden stejný cíl. V reálném davu lidí se však chování od tohoto modelu často liší, nejspíše z toho důvodu, že pouze pár chodců má stejné cíle, a protože mezi lidmi se každý snaží jednat svým vlastním způsobem, porušuje se adjustace a soudržnost. Snadno pozorovatelné je to při nízké hustotě davu, kdy má každý volnost zvolit si vlastní rychlost.

### 2.3.4 PLEdestrians

Model PLEdestrians (Principle of Least Effort, princip nejmenšího úsilí) představuje [Guy et al., 2010]. Algoritmus je určený pro simulaci velkých davů a jeho optimalizační metoda vypočítává bezkolizní trajektorie, zatímco minimalizuje množství úsilí pro každého agenta. Přístup je

schopen simulovat davy v řádu tisíců agentů na běžném stolním počítači. Model také počítá s heterogenitou agenta a generuje různorodou sadu chování.

Least Effort funkce modelu je založená na tom, že jedna z klíčových věcí při lidském rozhodování je princip nejmenšího úsilí. To ve výsledku znamená, že každý agent by měl jít nejkratší cestou a pohybovat se svou preferovanou rychlostí. Běžná rovnice úsilí však pouze minimalizuje vzdálenost, kterou je třeba urazit, a pouhé minimalizování času nestačí, protože by agenty nutilo chodit svou maximální rychlostí. Autoři představují novou rovnici, která minimalizuje celkovou biomechanickou energii vydanou agentem, měřenou v joulech.

## **2.4 AnyLogic**

AnyLogic je simulační software podporující nejčastější metody simulace. Výhodou oproti ostatním simulačním nástrojům je možnost modelování všech typů systémů, a to procesně orientované systémy, systémovou dynamiku a systémy založené na agentech. Ostatní nástroje jsou většinou zaměřeny pouze na jeden z těchto typů, například programy Witness, Vensim nebo Swarm. Jak je zmíněno na webu AnyLogicu, software umožňuje zobrazení a simulaci systémů na libovolné úrovni abstrakce. Knihovna předdefinovaných objektů dovoluje rychle sestavit model výroby a logistiky, podnikových procesů či chování lidí [The AnyLogic Company, 2015].

Rozhraní AnyLogicu je uživatelsky velmi přívětivé, včetně grafických panelů a poměrně detailní a přehledné nápovědy ke každému prvku knihovny. Užitečnou funkcí nástroje je propojení s webovou stránkou <http://www.runthemodel.com/>, kam je možno vytvořené modely ať už veřejně nebo soukromě nahrát, odkud je možné je spouštět i z počítače bez instalace AnyLogic.

### **2.4.1 Využití AnyLogic pro simulaci davu**

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly 2, simulace davu spadá pod oblast agentového modelování, tedy modelování systémů založených na agentech. Pro tento druh simulace má AnyLogic speciální knihovnu zvanou Pedestrian Library, jejíž simulační model je založen na Social Forces modelu a nabízí možnost diferenciací agentů pomocí atributů [Nassar et al., 2012]. V panelu knihovny jsou dostupné nástroje pro tvorbu prostředí pomocí zdí, vytváření oblastí služeb s frontami a oblastmi pro čekání a definování cílové čáry či oblasti, kterým je později možné přidělit význam. Užitečnou položkou je také možnost zobrazení mapy hustoty. V další části panelu je pak možné definovat chování agenta pomocí Ped Source (zdroj agentů), Ped Sink (zánik agenta), Ped Go To (určení cíle), Ped Wait (čekání) a podobně. Samotná tvorba simulace je díky tomuto velmi jednoduchá.

Nástroj AnyLogic byl využit v mnoha pracích a výzkumech. Například v [Curcio et al., 2007] využívají autoři AnyLogic a jeho simulační model pro simulaci toku cestujících v prostředí letiště a pozorují průměrné čekací doby cestujících. Prostředí letiště je řešeno i v [Ma, 2013], kde je cílem autorů návrh nového řešení komplexních davů na letištích a v [Cheng, 2014]. Autoři [Li et al., 2014] využívají Pedestrian Library pro optimalizaci počtu pokladen na vlakovém nádraží. V [Nassar et al., 2012] je nástroje AnyLogic využito pro určení počtu a rozmístění východů v modlitebním sále mešity. Dále je AnyLogic využit například v [Xi et al., 2011], kde autoři implementují vlastní modely pro výpočty směru a rychlosti agenta. V [Sato et al., 2007] je využita AnyLogic Pedestrian Library pro tvorbu simulátoru obchodu. V [Nasir et al., 2014] je navržen simulační model a je testována jeho validita porovnáváním s reálnými daty a daty simulovanými pomocí nástroje AnyLogic. [Shendarkar et al., 2006] navrhuje vlastního agenta pro simulace nouzových situací a pro simulování využívá nástroje AnyLogic. Při simulaci každý agent volá pro své plánování a rozhodování externí funkce.

### 3 Data

Následující výzkum je založen na datech poskytnutých na stránkách [Jülich Supercomputing Centre, 2014]. Výzkumníci v Jülich Supercomputing Centre (dále JSC) provedli řadu experimentů, při kterých vpouštěli lidi do reálných prostředí a jejich pohyb snímali kamerami. Výsledné videosekvence analyzovali pomocí software PeTrack [Boltes et al., 2013]. Trajektorie lidí jsou ukládány v textových souborech řádek po řádku ve formátu ID, frame, x, y, z. Data, jejichž strukturu naznačuje Tabulka 1, byla snímána frekvencí 16 FPS, a souřadnice x, y a z ukládány v centimetrech.

1	83	106.015	791.467	160.166
1	84	104.868	784.829	160.166
1	85	103.468	779.434	160.166
1	86	102.333	773.63	160.166
1	87	101.718	767.491	160.166
1	88	101.491	761.099	160.166
1	89	101.394	754.153	160.166
1	90	101.239	746.7	160.166

Tabulka 1 - Náhled dat JSC

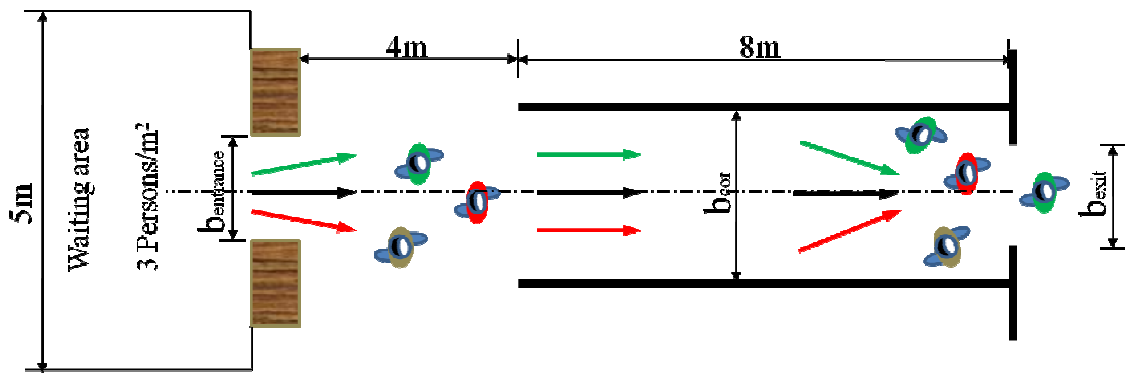
V podkapitole 3.1 jsou popsány jednotlivé experimenty, ze kterých byla data snímána.

#### 3.1 Experimenty JSC

Experimenty, popsané v [Keip et al., 2009], byly prováděny v několika různých prostředích. Pro každé prostředí bylo většinou provedeno několik experimentů, které se lišily hlavně v počtu posílaných lidí a rozměrech různých částí prostředí. Mezi prostředí patří chodba, kterou účastníci měli za úkol projít buď jednosměrně, či oběma směry zároveň, dále spojení dvou proudů účastníků v křižovatce typu T, průchod rohem chodby a komplexnější prostředí na venkovním stadionu.

##### 3.1.1 Jednosměrný průchod chodbou

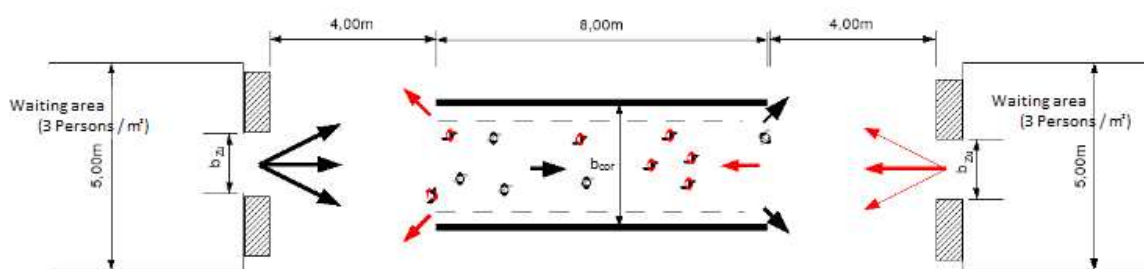
V tomto pokusu měli lidé za úkol projít jednosměrnou chodbou, která je naznačena na Obrázek 8. Na začátku experimentu lidé čekali v místnosti široké 5m, v přibližné hustotě 3 lidé na  $m^2$ . Poté procházeli zúženým vchodem, jehož velikost je označena  $b_{\text{entrance}}$  a byla jedním z proměnlivých parametrů prostředí. Po 4 metrech volného místa lidé vcházeli do chodby dlouhé 8m a široké  $b_{\text{cor}}$  (další z proměnlivých parametrů) a nakonec jí opouštěli na jejím konci úzkým hrdlem o šířce  $b_{\text{exit}}$ .



Obrázek 8 - Nákres prostředí jednosměrné chodby. Převzato z [Keip et al., 2009]

### 3.1.2 Obousměrný průchod chodbou

Tento experiment byl zaměřen také na průchod chodbou, tentokrát obousměrný. Přibližný půdorys chodby je znázorněn na Obrázek 9. Stejně jako u předchozího experimentu před jeho začátkem čekali účastníci experimentu v místnostech širokých 5m a s přibližnou hustotou 3 lidé na  $m^2$ , které opouštěli zúženým prostorem, jehož šířka je v tomto případě označena  $b_{zu}$ . Při většině experimentů byly obě strany nastaveny na stejnou šířku, jen několik experimentů mělo nastaveny různé velikosti. Po čtyřmetrovém prostoru na obou stranách účastníci vstupovali do 8m dlouhé chodby, široké  $b_{cor}$ , na jejímž konci měli opustit prostředí buď odchodem vpravo či vlevo. Experimenty probíhaly ve dvou režimech – se svobodnou volbou cíle a s přiděleným cílem.



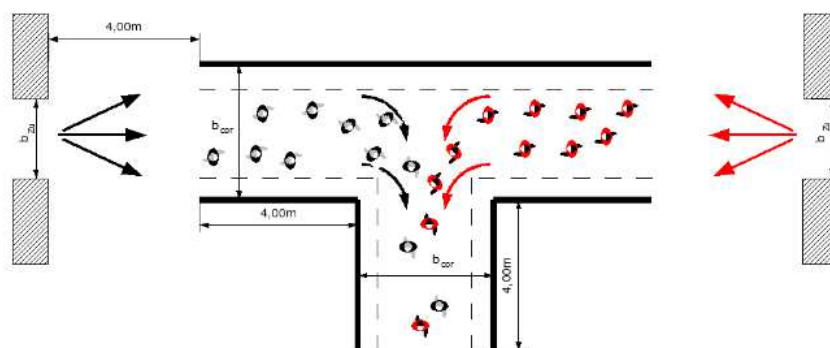
Obrázek 9 - Nákres prostředí obousměrné chodby. Převzato z [Keip et al., 2009]

V experimentech se svobodnou volbou cíle nebyli účastníci omezeni při výběru své destinace, a mohli si tedy sami vybrat, zda chodbu opustí vlevo či vpravo. Podle [Keip et al., 2009] z pozorování vyplývá, že v tomto typu experimentu se účastníci předem rozhodli a vycházeli rovnou na straně, na které prostředí i opouštěli.

Druhým typem experimentu obousměrného průchodu chodbou byl přidělený cíl, kdy bylo účastníkům přiděleno osobní číslo a podle něj musel každý účastník opustit chodbu na své straně - účastníci se sudým číslem opouštěli chodbu vpravo a účastníci, kterým bylo přiděleno liché číslo, opouštěli chodbu vlevo.

### 3.1.3 Křižovatka tvaru T

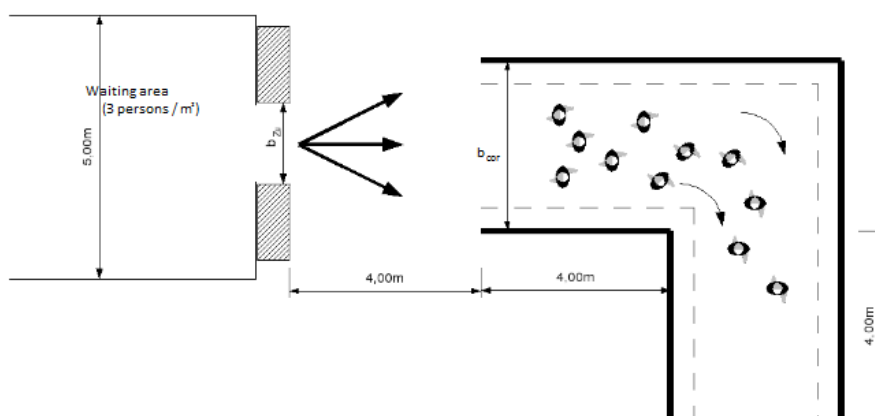
Tento experiment (viz Obrázek 10) stejně jako předchozí začínal zúženým průchodem o šířce  $b_{zu}$  a čtyřmetrovým volným prostorem před začátkem chodby, která byla široká  $b_{cor}$ . Délka chodby se lišila podle její šířky, a v jejím středu (4 metry od levého i pravého konce chodby) odbočovala další chodba ( $b_{cor}$ ), do které vcházeli účastníci z obou stran.



Obrázek 10 - Nákres křižovatky typu T. Převzato z [Keip et al., 2009]

### 3.1.4 Průchod rohem

Obrázek 11 zobrazuje experiment průchodu rohem, který začíná, stejně jako ostatní experimenty, místností, kde čekají účastníci v hustotě 3 lidé na  $m^2$  na start experimentu. Poté procházejí zúžením o šířce  $b_{zu}$  a po 4 metrech volného prostoru vchází do chodby o šířce  $b_{cor}$ , která se po 4 metrech pravouhle stáčí doprava.



Obrázek 11 - Nákres prostředí průchodu rohem. Převzato z [Keip et al., 2009]



### 3.1.5 Stadion

Komplexnějším experimentem (viz Obrázek 12) byl experiment sledující chování davu lidí opouštějících stadion na několika různých místech – na schodech přímo v hledišti stadionu, ve východech z hlediště stadionu a na schodech opouštějících stadion. Data z experimentu nebyla ve výzkumu v bakalářské práci použita.



Obrázek 12 - Snímky z experimentů JSC na stadionu. Zpracováno z videí [Jülich Supercomputing Centre, 2014]

## 4 Metodika

Postup práce zahrnoval zpracování dat a simulaci pomocí nástroje AnyLogic s reálným datům co nejpodobnějšími vstupními parametry. Průběh simulace byl exportován a zpracován podobně jako data JSC. Zpracování dat, popsané v podkapitole 4.1, zahrnovalo v případě JSC dat jejich vyhlazení a podvzorkování, a u obou typů dat pak generování a analýzu odvozených číselných charakteristik.

Pro simulaci bylo třeba zvolit co nejpřesnější způsob generování agentů. Bylo provedeno pět experimentů s různými typy generování agentů a byl pozorován vstup agentů do snímaného prostředí. Na základě podobnosti s daty JSC byl zvolen experiment č. 3, tj. generování přesně podle prostředí při experimentech JSC, jak podrobněji popisuje podkapitola 4.2.

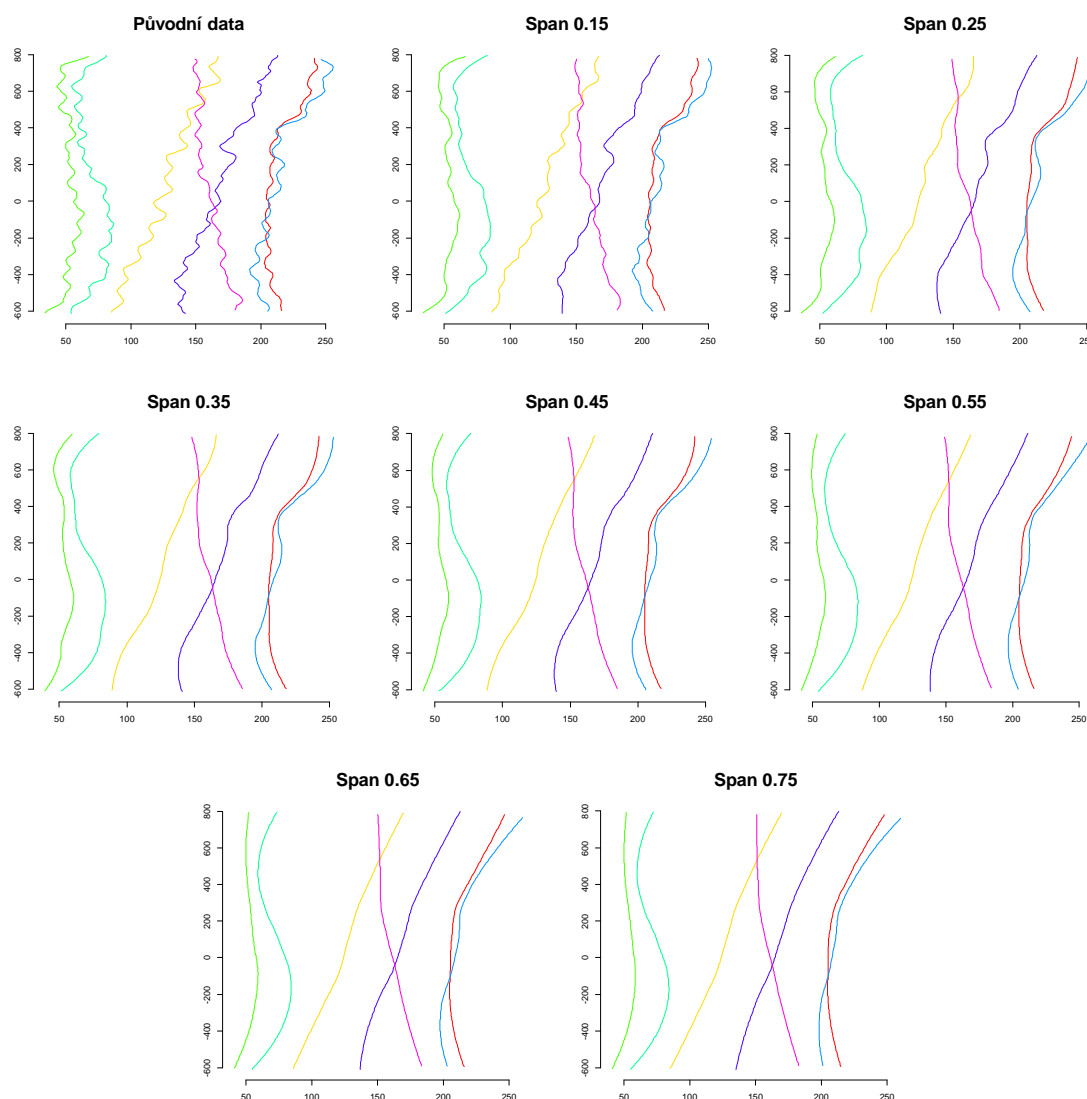
### 4.1 Zpracování dat

Ke zpracování a analýze dat byl použit software R ve verzi 3.0.3 [R Core Team, 2014]. Zpracování dat probíhalo v několika krocích. Data JSC bylo potřeba nejprve vyhladit (viz podkapitola 4.1.1) pro eliminaci přirozeného kývání účastníků při chůzi, a následně podvzorkovat (viz podkapitola 4.1.2) z 16 FPS na 1 FPS pro zvýraznění změn směrů účastníků. Datům z experimentů JSC byla také odstraněna souřadnice z, tedy výška účastníka, která pro účely zkoumání chování účastníků neměla význam. Nad daty JSC i nad daty exportovanými ze simulací prováděných pomocí nástroje AnyLogic byla provedena řada výpočtů blíže popsanych v podkapitole 4.1.3, jejichž účelem bylo získání sady číselných charakteristik, pro které je v dalším textu používán termín featury inspirovaný terminologií strojového učení a které popisují chování jedinců v průběhu simulace či experimentu.

#### 4.1.1 Vyhlazení

Účastníci experimentů při pomalé chůzi přešlapovali z nohy na nohu a v záběru kamery se tak kývali ze strany na stranu. V získaných trajektoriích proto vznikaly změny směru pohybu, které nespojivě se směřováním k cíli či s vyhýbáním se překážkám. Přestože se jedná o běžný úkaz při chůzi člověka, pro výzkumné cíle práce data s tímto šumem nebyla vhodná, takže byla před dalším zpracováním vyhlazena. Vyhlazení bylo provedeno pomocí lokální regrese, metodou LOESS, která využívá metody nejmenších čtverců k vytvoření polynomické křivky, kde největší váhu na aproximaci mají body nejbližší zkoumanému bodu a nejmenší pak vzdálené body. Vyhlazení bylo realizováno pomocí funkce loess implementované v jazyce R, které byla jako argument předána data s různým vyhlazovacím parametrem (span), který určuje, jaký počet dat bude využit pro každý lokální výpočet.

Obrázek 13 ukazuje porovnání původních dat a různě silných vyhlazení. Na základě vizuální inspekce trajektorií byla zvolena empirická hodnota parametru 0.35, při které je eliminováno kmitání účastníků, zatímco informace o jejich směru zůstává zachována. Nižší hodnoty spanu zanechávaly známky kmitání a vyšší hodnoty vyhlazovaly i opravdové změny účastníkovy směru a příliš tak zkreslovaly výsledná data.



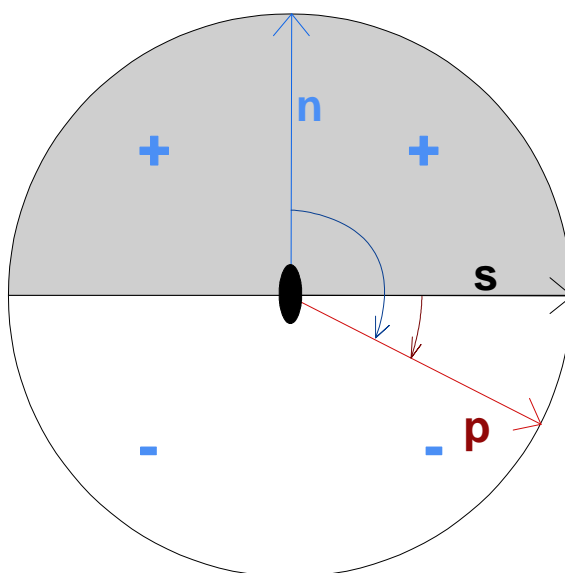
Obrázek 13 - Porovnání vyhlazování pro různé hodnoty parametru 'span'.

#### 4.1.2 Podvzorkování

Po vyhlazení dat a v důsledku vysoké frekvence snímání dat (16 FPS) byly odchylky mezi směry pohybu dvou po sobě jdoucích pozorování jednoho účastníka blízké nule. Data byla proto podvzorkována. Počet snímků za sekundu byl snížen na 1, tedy původní data byla zmenšena přibližně na jednu šestnáctinu tím, že byly započítány pouze ty řádky, jejichž "frame" (viz dále) byl dělitelný 16.

### 4.1.3 Featury

Na vyhlazená a následně podvzorkovaná data byla aplikována sada výpočtů, pomocí kterých byly získány odvozené proměnné, v dalším textu označované jako featury, a další informace o datech a jejich významu. Featury dále označované jako směr jsou odvozené od některého ze směrových vektorů. Aby mohly být uvažovány spojitě a nezávisle na rotaci, je každá reprezentovaná relativně vůči aktuálnímu vektoru pohybu jedince ve formě dvou proměnných obsahujících skalární součiny směrového vektoru s vektorem pohybu a s vektorem na něj kolmým. Všechny vektory jsou přitom normalizované, každý směrový vektor je tak reprezentován dvěma kosiny. První z hodnot udává odchytku a druhá znaménkem její směr, viz Obrázek 14.



Obrázek 14 - Použití dvou kosinů pro reprezentaci směrového vektoru  $p$  vůči vektoru pohybu  $s$  a vektoru  $k$  němu kolmému  $n$ .

Featury byly odvozeny pro každé pozorování, tedy pro každého účastníka v každé sekundě, pro každého účastníka souhrnně za celý experiment, pro každou sekundu souhrnně za všechny účastníky a souhrnně za celý experiment.

#### 4.1.3.1 Na člověka v každé sekundě

Celkem bylo vypočítáváno 54 hodnot pro každý řádek (pro každého člověka v každé sekundě), z nichž některé dvojice (směry) vyjadřují jednu informaci. Pokud jsou směry počítány jako jeden údaj, obsahuje jeden řádek 37 hodnot. Pokud budou z výčtu vynechány hodnoty stejného významu s jiným parametrem (například počet lidí v okolí o poloměru 0,5 m, 1 m, 2 m, ...), pak se jedná o 13 jedinečných údajů. Následující featury popisují jen samotného sledovaného jedince:

- ID,
- frame,
- rychlost,
- budoucí rychlost,
- budoucí směr
- vzdálenost do cíle,
- směr k cíli

Hodnoty ID a frame byly zavedeny pro sledování, o kterého člověka a který okamžik sledování se jedná. Hodnoty ID byly až na výjimečné případy lidem přiřazovány sekvenčně, takže proměnná byla při vyhodnocení také využita jako indikátor délky trvání experimentu, když do něj člověk vstoupil: čím větší, tím později. Rychlostí se myslí rychlost, kterou do současné sekundy přišel, a budoucí rychlostí rychlost, kterou z ní odchází (tedy rychlost v příští sekundě). Budoucí směr je změna směru vzhledem ke směru současnému. Vzdálenost do cíle udává přímočarou vzdálenost k místu posledního v experimentu zaznamenaného výskytu sledovaného jedince v centimetrech a směr k cíli značí směr k tomuto místu.

Další featury popisující okolí jedince jsou

- počet lidí v okolí  $x$  metrů,
- průměrná rychlost  $x$  nejbližších lidí,
- průměrná vzdálenost  $x$  nejbližších lidí,
- průměrný směr  $x$  nejbližších lidí
- průměrný směr k  $x$  nejbližším,
- průměrný budoucí směr  $x$  nejbližších.

Počet lidí v okolí je počet lidí, kteří se nacházejí v kruhové oblasti o poloměru  $x$  okolo zkoumaného jedince. V práci byly použity hodnoty  $x \in \{0,5; 1; 2; 3; 5\}$ . Pro všechny průměrné hodnoty nejbližších  $x$  lidí byly pak použity hodnoty  $x \in \{5; 10; 20\}$  a navíc byly stejné hodnoty vypočítávány pro nejbližšího a druhého nejbližšího jedince. Průměrná hodnota i vzdálenost nejbližších je obyčejným průměrem jednotlivých hodnot. Hodnota průměrných směrů je vypočítávána ze součtu normalizovaných vektorů jednotlivých směrů, aby se zamezilo rozdílu vlivů na výsledný vektor v závislosti na vzdálenosti od pozorovaného jedince.

Získané featury byly vizualizovány pomocí matice bodových grafů, kde každý vyjadřuje vztah jedné featury k jiné. Pro tyto featury byly také vypočteny Pearsonovy i Spearmanovy korelační koeficienty a vytvořena korelační matice.

#### **4.1.3.2 Na člověka**

Featury pozorované na člověka vychází z featur pozorovaných pro každého člověka v každé sekundě. Jsou vypočítávány tři hodnoty, a to průměrná rychlost po celou dobu působení účastníka v simulaci, celková uražená vzdálenost a čas, který účastník v simulaci strávil.

#### **4.1.3.3 Na sekundu**

Každou sekundu popisují dvě hodnoty, a to číslo snímku, který je zkoumán, a počet lidí, který je v tomto snímku v simulaci. Tím byl získán přehled o vývoji počtu lidí v simulaci v závislosti na čase.

#### **4.1.3.4 Celkové**

Mezi celkové featury patří celkový čas, který simulace zabrala od vstupu prvního účastníka až po odchod posledního. Dalšími údaji jsou průměr, směrodatná odchylka a kvartily jednotlivých featur na člověka v každé sekundě.

#### **4.1.3.5 Další informace**

V datech byl dále zkoumán počáteční snímek každého účastníka, tedy kdy do simulace přišel, jakou měl pozici při vstupu do simulace a jaké byly rozestupy mezi jednotlivými příchody účastníků experimentu do simulace. U pozic a rozestupů byl zkoumán vývoj v čase.

## **4.2 Experimenty**

Pomocí nástroje AnyLogic byly provedeny simulace napodobující situace a prostředí, ze kterých pochází data od JSC. Hlavní snahou bylo přiblížit se co nejlépe podmínkám získaných dat, co se týče generování agentů v simulaci, aby bylo zajištěno co nejobjektivnější porovnání výstupů.

### **4.2.1 Vstupní parametry**

Výchozí nastavení agenta v AnyLogicu není odpovídající datům JSC. Jedná se hlavně o preferovanou rychlost agenta, která je defaultně rovnoměrně rozložena mezi 0,5 a 1 m/s. Průměrná hodnota tohoto rozložení (0,75 m/s) je přibližně polovinou rychlosti běžné chůze, která je podle [Bohannon, 1997] až 1,5 m/s pro muže i ženy do čtyřiceti let a v žádném z pozorování neklesá pod 1,25 m/s. Maximální rychlosti lidské chůze se dle experimentů popsaných v článku pohybují v rozmezí přibližně 1,7 m/s až 2,5 m/s. Přesto bylo defaultní rychlosti využito jako jedné z možností experimentů. Účastníci JSC experimentu se v situaci,

kdy měli dostatek prostoru, pohybovali rychlostmi mezi 1,4 a 1,7 m/s, proto je rovnoměrné rozložení od 1,4 do 1,7 m/s jednou z úprav vstupních parametrů agenta.

U vyšších rychlostí byly pozorovány jevy, které neodpovídaly běžnému chování a pohybu člověka, způsobené nejspíše přílišnou setrvačností agenta. Těmito jevy byla dlouhá brzdná dráha agenta v řádu několika metrů, kdy agenti například nejdříve minuli odbočku, která byla jejich cílem, a až poté se vraceli a vcházeli do odbočky, nebo procházení záchytnými body bez povšimnutí, kdy se agenti chtěli nelogicky vracet na místo, kde už byli (místo, kde si samovolně vytvořili záchytný bod na cestě k cíli), a nepokračovali v cestě, dokud se na toto místo nevrátili, čímž docházelo k ucpávání chodeb.

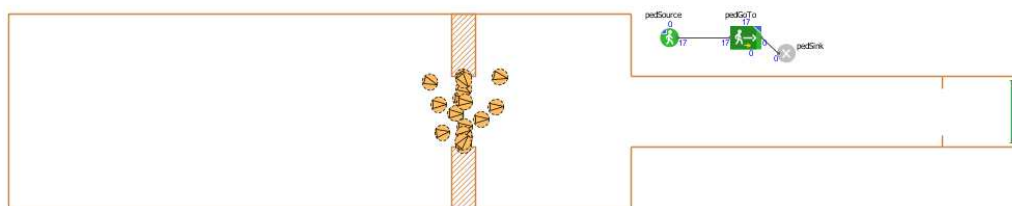
#### **4.2.2 Způsoby generování**

Pro zajištění co největší podobnosti generování agentů s příchody účastníků v experimentech JSC bylo nutné zvolit nejvhodnější způsob generování. Pomocí intervalů rozestupů v reálných datech byly v pěti experimentech testovány způsoby generování v prostředí jednosměrné chodby o rozměrech  $b_{\text{entrance}} = 1,8$  m,  $b_{\text{cor}} = 1,8$  m a  $b_{\text{exit}} = 1,2$  m (prostředí U120, viz podkapitola 5.1.1).

V každém experimentu byla posuzována podobnost s daty získanými od JSC. Jedním z porovnávaných aspektů bylo rozložení intervalů, kde byly zkoumány časové rozestupy mezi příchody jednotlivých agentů do sledovaného prostoru simulace (tj. části prostředí v simulaci odpovídající umístění a velikosti místa snímaného kamerami při experimentech JSC) a účastníků do experimentu. Dalším hlediskem bylo rozložení souřadnice vstupu (na obrázcích vertikální), kde bylo pozorováno, na kterém místě jedinec vchází do sledovaného prostoru, porovnáván tvar rozložení a celkový rozptyl (směrodatná odchylka) souřadnice. Dále byly porovnávány časy příchodů jedinců do snímaného prostoru a pomocí bodového grafu byly zkoumány vztahy mezi těmito časy a souřadnicemi příchodu. Ohled byl také brán na grafický průběh při simulování situace pomocí nástroje AnyLogic.

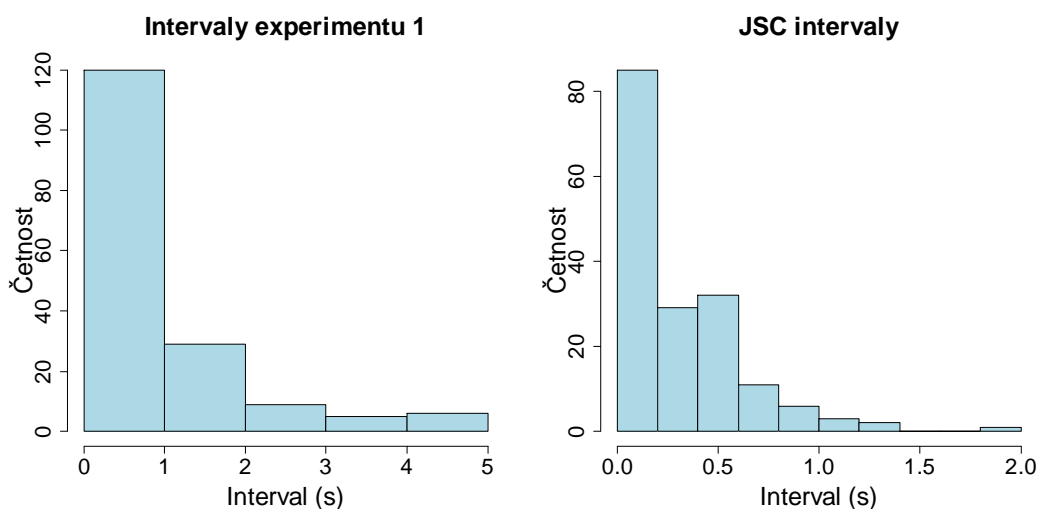
##### **4.2.2.1 Experiment 1**

V experimentu číslo 1 (Obrázek 15) byli agenti generováni ve vstupní štěrbině, zúženém prostoru, který vede ze vstupní místnosti, a to dle reálných intervalů. Už při simulování bylo patrné nepřesné generování, kdy agenti nestíhali opouštět generovací čáru před vygenerováním dalších agentů. To zapříčinilo rychlé ucpání vstupního prostoru a navíc odstrčilo některé agenty zpět do vstupní místnosti, jak je lehce vidět na obrázku. Navíc agenti měli nedostatek času pro nabrání preferované rychlosti před vstupem do simulace.



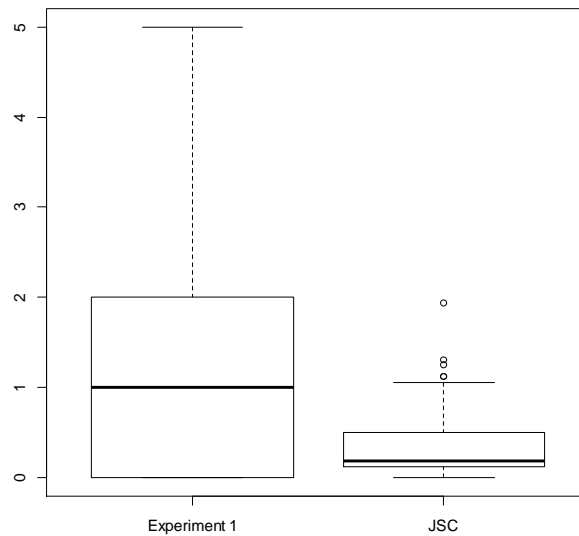
Obrázek 15 - AnyLogic experiment 1

Jak zobrazují Obrázek 16 a Obrázek 17, intervaly rozestupů mezi příchody do simulace neodpovídaly v tomto experimentu hlavně ve variačním rozpětí. Přestože většina intervalů byla, stejně jako u JSC dat, v rozmezí 0 až 1 sekunda, byly časté i intervaly o délce dvou, méně pak o délce tří, čtyř a pěti sekund, které v datech JSC nejsou zastoupeny vůbec. Příliš velký počet pozorování pro dvousekundové až pětisekundové intervaly byl jedním z důvodů zamítnutí tohoto typu generování.



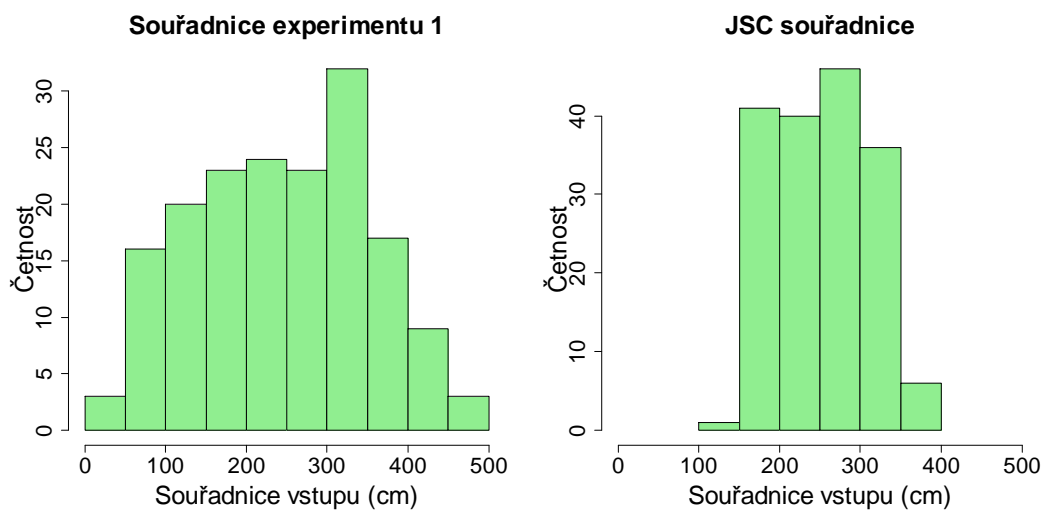
Obrázek 16 - Porovnání intervalů mezi příchody v experimentu 1 a datech JSC





Obrázek 17 - Boxplot rozložení intervalů v experimentu 1 a datech JSC.

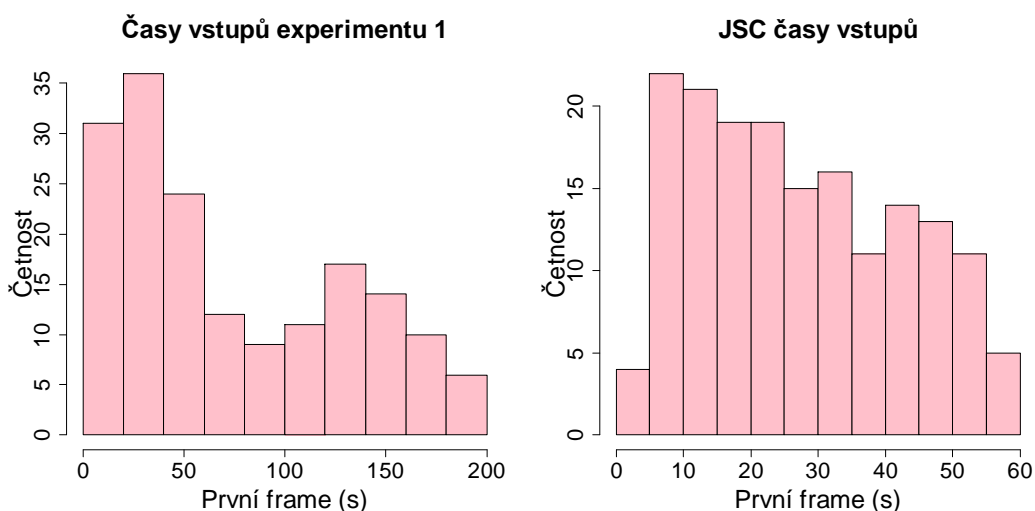
Jak znázorňuje Obrázek 18, agenti v experimentu 1 využívali celou šíři vstupní místnosti (5 m), zatímco účastníci experimentu JSC využívali 3 metry prostoru maximálně. S tím byla spojena i příliš velká směrodatná odchylka  $\sigma_1 = 105,9$  (směrodatná odchylka v datech JSC pro porovnání vyšla  $\sigma_{JSC} = 63,3$ ). Tento fakt byl dalším důvodem, proč nebyl zvolen tento typ generování.



Obrázek 18 - Porovnání souřadnic vstupu do snímané oblasti v experimentu 1 a datech JSC

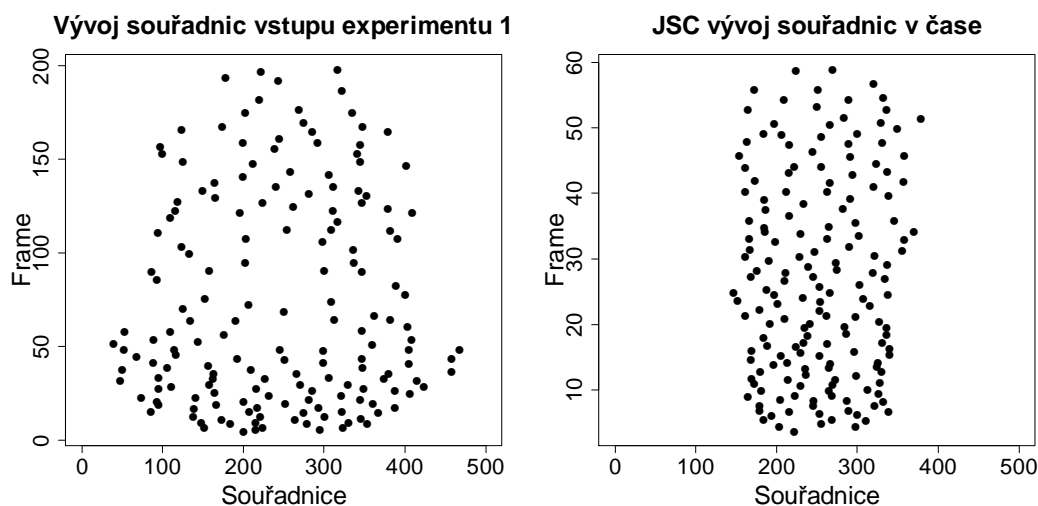
Obrázek 19 ukazuje vývoj příchodu agentů v experimentu 1 v čase v porovnání s příchody účastníků experimentu JSC. Stejně jako účastníci experimentu JSC, agenti v simulaci přicházeli

nejdříve ve větších počtech a s časem jejich množství klesalo. Vzhledem k pomalejšímu pohybu agentů a celkově déle trvajícím simulaci v AnyLogic je rozsah na ose x značně větší než u dat JSC.



Obrázek 19 - Porovnání časů vstupu do snímané oblasti v experimentu 1 a datech JSC

Na grafu, který zobrazuje Obrázek 20, je vidět, že v experimentu číslo 1 nejprve lidé přicházeli v úzké oblasti, ale rychle se souřadnice jejich objevení se ve sledovaném prostoru rozrostla na celou šíři vstupní místnosti. Data JSC oproti tomu vykazují na čase vcelku nezávislé souřadnice, s malým náznakem, že na začátku byla oblast vstupování také užší, než později v simulaci.



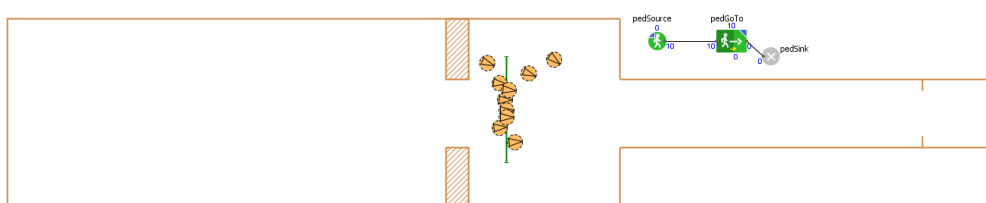
Obrázek 20 - Porovnání vývoje souřadnice vstupu v čase v experimentu 1 a datech JSC

Tento způsob generování se už od samotného simulování zdál jako spíše nevhodný, což bylo výsledky porovnávání potvrzeno. Intervaly mezi příchody agentů byly v porovnání s daty JSC příliš dlouhé. Přestože většinou se intervaly pohybovaly v rozmezí 0 až 1 sekunda, intervaly 2 až 5 sekund byly zastoupeny nezanedbatelně často. Další odlišností bylo využití celých 5 m

vstupního prostoru před chodbou, zatímco účastníci experimentu JSC využívali mnohem méně. Rozložení časů vstupů vycházelo víceméně podobně, stejně jako vývoj souřadnic v čase, který se u dat JSC zdál být více náhodný. Tento způsob nebyl z těchto důvodů zvolen pro další výzkum.

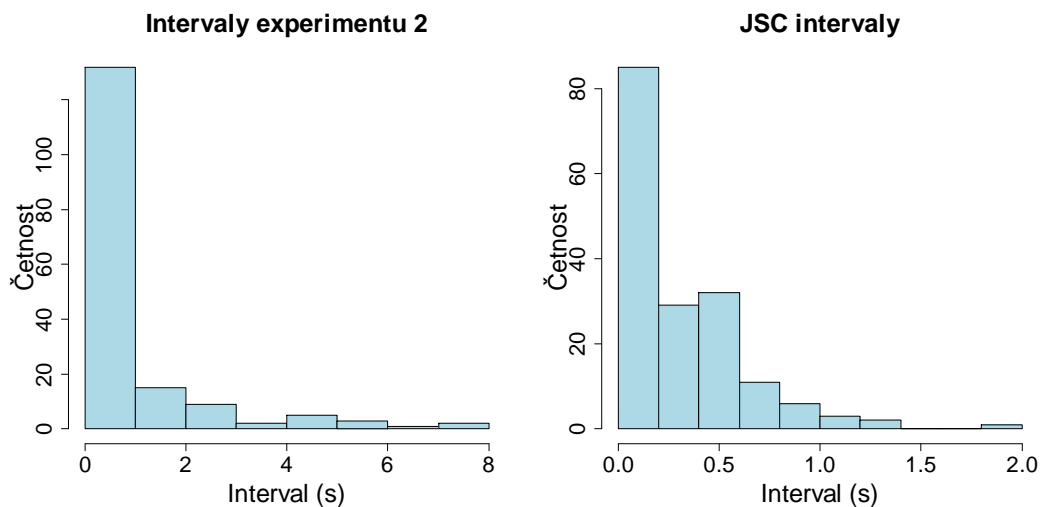
#### 4.2.2.2 Experiment 2

Experiment s číslem 2 se od prvního lišil umístěním generující cílové čáry. Ta byla v tomto případě umístěna přesně na hranici sledovaného prostoru a měla rozměry odpovídající šíři prostoru, kterým procházeli účastníci experimentů JSC. Tento způsob vykazoval statisticky velkou podobnost, protože byl v zásadě generován přímo podle JSC dat. Bohužel kvůli zpoždění mezi objevením se agenta a jeho rozejitím se tento způsob generování nezdál vhodný, a to z podobných důvodů jako u experimentu číslo 1. V simulaci docházelo k rychlému ucpání vstupního prostoru a agenti byli generováni přes ostatní agenty nebo je odstrkovali dozadu, a vzhledem k tomu byl tento způsob odsouzen k zamítnutí již při simulaci.

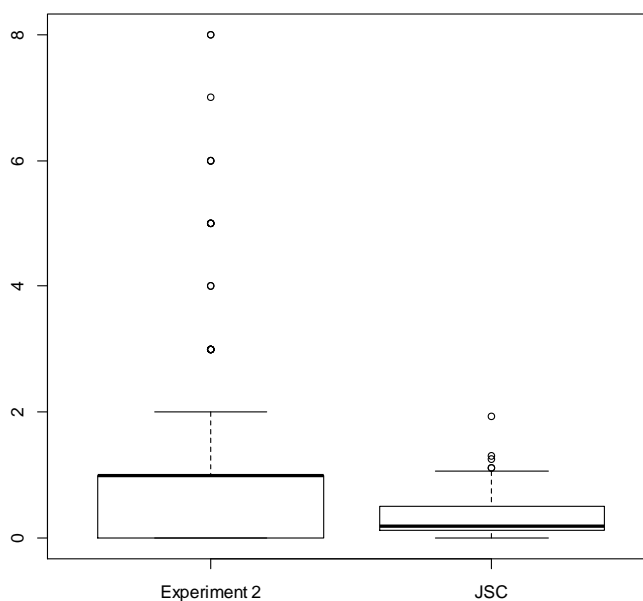


Obrázek 21 - AnyLogic experiment 2

Porovnání intervalů rozestupů (viz Obrázek 22 a Obrázek 23) u experimentu 2 vykazuje velmi velkou podobnost, která je způsobena generováním agentů víceméně přesně dle dat od JSC, a i přesto jsou v pokusu velké odchylky. Osmisekundový interval, přestože se vyskytuje minimálně, je nepřijatelný, jedná se o čtyřnásobek maximální hodnoty intervalů v datech JSC.

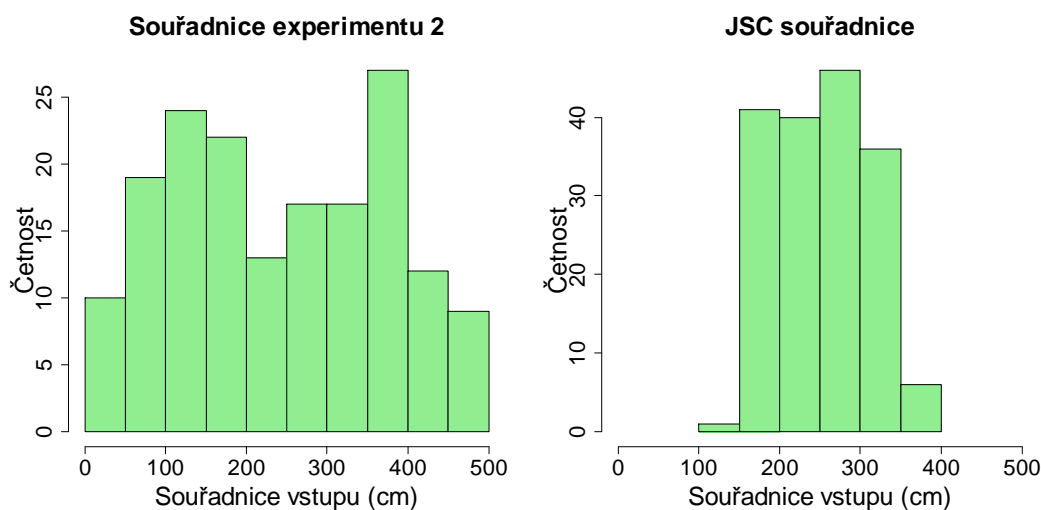


Obrázek 22 - Porovnání intervalů mezi příchody v experimentu 2 a datech JSC



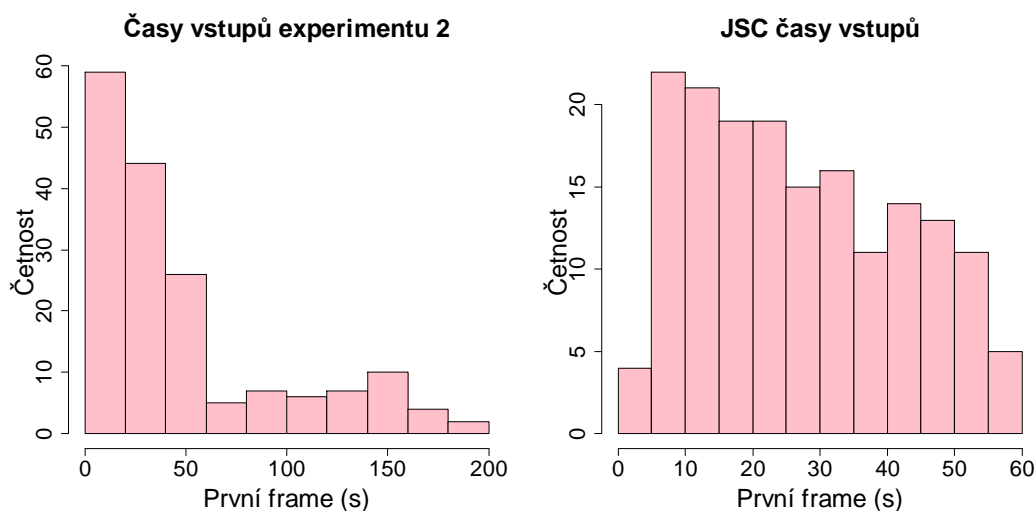
Obrázek 23 - Boxplot rozložení intervalů v experimentu 2 a datech JSC.

Rozložení souřadnice vstupu do sledovaného prostoru (viz Obrázek 24) vykazuje využití celého pětimetrového prostoru před vstupem do chodby, zatímco účastníci JSC experimentu využívali maximálně 3 metry prostoru. Toto značí rychlé ucpávání a přelidnění vstupního prostoru, což potvrzuje i grafický průběh simulace. Směrodatná odchylka podle očekávání vyšla v porovnání s daty JSC ( $\sigma_{JSC} = 63,3$ ) nepřiměřeně vysoká,  $\sigma_2 = 132,2$ .



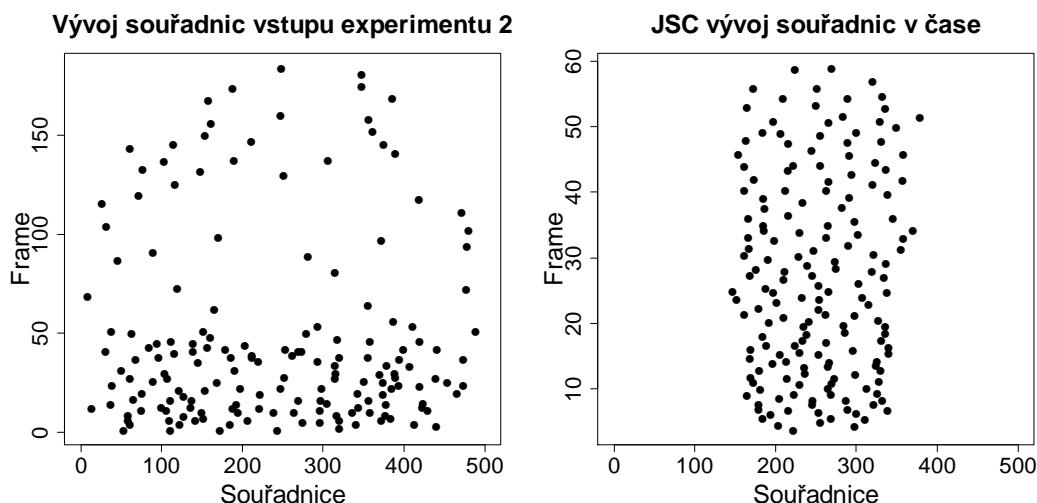
Obrázek 24 - Porovnání souřadnic vstupu do snímané oblasti v experimentu 2 a datech JSC

Frekvence časů vstupů s rostoucími hodnotami rychle klesají (viz Obrázek 25), což znamená, že většina lidí se v experimentu objevila na začátku simulace (podle obrázku přibližně v první čtvrtině) a potom lidé přicházeli velmi řídko. Tento jev je opět přisuzován ucpání ve vstupním prostoru, které během začátku simulace rychle narůstalo, až způsobilo tento rapidní pokles.



Obrázek 25 - Porovnání časů vstupů do snímané oblasti v experimentu 2 a datech JSC

Obrázek 26 znázorňuje vztah vstupní souřadnice s časem vstupu v experimentu 2 v porovnání s daty JSC. Z grafu experimentu 2 je vidět, že souřadnice je poměrně náhodná (podobně jako u dat JSC), ovšem většina pozorování zde proběhla před padesátým framem. Toto nahuštění je výraznou odchylkou od dat JSC, kterým se simulace snaží přiblížit, proto je z tohoto hlediska tento způsob generování nevhodný.

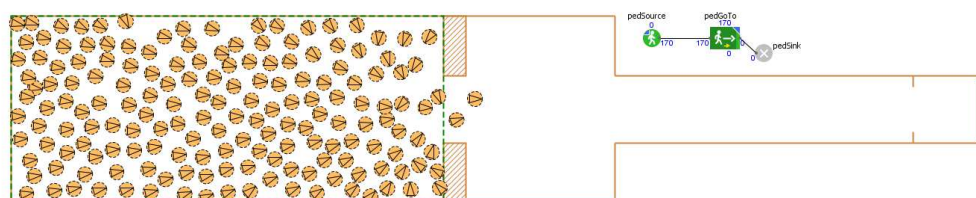


Obrázek 26 - Porovnání vývoje souřadnice vstupu v čase v experimentu 2 a datech JSC

Generovat agenty přesně podle dat JSC se, ač se to zdá jako nejlepší možnost, ukázalo jako možnost nejhorší. Způsobeno je to tím, že agenti v nástroji AnyLogic při objevení se v simulaci mají nulovou rychlost a teprve se rozcházejí do svého cíle, zatímco účastníci experimentů v Jülichu přicházejí do snímané oblasti již s určitou rychlostí (stejný problém vykazoval i experiment 1). Agenti se generují příliš rychle, než aby již vygenerovaní stihli opustit prostor generování, a rapidně ucpávají vstupní prostor. Tento způsob byl proto zamítnut a byly vyzkoušeny způsoby, kde mají agenti dostatek času nabrat preferovanou rychlost a možnost samovolně do snímané části simulace vstoupit.

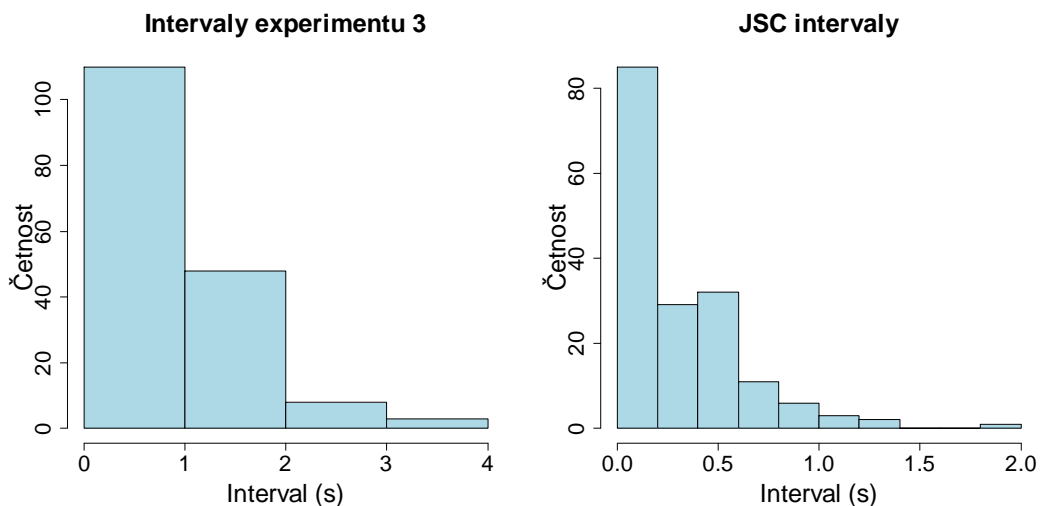
#### 4.2.2.3 Experiment 3

Třetí experiment odpovídal reálné situaci v pokusech JSC. Zde byli agenti všichni najednou umístěni do vstupní místnosti v hustotě 3 agenti na  $m^2$  a bylo jim přikázáno jít do cíle. Agenti tak měli možnost svobodného rozhodování už od procházení zúženým prostorem až do cíle a také více času na nabrání preferované rychlosti. Tento postup byl uvažován jako první, vzhledem k tomu, že přesně kopíruje prostředí experimentů JSC, a ukázal se jako jeden z nejpřesnějších.

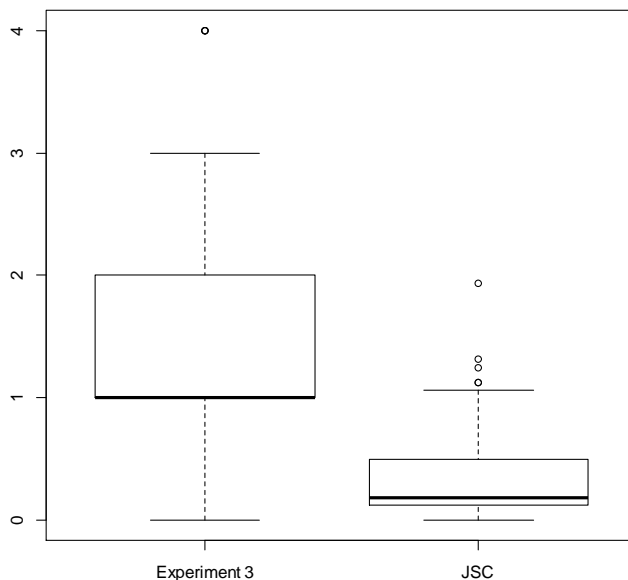


Obrázek 27 - AnyLogic experiment 3

Rozložení intervalů rozestupů (viz Obrázek 28 a Obrázek 29) v experimentu 3 vycházelo relativně velmi dobře. Přestože celkově je rozložení méně podobné datům JSC, maximální délka intervalu je 4 sekundy, a to pouze ve velmi malém počtu pozorování. Tvarem si rozložení odpovídají méně.



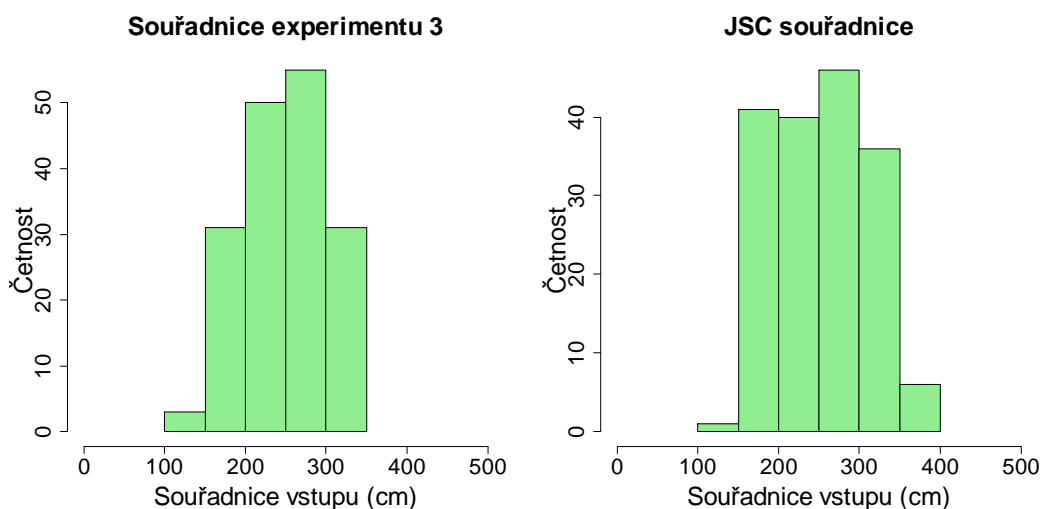
Obrázek 28 - Porovnání intervalů mezi příchody v experimentu 3 a datech JSC



Obrázek 29 - Boxplot rozložení intervalů v experimentu 3 a datech JSC.

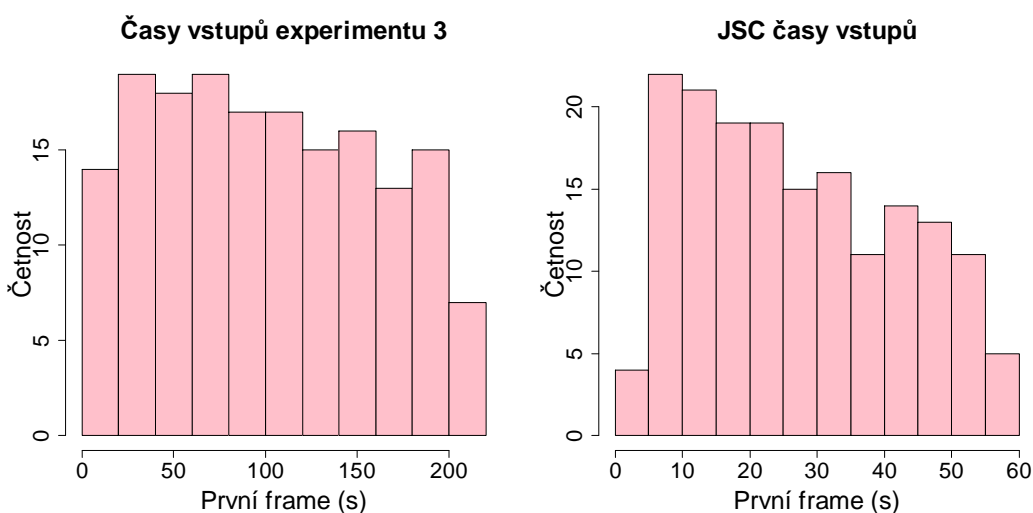
Souřadnice vstupu v experimentu 3 (viz Obrázek 30) byla rozložena velmi podobně jako souřadnice v datech JSC. Pozitivním zjištěním byla směrodatná odchylka rozložení souřadnice

$\sigma_3 = 49,4$ , která byla oproti předchozím způsobům výrazně nižší a více se tím podobala směrodatné odchylce souřadnice v datech JSC, jejichž směrodatná odchylka je  $\sigma_{JSC} = 63,3$ .



Obrázek 30 - Porovnání souřadnic vstupu do snímané oblasti v experimentu 3 a datech JSC

Rozložení času vstupů (viz Obrázek 31) vyšlo v případě AnyLogic simulace tvarově podobně datům JSC. V obou případech je rozložení lehce klesající, v případě dat JSC více. Relativně rovnoměrné rozložení napovídá, že při vstupu do snímaného prostředí nedocházelo k ucpávání a průběh byl plynulý, což je pro tento způsob generování pozitivní poznatek, a zároveň je rozložení lehce sklopené jako v datech JSC. Časy ze simulace však mají větší variační rozpětí.

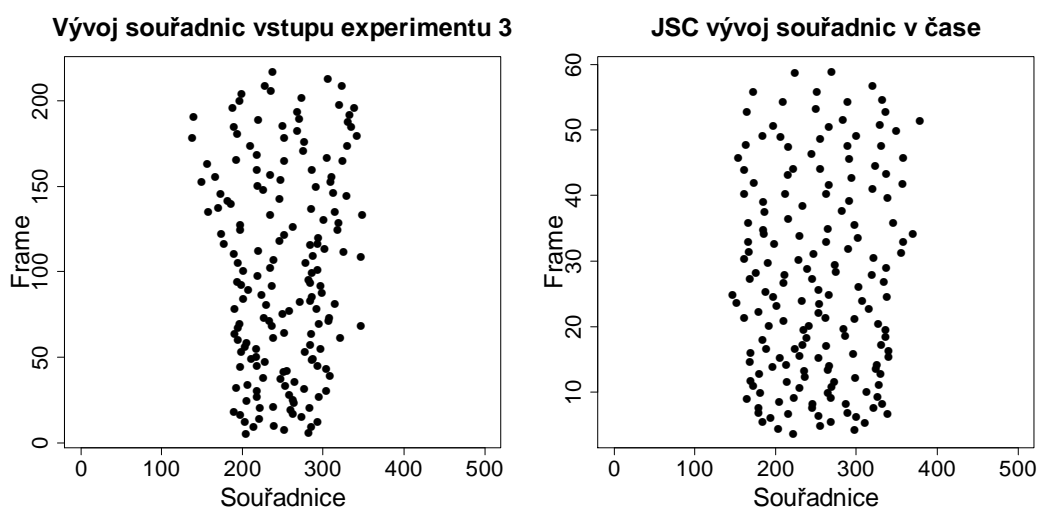


Obrázek 31 - Porovnání časů vstupů do snímané oblasti v experimentu 3 a datech JSC

Obrázek 32 znázorňuje vývoj souřadnic vstupu v čase. Ten je v případě dat získaných ze simulace pomocí nástroje AnyLogic méně náhodný, vykazuje využívání menšího prostoru ze začátku simulace a postupné rozšiřování využívaného prostoru (což značí postupné



zaldňování vstupního prostoru). Názňak, i když ne tak znatelný, stejného jevu je možné pozorvat i ve vývoji souřadnic v čase dat JSC.

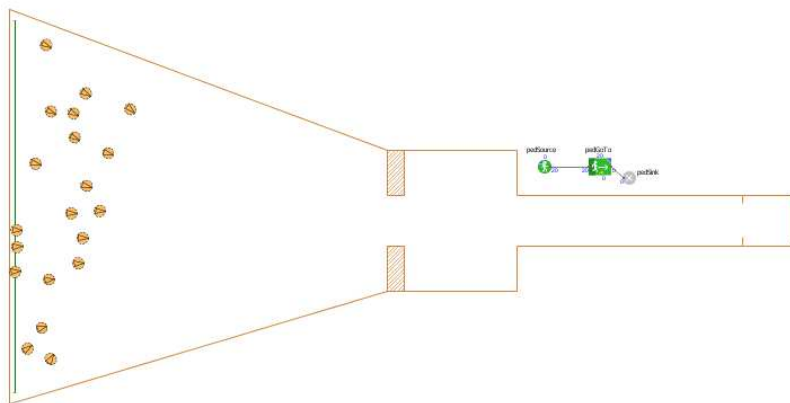


Obrázek 32 - Porovnání vývoje souřadnice vstupu v čase v experimentu 3a datech JSC

Experiment 3 vykazuje s daty JSC největší podobnost. Navíc se jedná o nejpřesnější kopii prostředí experimentů v Jülichu. Tento způsob generování vykazuje nejkratší intervaly mezi příchody agentů ze všech experimentů a nejvíce se tak blíží intervalům dat JSC. Souřadnice je tvarem rozložena velmi podobně a její směrodatná odchylka je nejbliže směrodatné odchylce rozložení souřadnice v datech z experimentů JSC. Přestože rozložení času vstupu do snímaného prostoru klesá v případě simulovaných dat pomaleji, podobnost s daty JSC je zde patrná a rozložení naznačuje plynulé vstupování do snímaného prostoru, což bylo potvrzeno grafickým znázorněním průběhu simulace. V čase se souřadnice vstupu simulovaných dat vyvíjí méně náhodně než v datech od JSC.

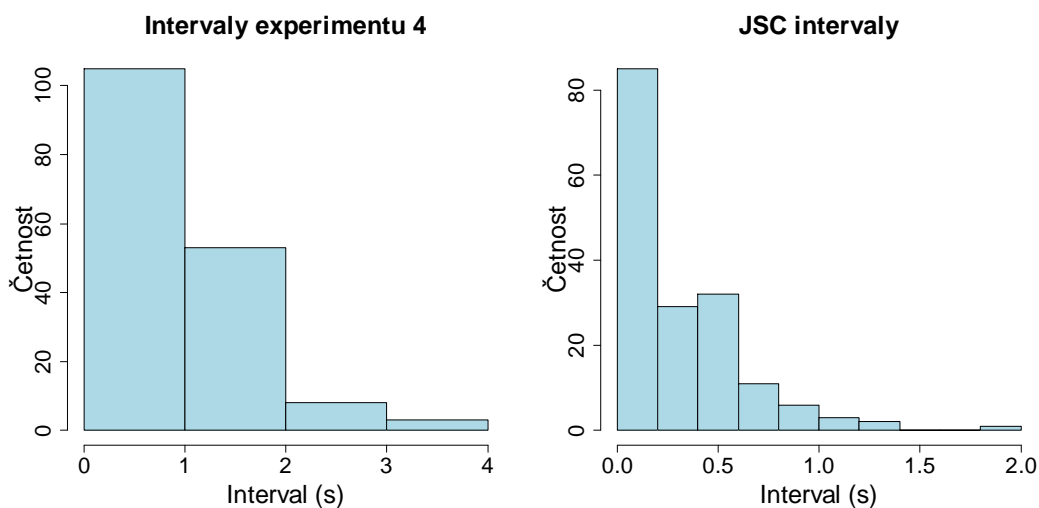
#### 4.2.2.4 Experiment 4

V experimentu číslo 4 byl agentům poskytnut velký prostor pro cestu ke vstupní šterbině: 13 metrů na délku a více jak 14 metrů na šířku ve tvaru lichoběžníku. Účelem tohoto prostředí bylo poskytnout agentům možnost svobodné volby vstupu a dostatečný prostor získat svou rychlost a procházet tak co nejrychleji do vstupního prostoru a snímané oblasti. Celkově se tento způsob svými výsledky od experimentu číslo 3 lišil jen minimálně.

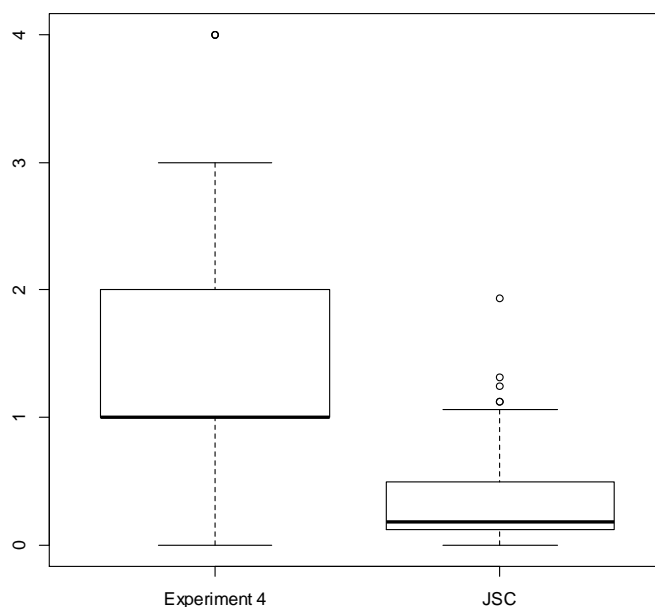


Obrázek 33 - AnyLogic experiment 4

Stejně jako v předchozím experimentu je rozložení intervalů mezi příchody (viz Obrázek 34 a Obrázek 35) velmi podobné. Boxplot vychází v opou případech naprosto stejný. Průměrná hodnota délky intervalu tohoto experimentu,  $\mu_{i4} = 1,24$ , je o něco nižší než průměrná hodnota v experimentu 3,  $\mu_{i3} = 1,25$ , zatímco směrodatná odchylka tohoto experimentu,  $\sigma_{i4} = 0,91$ , je naopak vyšší, než směrodatná odchylka předchozího experimentu,  $\sigma_{i3} = 0,87$ . Pro srovnání, průměrná hodnota dat JSC je rovna  $\mu_{iJSC} = 0,33$  a směrodatná odchylka  $\sigma_{iJSC} = 0,30$ . Průměrem je tedy blíže tento experiment, zatímco směrodatná odchylka je blíže v případě experimentu 3.

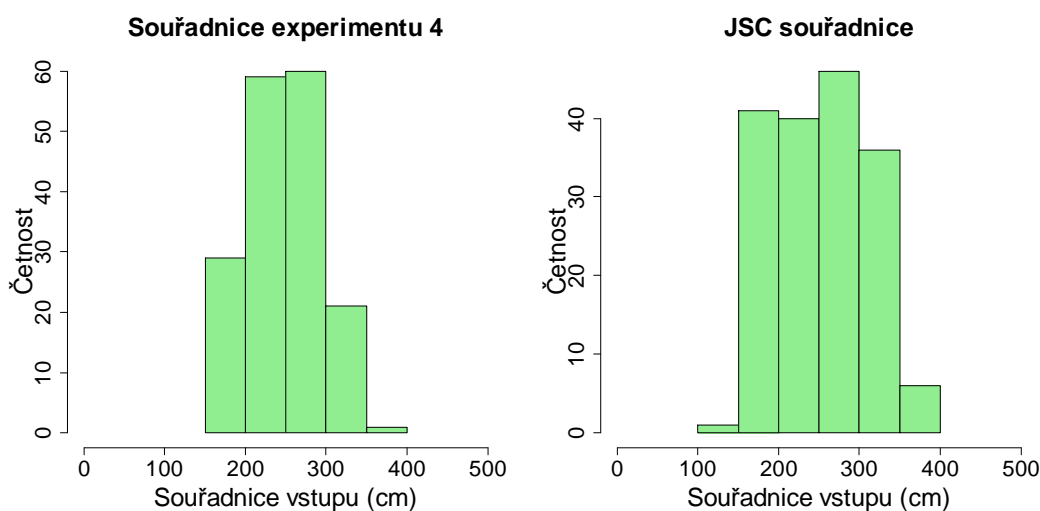


Obrázek 34 - Porovnání intervalů mezi příchody v experimentu 4 a datech JSC



Obrázek 35 - Boxplot rozložení intervalů v experimentu 4 a datech JSC.

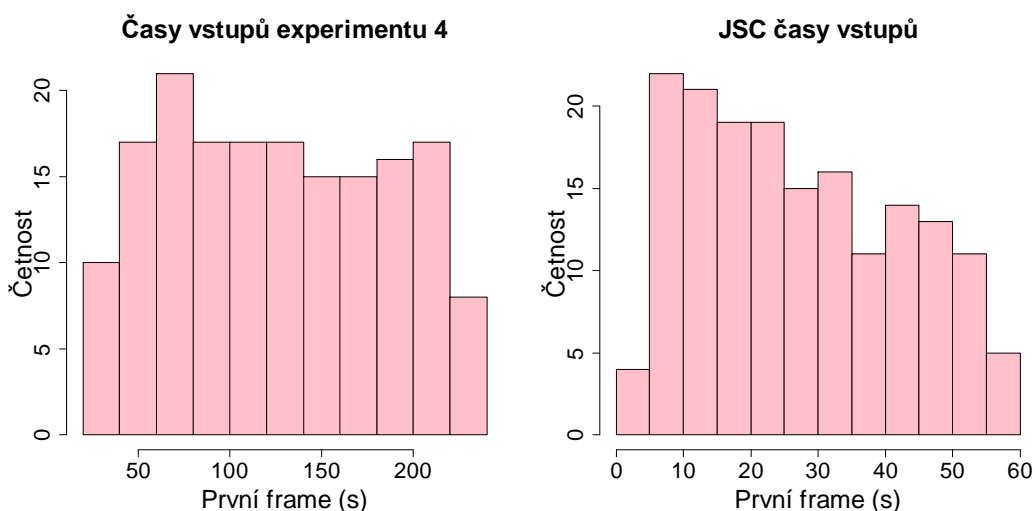
Rozložení souřadnice vstupu (viz Obrázek 36) vykazuje podobný tvar a jeho směrodatná odchylka je o něco nižší než v předchozím případě,  $\sigma_4 = 45,6$ . Vzhledem k směrodatné odchylce dat JSC,  $\sigma_{JSC} = 63,3$  se ale snížením směrodatné odchylky jedná o oddálení od požadovaného rozložení.



Obrázek 36 - Porovnání souřadnic vstupu do snímané oblasti v experimentu 4 a datech JSC

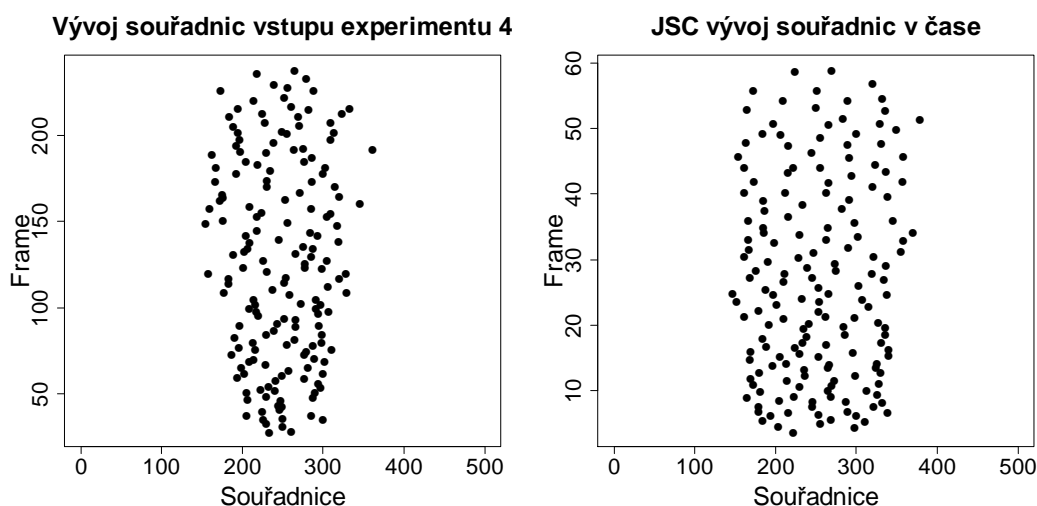
Rozložení času vstupů, které zobrazuje Obrázek 37, vykazuje v tomto způsobu generování minimální až žádnou klesající tendenci. Rozložení vychází velmi blízké rovnoměrnému

rozdělení, což sice naznačuje plynulý průběh a neucpávání vstupního prostoru okolo počátku snímané oblasti, ale neodpovídá tak požadovaným hodnotám podle dat JSC.



Obrázek 37 - Porovnání časů vstupu do snímané oblasti v experimentu 4 a datech JSC

Vývoj souřadnic v experimentu 4 vyšel v porovnání s daty JSC velmi podobně (viz Obrázek 38). Jako u předchozího experimentu byl i zde vývoj méně náhodný, kdy v začátku byly pozorovány vstupní souřadnice v rozmezí jednoho metru a ke konci bylo využíváno až kolem dvou metrů.



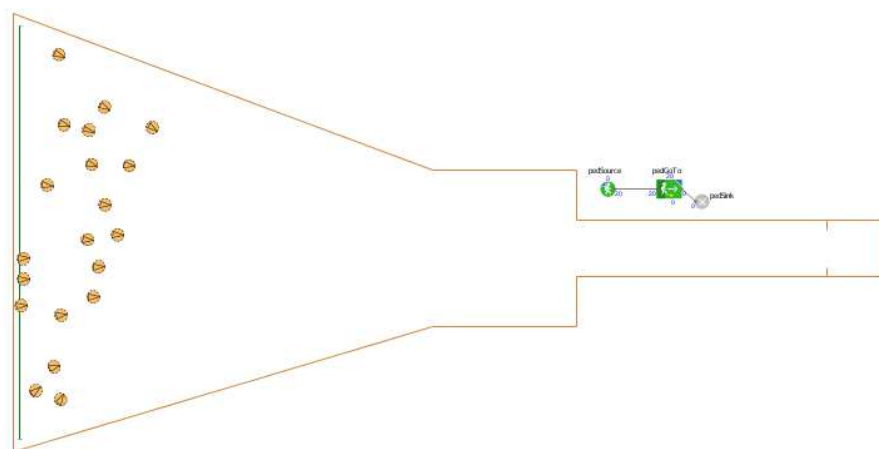
Obrázek 38 - Porovnání vývoje souřadnice vstupu v čase v experimentu 4 a datech JSC

Způsob generování označený číslem 4 vyšel, stejně jako experiment s číslem 3, velmi podobný datům JSC. V intervalech mezi vstupy do snímaného prostoru byly mezi experimenty 4 a 3 jen velmi malé rozdíly, rozložení souřadnice je ve čtvrtém experimentu jen o něco odlišnější od dat JSC, než byla v experimentu 3. Rozložení času vstupu bylo v tomto případě až příliš rovnoměrné

a neodpovídalo tak klesající tendenci, kterou vykazují data JSC. Vývoj souřadnic v čase vyšel velmi podobný datům JSC, ve kterých bylo pozorováno více náhodnosti.

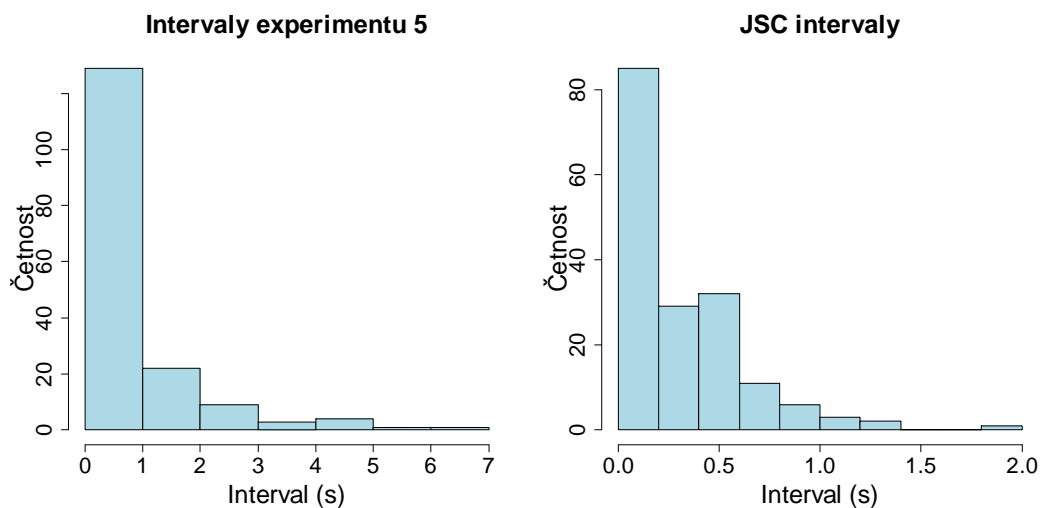
#### 4.2.2.5 Experiment 5

Pátý experiment probíhal stejně jako čtvrtý, ale byla odstraněna štěrbina vedoucí ze vstupní místnosti do snímané části simulace. Účel tohoto způsobu byl eliminovat vliv štěrbiny na procházení lidí, přestože je tato situace v rozporu s pokusy JSC. Agenti v tomto prostředí tedy měli dostatečný prostor pro nabrání požadované rychlosti a zároveň nebyli zpomalováni procházením štěrbinou.

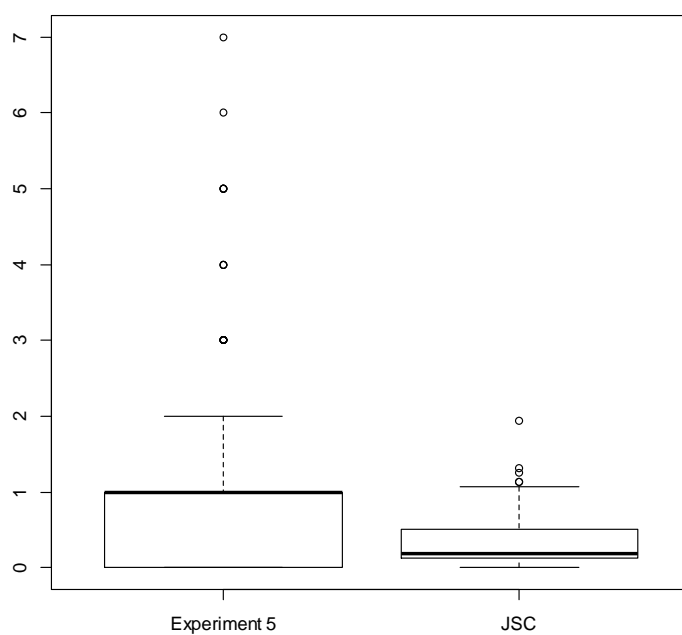


Obrázek 39 - AnyLogic experiment 5

Přesto, že byly pozorovány i velmi dlouhé intervaly (až 7 sekund), je rozložení intervalů mezi příchody v simulaci experimentu 5 velmi podobné příchodům reálných účastníků experimentů v Jülichu a počet pozorování dlouhých intervalů je velmi nízký. Celkový tvar vykazuje velkou podobnost, a většina pozorování je v rozmezí 0 až 2 sekundy, tedy ve stejném rozmezí, jaké mají data JSC. Stejně tak boxplot vykazuje velkou podobnost, díky nulovému dolnímu kvartilu asi největší (spolu se zamítnutým experimentem 2).

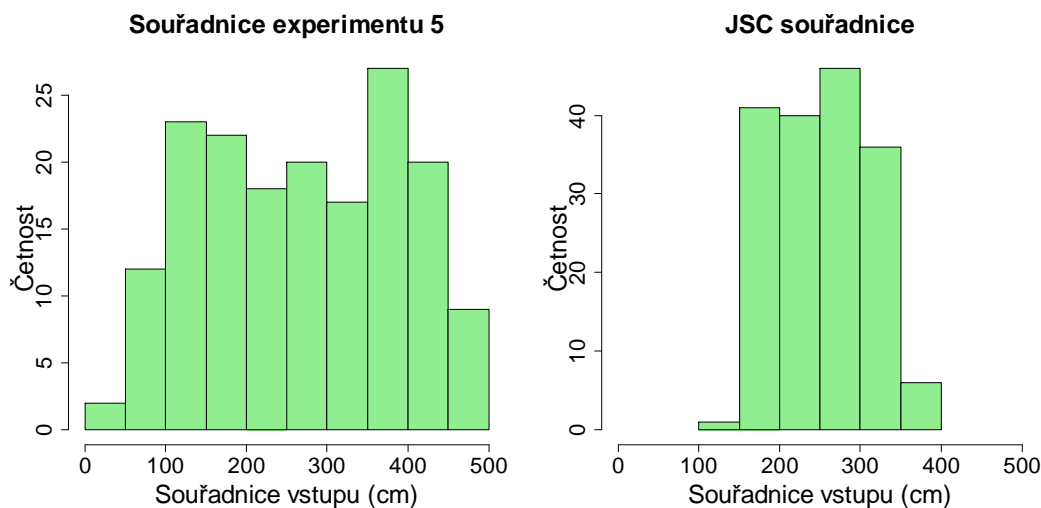


Obrázek 40 - Porovnání intervalů mezi příchody v experimentu 5 a datech JSC



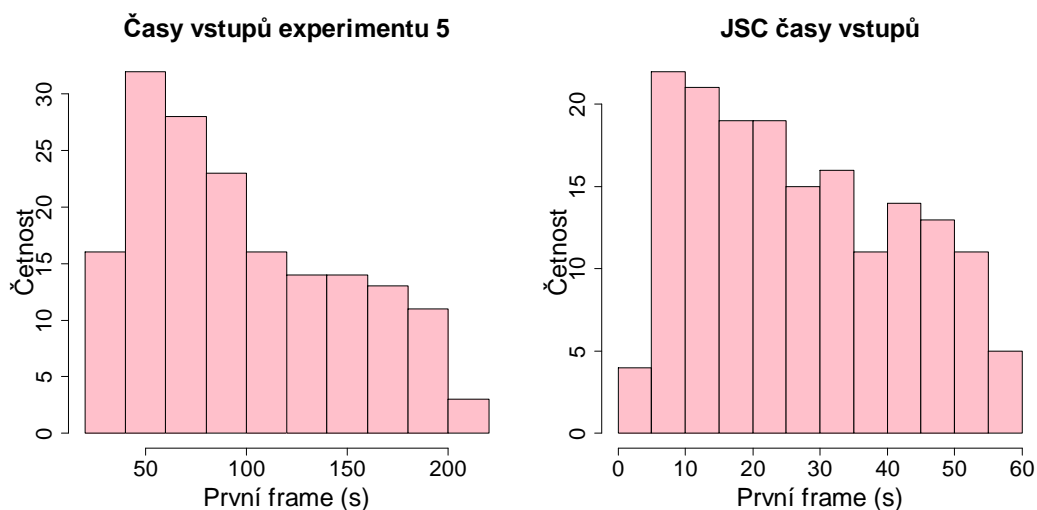
Obrázek 41 - Boxplot rozložení intervalů v experimentu 5 a datech JSC.

Přestože je rozložení vizuálně podobné, bylo při tomto způsobu generování využito agenty 5 metrů, tedy celá šíře vstupní místnosti. Směrodatná odchylka tohoto rozložení vyšla  $\sigma_5 = 120,7$  a v porovnání se směrodatnou odchylkou v datech JSC ( $\sigma_{JSC} = 63,3$ ) je relativně dost vysoká.



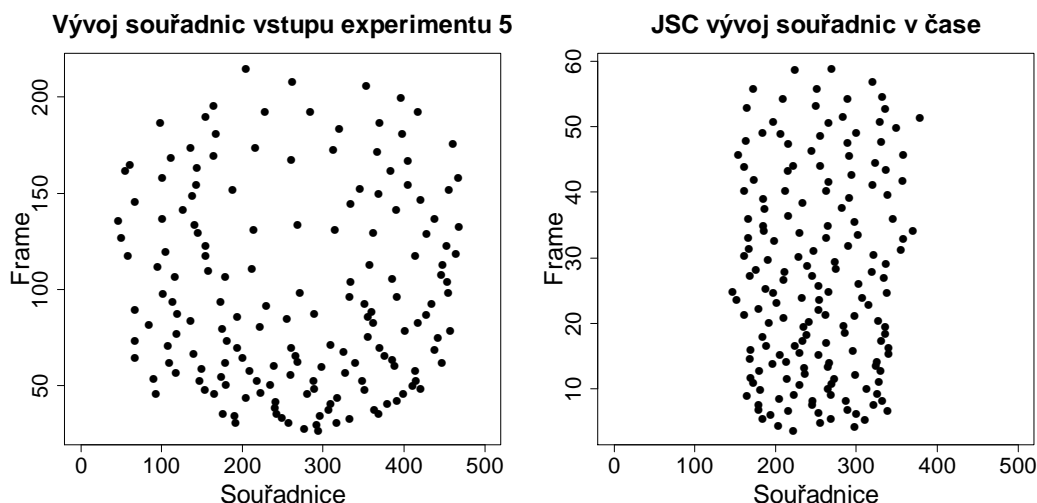
Obrázek 42 - Porovnání souřadnic vstupu do snímané oblasti v experimentu 5 a datech JSC

Rozložení časů vstupu je u experimentu 5 podobné jako u dat JSC, viz Obrázek 43.



Obrázek 43 - Porovnání časů vstupu do snímané oblasti v experimentu 5 a datech JSC

Vývoj souřadnice u pátého experimentu vykazuje podobné chování jako u experimentů předchozích, tedy začíná v užší oblasti a postupně se rozšiřuje. V tomto experimentu bylo rozšiřování velmi rychlé a graf tak rychle přechází do relativně náhodného vývoje v čase, což přibližuje tento vývoj souřadnic datům JSC.



Obrázek 44 - Porovnání vývoje souřadnice vstupu v čase v experimentu 5 a datech JSC

Silnou stránkou tohoto experimentu bylo rozložení intervalů rozestupů, u kterého se sice objevovaly vysoké extrémy, ale s minimálním výskytem. Rozložení vstupní souřadnice je oproti tomu slabší stránkou, jelikož agenti využívaly celý vstupní prostor a směrodatná odchylka dokonce převýšila první, již zamítnutý experiment. Časy vstupů byly opět lepší stránkou tohoto způsobu generování a JSC datům byly velmi podobné. Vývoj vstupní souřadnice v čase pak vykazoval podobnou nahodilost jako data JSC, s mírným náznakem postupného rozšiřování.

#### 4.2.2.6 Zvolený způsob generování

Experimenty 1 a 2 byly po prozkoumání vzhledem k velkým odlišnostem od dat JSC zamítnuty a dále nebyly uvažovány. Experimenty 3, 4 a 5 oproti tomu vycházely podobně, proto bylo třeba rozhodnout, který z nich zvolit. Experimenty 3 a 4 byly vzájemně velmi podobné, proto byly porovnány jako první. Vzhledem k faktu, že experiment 3 vychází z přesného prostředí experimentů JSC byl z těchto dvou zvolen jako vhodnější. Pro rozhodnutí mezi experimenty 3 a 5 byla pomocí nástroje AnyLogic simulována tato prostředí znovu, tentokrát za využití zvýšené rychlosti dle dat JSC (viz 4.2.1). Změna rychlosti přesto nedokázala eliminovat dlouhé intervaly v případě experimentu 5, proto byl jako výchozí zvolen experiment 3, ve kterém se neobjevila žádná hodnota intervalu vyšší než 2 a rozložení souřadnic více odpovídalo datům JSC.



## 5 Výsledky

Z výsledků dat JSC bylo vyzorováno, že nejsilnější vztah s rychlostí jedince má (kromě jeho rychlosti v příštím kroku) průměrná rychlost lidí v jeho okolí, a velmi silný vztah má rychlost a počet lidí v okolí jedince (a to hlavně v okolí dvou až tří metrů). Jeho směr je potom svázán se směrem k cíli a směry okolních lidí (podrobněji viz podkapitola 5.1). Výsledky simulovaných dat některým z těchto korelací odpovídaly, jiné korelace byly dokonce silnější než v datech experimentálních a jiné korelace, které se v experimentálních datech objevily, se v datech simulovaných nevyskytovaly vůbec (podrobněji vysvětluje podkapitola 5.2).

### 5.1 Chování lidí podle reálných dat

Jak je popsáno v kapitole 4.1.3, pro zkoumání chování lidí byla ze získaných dat vygenerována sada featur, které poskytují bližší informace o jednotlivých účastnících experimentu. Pro featury byla následně vytvořena korelační matice Spearmanových korelačních koeficientů a byly zkoumány vzájemné vztahy mezi featurami. Prostředí, ve kterých bylo chování zkoumáno, jsou průchod chodbou jednosměrně a obousměrně a spojení dvou proudů davu v křižovatce typu T. V každém z prostředí byl zkoumán vliv změny určitého parametru prostředí.

Při jednosměrném průchodu chodbou byl zkoumán vliv šířky případného úzkého hrdla na konci chodby. Výsledky ukázaly, že šířka hrdla měla v prostředí velký vliv celkově na rychlost účastníků, jejíž průměrná hodnota se zužováním hrdla klesala. Dále změny tohoto parametru ovlivňovaly počet lidí v okolí jedince, kde tentokrát se zužováním hrdla tyto hodnoty rostly, a ovlivněny byly i změny směru jedince (podrobněji viz podkapitola 5.1.1).

Procházení obousměrnou chodbou bylo rozděleno na dva typy, které se lišily v tom, zda si účastník vybírá stranu opuštění chodby sám, nebo je-li mu přidělena. První případ vykazoval známky organizovaného chování a tvoření proudů, zatímco druhý už kvůli svému principu vycházel o něco chaotičtěji. Průměrné hodnoty rychlosti se lišily jen minimálně, přesto však byly určité korelace pro jednotlivé způsoby silnější (více viz podkapitola 5.1.2).

Třetím typem zkoumaného prostředí byla křižovatka ve tvaru T, kde účastníci přicházeli ze dvou protilehlých stran a spojovali se do třetího směru. V tomto prostředí byly zkoumány vlivy rozdílných velikostí vstupních štěrbin, které dle výsledků mají poměrně velký vliv na rychlosti a zalidněnost prostředí (podrobněji popisuje podkapitola 5.1.3).

### 5.1.1 Průchod jednosměrnou chodbou

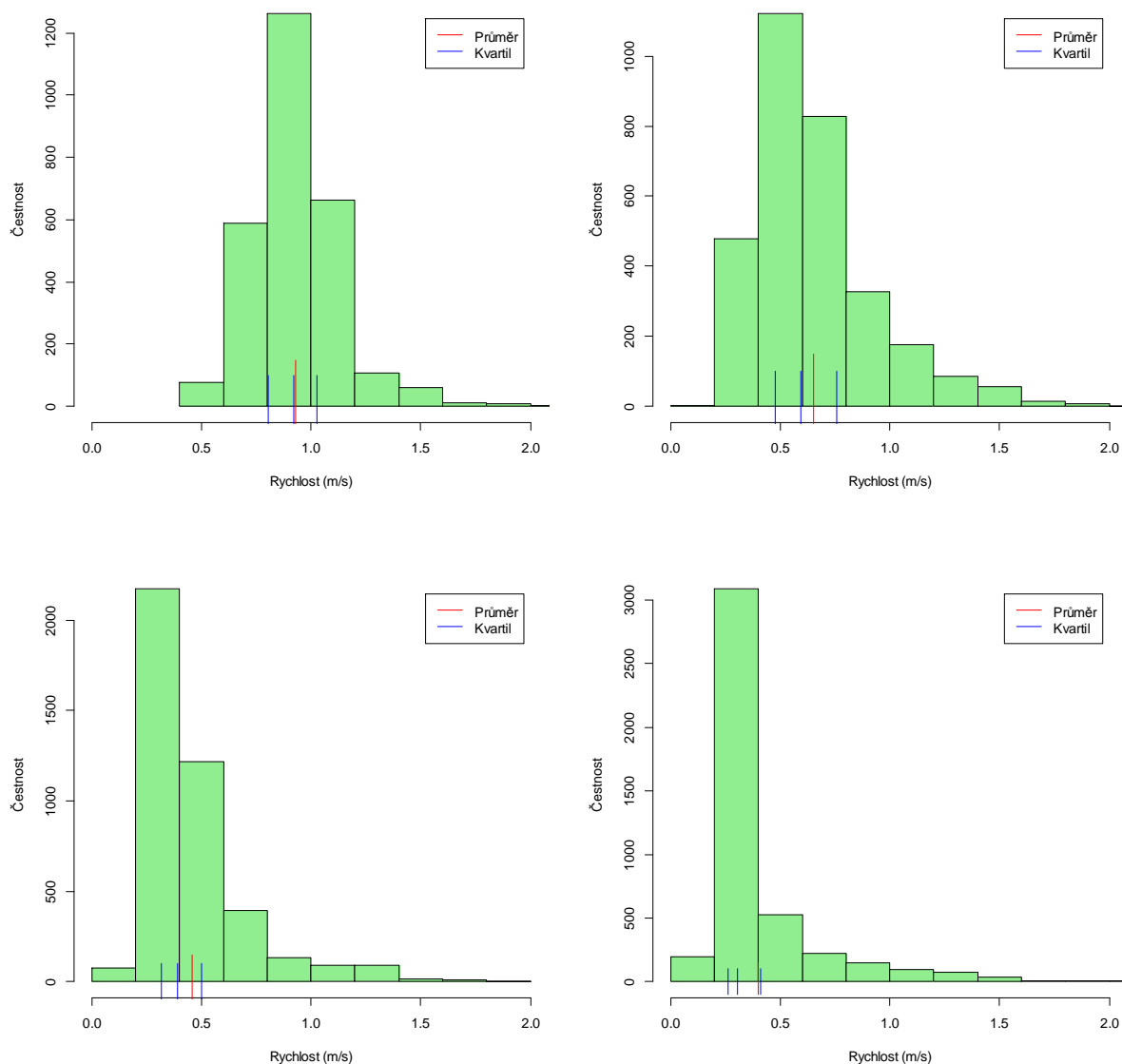
Chování lidí bylo zkoumáno v prostředí průchodu jednosměrnou chodbou o rozměrech 1,8 m vstupní štěrbina, 1,8 m šíře chodby a rozdílnými rozměry šíře případného hrdla na konci chodby, přesněji 1,8 m, tedy bez zúženého hrdla (v textu dále označováno jako U180), 1,2 m (v textu dále označováno jako U120), 0,95 m (označováno jako U095) a 0,7 m (označováno U070). Počty účastníků se v jednotlivých experimentech liší, v U180 procházelo 220 účastníků, v U120 170 účastníků, v U095 159 účastníků a v U070 148 účastníků.

#### 5.1.1.1 Rychlost

Rychlost byla vypočítávána jako vzdálenost pozic mezi jednotlivými navazujícími snímky, v podvzorkovaných datech se tedy jedná o rychlost v jednotkách cm/s. Údaje budou pro přehlednost a lepší představitelnost uváděny v m/s. Histogram znázorňující rychlosti účastníků ukazuje Obrázek 45. Průměrná rychlost  $\bar{v}$  účastníků experimentu na histogramu znázorněná červenou čarou, směrodatná odchylka  $s_v$  a kvartily rychlostí, na obrázku znázorněné modře, měly hodnoty uvedené v tabulce Tabulka 2.

Typ prostředí	$\bar{v}$ (m/s)	$s_v$ (m/s)	$Q_{0,25}$ (m/s)	$Q_{0,5}$ (m/s)	$Q_{0,75}$ (m/s)
U180	0,929	0,198	0,805	0,923	1,02
U120	0,653	0,274	0,477	0,539	0,758
U095	0,456	0,217	0,317	0,39	0,498
U070	0,4	0,267	0,261	0,304	0,408

Tabulka 2 - Průměry, směrodatné odchylky a kvartily rychlostí pro jednotlivá prostředí



**Obrázek 45 - Histogram rychlostí v datech JSC prostředí jednosměrného průchodu chodbou s různými rozměry úzkého hrdla (zleva dolů 1,8 m, 1,2 m, 0,95 m a 0,7 m)**

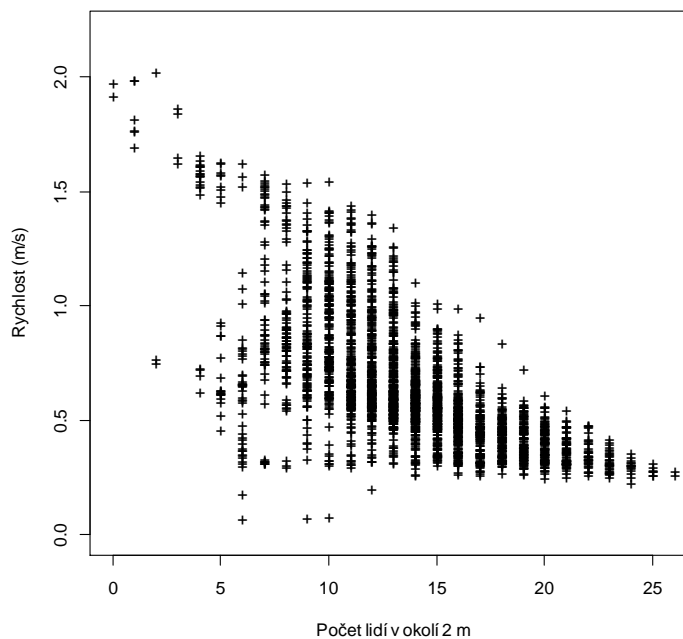
Z těchto hodnot vyplývá, že lidé v prostředích s užším hrdlem se celkově pohybovali výrazně pomaleji. Zatímco v prostředí bez zúženého konce hrdla se lidé průměrně pohybovali rychlostí téměř 1 m/s a čtvrtina z nich dokonce rychleji, v chodbě s úzkým hrdlem 0,7 m, přestože byl účastníků mnohem nižší počet, nedosahovala průměrná rychlost ani poloviny těchto hodnot.

Dále byly zkoumány rychlosti účastníků, kteří vešli do prostředí mezi prvními a měli tedy dostatek prostoru pro volnou chůzi. Dobrovolná volba preferované rychlosti se ukazuje být v rozmezí 1 až 2 m/s.

Featury Rychlost a Budoucí rychlost byly pochopitelně velmi silně korelovány s korelačním koeficientem (dále  $\rho$ ) ve všech případech vyšším než 0,9, tedy s rostoucí rychlostí téměř stejně rostla rychlost v příštím kroku a opačně. Rychlost byla středně silně až silně záporně korelována s featurami ID ( $\rho$  mezi -0,75 a -0,5) a Frame ( $\rho$  mezi -0,6 a -0,35), což naznačuje klesání rychlosti v čase a tedy s přibývajícím počtem lidí v prostředí. Podobně vypovídá korelace rychlosti a počtu lidí v určitém okolí účastníka. Ukazuje se, že čím více lidí je v okolí jedince, tím pomaleji má tendenci jít (viz Tabulka 3 s korelacemi rychlosti a počtu lidí v různě velkých okolích). Hodnoty naznačují, že největší vliv na rychlost jedince má jeho dvoumetrové (viz Obrázek 46) až třímetrové okolí, pro něž jsou hodnoty  $\rho$  ve všech případech mezi nejvyššími. V případě pětimetrového okolí je korelace slabší.

Okolí	U180		U120		U095		U070	
	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti
0,5 m	-0,21	-0,19	-0,2	-0,19	-0,3	-0,3	-0,24	-0,25
1 m	-0,41	-0,39	-0,51	-0,51	-0,51	-0,51	-0,38	-0,39
2 m	-0,62	-0,61	-0,71	-0,74	-0,69	-0,71	-0,53	-0,57
3 m	-0,61	-0,58	-0,7	-0,71	-0,67	-0,69	-0,48	-0,52
5 m	-0,42	-0,38	-0,53	-0,55	-0,54	-0,56	-0,38	-0,38

Tabulka 3 – Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a počtu lidí v okolí.



Obrázek 46 - Rychlost jedince v souvislosti s počtem lidí v blízkém okolí (2 m) v prostředí U120.

Změny uvedených korelací odpovídají změnám osobního prostoru každého jedince. Počet lidí v jednotlivých okolích jedince rostl s klesající šířkou vstupní štěrby (viz Tabulka 4). Většinou, není-li prostředí opravdu přelidněné, v půlmetrovém okolí jedince nenacházel nikdo, nebo maximálně jeden člověk.

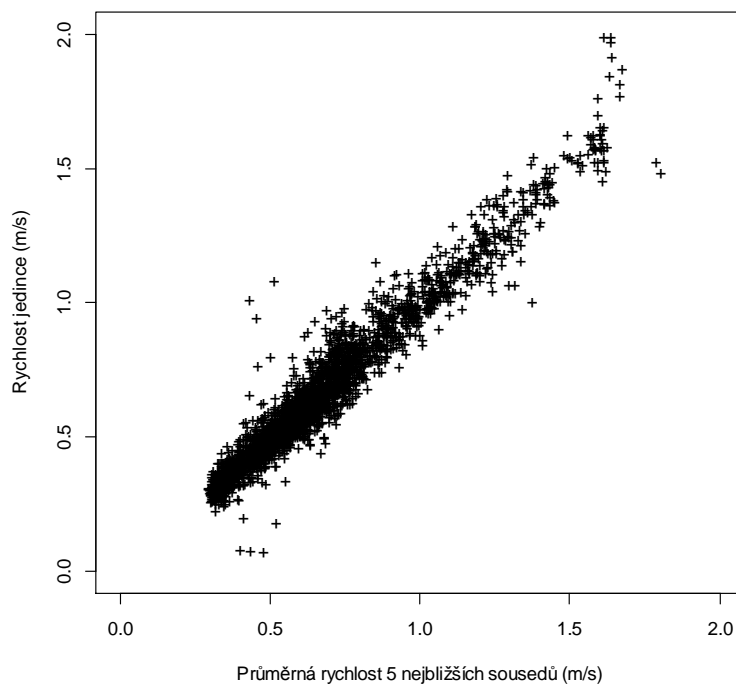
Typ prostředí	$\mu_{0,5m}$	$\mu_{1m}$	$\mu_{2m}$	$\mu_{3m}$	$\mu_{5m}$
<b>U180</b>	0,3	3,6	10,6	16,2	25,3
<b>U120</b>	0,5	4,7	13,7	20,9	31,8
<b>U095</b>	0,6	5,4	15,7	23,8	36,2
<b>U070</b>	0,9	6,2	17,4	26,3	39,4

Tabulka 4 - Průměrné hodnoty počtu lidí v různých okolích jedince a různých prostředích.

Velmi silná korelace se objevila i mezi rychlostí jedince a rychlostí lidí v jeho okolí, viz Tabulka 5, která udává Spearmanův koeficient korelace mezi rychlostí či budoucí rychlostí a průměrnou rychlostí uvedeného počtu nejbližších lidí, případně rychlostí jedince, který je pozorovanému jedinci nejbližší či je mu druhý nejbližší. Tento silný vztah naznačuje, že jedinec má tendenci, případně je nucen, jít takovou rychlostí, jakou se pohybují lidé v jeho okolí. Nejsilnější korelace se zdá být u rychlosti pěti nejbližších jedinců (viz Obrázek 47), ostatní korelace ale nejsou o mnoho slabší. Celkově se na základě těchto hodnot dá tvrdit, že rychlost jedince je rychlostí lidí v jeho okolí významně ovlivněna, a to hlavně v případě zalidněnějších prostředí, což vyplývá ze slabších korelací v prostředí U180.

Počet lidí	U180		U120		U095		U070	
	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti
<b>20</b>	0,84	0,82	0,93	0,92	0,92	0,91	0,85	0,83
<b>10</b>	0,87	0,84	0,95	0,94	0,95	0,94	0,91	0,89
<b>5</b>	0,88	0,85	0,96	0,95	0,96	0,95	0,93	0,91
<b>1. nejbližší</b>	0,82	0,78	0,94	0,92	0,94	0,92	0,89	0,87
<b>2. nejbližší</b>	0,82	0,79	0,94	0,93	0,94	0,92	0,88	0,86

Tabulka 5 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a rychlostí nejbližších lidí.

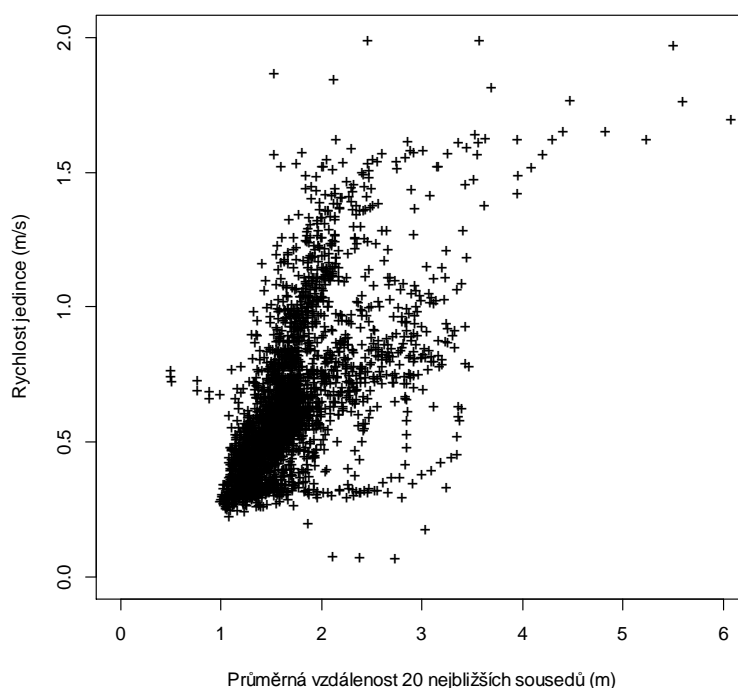


**Obrázek 47 - Rychlost jedince v souvislosti s průměrnými rychlostmi 5 nejbližších jedinců (U120).**

Silně byla rychlost korelována také s průměrnou vzdáleností od určitého počtu nejbližších lidí (viz Tabulka 6). Korelace vycházela kladně, což znamená, že čím větší byla vzdálenost okolních lidí, tím rychleji měl jedinec tendenci se pohybovat. Jinými slovy, účastníci se pohybovali větší rychlostí v řidčeji zaplněném prostoru, a s houstnoucím prostředím zpomalovali. Jedná se tedy vlastně o jinou interpretaci korelace mezi rychlostí a počtem lidí v určitém okolí pozorovaného jedince. Podle výsledných  $\rho$  se zdá, že čím více lidí bereme v potaz, tím více ovlivňují rychlost jedince, tedy jedinec je méně ovlivněn průměrnou vzdáleností 5 nejbližších lidí, než 20 nejbližších lidí (viz Obrázek 48). Vliv vzdálenosti samotného nejbližšího jedince vychází méně významný, vliv vzdálenosti druhého nejbližšího potom o něco významnější.

Počet lidí	U180		U120		U095		U070	
	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti
20	0,59	0,55	0,69	0,7	0,65	0,66	0,5	0,51
10	0,54	0,49	0,61	0,61	0,6	0,6	0,43	0,44
5	0,44	0,40	0,53	0,52	0,55	0,55	0,38	0,38
1. nejblížeší	0,27	0,25	0,23	0,22	0,33	0,32	0,26	0,25
2. nejblížeší	0,34	0,32	0,44	0,44	0,5	0,49	0,32	0,32

Tabulka 6 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a vzdálenosti nejblížeších lidí.



Obrázek 48 - Rychlost jedince v souvislosti s průměrnými vzdálenostmi 20 nejblížeších jedinců U120.

Další silně záporně korelovanou featurou byla vzdálenost do cíle, tedy čím blíže byli účastníci cíli, tím rychleji měli tendenci se pohybovat (s klesající vzdáleností do cíle rostla rychlost). Tato korelace byla pozorována silná u U095, U120 a U180 a slabá v prostředí U070. Dále byly slabě korelovány s rychlostí některé směry, nejspíše vlivem náhody nebo neobjevených faktorů.

### 5.1.1.2 Budoucí směr

Budoucí směr byl vyjádřen dvěma hodnotami (viz kapitola 4.1.3), kosinem úhlu současného směru a směru v příštím snímku, a kosinem úhlu normály současného směru a směru v příštím snímku, tedy obě hodnoty značí změnu směru během sekundy (z jednoho pozorování do dalšího).

První hodnota udává, o kolik se úhel lišil, a druhá udává polovinu, do které se následující směr odchyluje. V dalších analýzách je jako směr uvažována pouze první hodnota.

Budoucí směr vykazoval slabou až středně silnou korelaci s featurou směr k cíli (viz Tabulka 7). To znamená, že čím větší byl cosinus odchylky od cíle, tím větší byl cosinus odchylky současného a budoucího směru a naopak. To ve výsledku naznačuje snahu jedince srovnat svůj směr se směrem do svého cíle. Nejsilnější korelaci vykazuje chodba U180 a se zmenšováním vstupní šterbiny korelace klesá.

Slabou korelaci vykazoval budoucí směr s průměrným směrem lidí v okolí jedince (viz Tabulka 8). Korelace je pochopitelná, jelikož se jedná a prostředí chodby, kde mají všichni jedinci stejný cíl, takže se dá očekávat, že směr pozorovaného jedince a jedinců v jeho okolí bude podobný. Se změnou šíře vstupní šterbiny se korelace prakticky nemění.

Velmi slabá je korelace budoucího směru s budoucími směry okolních lidí (tedy směry okolních lidí v následujícím snímku, vztažené k jejich vlastnímu současnému směru, viz Tabulka 9). Tyto korelace vycházejí nejvýznamnější v případech U180 a U070, zatímco pro U120 a U095 jsou korelace nižší.

	$\rho_{U180}$	$\rho_{U120}$	$\rho_{U095}$	$\rho_{U070}$
<b>Směr k cíli</b>	0,48	0,4	0,36	0,3

Tabulka 7 - Spearmanovy koeficienty korelace budoucího směru a vektoru směru k cíli.

Počet lidí	$\rho_{U180}$	$\rho_{U120}$	$\rho_{U095}$	$\rho_{U070}$
20	0,26	0,27	0,26	0,23
10	0,29	0,28	0,26	0,23
5	0,27	0,26	0,24	0,22
1. nejblíží	0,19	0,2	0,2	0,19
2. nejblíží	0,25	0,19	0,18	0,16

Tabulka 8 - Spearmanovy koeficienty korelace budoucího směru a vektoru průměrného směru okolních lidí.

Počet lidí	$\rho_{U180}$	$\rho_{U120}$	$\rho_{U095}$	$\rho_{U070}$
20	0,17	0,06	0,08	0,13
10	0,2	0,12	0,13	0,2
5	0,22	0,14	0,15	0,21
1. nejblíží	0,17	0,12	0,12	0,21
2. nejblíží	0,15	0,19	0,11	0,2

Tabulka 9 - Spearmanovy koeficienty korelace budoucího směru a vektoru průměrného budoucího směru okolních lidí.



### **5.1.1.3 Další silné korelace**

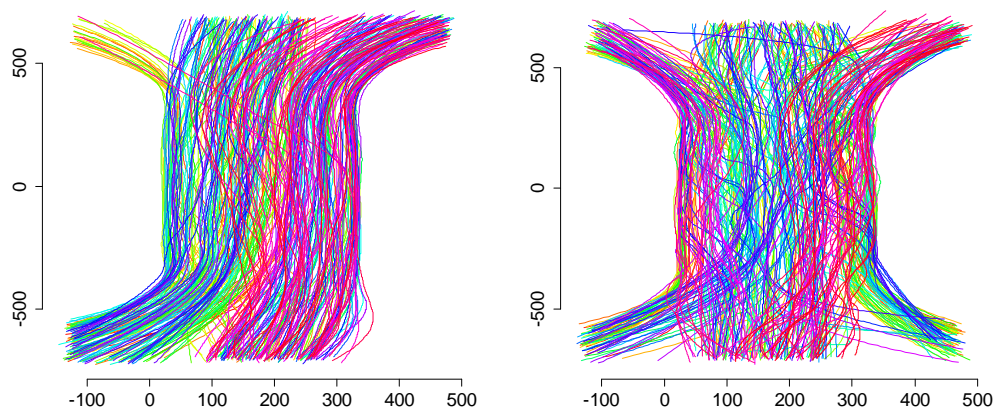
Pokud vykazovala korelaci nějaká featura jednotlivce, pak ji většinou vykazuje i featura davu. Například se jedná o vztah rychlosti a počtu lidí v okolí, kde podobně je korelována s počtem lidí v okolí průměrná rychlost dvaceti, deseti a pěti nejbližších lidí (a případně i nejbližšího či druhého nejbližšího jednotlivce), nebo korelace průměrné rychlosti určitého počtu nejbližších lidí a jejich průměrné vzdálenosti od pozorovaného jedince.

Objevují se však i korelace, které nejsou analogické již zmíněným. Například průměrný směr k určitému počtu nejbližších lidí vykazuje středně silnou až silnou korelaci s vzdáleností do cíle. Korelace je kladná, tedy čím blíže je člověk k cíli (čím menší je vzdálenost), tím menší je kosinus průměrného směru k okolním lidem, což znamená, že tím méně lidí se nachází přímo před pozorovaným jedincem. Tuto korelaci lze vysvětlit tak, že čím blíže je jedinec cíli, tím více lidí před ním opouští pozorovanou oblast a tedy mizí z dat (až je nakonec sám tím, kdo jako příští opustí sledovaný prostor a všichni nejbližší jsou v tuto chvíli za ním). Stejný efekt by samozřejmě měl mít i vstup do pozorované oblasti. Kladná korelace naznačuje, že lidé rychleji do pozorované oblasti přichází (rychleji vyrovnávají směr k nejbližším u vstupu), než jej opouštějí.

Další kladnou korelaci se vzdáleností do cíle má počet lidí v okolí (dle velikosti okolí od velmi slabé po středně silnou), což znamená, že čím blíže je jedinec opuštění sledovaného prostoru, tím méně má ve svém okolí lidí (ze stejného důvodu jako výše u korelace se směrem).

### **5.1.2 Průchod obousměrnou chodbou**

Dalším zkoumaným prostředím byla chodba, kterou jedinci procházeli oběma směry. Zkoumaná chodba měla šířku 3,6 m a účastníci do ní vstupovali štěrbinou o velikosti 1,6 m na obou stranách. Chodbu účastníci opouštěli buď vpravo, nebo vlevo na konci chodby, a to buď dle svého svobodného výběru (tento způsob je dále označován jako BF), nebo byla strana jejich odchodu předem dána (dále označováno jako BO), tj. každý měl podle svého čísla (sudé/liché) přikázáno opustit prostředí na určité straně. V obou způsobech byl do prostředí vpuštěn přibližně stejný počet lidí, přesněji 309 v případě BF a 306 v BO.



Obrázek 49 - Trajektorie jedinců v prostředí obousměrného průchodu chodbou typu BF (vlevo) a BO (vpravo).

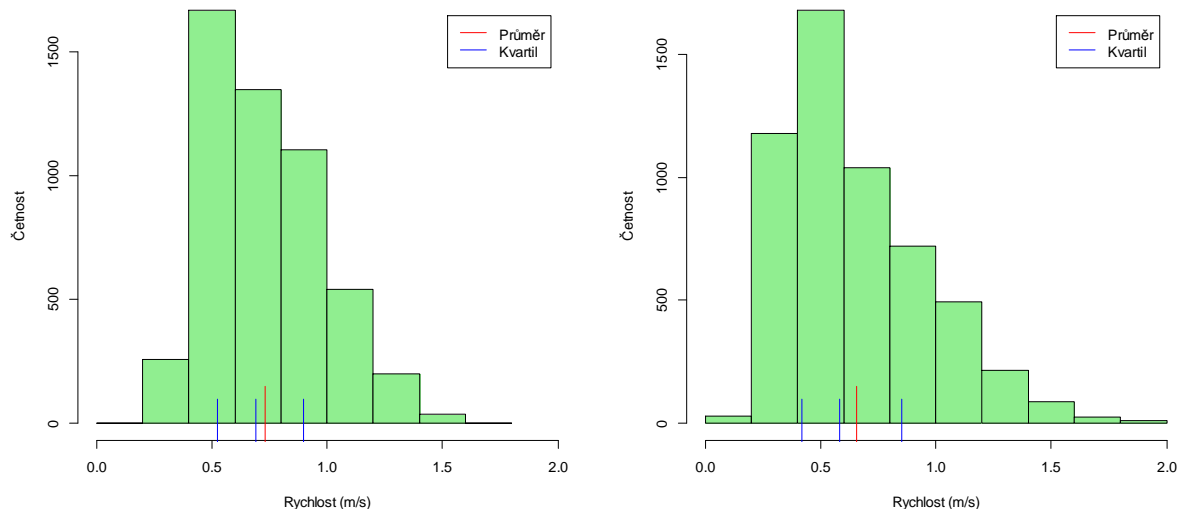
Výsledné trajektorie jedinců v tomto prostředí (viz Obrázek 49) ukazují, že pokud mají lidé svobodnou vůli a mohou se sami rozhodnout, kterou cestou se vydají a kterou stranou opustí chodbu, pak se většinou, až na výjimky, viditelné na obrázku vlevo nahoře, chovají organizovaně a vytvoří proudy, tj. dva pruhy, kde jedním procházejí lidé v jednom směru a opouštějí chodbu na jednu stranu, a druhým procházejí lidé ve směru opačném a chodbu také v opačném směru opouštějí.

### 5.1.2.1 Rychlost

Ukázalo se, že rychlost a korelace rychlosti s ostatními featurami je typem volby cíle ovlivněno. Celkově se jeví možnost svobodné volby jako organizovanější způsob s rychlejším průběhem. Hodnoty průměrné rychlosti, směrodatné odchylky a kvartilů rychlosti uvádí Tabulka 10 a znázorňuje Obrázek 50.

Typ prostředí	$\bar{v}$ (m/s)	$s_v$ (m/s)	$Q_{0,25}$ (m/s)	$Q_{0,5}$ (m/s)	$Q_{0,75}$ (m/s)
BF	0,728	0,247	0,523	0,69	0,898
BO	0,658	0,309	0,419	0,581	0,85

Tabulka 10 - Průměry, směrodatné odchylky a kvartily rychlostí pro jednotlivá prostředí.



Obrázek 50 - Histogram rychlostí v prostředí obousměrného průchodu chodby typu BF (vlevo) a BO (vpravo).

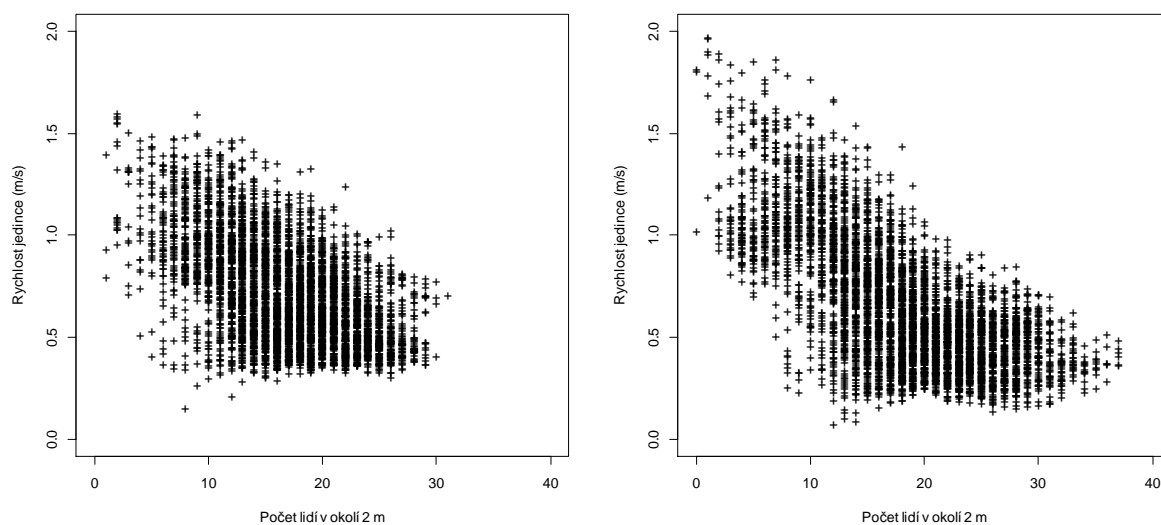
Hodnoty ukazují, že v pokusu, kde měli účastníci svobodnou možnost výběru cílové destinace, byla průměrná rychlost pohybu vyšší, než v případě přikázané destinace, stejně jako pořadové statistiky.

Rychlost byla dle očekávání korelována se stejnými featurami, jako v prostředí jednosměrného průchodu chodbou. První z těchto korelací byla korelace rychlosti a ID, případně korelace rychlosti a snímku, ve kterém je rychlost zkoumána. Obě tyto korelace byly v obou případech téměř stejné, v případě ID  $\rho \approx -0,48$  a u snímku  $\rho \approx -0,38$ . Tyto korelace tedy vycházejí o něco slaběji, než při průchodu jednosměrnou chodbou, což značí, že s přibývajícím časem klesala rychlost méně v prostředí obousměrného průchodu chodbou, než v průchodu jednosměrném.

Rychlost byla dále korelována s počty lidí v různých okolích jedince (viz Tabulka 11, Obrázek 51), opět čím více lidí v okolí, tím menší rychlost jedince. Korelace vychází silnější pro typ BO, tedy méně organizované prostředí, kde si lidé více křížili cesty.

Okolí	BF		BO	
	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti
0,5 m	-0,22	-0,21	-0,48	-0,47
1 m	-0,52	-0,52	-0,69	-0,68
2 m	-0,51	-0,49	-0,64	-0,62
3 m	-0,52	-0,48	-0,59	-0,56
5 m	-0,46	-0,44	-0,5	-0,47

Tabulka 11 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a počtu lidí v okolí.



**Obrázek 51 - Rychlost jedince v souvislosti s počtem lidí v okolí 2 m v prostředí obousměrného průchodu chodbou BF (vlevo) a BO (vpravo)**

I v tomto prostředí byl zkoumán osobní prostor jedince. Průměrný počet lidí v okolí (viz Tabulka 12) se liší pouze lehce. Celkově hodnoty odpovídají pozorování z prostředí jednosměrné chodby, včetně hodnot kvartilů, kde je v obou případech dolní kvartil a medián nulový a horní kvartil roven jedné.

Typ prostředí	$\mu_{0,5m}$	$\mu_{1m}$	$\mu_{2m}$	$\mu_{3m}$	$\mu_{5m}$
<b>BF</b>	0,4	4,5	16,7	30,7	51,6
<b>BO</b>	0,6	5	18,4	33,7	57,3

**Tabulka 12 - Průměrné hodnoty počtu lidí v různých okolích jedince a různých prostředích.**

Vztah mezi rychlostí a rychlostí okolních lidí (viz Tabulka 13) byl i v tomto případě velmi silný, a téměř s jistotou se tedy dá tvrdit, že čím rychleji šli lidé v okolí jedince, tím rychleji šel sám jedinec (a případně naopak). Nejsilnější korelace opět vycházejí pro nejbližších 5 lidí, přestože rozdíly mezi korelacemi jsou malé. Rychlost je více korelována s počtem lidí v okolí v BF, a méně potom v BO.

Počet lidí	BF		BO	
	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti
<b>20</b>	0,83	0,76	0,74	0,68
<b>10</b>	0,89	0,83	0,8	0,74
<b>5</b>	0,92	0,87	0,85	0,8
<b>1. nejbližší</b>	0,9	0,86	0,82	0,77
<b>2. nejbližší</b>	0,86	0,82	0,78	0,73

**Tabulka 13 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a rychlostí nejbližších lidí.**

Mezi další středně silné až silné korelace s rychlostí patří průměrná vzdálenost nejbližších lidí, tedy opět jinak interpretovaný vztah rychlosti a počtu lidí v okolí. Vztah rychlosti a vzdálenosti nejbližších lidí je tentokrát pro BO silnější než pro BF, viz Tabulka 14. Korelace pro BO je dokonce o něco vyšší než korelace stejných featur v prostředí jednosměrné chodby. Zatímco u jednosměrného průchodu chodbou byla pozorována tendence růstu korelačního koeficientu s počtem pozorovaných lidí, v tomto případě vykazují hodnoty s počtem lidí mírný pokles, tedy silnější vztah je v tomto případě mezi rychlostí a vzdáleností pěti nejbližších jedinců, než mezi rychlostí a vzdáleností 20 nejbližších.

Počet lidí	BF		BO	
	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti	$\rho$ k rychlosti	$\rho$ k budoucí rychlosti
20	0,54	0,53	0,69	0,68
10	0,56	0,55	0,72	0,7
5	0,57	0,57	0,74	0,72
1. nejbližší	0,34	0,33	0,56	0,54
2. nejbližší	0,5	0,5	0,68	0,67

Tabulka 14 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a vzdálenosti nejbližších lidí.

Rychlost a vzdálenost do cíle byly opět středně silně korelované. Korelace byla záporná, tedy čím blíže byl jedinec cíli, tím větší byla jeho rychlost. Korelace je v obou typech (BF i BO) téměř stejně silná ( $\rho \approx -0,45$ ).

### 5.1.2.2 Budoucí směr

Korelace budoucího směru byly slabší než ty, které se vyskytovaly v prostředí jednosměrného průchodu chodby. Jednou z nich byla korelace s featurou směr k cíli, kde se vyskytly hodnoty  $\rho = 0,25$  pro BF a  $\rho = 0,16$  pro BO, tedy korelace mnohem slabší, než v případě jednosměrného průchodu. Hodnoty korelací budoucího směru a směru k cíli vyjádřených vzhledem k normále aktuálního směru  $\rho = 0,55$  pro BF a  $\rho = 0,45$  pro BO však vypovídají o středně silném vztahu směru odchýlení (vlevo nebo vpravo) od současného směru a směru odchýlení vektoru směru do cíle.

Korelace mezi budoucím směrem a průměrným směrovým vektorem nejbližších lidí vyšla při vyšším počtu sledovaných lidí slabší pro BO, zatímco v BF je korelace při velkém počtu sledovaných lidí naopak silnější (viz Tabulka 15). V obou případech jsou korelace slabé.

Tabulka 16 uvádí korelační koeficienty vztahu budoucího směru a budoucích směrů nejbližších sousedů. Oproti prostředí jednosměrné chodby vychází korelace v případě BF mnohem silnější než u BO. Výrazný rozdíl mezi BF a BO je v korelaci mezi budoucím směrem a průměrným

budoucím směrem 20 nejbližších jedinců, kde v případě BF vyšel korelační koeficient mnohem vyšší, což poukazuje na již zmíněné organizované chování a tvoření proudů, které v BO kvůli příkázanému místu odchodu z chodby nastat nemůže.

Počet lidí	BF	BO
20	0,31	0,23
10	0,28	0,28
5	0,25	0,28
1. nejbližší	0,22	0,23
2. nejbližší	0,24	0,22

Tabulka 15 - Korelační koeficienty vztahu budoucího směru a vektoru průměrného směru okolních lidí.

Počet lidí	BF	BO
20	0,3	0,07
10	0,42	0,15
5	0,49	0,27
1. nejbližší	0,49	0,32
2. nejbližší	0,42	0,27

Tabulka 16 - Korelační koeficienty vztahu budoucího směru a vektoru průměrného budoucího směru okolních lidí.

### 5.1.2.3 Další silné korelace

Stejně jako v prostředí jednosměrného průchodu chodbou, i zde byly vzájemně korelovány skupinové featury odpovídající featurám jednotlivce (tedy například je-li korelována rychlost a počet lidí v okolí, pak je korelována s počtem lidí v okolí i průměrná rychlost nejbližších lidí apod.). Všechny ostatní korelace, které nejsou analogickým vyjádřením featur jednotlivce a featur davu, jsou víceméně stejné jako korelace v prostředí jednosměrného průchodu chodbou.

### 5.1.3 Křižovatka typu T

Posledním prostředím, které bylo v rámci bakalářské práce vyhodnocováno, je prostředí křižovatky typu T, kde se dva proudy spojují v jeden. Zkoumány byly tři typy tohoto prostředí, které se lišily vstupními štěrbinami na obou stranách, a to 2,4 m (dále v textu označováno T240), 1,5 m (dále T150) a 1,2 m (dále T120). Všechna zmíněná prostředí měla rozměr chodby 2,4 m a bylo do nich vpuštěno 303 účastníků v případě T240, a 305 účastníků v typech T150 a T120.

#### 5.1.3.1 Rychlost

Průměrná rychlost v tomto prostředí se u všech typů pohybovala relativně nízko (viz Tabulka 17 a Obrázek 52), a spolu s ní i kvartily rychlostí. Hodnoty ukazují, že s rostoucí šířkou vstupní štěrbinou rychlost účastníků experimentu klesá, což je způsobeno tím, že větší štěrbinou projde více lidí současně a prostředí je tím celkově zalidněnější, což je pozorovatelné i na počtech lidí v okolí jedince (viz Tabulka 18). Jak je vidět, s rostoucí šířkou vstupní štěrbinou rostou počty lidí v okolí jedince, což znamená zalidněnější prostor. Výrazně (vzhledem k ostatním prostředím) se

lišily kvartily těchto počtů (viz Tabulka 19). Údaje ukazují, že velikost vstupní štěrby výrazně ovlivňuje zalidnění prostředí, které pak výrazně ovlivňuje rychlost.

Typ prostředí	$\bar{v}$ (m/s)	$s_v$ (m/s)	$Q_{0,25}$ (m/s)	$Q_{0,5}$ (m/s)	$Q_{0,75}$ (m/s)
T240	0,462	0,234	0,288	0,391	0,604
T150	0,5	0,244	0,314	0,429	0,646
T120	0,556	0,255	0,357	0,5	0,711

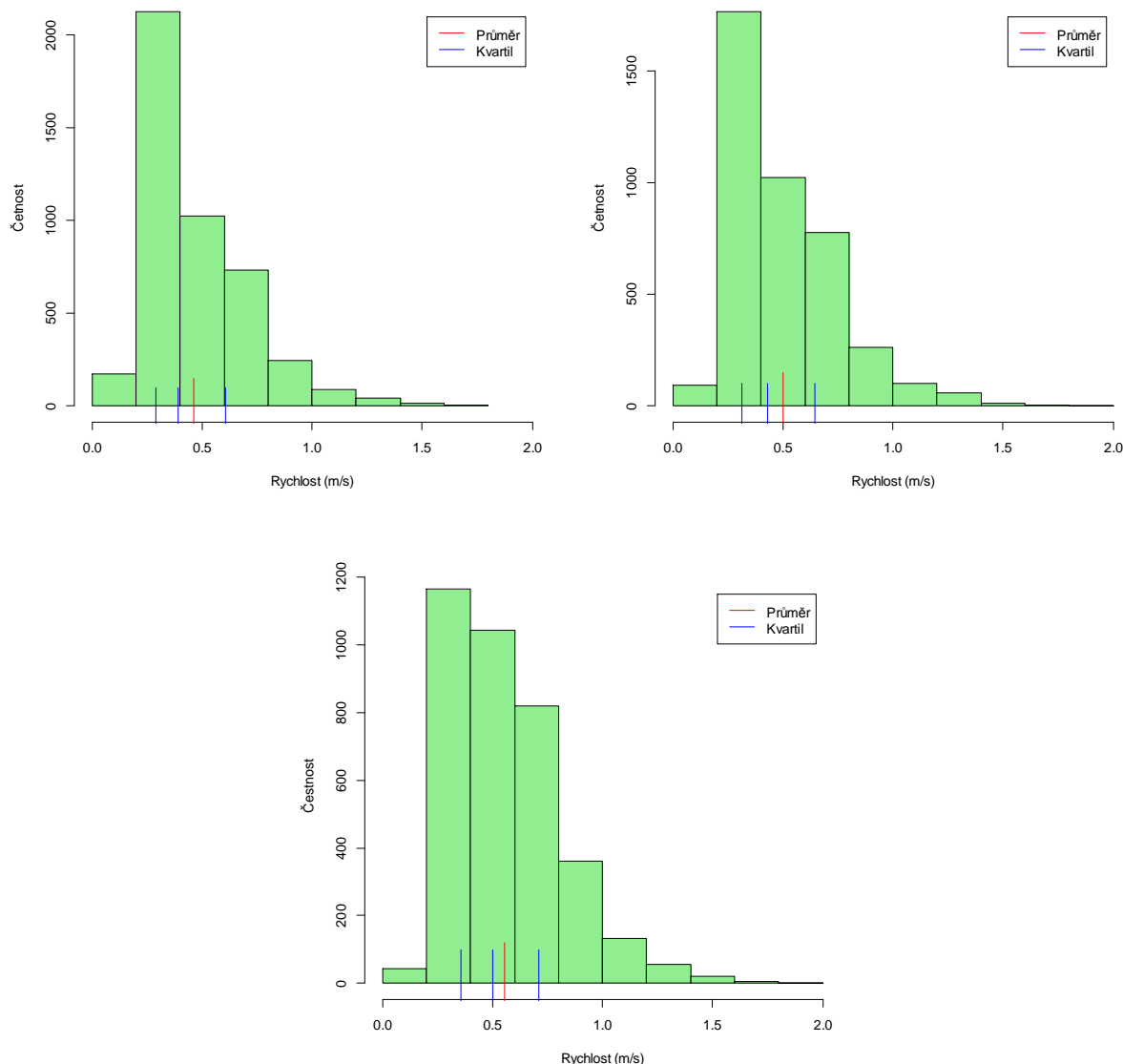
Tabulka 17 - Průměry, směrodatné odchylky a kvartily rychlostí pro jednotlivá prostředí

Typ prostředí	$\mu_{0,5m}$	$\mu_{1m}$	$\mu_{2m}$	$\mu_{3m}$	$\mu_{5m}$
T240	1	6,6	21,3	35,3	58,9
T150	0,8	5,9	19,3	32,2	53,5
T120	0,5	5,1	16,8	28	46,6

Tabulka 18 - Průměrné hodnoty počtu lidí v různých okolích jedince a různých prostředích.

Typ prostředí	$Q_{0,25}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,75}$
T240	0	1	2
T150	0	1	1
T120	0	0	1

Tabulka 19 - Kvartily počtů lidí v 0,5m-okolí jedince.



**Obrázek 52 - Histogram rychlostí v prostředí křižovatky typu T, typ T240 (vlevo nahoře) a T150 (vpravo nahoře) a T120 (dole).**

Korelace rychlosti s ID a snímkem, ve kterém byla rychlost pozorována, byla slabší v případě T240, kde vyšel korelační koeficient  $\rho = -0,29$  pro korelaci rychlosti a ID, a  $\rho = -0,17$  pro rychlost a snímek. V případech T150 a T120 vycházely tyto koeficienty vzájemně podobné, přibližně  $\rho = -0,48$  pro ID a  $\rho = -0,4$  pro snímek. Z těchto hodnot vyplývá, že vztah rychlosti jedince a času byl významnější v typech prostředí s užší vstupní šterbinou.

Tabulka 20 ukazuje korelaci rychlosti s počty lidí v okolí jedince. Vztah není tak silný, jako v ostatních zkoumaných prostředích, korelace jsou velmi slabé nebo slabé. Opět platí, že s rostoucím počtem lidí v okolí jedince klesá jeho rychlost. Korelace se nezdá být výrazně



ovlivněna typem prostředí (šířkou vstupní štěrbiny) ani velikostí zkoumaného okolí, kde je větší změna pozorována pouze u T240.

Okolí	T240		T150		T120	
	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti
0,5 m	-0,31	-0,28	-0,31	-0,25	-0,22	-0,17
1 m	-0,39	-0,34	-0,39	-0,32	-0,38	-0,3
2 m	-0,32	-0,24	-0,36	-0,26	-0,38	-0,27
3 m	-0,2	-0,14	-0,28	-0,19	-0,34	-0,24
5 m	-0,17	-0,11	-0,24	-0,18	-0,34	-0,27

Tabulka 20 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a počtu lidí v okolí.

Velmi silnou korelaci opět vykazovala rychlost a průměrná rychlost určitého počtu nejbližších lidí v okolí jedince (viz Tabulka 21), tedy čím vyšší byla průměrná rychlost okolních lidí, tím vyšší byla i rychlost samotného jedince. Korelace vycházela velmi silná ve všech typech prostředí a hodnoty korelačních koeficientů se zdají být typem prostředí, a tedy šířkou vstupní štěrbiny, neovlivněny.

Počet lidí	T240		T150		T120	
	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti
20	0,85	0,85	0,84	0,85	0,82	0,82
10	0,91	0,91	0,9	0,9	0,88	0,88
5	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,9
1. nejbližší	0,89	0,87	0,89	0,87	0,87	0,85
2. nejbližší	0,88	0,86	0,87	0,85	0,86	0,84

Tabulka 21 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a rychlostí nejbližších lidí.

Rychlost dále vykazovala slabou až středně silnou korelaci s průměrnou vzdáleností nejbližších lidí v okolí (viz Tabulka 22). Hodnoty dle jednotlivých typů se, stejně jako ostatní doposud zkoumané korelační koeficienty, příliš neliší, a stejně jako pro počty lidí v okolí, i tyto hodnoty vycházejí méně významné než u ostatních prostředí.

Počet lidí	T240		T150		T120	
	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti
20	0,36	0,31	0,37	0,29	0,37	0,28
10	0,42	0,36	0,44	0,36	0,43	0,34
5	0,43	0,38	0,46	0,39	0,44	0,36
1. nejbližší	0,31	0,28	0,33	0,27	0,28	0,22
2. nejbližší	0,4	0,36	0,41	0,36	0,41	0,35

Tabulka 22 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a vzdáleností nejbližších lidí.

Silnější korelace než u předchozích prostředí se objevily mezi rychlostí a vzdáleností do cíle. Korelační koeficienty byly záporné, což značí vyšší rychlosti jedinců s klesající vzdáleností. Tento vztah byl výraznější v případě T240 a téměř identický v případech T150 a T120.

	T240		T150		T120	
	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti	$\rho_k$ rychlosti	$\rho_k$ budoucí rychlosti
<b>Vzdálenost do cíle</b>	-0,51	-0,59	-0,46	-0,56	-0,45	-0,56

Tabulka 23 - Spearmanovy koeficienty korelace rychlosti/budoucí rychlosti a vzdálenosti nejbližších lidí.

### 5.1.3.2 Budoucí směr

Korelace pozorované v tomto prostředí s budoucím směrem odpovídaly korelacím ostatních prostředí. První pozorovanou korelací byla korelace budoucího směru a směru k cíli, kde byly objeveny korelační koeficienty, které uvádí Tabulka 24. Z hodnot vyplývá, že směr odbočení a směr k cíli vyjádřené vůči normále k aktuálnímu vektoru pohybu byly silně korelované, i když při vyjádření přímo k aktuálnímu směru jsou korelace jen slabé. Korelace jsou silnější v prostředích s menší vstupní šterbinou.

	$\rho_{T240}$	$\rho_{T150}$	$\rho_{T120}$
<b>Směr k cíli</b>	0,29	0,32	0,35
<b>Směr k cíli k normále</b>	0,59	0,63	0,67

Tabulka 24 - Spearmanovy koeficienty korelace směru k cíli (k normále) a budoucího směru jedince (k normále).

Korelace mezi budoucím směrem a průměrným směrem okolních lidí byla středně silná, a vzhledem ke kladným korelačním koeficientům platí, že čím více se současný směr jedince odchyloval od průměrného směru lidí v jeho okolí, tím více se v příštím kroku sám odchýlil. Korelace se v tomto případě nezdá být ovlivněna ani typem prostředí, ani počtem pozorovaných jedinců.

Počet lidí	$\rho_{T240}$	$\rho_{T150}$	$\rho_{T120}$
<b>20</b>	0,41	0,42	0,41
<b>10</b>	0,45	0,44	0,44
<b>5</b>	0,44	0,43	0,42
<b>1. nejbližší</b>	0,45	0,45	0,43
<b>2. nejbližší</b>	0,45	0,49	0,48

Tabulka 25 - Spearmanovy koeficienty korelace budoucího směru a vektoru průměrného směru okolních lidí.

Silnější vycházely oproti ostatním prostředím korelace mezi budoucím směrem jednotlivce a průměrným budoucím směrem lidí v blízkém okolí jedince. Korelace je silná i pro stejné featury vyjádřené k normále směru, tedy silně korelována je jak velikost odchylky, tak její směr.

Z toho lze vyvodit, že v tomto prostředí byl směr jednotlivce velmi podobný směru okolních lidí. Kromě nižší hodnoty v případě T120 při počtu pozorovaných lidí 20 (což je způsobeno nejspíše nižší hustotou zalidnění prostředí z důvodu užší vstupní štěrbiny) není korelace typem prostředí příliš ovlivněna. Silněji se korelace jeví u pěti a deseti pozorovaných lidí, než u 20. Budoucí směr nejbližšího jedince a druhého nejbližšího jedince je pak s budoucím směrem pozorovaného účastníka středně silně korelován.

Počet lidí	$\rho_{T240}$	$\rho_{T150}$	$\rho_{T120}$
20	0,45	0,41	0,25
10	0,63	0,63	0,57
5	0,65	0,67	0,65
1. nejbližší	0,59	0,62	0,61
2. nejbližší	0,55	0,58	0,57

Tabulka 26 - Korelační koeficienty vztahu budoucího směru a vektoru průměrného budoucího směru okolních lidí.

### 5.1.3.3 Další silné korelace

Ani v tomto prostředí nebyly pozorovány korelace jiné a s jiným významem, než v prostředí jednosměrné chodby.

## 5.2 Porovnání výstupu reálných dat a SW AnyLogic

V následující části práce jsou porovnávány charakteristiky dat JSC s výstupem simulace ze simulačního nástroje AnyLogic. Porovnáváno je vždy jedno z prostředí (jednosměrná chodba, obousměrná chodba, křižovatka typu T), a simulace jsou rozděleny na defaultní nastavení a nastavení, při kterém je preferovaná rychlost agenta zvýšena na hodnoty vypočítané z dat JSC.

### 5.2.1 Průchod jednosměrnou chodbou

V této části práce je porovnáváno prostředí jednosměrné chodby U120, tedy o rozměrech 1,8 m šířky chodby a vstupní štěrbiny a 1,2 m šířky zúženého hrdla na konci chodby. Byly provedeny dva typy simulace, z nichž první vycházel z nezměněného defaultního nastavení agenta v nástroji AnyLogic (tento typ je dále v textu označován jako AL-DU) a v druhém typu byla upravena preferovaná rychlost agenta na vyšší hodnoty odpovídající pozorování z dat JSC (dále v textu AL-RU).

Před ostatním porovnáváním bylo nejdříve provedeno srovnání trvání simulace, tedy čas, který uplynul od vstupu prvního účastníka/agenty do doby, kdy poslední účastník/agent prostředí opustil. Experiment JSC trval 79 sekund. Simulace AL-DU trvala mnohem déle, celých 342 sekund, a simulace AL-RU proběhla během 163 sekund.

Toto pozorování ukazuje, že celkově byla simulace v obou případech pomalejší, než experiment JSC, a to přes to, že rychlosti byly v AL-RU dokonce vyšší, než v datech získaných od JSC. AL-DU oproti tomu vykazoval rychlost agentů velmi nízkou, přestože defaultně je preferovaná rychlost agenta nastavena na 0,5 až 1 m/s, průměrná rychlost byla 0,152 m/s (podrobněji v podkapitole 5.2.1.1). Korelace rychlosti s ostatními featurami sledovaly podobné trendy jako v datech JSC, tedy tam, kde korelace v datech JSC byly silnější, byly silnější i v datech simulovaných, i když v některých případech s o hodně nižší hodnotou korelačního koeficientu (podrobněji popsáno v podkapitole 5.2.1.2).

Velké rozdíly byly pozorovány v odchylkách od současného směru, a to hlavně pro budoucí směr a směr k cíli. Obě tyto odchylky byly v simulovaných datech vysoké a neodpovídaly tak datům JSC (podrobněji v podkapitole 5.2.1.1). Korelace budoucího směru a směru k cíli se v případě AL-DU ukázala být velmi podobná, ostatní korelace budoucího směru už ale vycházely odlišně. Často docházelo ke slabé korelaci směrů vyjádřených k normále, tj. hodnot, které určují orientaci odchylky (podrobněji v podkapitole 5.2.1.2).

Podobnost oproti tomu vykazovaly počty lidí v okolí jedince, kde v simulaci AL-DU vycházely hodnoty velmi blízké. Počty lidí v okolí v simulaci AL-RU byly však nízké, a výrazně se tak od experimentálních dat lišily (podrobněji v podkapitole 5.2.1.1).

### **5.2.1.1 Porovnání featur**

Nejdříve bylo provedeno porovnání souhrnných featur. První byly porovnány rychlosti. Za defaultního nastavení simulace AL-DU se rychlosti pohybovaly hodně nízko (průměrně 0,152 m/s), zatímco při nastavení rychlosti na vyzporovanou preferovanou rychlost, tedy AL-RU, se rychlosti posunuly výrazně nahoru a průměrná hodnota se posunula na 0,968 m/s. Ani jedna z hodnot není odpovídající průměrné hodnotě získané z dat JSC, tj. 0,653 m/s, přesto je blíže hodnota AL-RU.

Budoucí směr se v simulovaných datech průměrně odchyloval v obou případech přibližně o 30°, zatímco odchylka v datech JSC činila průměrně 2° 9'. Také se v simulovaných datech objevily hodnoty kosinu této odchylka téměř rovné -1, což znamená naprosté otočení směru (o 180°) během jedné sekundy. Tím byl také ovlivněn průměr, proto Tabulka 27 uvádí pořadové statistiky. V případě AL-RU jsou hodnoty o něco podobnější, ale stále vysoké.

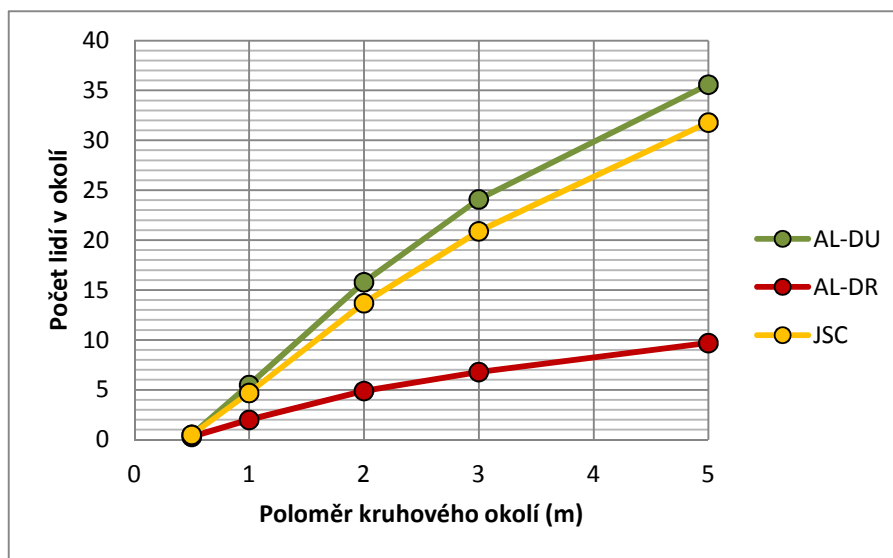
Směr	AL-DU			AL-RU			JSC		
	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>
Kosinus	0,78592	0,94367	0,98942	0,91784	0,99092	0,99912	0,99872	0,99965	0,99993
Stupně	38° 12'	19° 19'	8° 21'	23° 23'	7° 44'	2° 24'	2° 54'	1° 31'	0° 41'

Tabulka 27 - Kvartily rozložení budoucího směru v porovnání s JSC v průchodu jednosměrnou chodbou U120.

Počty lidí v okolí jedince (viz Tabulka 28) vycházely naopak podobněji v případě AL-DU. Celkově byly počty sice o něco vyšší, než v datech JSC, ale jedná se o minimální rozdíl a obzvláště v malých okolích jsou výsledné hodnoty opravdu velmi podobné (v případě půlmetrového okolí dokonce totožné). Simulace AL-RU oproti tomu vykazuje počty lidí v okolích jedince v porovnání s JSC nízké. Vývoj počtů při změnách velikostí sledovaného okolí jedince ukazuje, že zatímco AL-RU má k datům JSC skutečně daleko, AL-DU je jim naopak velmi blízko, viz Obrázek 53.

	AL-DU				AL-RU				JSC			
	μ	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	μ	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	μ	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>
Okolí 0,5 m	0,5	0	0	1	0,3	0	0	0	0,5	0	0	1
Okolí 1 m	5,5	4	5	7	2	1	2	3	4,7	4	5	6
Okolí 2 m	15,8	12	15	20	4,9	3	4	7	13,7	11	13	16
Okolí 3 m	24,1	18	24	31	6,8	5	6	8	20,9	17	21	25
Okolí 5 m	35,6	26	36	45	9,7	8	10	12	31,8	26	32	38

Tabulka 28 - Počty lidí v kruhových okolích jedince, porovnání JSC a simulací AnyLogic.



Obrázek 53 - Porovnání vývoje počtu lidí v okolí podle velikosti okolí v simulacích a v datech JSC.

Relativně velké rozdíly byly pozorovány také u směru k cíli (viz Tabulka 29), tedy velikosti odchylky současného směru a směru vektoru, který směřuje k pozici, na které účastník opustil experiment (nebo agent simulaci). Zatímco v datech JSC byly odchylky velmi nízké, u obou simulací se vyskytovaly poměrně nízké hodnoty kosinů (a tedy větší odchylky). AL-DU

vykazuje nižší hodnotu dolního kvartilu, převedeno na stupně 33° 58', což znamená, že 75% lidí mělo odchylku ve stupních nižší než tato hodnota. Medián a horní kvartil vyšel o něco podobněji JSC v případě AL-RU, kde medián vyšel převeden na stupně 9° 30' a horní kvartil 3° 13', tedy v této simulaci se polovina lidí odchylovala od směru k cíli maximálně o 9° 30' a 25% lidí nemělo odchylku větší, než 3° 13'. V porovnání s daty JSC jsou však všechny tyto odchylky vysoké.

Směr	AL-DU			AL-RU			JSC		
	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,5</sub>	Q <sub>0,75</sub>
Kosinus Stupně	0,83892 33° 58'	0,95866 16° 32'	0,99235 7° 5'	0,68138 47° 3'	0,9863 9° 30'	0,99843 3° 13'	0,99666 4° 41'	0,99908 2° 27'	0,99982 1° 5'

Tabulka 29 - Kvartily rozložení směru k cíli (velikosti odchylky od současného směru), porovnání simulovaných dat a dat JSC.

### 5.2.1.2 Porovnání korelací

V první řadě byly porovnávány korelace s rychlostí. Jako první byl porovnán vztah rychlosti a budoucí rychlosti, který byl v případě dat JSC velmi silný s korelačním koeficientem  $\rho = 0,97$ . Data získaná ze simulací pomocí nástroje AnyLogic vykazovala korelaci slabší, a to  $\rho = 0,89$  pro AL-RU a dokonce  $\rho = 0,54$  v případě AL-DU. Tyto hodnoty vypovídají o menší (v případě AL-DU výrazně) souvislosti budoucí rychlosti a rychlosti současné. Stejně jako klesala rychlost v čase při experimentech JSC, i při simulaci v nástroji AnyLogic vznikla korelace mezi rychlostí a snímkem, ve kterém je rychlost počítána (viz Tabulka 30). Tato korelace vycházela jen lehce slaběji než v datech JSC.

Stejně jako v experimentech JSC, i v simulovaných datech byla korelace mezi počty lidí v okolí jedince a jeho rychlostí záporná. V případě dat simulovaných se však jedná o korelace slabší, zejména v případě AL-DU. Simulace AL-RU je až na pětmetrové okolí s daty JSC spíše srovnatelná, viz Tabulka 30.

Korelace mezi průměrnou rychlostí lidí v okolí jedince a rychlostí jeho samotného byly v simulovaných datech mnohem nižší než v datech JSC, kde je korelace téměř stoprocentní. Nejvyšší hodnota korelačního koeficientu byla v simulovaných datech  $\rho = 0,62$  (AL-RU, 5 nejbližších lidí) a nejnižší hodnota byla  $\rho = 0,3$  (AL-RU, 20 nejbližších lidí). Celkově jsou hodnoty vyšší (a tím podobnější datům JSC) v případě AL-RU, ale ani tak nedosahují takové síly korelace, jaké v tomto případě dosahovaly v datech JSC.

Korelace průměrné vzdálenosti nejbližších lidí a rychlosti jedince odpovídala datům JSC méně v případě AL-DU, kde byly většinou hodnoty korelačních koeficientů mnohem nižší a vztah byl tedy méně významný. Simulace AL-RU na druhé straně datům JSC hodnotami svých

korelačních koeficientů odpovídala, a až na průměrnou vzdálenost 20 nejbližších lidí byly hodnoty podobné.

	Rychlost AL-DU	Rychlost AL-RU	Rychlost JSC
<b>Budoucí rychlost</b>	0,54	0,89	0,97
<b>Frame</b>	-0,41	-0,42	-0,57
<b>Počet lidí v okolí 0,5 m</b>	-0,22	-0,41	-0,5
<b>Počet lidí v okolí 1 m</b>	-0,22	-0,6	-0,71
<b>Počet lidí v okolí 2 m</b>	-0,3	-0,56	-0,7
<b>Počet lidí v okolí 3 m</b>	-0,31	-0,41	-0,53
<b>Počet lidí v okolí 5 m</b>	-0,26	-0,12	-0,5
<b>Průměrná rychlost 20 nejbližších jedinců</b>	0,44	0,3	0,93
<b>Průměrná rychlost 10 nejbližších jedinců</b>	0,47	0,47	0,95
<b>Průměrná rychlost 5 nejbližších jedinců</b>	0,49	0,62	0,96
<b>Rychlost nejbližšího jedince</b>	0,35	0,55	0,94
<b>Rychlost druhého nejbližšího jedince</b>	0,4	0,54	0,94
<b>Průměrná vzdálenost 20 nejbližších jedinců</b>	0,3	0,22	0,69
<b>Průměrná vzdálenost 10 nejbližších jedinců</b>	0,27	0,47	0,61
<b>Průměrná vzdálenost 5 nejbližších jedinců</b>	0,26	0,57	0,53
<b>Vzdálenost nejbližšího jedince</b>	0,27	0,48	0,23
<b>Vzdálenost druhého nejbližšího jedince</b>	0,3	0,54	0,44

Tabulka 30 - Korelace různých featur s rychlostí v datech JSC a ve výstupu simulací AnyLogic.

Dalšími porovnávanými korelacemi byly korelace s budoucím směrem jedince (viz Tabulka 31). Ty byly pro směr k cíli v případě simulovaných dat silnější než v případě dat JSC, zejména v případě AL-RU, kde se ale také objevila nejmenší korelace mezi směry vyjádřenými k normále, které určují orientaci odchylky. Korelace v případě AL-DU byla lehce vyšší, než korelace v datech JSC, ale velmi podobná.

Korelace s průměrnými směry okolních lidí opět vycházela nejvýznamnější pro AL-RU simulaci, přestože orientace vektorů nebyla korelována téměř vůbec. Korelace v AL-DU vycházela o něco slabší, ale i tak stále silnější, než v experimentech JSC.

Velmi slabě byl v experimentálních datech korelován s budoucím směrem průměrný budoucí směr okolních lidí. Tento vztah se sice objevil i v simulovaných datech, v obou simulacích ale korelace těchto směrů vyjádřených k normále vycházela téměř nulová, což znamená, že orientace budoucího směru neměla s orientací budoucích směrů okolních lidí téměř žádný vztah.

	Budoucí směr ( k normále) AL-DU	Budoucí směr ( k normále) AL-RU	Budoucí směr ( k normále) JSC
<b>Směr k cíli</b>	0,45 (0,52)	0,74 (0,34)	0,4 (0,48)
<b>Průměrný směr 20 nejbližších jedinců</b>	0,42 (0,49)	0,54 (0,08)	0,27 (0,26)
<b>Průměrný směr 10 nejbližších jedinců</b>	0,41 (0,49)	0,56 (0,09)	0,28 (0,28)
<b>Průměrný směr 5 nejbližších jedinců</b>	0,4 (0,47)	0,58 (0,12)	0,26 (0,27)
<b>Směr nejbližšího jedince</b>	0,34 (0,36)	0,57 (0,16)	0,2 (0,24)
<b>Směr druhého nejbližšího jedince</b>	0,32 (0,35)	0,56 (0,09)	0,19 (0,2)
<b>Průměrný budoucí směr 20 nejbližších jedinců</b>	0,04 (-0,01)	0,17 (0)	0,06 (0,03)
<b>Průměrný budoucí směr 10 nejbližších jedinců</b>	0,09 (-0,03)	0,27 (-0,01)	0,12 (0,1)
<b>Průměrný budoucí směr 5 nejbližších jedinců</b>	0,12 (-0,03)	0,41 (-0,01)	0,14 (0,21)
<b>Budoucí směr nejbližšího jedince</b>	0,17 (-0,01)	0,41 (-0,01)	0,12 (0,19)
<b>Budoucí směr druhého nejbližšího jedince</b>	0,15 (-0,01)	0,39 (0,01)	0,11 (0,14)

Tabulka 31 - Korelace různých featur s budoucím směrem v datech JSC a výstupu simulací AnyLogic.

### 5.2.2 Průchod obousměrnou chodbou

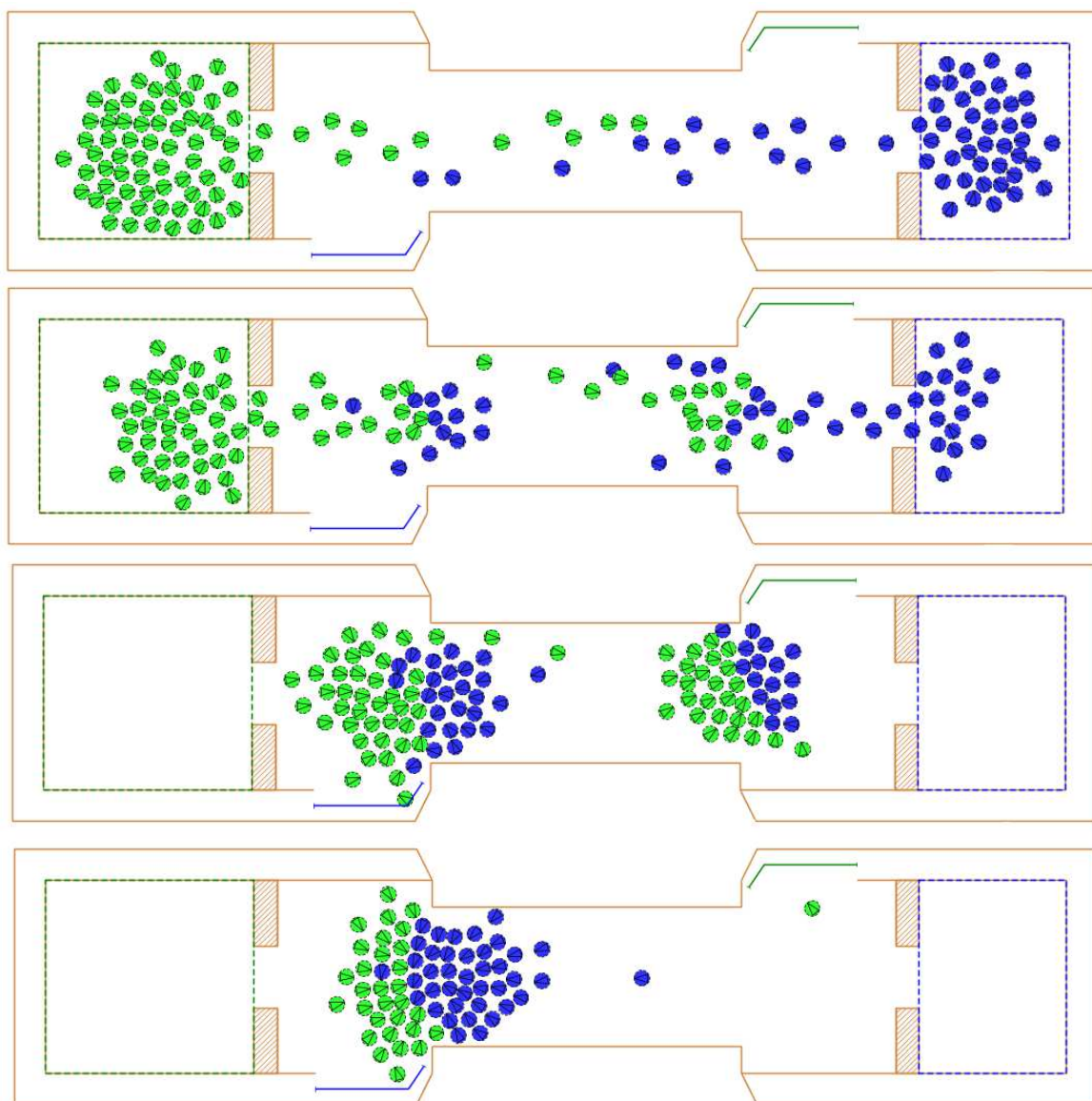
Předmětem porovnávání v této podkapitole je chování davu v prostředí jednoduché chodby při obousměrném průchodu. Pro porovnání byla zvolena chodba o rozměrech 3,6 m šíře chodby a 1,6 m šíře vstupních štěrbin a porovnávána byla možnost svobodné volby cíle.

Simulace prostředí neprobíhala podle předpokladů už při startu simulace, kdy se od agentů dalo očekávat organizovanější chování a případné vytvoření podobných proudů jako v případě dat JSC. Takové chování se v simulaci neobjevilo a všichni agenti se snažili procházet prostředkem chodby a chaoticky se jeden druhému vyhýbali. Prostředí v nástroji AnyLogic bylo z tohoto důvodu lehce upraveno ve snaze uměle vytvořit proudy agentů, přesto ale bez přikázaných cest, pouze přikázáním cíle (agenti stále mohli libovolně využít celý prostor chodby, ale jejich cílem byla pouze jedna ze stran chodby). Při použití tohoto způsobu proběhla simulace rychleji, přesto ale nebylo pozorováno očekávané tvoření proudů.

Velmi brzy docházelo při simulaci z důvodu tohoto chaotického chování k ucpání chodby (viz Obrázek 54) a tím k výraznému zpomalení průběhu. Zatímco experiment provedený v JSC trval celkem 80 sekund od vstupu prvního účastníka do odchodu posledního, data získaná simulací vykazují délku simulace 1 753 sekund, tedy téměř půl hodiny, ve srovnání s daty JSC je simulace více než dvacetkrát pomalejší. Svůj vliv na délku simulace samozřejmě má preferovaná rychlost agenta, která je defaultně nastavena na 0,5 až 1 m/s. I tak by ale samotná pomalejší rychlost agenta neměla ovlivnit délku simulace tak výrazně. Proto lze, i na základě grafického znázornění průběhu simulace, přisuzovat tuto délku ucpávání prostředí.



Jak je vidět na obrázku průběhu simulace (viz Obrázek 54), agenti v simulovaném prostředí zůstávali v ucpané situaci i přes to, že v jejich okolí byla volná cesta vedoucí do jejich cíle (například v pravé části chodby v obrázku snímaném v čase  $t=180s$ ). Všichni agenti se v této situaci snaží dostat do bodu, který leží na konci chodby ve středu její šířky, a nemění svůj dočasný cíl, dokud se do tohoto místa nedostanou (tento dočasný cíl nebyl agentům přidělen, ale byl automaticky vytvořen při průběhu simulace dle implementace modelu v nástroji AnyLogic). Neupuštění od tohoto dočasného cíle v případě, kdy existuje volná cesta do cíle, se jeví značně nelogické.

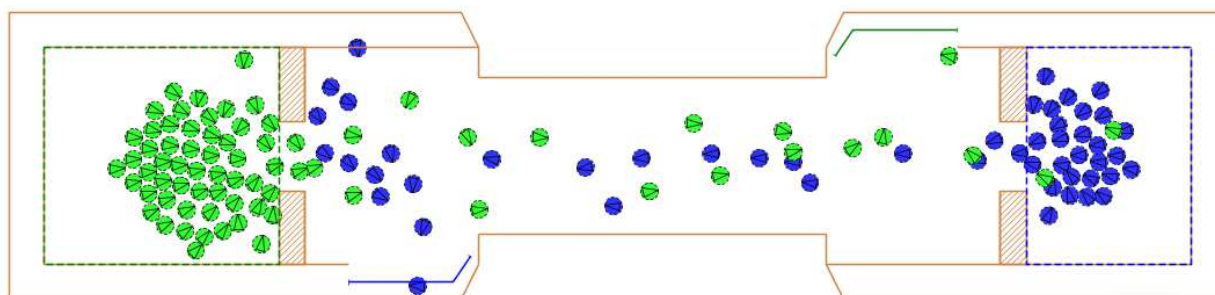


Obrázek 54 - Průběh simulace obousměrného průchodu chodbou pomocí AnyLogic. Snímáno v časech  $t=10 s$ ,  $t=45 s$ ,  $t=180 s$  a  $t=366 s$ .

Simulace byla provedena s úpravou preferované rychlosti agenta, tedy místo 0,5 až 1 m/s byla preferovaná rychlost nastavena na 1,4 až 1,7 m/s. Bohužel byly při této rychlosti v simulaci

sledovány značné nedostatky (viz Obrázek 55). Prvním z nich byla až příliš silná setrvačnost agenta, respektive pomalé brzdění a otáčení směru. Jak je vidět na obrázku, agenti se v důsledku tohoto nedostatku ocitli mimo očekávaný prostor cesty, v některých případech dokonce agenty jejich setrvačnost dostala až do vstupní místnosti na opačném konci chodby. Agenti se tak vzhledem k brzdě dráze jeví spíše jako vozidla (a i pro tato vozidla by brzdě dráha o délce několika metrů byla nepřiměřená rychlosti pohybu). Druhým nedostatkem, nejspíše spojeným a částečně způsobeným předchozím nedostatkem, bylo ignorování kolizí, které se objevovalo jak mezi agenty vzájemně, tak mezi agenty a prostředím (přestože nedocházelo k opuštění prostředí, agenti se ocitli graficky znázornění ve zdech). Obě ignorované kolize jsou na obrázku patrné.

Přestože tato simulace byla pouze o 20 sekund pomalejší než experiment JSC, nebylo s ní vzhledem k velkým nedostatkům při simulování dále počítáno a nebyla porovnávána s daty z experimentu JSC.



Obrázek 55 - Průběh simulace obousměrného průchodu chodbou ( $t=25s$ ) s viditelnými nedostatky simulace.

Vzhledem k rychlému a dlouhému přelidnění a ucpání prostředí byla průměrná rychlost agentů výrazně nižší než rychlost účastníků v experimentu JSC. Zatímco tyto účastníci se pohybovali průměrně rychlostí 0,728 m/s, rychlost agentů v simulaci byla průměrně 0,044 m/s. Přestože byla nižší rychlost očekávána z důvodů nízké preferované rychlosti agenta vycházející z defaultního nastavení AnyLogic, jedná se rychlost příliš nízkou, přibližně 17krát nižší, než preferovaná rychlost (zatímco u dat JSC je průměrná rychlost pouze dvakrát nižší než preferovaná). Počty lidí v okolí vyšly naopak výrazně vyšší (viz Tabulka 32).

	AL-B				JSC			
	$\mu$	$Q_{0,25}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,75}$	$\mu$	$Q_{0,25}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,75}$
Okolí 0,5 m	2,3	1	2	4	0,4	0	0	1
Okolí 1 m	10,2	7	11	14	4,5	3	5	6
Okolí 2 m	32	24	32	41	16,7	13	17	21
Okolí 3 m	52,3	44	54	64	30,7	25	32	37
Okolí 5 m	66,6	62	70	84	51,6	43	54	63

Tabulka 32 - Počty lidí v kruhových okolicích jedince, porovnání JSC a simulací AnyLogic (AL-B).

I při porovnávání korelací featur byly objeveny značné rozdíly (viz Tabulka 33). V simulovaných datech byl pozorován pouze slabý vztah mezi současnou rychlostí a rychlostí v příštím snímku. Čas nehrál při vývoji rychlosti téměř žádnou roli, zatímco v datech JSC rychlost s časem experimentu klesala. Vztah počtu lidí v okolí a rychlosti se zdá být celkově slabší (jen v případě 0,5 m okolí je vztah silnější). Podobně je slabší vztah pozorován i u průměrné vzdálenosti okolních lidí. Velmi slabě vychází oproti datům JSC vztah rychlosti a průměrné rychlosti lidí v okolí jedince.

	Rychlost AL-B	Rychlost JSC
<b>Budoucí rychlost</b>	0,38	0,95
<b>Frame</b>	-0,01	-0,38
<b>Počet lidí v okolí 0,5 m</b>	-0,34	-0,22
<b>Počet lidí v okolí 1 m</b>	-0,39	-0,52
<b>Počet lidí v okolí 2 m</b>	-0,38	-0,51
<b>Počet lidí v okolí 3 m</b>	-0,34	-0,52
<b>Počet lidí v okolí 5 m</b>	-0,22	-0,46
<b>Průměrná rychlost 20 nejbližších jedinců</b>	0,33	0,83
<b>Průměrná rychlost 10 nejbližších jedinců</b>	0,36	0,89
<b>Průměrná rychlost 5 nejbližších jedinců</b>	0,37	0,92
<b>Rychlost nejbližšího jedince</b>	0,23	0,9
<b>Rychlost druhého nejbližšího jedince</b>	0,24	0,86
<b>Průměrná vzdálenost 20 nejbližších jedinců</b>	0,38	0,54
<b>Průměrná vzdálenost 10 nejbližších jedinců</b>	0,38	0,56
<b>Průměrná vzdálenost 5 nejbližších jedinců</b>	0,36	0,57
<b>Vzdálenost nejbližšího jedince</b>	0,22	0,34
<b>Vzdálenost druhého nejbližšího jedince</b>	0,31	0,50

Tabulka 33 - Korelace různých featur s rychlostí v datech JSC a výstupu simulací AnyLogic.

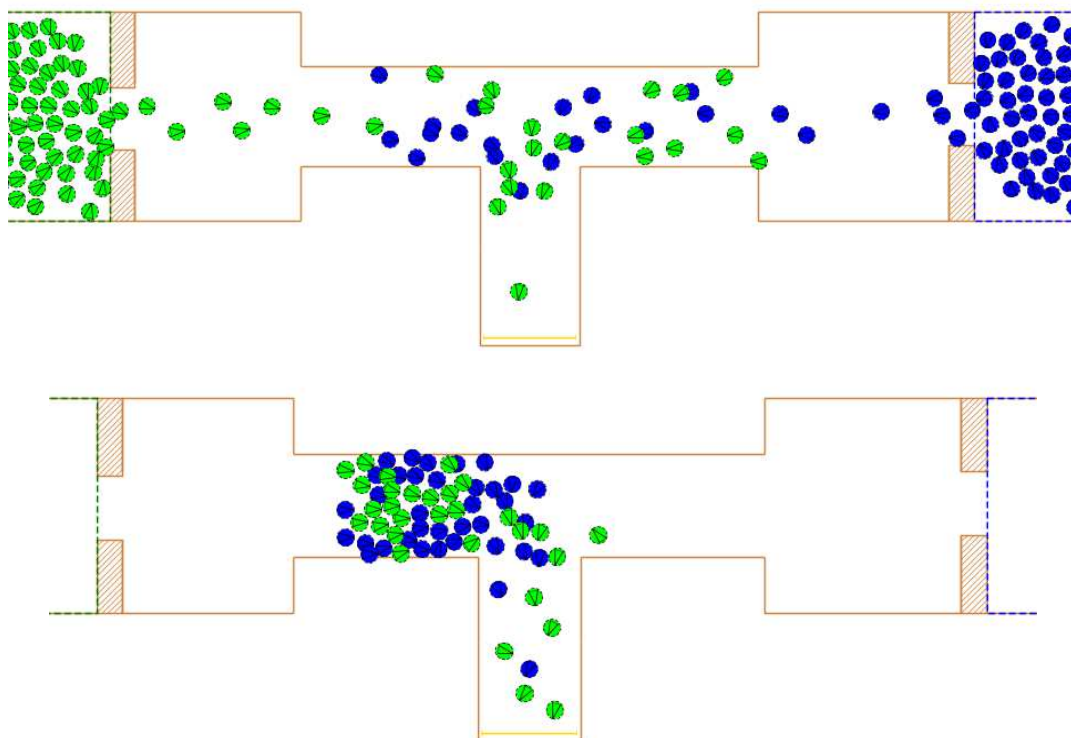
Budoucí směr měl v případě simulovaných dat velmi slabé korelace s jakýmkoli featurami. Slabě byl záporně korelován s počty lidí v okolí a kladně se vzdálenostmi okolních lidí. Neobjevila se však žádná výrazná korelace budoucího směru s jinými featurami vyjadřujícími směr.

### 5.2.3 Křižovatka typu T

Pro porovnání chování v prostředí spojení dvou davů v křižovatce typu T bylo vybráno prostředí T150, tj. křižovatka T s chodbou o šířce 2,4 m a vstupními šterbinami 1,5 m. Na rozdíl od průchodu obousměrnou chodbou nedocházelo v tomto prostředí k ucpávání, přesto přetrvávaly problémy při nastavení vyšších rychlostí agenta, tj. ignorování kolizí a nerealistická

setrvačnost agenta, kvůli které se agenti dostávali do protější chodby, tedy zcela mimo svou cestu (Obrázek 56). Vzhledem k tomuto pozorování nebyla simulace s vyšší rychlostí dále brána v úvahu a porovnávána byla pouze simulace s defaultním nastavením rychlosti.

Délka simulace byla s délkou experimentu JSC v podobném poměru jako u jednosměrného průchodu chodbou. Experiment trval 86 sekund a simulace 308 sekund, což je vzhledem k nižším rychlostem pochopitelné.



Obrázek 56 - Průběh simulace spojení davů v křižovatce T pomocí nástroje AnyLogic v časech  $t=18$  s a  $t=176$  s při zvýšené rychlosti agenta.

Rychlost víceméně odpovídala pozorováním z jednosměrného průchodu chodbou. Agenti se průměrně pohybovali rychlostí 0,176 m/s, zatímco účastníci JSC experimentu 0,499 m/s. Stejně jako v předchozích případech nejde z důvodů nižší defaultní preferované rychlosti očekávat srovnatelný výsledek. Velmi podobně oproti tomu vycházely počty lidí v okolí jedince (viz Tabulka 34), které byly v případě simulovaných dat jen o málo vyšší než v případě dat experimentálních.

	AL-T				JSC			
	$\mu$	$Q_{0,25}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,75}$	$\mu$	$Q_{0,25}$	$Q_{0,5}$	$Q_{0,75}$
Okolí 0,5 m	0,8	0	1	1	0,6	0	0	1
Okolí 1 m	5,9	4	6	7	5,9	4	6	8
Okolí 2 m	19,3	15	19	24	18,4	12	19	25
Okolí 3 m	32,2	24	32	41	29,9	21	30	39
Okolí 5 m	53,5	46	56	64	48,2	37	49	61

Tabulka 34 - Počty lidí v kruhových okolích jedince, porovnání JSC a simulací AnyLogic (AL-T).

Korelace featury rychlost s dalšími featurami ukazuje Tabulka 35. V některých případech se objevily korelace silnější (počet lidí v okolí, vzdálenost od okolních lidí), v ostatních byly korelace slabší. Výrazně slabší korelace je opět pozorována u budoucí rychlosti, která je v datech experimentálních vždy s rychlostí korelována s korelačním koeficientem vyšším než 0,9. Stejně tak byla korelace mnohem slabší u vztahu rychlosti a rychlostí okolních lidí. Jen lehce slabší pak byla korelace rychlosti a snímku (Frame).

	Rychlost AL-T	Rychlost JSC
<b>Budoucí rychlost</b>	0,71	0,95
<b>Frame</b>	-0,3	-0,4
<b>Počet lidí v okolí 0,5 m</b>	-0,47	-0,31
<b>Počet lidí v okolí 1 m</b>	-0,53	-0,39
<b>Počet lidí v okolí 2 m</b>	-0,52	-0,36
<b>Počet lidí v okolí 3 m</b>	-0,44	-0,28
<b>Počet lidí v okolí 5 m</b>	-0,36	-0,24
<b>Průměrná rychlost 20 nejbližších jedinců</b>	0,62	0,84
<b>Průměrná rychlost 10 nejbližších jedinců</b>	0,68	0,9
<b>Průměrná rychlost 5 nejbližších jedinců</b>	0,69	0,92
<b>Rychlost nejbližšího jedince</b>	0,57	0,87
<b>Rychlost druhého nejbližšího jedince</b>	0,58	0,87
<b>Průměrná vzdálenost 20 nejbližších jedinců</b>	0,57	0,37
<b>Průměrná vzdálenost 10 nejbližších jedinců</b>	0,58	0,44
<b>Průměrná vzdálenost 5 nejbližších jedinců</b>	0,59	0,46
<b>Vzdálenost nejbližšího jedince</b>	0,53	0,33
<b>Vzdálenost druhého nejbližšího jedince</b>	0,6	0,41

Tabulka 35 - Korelace různých featur s rychlostí v datech JSC a výstupu simulací AnyLogic.

Budoucí směr byl v simulaci i v datech JSC záporně korelován s počty lidí v okolí, viz Tabulka 36, tedy čím více lidí v okolí, tím menší hodnota kosinu odchylky budoucího a současného směru, a tím tedy větší odchylka. Jinými slovy v zalidněnějším prostředí se lidé pohybovali méně přímočaře. Korelace se směrem k cíli mnohem slabší pro vyjádření k normále u simulovaných dat. Průměrné směry vycházely v simulovaných datech podobně korelované s budoucím směrem jako v datech JSC, průměrné budoucí směry okolních lidí oproti tomu vycházely velmi nevýznamné. U simulovaných dat se dále objevila silnější korelace mezi budoucím směrem a rychlostí jedince, která se v případě dat JSC nejeví tak významná.

	Budoucí směr ( k normále) AL-T	Budoucí směr ( k normále) JSC
Směr k cíli	0,22 (0,27)	0,32 (0,63)
Průměrný směr 20 nejbližších jedinců	0,29 (0,43)	0,42 (0,53)
Průměrný směr 10 nejbližších jedinců	0,35 (0,48)	0,44 (0,44)
Průměrný směr 5 nejbližších jedinců	0,37 (0,48)	0,43 (0,35)
Směr nejbližšího jedince	0,34 (0,37)	0,45 (0,14)
Směr druhého nejbližšího jedince	0,3 (0,34)	0,49 (0,18)
Průměrný budoucí směr 20 nejbližších jedinců	0,07 (-0,01)	0,41 (0,58)
Průměrný budoucí směr 10 nejbližších jedinců	0,12 (-0,02)	0,63 (0,7)
Průměrný budoucí směr 5 nejbližších jedinců	0,15 (-0,02)	0,67 (0,74)
Budoucí směr nejbližšího jedince	0,18 (-0,04)	0,62 (0,66)
Budoucí směr druhého nejbližšího jedince	0,17 (0,01)	0,58 (0,6)
Počet lidí v okolí 0,5 m	-0,25 (0)	-0,12 (0,01)
Počet lidí v okolí 1 m	-0,24 (0)	-0,14 (-0,04)
Počet lidí v okolí 2 m	-0,23 (-0,01)	-0,28 (-0,02)
Počet lidí v okolí 3 m	-0,19 (0)	-0,3 (-0,06)
Počet lidí v okolí 5 m	-0,14 (0)	-0,15 (-0,14)
Rychlost	0,36 (0)	0,2 (0,06)

Tabulka 36 - Korelace různých featur s budoucím směrem v datech JSC a výstupu simulací AnyLogic.

### 5.3 Shrnutí výsledků

Zkoumání chování účastníků experimentů JSC přineslo několik poznatků. V první řadě jde o souvislost rychlosti se stavem okolí jedince. Zde se ukázalo, že rychlost nejvíce (nepočítáme-li rychlost v příštím kroku) souvisí s rychlostí lidí v jeho okolí (s rostoucí rychlostí okolních lidí roste rychlost jedince). Na druhém místě jsou přibližně stejně (středně silně až silně) s rychlostí korelovány počty lidí v okolí jedince (s rostoucím počtem klesá rychlost) a vzdálenost nejbližších sousedů (s klesající vzdáleností klesá rychlost).

Se stavem okolí jedince vždy souvisel i jeho příští směr. Často byla nejvýraznější souvislost se směrem k cíli, kde s rostoucím odchýlením se od cíle rostlo odchýlení se od současného směru. Stejně tak odpovídaly i orientace odchylek. Slabá korelace příštího směru a průměrného směru blízkých sousedů (opět včetně orientací odchylek) tendenci srovnávání směru se svým okolím jen naznačuje.

Hodnoty počtu lidí v okolí jedince se v různých prostředích lišily. Obecně lze tvrdit, že v okolí o poloměru 0,5 m se jen výjimečně nacházel nějaký člověk a hodnoty v 1m okolí se pohybovaly okolo čtyř až šesti lidí. Zbylé hodnoty byly mezi prostředními značně rozdílné. Souvislost rychlosti s počtem lidí v okolí jedince je ve většině pozorování nejsilnější při poloměru 2 m a 3 m.

Velikost zúženého hrdla měla vliv hlavně na počty lidí v okolí (se zmenšováním hrdla se počty zvyšují) a s tím spojenou rychlost (se zmenšováním hrdla průměrná rychlost klesá). S velikostí hrdla se méně významně měnily korelace některých směrů. Velikost vstupní štěrbiny měla také vliv na počty lidí v okolí (se zmenšováním štěrbiny klesají počty) a na rychlosti (se zmenšováním štěrbiny průměrná rychlost roste). Žádné korelace se však s velikostí této štěrbiny prakticky neměnily.

Simulace v nástroji AnyLogic byly oproti experimentům vždy pomalejší. Rychlost souvisela při simulacích o něco méně se všemi ostatními featurami v prostředích jednosměrného i obousměrného průchodu chodby. V prostředí křižovatky "T" byla souvislost nižší s budoucí rychlostí a průměrné rychlosti nejbližších sousedů a vyšší s počty lidí v okolí a vzdálenostmi od nejbližších sousedů. Souvislost příštího směru agenta byla v simulacích ve většině případů slabší, než u účastníků experimentů JSC. Navíc často docházelo k absenci vzájemné souvislosti orientace odchylek. Kromě prostředí obousměrné chodby, kde počty lidí v okolí byly výrazně vyšší než v experimentálních datech, byly hodnoty počtů lidí v okolí jen velmi málo odlišné od dat JSC.

## 6 Závěr

Cílem práce bylo mimo prostudování metod a modelů simulování davu prozkoumat získaná reálná data a porovnat výstupní data simulace stejných prostředí v nástroji AnyLogic s těmito reálnými daty. S využitím jazyka R a statistických metod byla experimentální i simulovaná data analyzována a následně vzájemně vizuálně a numericky porovnána.

Analýza reálných dat přinesla poznatky o chování reálných lidí v davu. Mezi nejdůležitější patří souvislost rychlosti pohybu s okolním prostředím, konkrétněji s počtem lidí v blízkém okolí jedince a vzdáleností a rychlostí nejbližších sousedů, souvislost směru chůze se směrem k cíli a směry lidí v okolí jedince a vliv velikosti zúžených hrdel na tyto a další souvislosti a údaje.

Při simulování dat v nástroji AnyLogic bylo pozorováno neočekávané chování, ke kterému došlo při nastavení preferované rychlosti agenta na vyšší než výchozí. Agenti při takové rychlosti v některých případech ignorovali vzájemnou kolizi a měli vysokou setrvačnost, která na průběh simulace působila negativně.

Samotné porovnání simulovaných dat s daty experimentálními vykazovalo ve většině pozorování podobnost počtu lidí v okolí jedince. Méně podobná byla simulovaná data datům experimentálním, co se týče souvislostí rychlosti s okolím jedince. Souvislosti směrů byly ve většině případů od dat JSC odlišné.

Na práci je možno navázat dalším, případně hlubším zkoumáním reálných dat z experimentů JSC a případným porovnáním s dalšími nástroji užívanými pro simulování davu. Kromě dat z prostředí zkoumaných v této práci jsou k dispozici také komplexnější data z opouštění stadionu, která je možné dále zkoumat. Možností je také vytvoření simulačního modelu, který bude z reálných dat vycházet.



## 7 Seznam literatury

- BANKS, J. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, 1998. ISBN 9780471134039.
- BERNON, C., GLEIZES, M.-P. & PICARD, G. Enhancing Self-Organising Emergent Systems Design with Simulation. In G. M. P. O'Hare, A. Ricci, M. J. O'Grady, & O. Dikenelli, ed. *Engineering Societies in the Agents World VII*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 284–299. ISBN 978-3-540-75522-7, 978-3-540-75524-1.
- BOHANNON, R.W. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20—79 years: reference values and determinants. *Age and ageing*, 1997, vol. 26, no. 1, s. 15–19.
- BOLTES, M. & SEYFRIED, A. Collecting pedestrian trajectories. *Neurocomputing*, 2013, vol. 100, s. 127–133. ISSN 0925-2312.
- LE BON, G. *Psychologie davu*. Praha : Kra, 1994. ISBN 9788090152786.
- BRAUN, A., MUSSE, S.R., DE OLIVEIRA, L.P.L. & BODMANN, B.E. Modeling individual behaviors in crowd simulation. In *16th International Conference on Computer Animation and Social Agents*. IEEE, 2003, s. 143–148.
- CURCIO, D., LONGO, F., MIRABELLI, G. & PAPPOFF, E. Passengers' flow analysis and security issues in airport terminals using modeling & simulation. In *European Conference on Modeling & Simulation, Praga-Repubblica Ceca*. 2007, s. 4–6.
- DENG, Y. The Improved Cellular Automata and Its Application in Delineation of Urban Spheres of Influence. *Sustainability*, 2014, vol. 6, no. 12, s. 8931–8950.
- DIAMOND, D.M., CAMPBELL, A.M., PARK, C.R., HALONEN, J. & ZOLADZ, P.R. The temporal dynamics model of emotional memory processing: a synthesis on the neurobiological basis of stress-induced amnesia, flashbulb and traumatic memories, and the Yerkes-Dodson law. *Neural plasticity*, 2007, vol. 2007.
- FEURTEY, F. *Simulating the collision avoidance behavior of pedestrians*. Tokyo : The University of Tokyo, School of Engineering, 2000.
- GUY, S.J., CHHUGANI, J., CURTIS, S., DUBEY, P., LIN, M. & MANOCHA, D. Pedestrians: a least-effort approach to crowd simulation. In *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Eurographics Association, 2010, s. 119–128.
- HELBING, D., FARKAS, I. & VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, vol. 407, no. 6803, s. 487–490.
- HELBING, D. & MOLNAR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 1995, vol. 51, no. 5, s. 4282.
- CHANG, D.E., SHADDEN, S.C., MARSDEN, J.E. & OLFATI-SABER, R. Collision avoidance for multiple agent systems. In *Conference on Decision and Control*. University of California, California Institute of Technology, 2003.

- CHENG, L. *Modelling airport passenger group dynamics using an agent-based method*. Queensland University of Technology, 2014.
- IRESON-PAINE, J. *What is a rule-based system?* [online]. 1993, What is a rule-based system? [Cit. 21.3.2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.j-paine.org/students/lectures/lect3/node5.html>>.
- JÜLICH SUPERCOMPUTING CENTRE. *Forschungszentrum Jülich - JSC - Civil Security and Traffic* [online]. 2014. [Cit. 13.3.2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/CivilSecurityTraffic/PedestrianDynamics/Activities/database/databaseNode.html;jsessionid=8B71D5B24A19C1032C0C7D844204DEE3>>.
- KEIP, C. & RIES, K. *Dokumentation von Versuchen zur Personenstromdynamik*. Jülich : Jülich Supercomputing Centre, 2009.
- KUBÍK, A. *Inteligentní agenty: tvorba aplikačního software na bázi multiagentových systémů*. Brno : Computer Press, 2004. ISBN 9788025103234.
- LI, J., YANG, Y. & ZHAO, Q. Study on Passenger Flow Simulation in Urban Subway Station Based on Anylogic. *Journal of Software*, 2014, vol. 9, no. 1, s. 140–146.
- MA, W. *Agent-based model of passenger flows in airport terminals*. Queensland University of Technology, 2013.
- NASIR, M., LIM, C.P., NAHAVANDI, S. & CREIGHTON, D. A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 45, s. 18–34.
- NASSAR, K. & BAYYOUMI, A. A simulation study of the effect of mosque design on egress times. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Winter Simulation Conference, 2012, s. 110.
- NETRVALOVÁ, A. Úvod do problematiky multiagentních systémů. *ZČU v Plzni, FAV, KIV*, 2005.
- PELECHANO, N., ALLBECK, J.M. & BADLER, N.I. Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. Eurographics Association, 2007, s. 99–108.
- PELECHANO, N., O'BRIEN, K., SILVERMAN, B. & BADLER, N. *Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication*. University of Pennsylvania, 2005.
- PETRUSEK, M. *Velký sociologický slovník: I. svazek A - O*. Praha : Univerzita Karlova, Vyd. Karolinum, 1996. ISBN 9788071843115.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. [online]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. Dostupné z WWW: <<http://www.R-project.org/>>.
- RUSSELL, S., NORVIG, P. & INTELLIGENCE, A. A modern approach. *Artificial Intelligence*. Prentice-Hall, Egnlewood Cliffs, 1995, vol. 25.

- SATO, H., KUBO, M. & NAMATAME, A. Video-Based Conjoint Analysis and Agent Based Simulation for Estimating Customer's Behavior. In *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAL 2007*. Springer, 2007, s. 1102–1111.
- SHENDARKAR, A., VASUDEVAN, K., LEE, S. & SON, Y.-J. Crowd simulation for emergency response using BDI agent based on virtual reality. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*. Winter Simulation Conference, 2006, s. 545–553.
- SILVERMAN, B.G., JOHNS, M., CORNWELL, J. & O'BRIEN, K. Human behavior models for agents in simulators and games. Part I: Enabling science with PMFserv. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2006, vol. 15, no. 2, s. 139–162.
- THE ANYLOGIC COMPANY. *Multimethod Simulation Software and Solutions* [online]. 2015, AnyLogic, Multimethod Simulation Software. [Cit. 12.3.2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.anylogic.com/>>.
- UHRMACHER, A.M. & WEYNS, D. *Multi-Agent systems: Simulation and applications*. CRC press, 2009. ISBN 9781420070231.
- XI, H., LEE, S. & SON, Y.-J. An Integrated Pedestrian Behavior Model Based on Extended Decision Field Theory and Social Force Model. In L. Rothrock & S. Narayanan, ed. *Human-in-the-Loop Simulations*. London : Springer, 2011, s. 69–95. ISBN 978-0-85729-882-9, 978-0-85729-883-6.

## Příloha

### Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD jsou kromě elektronické verze práce data, ze kterých práce vychází, výsledky analýzy, modely pro nástroj AnyLogic a kód v jazyce R použitý při zpracování a analýze dat. Některé složky a soubory mají ve svém názvu označení prostředí experimentu JSC, které se shoduje s označením použitým v textu práce (např. U120 nebo T150). Pro přehlednost je v následující struktuře takto odvozená část názvu zastoupena symbolem "\*".

- / (kořenový adresář)
  - **readme.txt** - popis adresářů a souborů
  - **rcode.rtf** - okomentovaný využívaný R kód
  - **rcode.R** - R kód ve formátu R script
  - **/Data** - adresář obsahující reálná a simulovaná data
    - ♦ **/JSC** - adresář obsahující reálná data
      - **\*.txt** - textový soubor s daty
    - ♦ **/AnyLogic** - adresář obsahující simulovaná data
      - **\*.txt** - textový soubor s daty
  - **/Analýza** - adresář obsahující kompletní výsledky analýzy
    - ♦ **/\***
      - **\*\_features.csv** - featury
      - **\*\_features\_aggregate.csv** - souhrnné featury
      - **\*\_features\_byPerson.csv** - featury na člověka
      - **\*\_features\_bySecond.csv** - featury na sekundu
      - **\*\_scatterplots.png** - bodové grafy vzájemných vztahů featur
      - **\*\_spearman.xlsx** - matice spearmanových koeficientů korelací
      - **\*\_trajectories.png** - vizualizace trajektorií
  - **/AnyLogic Models** - adresář s modely pro nástroj AnyLogic
    - ♦ **ALm\_tutorial.docx** - dokumentace a tutoriál k modelům AnyLogic
    - ♦ **/\***
      - **\*.alp** - soubor AnyLogic modelu
      - **positions.xlsx** - soubor pro ukládání pozic agentů



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:

**Tomáš Bulíček**

Obor studia:

Aplikovaná informatika

Jméno a příjmení vedoucího práce:

**Jan Vaněk**

Název práce:

**Částicové systémy**

Název práce v AJ:

Particle systems

Podtitul práce:

Simulace davu

Podtitul práce v AJ:

Crowd simulation

Cíl práce: Prostudovat metody a modely simulace pohybu lidí v davu, získat a prozkoumat data z experimentů v Jülich Supercomputing Centre, replikovat experimenty v simulačním nástroji a reálná a simulovaná data porovnat.

Osnova práce:

Rešerše literatury

Získání dat

Návrh a provedení experimentů


Vyhodnocení dat

Projednáno dne:

16. 10. 2014

Podpis studenta

Bulíček

  
Podpis vedoucího práce