Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Multiagentový model vplyvu priestorovej štruktúry populácie na emergenciu kooperácie

Diplomová práca

2016
Bc. Juraj Štancel

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Multiagentový model vplyvu priestorovej štruktúry populácie na emergenciu kooperácie

Diplomová práca

Študijný program:	Kognitívna veda
Študijný odbor:	2503 Kognitívna veda
Školiace pracovisko:	Katedra aplikovanej informatiky
Školiteľ:	RNDr. Martin Takáč, PhD.

Bratislava, 2016
Bc. Juraj Štancel

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Juraj Štancel
Študijný program: kognitívna veda (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: kognitívna veda
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Multiagentový model vplyvu priestorovej štruktúry populácie na emergenciu kooperácie
Multi-agent model of the influence of a population's spatial structure on the emergence of cooperation

Cieľ: Naštudovať si literatúru z oblasti etických noriem, teórie kooperácie a vplyvu priestorovej štruktúry zloženia populácie agentov na emergenciu kooperácie. Implementovať vhodný model a analyzovať priestorové rozloženie kooperujúcich a nekooperujúcich agentov pri rôznych simulačných podmienkach.

Literatúra: Langer, P., Nowak, M.A., Hauert, C. (2008). Spatial invasion of cooperation. Journal of Theoretical Biology, 250(4), 634-641.
Hauert, C., Doebeli, M. (2004). Spatial structure often inhibits the evolution of cooperation in the snowdrift game. Nature, 428, 643-646.
Bravo, G. (208). Imitation and cooperation in different helping games. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 11(8).

Anotácia: Existuje niekoľko modelov vzniku kooperácie v spoločnosti, ktoré však prinášajú rozdielne výsledky úspešnosti a priestorového rozloženia agentov adoptujúcich si kooperatívne správanie. Vhodný model by mohol ukázať úroveň flexibility spoločnosti napríklad vzhľadom na počet nekooperujúcich agentov ale aj odkryť rozhodujúce podmienky pre emergenciu kooperácie v spoločnosti.

Vedúci: RNDr. Martin Takáč, PhD.
Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Vedúci katedry: prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.

Dátum zadania: 21.11.2014

Dátum schválenia: 16.04.2015

prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.
garant študijného programu

Štancel
študent

Takáč
vedúci práce

Poďakovanie: Ďakujem svojmu školiteľovi RNDr. Martinovi Takáčovi, PhD. nielen za odborné vedenie a priateľský prístup, ale aj za pomoc pri písaní diplomovej práce.

Abstrakt

Kooperácia je fundamentálnym aspektom vo viacerých systémoch vrátane ľudskej spoločnosti. Teória hier sa stala vhodným aplikačným rámcom na skúmanie tohto sociálneho správania. Hrou, ktorá pritiahla najväčšiu pozornosť, je vo všeobecnosti veľmi známa dilema väzňa. V tejto hre sa dvaja hráči musia rozhodnúť, či budú vzájomne spolupracovať. V prípade obojstrannej spolupráce je každý z hráčov odmenený $R = b - c$, kde b reprezentuje benefit pre prijímateľa a c reprezentuje náklady, ktoré vznikli kooperátorovi. V opačnom prípade pri obojstrannej nespolupráci získajú obaja hráči $P = 0$. Jednostranná kooperácia je ocenená hodnotou $T = b$ pre nespolupracujúceho a $S = -c$ pre spolupracujúceho hráča. Poradie týchto štyroch hodnôt je $T > R > P > S$. Avšak, v reálnych situáciách je veľmi ťažké odhadnúť správne poradie výnosov pre rôzne vzory správania, čo viedlo k rozdielu medzi teóriou a praxou a rastúcou nespokojnosťou s dilemou väzňa ako jediným modelom kooperácie.

Za účelom skúmania kooperatívneho správania v každej možnej situácii sme pripravili náš model, ktorý pozostáva z mriežky vo forme torusu s rozmermi 10 x 10, kde každé políčko je obsadené práve jedným agentom. Agent interaguje s jedným agentom vo svojom Moorovskom susedstve, pričom hrá jednu z piatich sociálnych hier založených na Heckathornových definíciách, konkrétne: dilema väzňa ($T > R > P > S$), hra na istotu ($R > T > P > S$), hra zbabelec ($T > R > S > P$), privilegovaná hra ($R > T > S > P$) a atruistická dilema ($T > P > R > S$).

Výsledky naznačujú, že počiatočné rozloženie agentov má veľký vplyv pri dileme väzňa. Podobne existuje prahová hodnota nákladov, kedy sa objavujú v populácii paraziti. Schopnosť tvoriť zhluky umožňuje spolupracujúcim agentom pretrvať v populácii podobne aj pri hre na istotu. Schopnosť zhlukovať sa do kompaktných celkov chýba v hre zbabelec, na druhú stranu vytvárajú vláknovité štruktúry. Altruistická dilema silne uprednostňuje nespolupracujúcich agentov a naopak privilegovaná hra uprednostňuje kooperatívne správanie.

Kľúčové slová: multiagentový model, kooperácia, teória hier

Abstract

Cooperation is a fundamental factor in many systems, including human society. Game theory has become a powerful framework for investigation of this social behaviour. Commonly well known Prisoner's dilemma is the game that attracted the most of attention. In this game, two players have to decide if they are going to cooperate or not. Players are rewarded with $R = b - c$ in mutual cooperation, where b represents benefits to the recipient and c represents cost that incurs to the cooperator. Otherwise, in mutual defection, both players get $P = 0$. Unilateral cooperation results in profit $T = b$ for defector and $S = -c$ for cooperator. The ranking of the four payoff values is $T > R > P > S$. However, it is often difficult to assess the proper ranking of the payoffs for different behavioural patterns in real life situations. This has led to a considerable gap between theory and experimental evidence, and to an increasing discomfort with the Prisoner's Dilemma as the only model to discuss cooperation.

In order to investigate the cooperative behaviour in every possible situation, we prepared our model which consists of a square lattice 10 x 10 in the form of a torus where every site is occupied by a single individual. Each agent engages in a pairwise interaction with one of the agents within Moore neighbourhood. They play one of the five social games namely the Prisoner's Dilemma ($T > R > P > S$), the assurance game ($R > T > P > S$), the chicken game ($T > R > S > P$), the privileged game ($R > T > S > P$) and the altruist's dilemma ($T > P > R > S$), based on Heckathorn's definitions.

Results suggest that initial density of cooperation in population has a big influence in Prisoner's Dilemma. Similarly, beyond certain threshold of costs parasites persist in the population. The ability to form clusters enables cooperators to persist, that is same as in assurance game. The ability to give rise to compact clusters lacks in the chicken game, on the other hand there exist filament-like clusters and cooperative individuals. The altruist's dilemma strongly favors defectors and, to the contrary, the privileged game favors cooperative behaviour.

Keywords: multi-agent model, cooperation, game theory

Obsah

Úvod **1**

1 Východiská práce **2**
1.1 Čo sú to normy? . . . 2
1.1.1 Konvencie, sociálne normy a zákony . . . 3
1.1.2 Životný cyklus normy (Norm life-cycle) . . . 4
1.2 Multiagentové modelovanie . . . 4
1.3 Teória rozhodovania . . . 7
1.4 Teória kolektívnej akcie (činnosti) . . . 8
1.5 Sociálne dilemy . . . 9
1.6 Modely zaoberajúce sa priestorovou štruktúrou populácie . . . 13
1.6.1 Model hier pomoci . . . 13
1.6.2 Model priestorovej invázie kooperácie . . . 15
1.6.3 Model jastrab – holub . . . 17
1.6.4 Model lovu na jeleňa . . . 20

2 Návrh a implementácia **22**
2.1 Design . . . 22
2.2 Model . . . 25
2.3 NetLogo . . . 26
2.4 Používateľské rozhranie a ovládanie . . . 27
2.4.1 Ovládacie prvky simulácie . . . 27
2.4.2 Monitorovacie prvky simulácie . . . 28
2.4.3 Monitorovacie okno populácie . . . 29

3 Výsledky **31**
3.1 Dilema väzňa . . . 32
3.1.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo . . . 32
3.1.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom . . . 35
3.2 Hra na istotu . . . 38
3.2.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo . . . 38

3.2.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom 40
3.3 Hra zbabelec 43
3.3.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo 43
3.3.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom 45
3.4 Privilegovaná hra 47
3.4.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo 47
3.4.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom 49
3.5 Altruistická dilema 49
3.5.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo 49
3.5.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom 51

4 Analýza výsledkov **53**

5 Záver **55**

Prílohy **60**

Zoznam obrázkov

1.1 Progres z konvencií na zákony 4
1.2 Životný cyklus normy a metódy používané pri jeho modelovaní 5
1.3 Distribúcia spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov v modeli hier pomoci [6] 15
1.4 Invázia spolupracujúcich agentov v populácii [18] 17
1.5 Frekvencia kooperátorov ako funkcia pomeru nákladov a benefitu [15] . 19
1.6 Štruktúry charakteristické pre model jastrab – holub [15] 19
1.7 Evolúcia populácie v modeli lovu na jeleňa [23] 21

2.1 Grafické užívateľské rozhranie modelu 28
2.2 Emotikony použité v modeli reprezentujúce spokojnosť agenta 29
2.3 Farebná škála znázorňujúca úspešnosť agenta 29

3.1 Ukážka kompaktného zhluku tvoreného kooperátormi 33
3.2 Paraziti jednotlivci v prípade dilemy väzňa 34
3.3 Graf vývoja počtu agentov v čase pre simuláciu 35
3.4 Porovnanie počtu agentov v čase pre rôzne hodnoty 35
3.5 Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov pri dileme väzňa 36
3.6 Izolácia kooperujúcich agentov 37
3.7 Bodový graf konečného počtu agentov 38
3.8 Porovnanie počtu agentov v čase pre simulácie s rôznymi hodnotami . . 39
3.9 Ukážka zhluku spolupracujúcich agentov pri hre na istotu 41
3.10 Ukážka parazitov jednotlivcov v hre na istotu 42
3.11 Šírenie stratégie spolupracovať v hre na istotu 43
3.12 Ukážka altruistov pri hre zbabelec 44
3.13 Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov a parazitov v hre zbabelec . 46
3.14 Ukážka vláknovitých štruktúr 47
3.15 Ukážka altruistov pri privilegovanej hre 48
3.16 Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov v privilegovanej hre 50
3.17 Ukážka parazitov jednotlivcov v hre altruistickej dilemy 51
3.18 Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov v altruistickej dileme 52

Úvod

Kooperácia je základným aspektom mechanizmov vyskytujúcich sa pri organizmoch všetkých rozmerov a typov, či sa už jedná o jednobunkové organizmy alebo ľudskú spoločnosť. Nie je teda prekvapujúce, že sa kooperácia stala jednou z hlavných výskumných otázok v rôznych vedných disciplínach, ako sociológia, biológia, ekonómia, filozofia, psychológia, ale aj informatika.

Existujúca teória a experimentálne práce však vo veľmi málo prípadoch rozoberajú kooperáciu ako komplexnejší vzor správania pre viacej rôznorodých situácií. Namiesto toho sa väčšina prác sústredí na dilemu väzňa. Avšak z kontextu teórie hier nevychádza kooperácia pri dileme väzňa, ako individuálne racionálna stratégia, z čoho už intuitívne vyplýva záver, že dilema väzňa sama o sebe nestačí na pokrytie celého fenoménu spolupráce.

Cieľom tejto práce je zosumarizovať teoretické a experimentálne práce zaoberajúce sa vplyvom priestorovej štruktúry populácie na emergenciu kooperácie v spoločnosti. Na základe nich zostaviť vhodný model, ktorý je aplikovateľný na reálne situácie z každodenného života.

Prvá kapitola obsahuje potrebné teoretické znalosti z oblasti etických noriem, teórie rozhodovania, sociálnych dilem a teórie kooperácie. V druhej časti sa nachádza detailný popis implementácie a výsledkov už existujúcich modelov kooperácie.

Druhá kapitola pozostáva z návrhu nášho modelu spoločne so stručným popisom implementácie a predstavením programovacieho prostredia NetLogo. Kapitola obsahuje aj detailný popis užívateľského prostredia hotového modelu s návodom na použitie.

V tretej kapitole podrobne prejdeme výsledky modelu pre rôzne testované hry a hodnoty. V štvrtej kapitole zhrnieme najzásadnejšie zistené závislosti a javy objavujúce sa v simuláciách.

Kapitola 1

Východiská práce

1.1 Čo sú to normy?

Normy môžeme v prostredí multi-agentových systémov popísať ako očakávania agenta, že iný agent v spoločnosti sa bude patrične chovať [4]. Nemyslí sa tým však chovanie v zmysle etiky a morálky, ale skôr predikovateľné správanie sa agenta vo vzťahu k udalostiam v spoločnosti [25]. Normy sú súčasťou kultúry aj v ľudskej spoločnosti, práve preto sa veľmi často objavujú ako výskumný cieľ v rôznych vedných oblastiach, ako sociológia, ekonómia, biológia, filozofia, informatika atď. Práve z dôvodu ich multidisciplinarity vzniklo niekoľko rôznych definícií noriem. Napríklad, filozof Habermas [13] definoval normy ako „všeobecné očakávanie správania“, práve jeho definícia je jedným z najrozšírenejších výkladov noriem v ľudskej spoločnosti. Ullmann-Margalit [30] popísala normy ako preddefinované formy správania alebo reagovania, ktoré sú dodržiavané väčšinou členov spoločnosti. Elster [8] poznamenal na margo sociálnych noriem, že normy sa stávajú sociálnymi vtedy, keď sú dodržiavané alebo presadzované určitou skupinou jedincov v spoločnosti. Sú udržiavané vďaka tomu, že jedinci pociťujú rozpaky, starosti či pocit viny už pri predstave ich porušovania. Rovnako však môžu byť poháňané aj pozitívnymi emóciami. Práve kvôli tomu, aké silné emócie vyvolávajú, majú taký silný vplyv v spoločnosti.

Normy sa rozdeľujú do niekoľkých kategórií. Tuomela [29] rozdelil normy do dvoch základných kategórií, a to sociálne normy a osobné normy. Sociálne normy definujú správanie v skupine a vyznačujú sa istými sankciami v prípade ich nedodržiavania. Členovia skupiny očakávajú, že aj ostatní členovia budú dodržiavať danú sociálnu normu. Naopak je to v prípade osobných noriem, ktoré sú založené na osobnostných presvedčeniach a postojoch jednotlivých členov spoločnosti a platia len pre daného jednotlivca. Za istých predpokladov je možné, aby sa z osobných noriem vytvorili normy sociálne. To nastane v prípade, že určitú osobnú normu si adoptuje viacero členov spoločnosti a jej nedodržiavanie bude trestané istými sankciami. Jednotlivé kategórie sa ďalej rozdeľujú

na niekoľko sub-kategórií. Sociálne normy rozdeľujeme na [25]:

- r-normy (rule norms) – sú normy, ktoré sú vo väčšine prípadov vytvorené autoritatívnym orgánom. Príkladom takejto normy v ľudskej spoločnosti je povinnosť platiť dane.
- s-normy (social norms) – jedná sa tak isto o normy, ktoré sú platné vo väčšej skupine, no na rozdiel od r-noriem ich pôvod je v zhode s presvedčením spoločnosti. Príklad z reálneho prostredia je, že človek by nemal robiť neporiadok.

Osobné normy môžeme rozdeliť na nasledujúce podkategórie:

- m-normy (moral norms) – sú normy, ktoré závisia na svedomí jedinca. Príkladom môže byť, že človek považuje za nesprávne kradnúť.
- p-normy (prudential norms) – sú normy, ktoré sú založené na racionálnom uvažovaní. Teda takom, ktoré vedie k maximalizácii zisku.

Podobne ako samotné normy, aj dôvody, prečo sú normy dodržiavané, sa stali cieľom vedeckých štúdií. Medzi najvýznamnejšie patria:

- autorita alebo iný mocenský orgán [1]
- racionálne odôvodnenie noriem [3]
- emócie – ako hanba a rozpaky spojené s nedodržiavaním noriem [9]
- ochota nasledovať dav [10]

1.1.1 Konvencie, sociálne normy a zákony

Je dôležité spomenúť a rozlišovať medzi konvenciami, normami a zákonmi (Obr. 1.1). Dobrý príklad uviedli Savarimuthu a Cranefield [25], kde konvencia je očakávanie, že väčšina agentov bude vykonávať patričnú akciu alebo zaujme konkrétny postoj v určitých situáciách. Ako príklad uvádzajú, že počas starovekého Ríma bol dohovor jazdiť po ľavej strane cesty. Ako náhle konvencie naberajú na sile, a to sa deje na decentralizovanej medziagentovej úrovni (peer-to-peer level), a ich porušovanie je istou formou sankciované, stávajú sa z nich sociálne normy. V tom prípade by jazda po pravej strane cesty bola sankciovaná. Zo sociálnych noriem sa ďalej môžu stať zákony, ale to len v prípade, ak o tom rozhodne inštitúcia alebo orgán zastrešujúci centrálnu autoritu, ktorá následne kontroluje ich dodržiavanie.

Obr. 1.1: Progres z konvencií na zákony

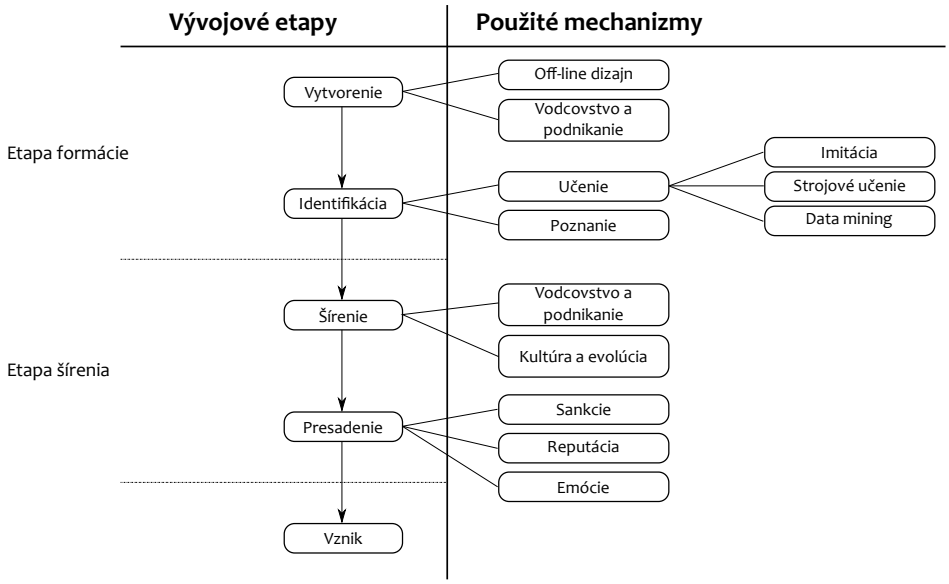
1.1.2 Životný cyklus normy (Norm life-cycle)

V doterajšom výskume noriem bolo použitých niekoľko rôznych prístupov [4, 8, 22], ako sa normy vytvárajú a šíria v spoločnosti. Ako Coleman [7] poznamenal: „Normy sú makro-úrovňové konštrukcie, ktoré sú však založené na účelných akciách na mikro-úrovni a ich vznik je teda podmienený prechodom z micro do macro úrovne.“ Finnemore a Sikkink [11] predstavili trojstupňový model životného cyklu normy. Ten sa skladá z etapy vzniku normy, teda tej, v ktorej samotná norma vzniká a formujú sa takzvaní interpreti alebo inovátori. To sú osoby, ktoré prichádzajú s návrhom novej normy v spoločnosti. (Príkladom z reálneho sveta je Henry Dunant, zakladateľ Červeného kríža, ktorý prišiel s novou normou, aby sa pozeralo na zranených vojakov vo vojne ako na neutrálnych.) Druhou etapou je vodopádová etapa. Tá sa vyznačuje dynamikou šírenia normy, zväčša od interpretov, ktorí majú vplyv na ostatných členov. Tí sa môžu stať nasledovníkmi motivovaní jedným z dôvodov spomenutých v predchádzajúcich kapitolách. Tretia etapa internalizácie je etapa, kedy sú normy dostatočne rozšírené v spoločnosti a dalo by sa povedať, že nasledovanie príslušnej normy sa stalo automatickou úlohou aj pre nasledujúce generácie.

Podobný prístup sa využil aj pri výskume životného cyklu noriem v multi-agentových systémoch (Obr. 1.2). Tri etapy, ktoré sa nazývajú etapa formácie, šírenia a vzniku. Cieľom etapy formácie je zabezpečiť samotné vytvorenie normy agentom v spoločnosti, respektíve, ako ostatní agenti dokážu identifikovať normu, ktorá bola vytvorená. Mechanizmy z druhej etapy šírenia odzrkadľujú, akoby sa mohli normy šíriť a presadzovať v spoločnosti. Posledná etapa vzniku poukazuje na stav a rozsah ukotvenia normy v spoločnosti. Na základe týchto troch základných etáp identifikovali Savarimuthu a Cranefield [25] cyklus pozostávajúci z piatich fáz. Obrázok 1.2 zobrazuje na ľavej strane spomínaných päť fáz, zatiaľ čo na pravej strane sa nachádzajú príslušné mechanizmy využívané vedcami pri určitých fázach.

1.2 Multiagentové modelovanie

Cieľom multi-agentových simulácií, ktoré implementujú etické normy, je vytvoriť umelé prostredie alebo populáciu agentov, ktorí sú schopní si adoptovať vzorce správania inšpirované etickými princípmi. Takéto systémy môžeme zoskupiť pod termínom výpočtová etika [24]. Výpočtová etika definuje niekoľko vlastností agentov [31], ako napríklad



Obr. 1.2: Životný cyklus normy a metódy používané pri jeho modelovaní

povinnosti – záväzky. Záväzky môžeme reprezentovať situáciou, kedy agent nemá na výber inú morálnu voľbu ako tú, ktorá reprezentuje jeho záväzok. Nevykonaním tejto akcie by teda konal v konflikte s morálkou. Ďalším typom povinností je zodpovednosť. Agenti nemajú striktne definované morálne akcie, ale vykonávajú akcie, ktoré vedú k želanému výsledku. V tomto zmysle ich môžeme prirovnať ku agentom orientovaným na cieľ (goal-based). Okrem povinnosti definuje výpočtová etika aj ďalšie vlastnosti, ako množinu práv a množinu slobôd, ktoré určujú úroveň voľnosti agenta.

Výpočtová etika je teda morálny framework, ktorý ovplyvňuje správanie agentov v spoločnosti. Pre dosiahnutie podobného stavu v umelom prostredí je potrebné pripraviť vhodnú metodiku a dynamiku správania agentov v spoločnosti, ktorá umožní sledovať etiku nielen na úrovni jednotlivých agentov, ale aj na úrovni celej populácie. S týmto zámerom môžeme sledovať niekoľko interakcií:

- ako agenti interagujú medzi sebou navzájom
- ako sa riešia etické dilemy medzi agentmi
- ako sociálne normy vznikajú a stabilizujú v populácii agentov

V sociálnych vedách sa multi-agentové systémy používajú hlavne ako nástroj na simulovanie sociálnych procesov v populácii, zatiaľ čo z pohľadu inžiniera multi-agentových systémov je najdôležitejšou úlohou zabezpečiť dostatočnú efektívnosť a zároveň aj dostatočnú autonómiu každého z agentov. Existujú dve základné implementácie etických noriem do multi-agentových systémov [35]. Jedným z nich je centrálna kontrola, kde vznik a šírenie noriem je pod kontrolou vývojára [32]. V tomto prípade však limitujeme autonómnosť agentov a adaptabilitu systému veľmi razantne, ako protiváhu však

môžeme získať širšie možnosti ovládania systému. Preto táto možnosť je vhodná iba v prípadoch, ak máme systém s nízkou mierou prispôsobivosti. Druhou možnosťou sú otvorené systémy, v ktorých sa populácia agentov podieľa na evolúcii noriem tak, aby reflektovali okolnosti prostredia systému. Tento prístup zabezpečuje vysokú úroveň adaptability, v otvorených systémoch sa môžu neustále meniť aj ciele jednotlivých agentov, neustále manuálne preprogramovávať agentov v prípade centrálnej kontroly by bolo však veľmi nákladné a neefektívne. Nevýhodou otvorených systémov je absencia kontroly nad vznikajúcimi normami. Vznik noriem a sociálnych zákonov v spoločnosti agentov naráža na problém, ako môže dôjsť k dohode v podobe globálne akceptovaných konvencií, ak agenti používajú len lokálne prístupné informácie. Normy musia byť globálne v zmysle, že všetci agenti ich používajú, no samotné rozhodovanie, ktoré vzory správania si agent adoptuje, je striktne založené na jeho vlastných skúsenostiach a akékoľvek ovplyvňovanie autoritami je neprípustné. Tento problém ako prví skúmali v roku 1992 Shoham a Tennenholtz [26], ktorí popísali v scenári, ktorý neskôr Woolridge nazval ako „hra s tričkami“ [35].

> Predstavme si skupinu agentov, kde každý z nich má dve tričká. Jedno červenej a druhé modrej farby. Agenti sa nikdy predtým nestretli a nemajú o sebe navzájom ani žiadnu predchádzajúcu vedomosť. Cieľom hry, ktorú hrajú, je, aby mal každý agent oblečené tričko rovnakej farby. Na začiatku si každý agent náhodne vyberie tričko, ktoré si oblečie. Každé kolo je každý agent spárovaný s presne jedným náhodným agentom zo skupiny. Jedinú informáciu, ktorú dostane, je farba trička druhého agenta z páru, žiadna ďalšia komunikácia nie je dovolená. Na konci kola má na výber – buď si ponechá aktuálne oblečené tričko alebo si ho vymení za druhú farbu.

Ako vyplýva zo scenára hry, agent nikdy nemá prehľad o aktuálnom globálnom stave skupiny, a teda voľbu či si zmení farbu trička alebo nie, musí založiť na svojej internej pamäti z predchádzajúcich kôl. Tento rozhodovací proces agenta nazvali Shoham a Tennenholtz ako „funkcia zmeny stratégie“ (strategy update function) [27]. Existuje niekoľko rôznych typov takýchto funkcií [28, 33]:

- Väčšina – je jednou z najjednoduchších funkcií zmeny stratégie. Agent zmení svoju stratégiu v momente, keď počet inštancií novej stratégie bude väčší ako ten, ktorú práve aplikuje. Inak povedané, agent preferuje stratégiu, s ktorou sa stretáva najčastejšie.

- Väčšina a typy agentov – je založená na rovnakom princípe ako jej jednoduchšia forma. Rozdiel je však v tom, že agenti sú rozdelení do dvoch typov. Okrem toho, že agent preferuje najčastejšiu stratégiu, dokáže komunikovať s agentmi

rovnakého typu a vymieňať si pamäť, ktorú si pridruží ako svoju vlastnú. Čiže je schopný prihliadať aj na skúsenosti iných agentov rovnakého typu.

- Väčšina a komunikácia pri úspechu – táto stratégia na rozdiel od predchádzajúcich je založená na komunikácií a prahu úspechu. V momente, keď agent dosiahne so svojou stratégiou určitý úspech, prekročí prah, komunikuje svoju pamäť a preferovanú stratégiu všetkým ostatným agentom, ktorých „vidí“. Neposiela však kompletnú pamäť, ale len tie zložky, ktoré sa týkajú preferovanej stratégie. Výhodou tohto prístupu je, že agent začne komunikovať až v momente, keď dosiahne určitý stupeň úspechu. Tým predídeme zbytočne rušivej komunikácií medzi agentmi.

- Najvyššia kumulatívna odmena – Tento prístup je odlišný od predchádzajúcich nakoľko si agent neadoptováva stratégiu, ktorá je najpočetnejšia, ale tú, v ktorej vidí potencionálne najväčší zisk.

Po vyhodnotení niekoľkých sérií experimentov, kde boli použité všetky hore popísané funkcie, sa ukázalo, že všetky viedli k vzniku jednotlivých noriem v spoločnosti [35]. Avšak, najvýraznejšie výsledky boli spojené práve s funkciou najvyššej kumulatívnej odmeny [28]. Shoham a Tennenholtz preukázali, že pre hocijakú hodnotu t takú, že $0 < t \leq 1$ existuje nejaká hraničná hodnota n, že skupina agentov, ktorí používajú funkciu najvyššej kumulatívnej odmeny, dosiahne zhodu v stratégií v n kolách s pravdepodobnosťou $1 - t$. Navyše výhodou tejto funkcie je aj to, že garantuje agentovi minimálne takú ziskovú stratégiu, s akou začínal na začiatku.

Spolu s funkciami zmeny stratégie je potrebné spomenúť aj pojem „reštart pamäte“ [35]. Ako intuitívne vyplýva z názvu, jedná sa o periodické premazávanie pamäte agenta na počiatočný stav. Dôvod tohto konania je jednoduchý a to ten, že bráni tomu, aby sa agent neprilipol na jednu konkrétnu stratégiu na základe jeho celkovej histórie. V tom prípade by prechod na novú stratégiu bol veľmi ťažký a agent by nebol otvorený novým ideám.

1.3 Teória rozhodovania

Teória rozhodovania (decision theory) skúma schopnosť vyhodnotiť všetky pozitíva a negatíva z poskytnutej informácie a vykonanie racionálne najoptimálnejšej voľby. Zároveň skúma a snaží sa predpovedať aj rozhodovanie ľudí, nakoľko je známe, že tí nekonajú vždy optimálne. Súčasťou teórie rozhodovania je teória hier (game theory) [2].

Teória hier je predmetom záujmu viacerých vedných disciplín, napríklad aplikovanej matematiky alebo ekonómie. Podobne, ako teória rozhodovania, aj teória hier

skúma predpokladané alebo skutočné správanie sa jednotlivcov v určitých situáciách, na rozdiel od teórie rozhodovania v situáciách, kde sú rozhodnutia urobené v súčinnosti s okolím alebo ostatnými hráčmi. Teda samotný výsledok nezávisí len čisto od samotného hráča a jeho stratégie, ale aj od stratégií a akcií ostatných hráčov. Príkladom môže byť taký šach, kde úspech jedinca nezáleží len od jeho ťahov, ale aj od ťahov druhého hráča [5].

Teóriu hier ako prví sformulovali John von Neumann a Oskar Morgenstern [19]. Neumann a Morgenstern argumentujú, že aj keď experimentálne a reálne hry sa nezhodujú v každom aspekte, ak zredukujeme problém a zanedbáme nadbytočné detaily, dostaneme sa k základnému abstraktnému problému, ktorý je v oboch prípadoch rovnaký. Experimentálne hry predstavujú formalizované situácie, ktoré sú reprezentované maticovým zápisom. Matice majú rozmery podľa počtu participantov a podľa počtu možností, ktoré mali participanti k dispozícii. Každá bunka matice reprezentuje výnos jednotlivých participantov k prislúchajúcej voľbe. Najčastejšia forma takejto matice je o veľkosti 2 x 2.

Hry rozdeľujeme na hry s nulovým súčtom a hry s nenulovým súčtom. Hry s nulovým súčtom sa vyznačujú vlastnosťou, že celkový zisk všetkých hráčov sa pre každú možnú kombináciu stratégií rovná nule. Jednoduchšie povedané, súčet zisku víťaza sa rovná súčtu straty porazených, a teda vlastne víťaz profituje na úkor porazených. Príkladom hier s nulovým súčtom je napríklad spomínaný šach. Od 60. rokov sa zvýšil dopyt po hrách, ktoré okrem modelovania súperenia sú schopné poskytnúť nástroje aj na modelovanie kooperácie. Takýmito hrami sú práve hry s nenulovým súčtom. Jedná sa o hry, kde súčet ziskov a strát sa nemusí rovnať nule a víťazstvo jedného hráča nemusí nevyhnutne znamenať prehru pre iného hráča. Medzi príklady hier s nenulovým súčtom patria dilema väzňa alebo hra zbabelec.

1.4 Teória kolektívnej akcie (činnosti)

Pojem kolektívna akcia, v niektorých slovenských zdrojoch môžeme nájsť aj preklad kolektívna činnosť z anglického originálu collective action, je pomerné bežný jav vyskytujúci sa v ľudskej spoločnosti. Je definovaný ako úsilie minimálne dvoch osôb dosiahnuť určitý spoločný cieľ [36], skúma situácie a podmienky, za ktorých sú ľudia ochotní podieľať sa na danej kolektívnej akcii [2]. Teória kolektívnych akcií sa postupne rozvíjala od 60. rokov [20], kedy myšlienku kolektívnej akcie ako spoločnej činnosti skupiny ľudí ako prvý predstavil Mancur Olson [21]. Pri riešení problematiky kolektívnej akcie použil model dilemy väzňa, pri ktorej môže nastať situácia, kde individuálna racionalita môže smerovať k výsledku, ktorý je z pohľadu spoločnosti iracionálny. Racionálni jednotlivci by sa snažili získať čo najväčší zisk od spolupracujúcich jedincov, ale záro-

veň minimalizovať svoje náklady, a teda by sa vyhýbali participácii [16]. Ďalej podľa Olsona úžitok z kolektívneho statku nie je možné odoprieť neparticipujúcim jedincom, čo bude ďalšou motiváciou pre „sebecké“ správanie. Podobný vplyv bude mať aj počet členov skupiny, pretože s narastajúcim počtom členov bude príspevok jednotlivca menej významný a kolektívny statok bude využívať väčší počet jedincov, v dôsledku čoho sa sebecké správanie v skupine „stratí“.

Kritikou Olsonovej teórie je, že veľkosť skupiny s inými faktormi môže mať aj opačný, a teda pozitívny vplyv na mieru kooperácie [20]. Rovnako kritici nesúhlasia s tvrdením, že sebecké správanie zásadne vplýva na kolektívnu akciu [16]. Za neochotou participovať vidia skôr negatívne očakávania výsledku kolektívnej akcie.

1.5 Sociálne dilemy

Existuje niekoľko sociálnych dilem, ktoré sa používajú v sociálnych experimentoch. Jednoznačne najznámejšia a v literatúre najviac používaná je dilema väzňa [2]. Ostatné modely dilem sa od nej viac či menej odlišujú v niektorých atribútoch, ako je zisk aktérov alebo veľkosť skupiny angažovanej sa v modeli a pod. Zisk aktérov je zapísaný vo forme matice výnosov (Tabuľka. 1.1), kde jednotlivé bunky reprezentujú kombinácie stratégií oboch aktérov, označené sú však len z pohľadu aktéra č.1. Bunka označená písmenom R (reward) reprezentuje obojstrannú kooperáciu, teda situáciu, kedy spolupracujú obaja aktéri a obaja musia znášať svoje náklady. Bunka S (sucker) zastupuje jednostrannú kooperáciu aktéra č.1. V tomto prípade náklady znáša len aktér č.1 a aktér č.2 parazituje na jeho kooperácii. Bunka T (temptation) je rovnako jednostranná kooperácia, no tento raz musí znášať náklady aktér č.2. Aktér č.1 iba parazituje. Bunka označená P (punishment) reprezentuje vzájomnú zradu oboch aktérov. Náklady neznáša ani jeden aktér, no rovnako nie je možnosť parazitovať.

Tabuľka 1.1: Vzor výnosovej matice hry dvoch aktérov.

	C2	D2
C1	R	S
D1	T	P

V nasledujúcej časti popíšeme niekoľko modelov sociálnych dilem a poukážeme na ich rozdiely. Podľa Kollocka [17] môžeme rozdeliť modely sociálnych dilem podľa počtu aktérov. Medzi dilemy dvoch aktérov patrí aj už vyššie spomínaná dilema väzňa.

- Dilema väzňa (Prisoner's dilemma) – dilema odzrkadľuje situáciu dvoch páchateľov obvinených zo zločinu. Sú väznení oddelene, a teda im nie je umožnená komunikácia. Ak sa väzeň rozhodne vypovedať, je možné, za určitej situácie, že

sa mu celý trest odpustí. No to nastane len v momente, keď druhý páchateľ nebude vypovedať. Ten však dostane plný trest. Ak obaja páchatelia vypovedajú, dostanú obaja stredný trest. Ak obaja nevypovedajú (nezradia toho druhého), dostanú malý trest. Príklad kombinácií je zapísaný v matici (Tabuľka. 1.2). Z pohľadu modelu rozlišujeme tri situácie: vzájomnú kooperáciu (nevypovedanie), jednostrannú zradu a vzájomnú zradu (vypovedanie). Poradie výnosov pri dileme väzňa môžeme zapísať aj nerovnosťou pomocou vzorovej výnosovej matice. Takéto poradie by potom reprezentovala nerovnosť.

$$T > R > P > S \tag{1.1}$$

Pre aktéra je teda najoptimálnejším variantom vypovedanie, pokiaľ druhý aktér nebude vypovedať (jednostranná zrada). Podľa Heckathorna je v prípade dilemy väzňa kameňom úrazu práve dôvera medzi aktérmi, keďže medzi aktérmi nie je dovolená komunikácia.

Tabuľka 1.2: Príklad výnosov pre dilemu väzňa

	C2	D2
C1	3;3	0;5
D1	5;0	1;1

- Hra na istotu (Assurance game) – je istou formou dilemy väzňa. Hlavný rozdiel však spočíva v tom, že vzájomná kooperácia je oproti prípadu v dileme väzňa oveľa ziskovejšia ako prípad jednostrannej zrady. Z tohto hľadiska hra na istotu motivuje aktérov ku spolupráci (Tabuľka. 1.3). Podobne vieme aj tu poradie výnosov zapísať pomocou rovnice

$$R > T > P > S \tag{1.2}$$

Problémom zostáva koordinácia aktérov, pretože ak bude mať aktér očakávanie, že druhý aktér zradí, jeho najlepšou voľbou je zradiť tiež.

Tabuľka 1.3: Príklad výnosov pre hru na istotu

	C2	D2
C1	5;5	0;3
D1	3;0	1;1

- Hra zbabelec (Chicken game) – ďalším príkladom modifikácie dilemy dvoch aktérov je hra zbabelec. Hru môžeme simulovať situáciou, kedy sa dvaja aktéri vzájomne konfrontujú. Rútia sa v autách proti sebe veľkou rýchlosťou, a ten ktorý

uhne (kooperuje), sa stáva slabochom. Z pohľadu jednotlivca je najoptimálnejším prípadom ten, kde neuhne (zradí), za predpokladu, že druhý aktér sa rozhodne uhnúť (kooperovať). Nasleduje stratégia, kde obaja aktéri rozhodnú uhnúť (kooperovať). Jednoznačne najhorším prípadom je vzájomná zrada, teda situácia, kedy sa neuhne ani jeden z aktérov. A teda výsledná nerovnica výnosnosti ukáže, že pri tejto hre je poradie dvoch najmenej výnosných prípadov vymenené oproti dileme väzňa (Tabuľka. 1.4).

$$T > R > S > P \tag{1.3}$$

Táto dilema je založená na očakávaní, pretože agenti sa chcú vyhnúť kolízii, ale zároveň sa nestať zbabelcom. Túto dilemu môžeme v literatúre nájsť aj pod názvom „Snowdrift game“. Princíp zostáva zachovaný s tým, že sprievodný scenár je o aktéroch, ktorí zostali zasypaní v snehovej víchrici a aby sa stade dostali, je potrebné, aby niekto odpratal sneh.

Tabuľka 1.4: Príklad výnosov pre hru zbabelec

	C2	D2
C1	3;3	1;5
D1	5;1	0;0

Druhou skupinou v Kollockovom rozdelení sociálnych dilem sú dilemy N-aktérov [17]. Ešte predtým, ako si popíšeme túto skupinu, uvedieme však ďalšie dva prípady, ktoré sformuloval D. Heckathorn [16]. Zaujímavé je, že Heckathorn vôbec nerozdeľoval dilemy podľa počtu aktérov. Nasledujúce prípady spolu s troma už uvedenými slúžia ako akési vzory a celý stavový priestor kolektívnych akcií sa dá popísať pomocou týchto piatich prípadov.

- Privilegovaná hra (Privileged game) – Heckathorn poukazuje na fakt, že sa vo svojej podstate ani nejedná o dilemu, pretože v nej nie je konflikt. Individuálna a kolektívna racionalita sa zhodujú. Jediný konflikt by mohol nastať v prípade, ak by sa jednalo o súťaživých aktérov, ktorí by mali cieľ minimalizovať zisk druhého aktéra. V tejto hre je poradie dvoch najvýnosnejších prípadov vymenené rovnako ako je to pri hre na istotu a poradie dvoch najmenej výnosných prípadov podobne ako pri hre na zbabelca (Tabuľka. 1.5). Výsledná nerovnica teda vyzerá nasledovne

$$R > T > S > P \tag{1.4}$$

- Altruistická dilema (Altruist's dilemma) – Jej znakom je, že hodnoty výnosov pri vzájomnej kooperácii a vzájomnej zrade sú oproti dileme väzňa obrátené. Ak by

Tabuľka 1.5: Príklad výnosov pre privilegovanú hru

	C2	D2
C1	5;5	1;3
D1	3;1	0;0

hru hrali egoistickí aktéri, nepredstavovala by dilemu, pretože každý aktér by sa snažil zradiť, čo by bolo racionálne z kolektívneho aj individuálneho hľadiska. Ak by sme však mali altruistických aktérov, tí by sa snažili kooperovať, pretože túto aktivitu by druhí aktéri od nich preferovali (Tabuľka. 1.6). Výnosová nerovnica má tvar

$$T > P > R > S \tag{1.5}$$

Príkladom takejto situácie je darovanie darčekov na Vianoce. Najčastejším prípadom stratégie je vzájomné obdarovanie, teda vzájomná kooperácia. Z pohľadu jednotlivca je však najoptimálnejšie nikoho neobdarovať a byť obdarovaný. No z kolektívneho pohľadu by bolo najoptimálnejšie, aby sa dohodli, že nikto nebude nikomu kupovať darček.

Tabuľka 1.6: Príklad výnosov pre altruistickú dilemu

	C2	D2
C1	1;1	0;5
D1	5;0	3;3

Teraz sa vrátime ku Kollockovmu rozdeleniu sociálnych dilem [17]. Druhou skupinou v jeho rozdelení sú dilemy N-aktérov. Ako už z názvu vyplýva, základnou črtou týchto dilem je, že sa nejedná o konflikt dvoch aktérov, ale širšej skupiny aktérov. Ďalšími charakteristikami je, že ťarchu nákladov, ktoré vznikajú nekooperovaním aktérov, neznáša druhý aktér, ako to bolo pri dilemách dvoch aktérov, ale je rozložená po celej skupine. Z toho vyplýva, že aktér nemá jednoznačnú kontrolu nad výsledkom svojho partnera a konanie aktéra teda môže ostať skryté pred ostatnými aktérmi.

- Dilema verejných statkov (Public good dilemma) – ako už sme spomínali Olsonovu definíciu, verejný statok je zdroj, ktorý je prístupný pre všetkých aktérov bez ohľadu na ich participáciu pri jeho produkcii. Pekný príklad tejto dilemy môže byť verejnoprávne vysielanie. Ak aktér vlastní prijímač, ale nikde to neohlásil, môže vysielanie prijímať bez toho, aby zaplatil koncesionárske poplatky. Nie je možné ho odrezať od vysielania, pokým sa sám neprezradí. Tým, že aktér prijíma vysielanie, nikoho neobmedzuje ani neznižuje hodnotu verejného statku.

- Dilema tragédia spoločného (Commons dilemma, Tragedy of commons) – jedná sa o druhý typ dilem N-aktérov. Dilemou sa zaoberal Hardin [14]. Situácia odzrkadľujúca túto dilemu obsahuje pastierov (symbolizujú aktérov) a pasienky, ktoré reprezentujú verejný statok. Rozdielnou charakteristikou oproti predchádzajúcej dileme je vyčerpateľnosť zdrojov, konkrétne pasienkov. Ak by každý pastier vyhnal svoje stádo na pasienky s úmyslom čo najväčšieho zisku, pasienky by sa minuli a došlo by teda k obmedzeniu statku globálne pre všetkých aktérov.

1.6 Modely zaoberajúce sa priestorovou štruktúrou populácie

1.6.1 Model hier pomoci

Agenti v modeli hier pomoci [6] môžu vystupovať buď ako darcovia alebo prijímatelia. Darcom je agent, ktorý ma voľbu poskytnúť benefit (pomoc) druhému agentovi, ktorý sa tým stáva prijímateľom. Za poskytnutie pomoci však musí donor znášať isté náklady. Ak by sme túto interakciu sledovali medzi dvoma agentmi a obaja by mohli zastávať obe úlohy, tak táto interakcia je istou analógiou dilemy väzňa. Upravená výnosová matica by vyzerala nasledovne (Tabuľka. 1.7).

Tabuľka 1.7: Výnosová matica modelu hier pomoci

	C2	D2
C1	b - c	-c
D1	b	0

Hodnota b označuje benefit a hodnota c označuje náklady. Autor Bravo definoval dve varianty rozdielne podľa spôsobu platby nákladov a počtu prijímateľov. Prvým prípadom je, keď agent donor platí náklady c za každého jedného prijímateľa. Príkladom zo skutočného života môže byť zdieľanie jedla s ostatnými jedincami (lovci – zberači). Nakoľko táto hra prezentuje pomáhanie jednotlivca jednotlivcovi, Bravo sa ju rozhodol pomenovať ako hru privátnej pomoci (private helping game). Druhým prípadom je, keď donor zaplatí náklady c jednorazovo bez ohľadu na počet prijímateľov. Príkladom môžu byť zvieracie kolónie, kde jedinec signalizuje ostatným prítomnosť predátora. Keďže druhý prípad je podobný verejnému statku, Bravo túto hru nazval hru verejnej pomoci (public helping game).

Každý agent má svoju vlastnú internú stratégiu, tá môže byť buď kooperácia alebo nespolupráca. Nespolupracujúci sú agenti, ktorí nikdy nepomáhajú svojim susedom. Stratégie agentov však nie sú statické, a teda nespokojní agenti ich môžu v čase meniť.

Táto zmena je v modeli zabezpečená pomocou imitácie, konkrétne imitáciou majoritného alebo najúspešnejšieho správania.

- Imitovaním majority – nespokojní agenti imitujú stratégiu, ktorá je najviac rozšírená u ich susedov. Táto funkcia zmeny stratégie je v modeli označená ako M podmienka.
- Imitovaním úspešného správania:
  - Nespokojní agenti imitujú stratégiu, ktorá zabezpečuje najvyššie priemerné zisky medzi susedmi agenta. Označená ako S podmienka.
  - Nespokojní agenti imitujú stratégiu najúspešnejšieho agenta spomedzi susedov. Označená ako MS podmienka.

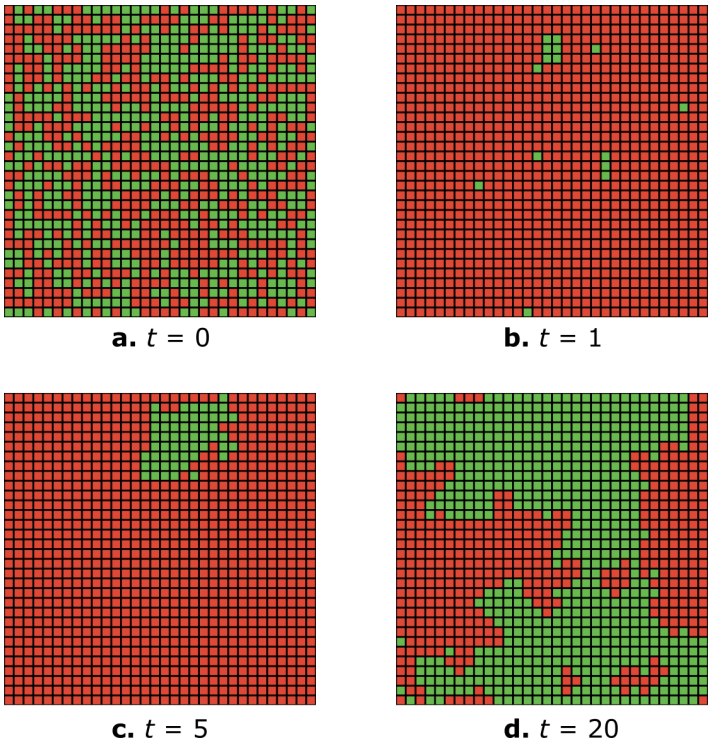
Ďalším experimentálnym parametrom, ktorý ovplyvňuje zmenu stratégie agenta, je posudzovanie svojho úspechu. Svoju úspešnosť si môže počítať vzhľadom na celý priebeh simulácie, alebo len na základe úspechu z posledného kola.

Okrem dvoch druhov hier a rôznych podmienok imitácie sú v modeli zakomponované aj iné aspekty. Bravo pripravil simulácie najprv pri stabilných podmienkach, teda takých, kedy sa agenti nemohli premiestňovať v priestore. Druhým variantom boli nestabilné podmienky, teda také, kedy sa nespokojní agenti môžu premiestniť v priestore, a teda zmeniť svojich susedov. Premiestňovanie je zabezpečené pomocou konštantnej pravdepodobnosti, že sa nespokojný agent bude chcieť premiestniť. Nespokojný agent sa presúva vždy na náhodne vybratú novú lokalitu. Ak tá je už obsadená, zostáva na mieste, prípadne upraví svoju aktuálnu stratégiu.

Výsledky modelu hier pomoci

V prípade simulácie hry privátnej pomoci a pri stabilných podmienkach sa ukázalo, že kooperácia medzi agentmi sa rozšírila len pri podmienke MS, aj to len pri určitých parametroch. Zvyšovanie parametra b, teda benefitov, by malo viesť k rozšíreniu stratégie kooperovať, avšak tento jav je tlmený zmenami imitačných podmienok. Podobne simulácie, kde sa bral ohľad na úspešnosť počas celého behu simulácie, vedie k rozšíreniu stratégie, ale len mierne. Pri ostatných podmienkach M a S sa nepodarilo emergovať kooperáciu za akýchkoľvek testovaných parametrov. Pri podmienke MS, v ktorej sa podaril vznik kooperácie, bolo možné pozorovať zaujímavé správanie populácie (Obr. 1.3). Na začiatku hry, kedy sú ešte kooperujúci agenti neorganizovaní, stávajú sa teda terčom nespolupracujúcich agentov, ktorí na nich profitujú. Z čoho vyplýva rozšírenie stratégie nespolupracovať až do takej situácie, že zostane zopár posledných zhlukov kooperujúcich agentov. V tomto momente zisky nespolupracujúcich agentov hlboko

klesajú, zatiaľ čo zhluky kooperujúcich agentov profitujú. Následne agenti začnú preferovať zmenu stratégie na základe podmienky MS. Kooperácia sa rozšíri v systéme, až kým nezostane niekoľko malých zhlukov parazitujúcich agentov. V tomto stave systém dosiahol ekvilibrium.



Obr. 1.3: Priestorová distribúcia spolupracujúcich (zelení) a nespolupracujúcich (červení) agentov v modeli hier pomoci [6]

Výsledky simulácie pri hre verejnej pomoci dosiahli podobné a pri určitých parametroch dokonca mierne vyššie hodnoty rozšírenia kooperácie pri podmienke MS. Intuitívne sa ukázalo, že je jednoduchšie poskytovať jednoduchý verejný statok ako viaceré súkromné statky.

Pridaním možnosti pohybu agenta sa stratégia kooperácie v priestore podstatne viacej rozšírila. V simulácii hier privátnej pomoci sa kooperácia rozšírila pri podmienke MS výrazne viacej ako pri simulácii bez možnosti pohybu. Významný rozdiel bol však pri podmienke M a S, pretože aj pri týchto podmienkach sa stratégia kooperácie rozšírila. Zvyšovaním počtu agentov sa však úspech kooperácie znižoval, čo bolo spôsobené tým, že priestor simulácie sa zapĺňal. Agenti tým pádom nemali inú možnosť a museli zostať na mieste, čím sa výsledky približovali tým zo statickej simulácie.

1.6.2 Model priestorovej invázie kooperácie

Ďalším modelom, ktorý je založený na dileme väzňa, a rovnako pracuje s výnosovou maticou založenou na parametroch b a c, je model priestorovej invázie kooperácie [18].

V štúdii vychádzajú z podobného predpokladu, že priestorová štruktúra ovplyvňuje evolučný proces interakcií v hre dvoch aktérov. S ohľadom na ekvilibrium, frekvencia kooperátorov a nespolupracujúcich agentov v priestorovej štruktúre ukazuje, že výhody zhlukovania sú obzvlášť podstatné v hrách, kde pomer nákladov a výnosov (c/b) je malý. Existuje však aj prahová hodnota L a v prípade, že pomer nákladov a výnosov je vyšší ako spomínaná prahová hodnota L, kooperátori nie sú schopní vyrovnať vykorisťovanie nespolupracujúcimi agentmi, čo ma za následok úbytok kooperujúcich jedincov v spoločnosti.

Samotný model je tvorený štvorcovou mriežkou o rozmeroch S x S, kde každé políčko je okupované jedným agentom. Čo je však zaujímavé v porovnaní s predchádzajúcim modelom, je fakt, že všetci agenti sú na začiatku nespolupracujúci, okrem agentov v zhluku o rozmere s x s, kde s môže nadobúdať hodnoty $s = 1, 3, 5, ..., 15$. Každý z agentov párovo interaguje so svojimi susedmi v Moorovom susedstve. Výnosy z týchto interakcií reprezentujú reprodukčnú zdatnosť agenta. Ďalším rozdielom je, že oproti modelu hier pomoci upravili výnosovú maticu reprezentujúcu dilemu väzňa závislú od jedného parametra, ktorým je c/b. Príslušná matica má tvar (Tabuľka. 1.8)

Tabuľka 1.8: Výnosová matica modelu priestorovej invázie kooperácie

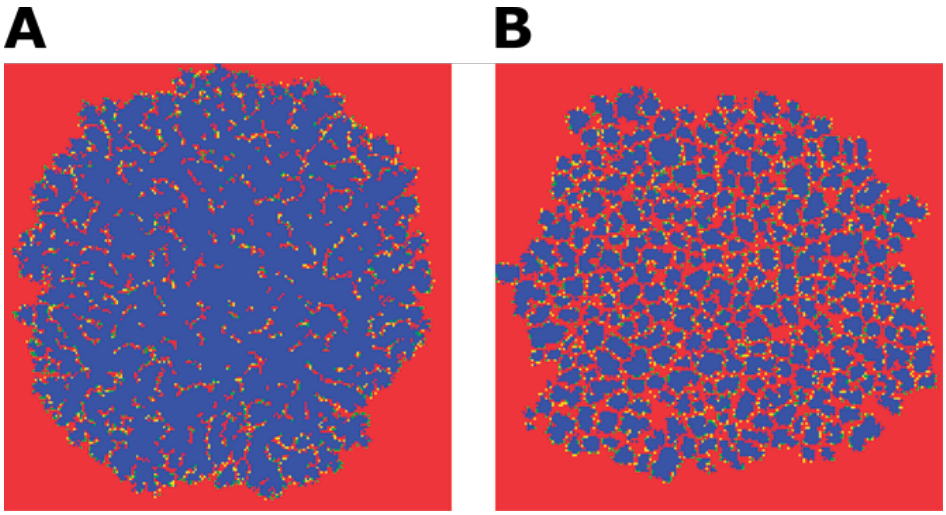
	C2	D2
C1	1	0
D1	1 + c/b	c/b

Výsledky modelu priestorovej invázie kooperácie

Kooperácia je zo svojej podstaty náchylná na vykorisťovanie nespolupracujúcimi agentmi, preto aj ich miera prežívať závisí od schopnosti kompenzovať náklady. Osamotený kooperátor v obklopení nespolupracujúcich agentov bude mať výnosy veľmi slabé. Keďže agenti si osvojujú stratégiu, ktorá je ziskovejšia, samostatne kooperujúci jedinec sa nikdy neudrží. Pre hodnoty c/b, ktoré sú nižšie ako prahová hodnota 0,15, je pravdepodobnosť prežitia počiatočného zhluku kooperátorov veľmi vysoká a len minimálne ovplyvnená hodnotou c/b . Pre hodnotu c/b vyššiu ako je prahová hodnota 0,15 je výhoda poskytovaná zhlukovaním nedostatočná, čo má za následok vyhynutie kooperátorov bez ohľadu na ich počiatočné množstvo.

Makroskopické vlastnosti simulácie, akými sú počet spojitých zhlukov kooperátorov, ich tvar a veľkosť odhaľujú zaujímavé vlastnosti základných mikroskopických interakcií (Obr. 1.4). zobrazuje dva odlišné priestorové vzory pre dve rôzne hodnoty c/b. Pri malých hodnotách $c/b < 0,1$ vzniká väčšinou jeden súvislý zhluk kooperátorov s malými škvrnami nespolupracujúcich agentov. Až na hranici zhluku môžeme nájsť malé oddelené útvary kooperátorov. Pri hodnotách $0,1 < c/b < 0,15$ vzniká namiesto jedného

kompaktného zhluku množstvo malých zhlukov. Typické pre ne je však to, že už viac neobsahujú škvrny nespolupracujúcich agentov, tie by totiž spôsobili rozpad zhluku na dva menšie.



Obr. 1.4: Inv\u00e1zia spolupracujúcich (modrí) agentov v populácii nespolupracujúcich (červení) agentov [18]. (A) pre malý pomer $c/b = 0,02$ (B) pre pomer bližšie k prahovej hodnote vyhynutia $c/b = 0,12$

1.6.3 Model jastrab – holub

Základnou charakteristikou modelu jastrab – holub [15] je použitie inej hry, konkrétne jastrab – holub (hawk – dove). Jedná sa v podstate o hru zbabelec. Dilema väzňa ilustruje, že spolupracujúci jedinci sú náchylní na vykorisťovanie, z čoho následne vyplýva, že prirodzený výber bude uprednostňovať nespolupracujúcich agentov. Z toho je očividné, že nespolupráca je evolučne stabilná stratégia napriek tomu, že z pohľadu spoločnosti by bolo ziskovejšie, keby aktéri spolupracovali.

Napriek tomu existujú v prírode druhy a jedinci, ktorí prejavujú aj iné altruistické vzory správania. Napríklad sú ochotní znášať náklady za to, aby iným poskytli istý benefit. Práve tieto prípady viedli k záveru, že dilema väzňa nestačí ako jediný model v diskusii o kooperatívnom správaní. Ako vhodnú alternatívu zvolili práve hru zbabelec. Ak by sme chceli vypracovať výnosovú maticu pomocou parametra b (benefit) a c (náklady) podobne ako v prípade hier pomoci, pomôže nám skorej spomínaný príklad s vodičmi uväznenými v snehovej víchrici. V prípade kedy by obaja vodiči spolupracovali, získali by benefit a vynaložené náklady by si rozdelili. Ak by spolupracoval len jeden z nich, získal by benefit, no musel by náklady znášať sám. Druhý vodič by rovnako získal benefit, no nemusel by vynaložiť žiadne náklady. V situácii, keď nebude spolupracovať ani jeden vodič, nikto nezíska benefit, ale zároveň ani nebude musieť platiť. Výnosová matica by vyzerala nasledovne (Tabuľka. 1.9).

Tabuľka 1.9: Výnosová matica modelu jastrab – holub

	C2	D2
C1	b - c/2	b - c
D1	b	0

Keďže parametre b a c môžu nadobúdať rôzne hodnoty, je dôležité uviesť, že ak platí vzťah

$$2b > c > b > 0 \tag{1.6}$$

výnosová matica nadobudne podobu matice dilemy väzňa. Aby výsledná matica reprezentovala hru zbabelec, je potrebné, aby platil vzťah

$$b > c \tag{1.7}$$

V štúdii pracujú s faktom, že priestorová štruktúra populácie, v ktorej jedinci interagujú len s limitovaným počtom susedov pri dileme väzňa, môže podporovať stálosť kooperácie. Výskumná otázka je, aký bude efekt priestorovej štruktúry pri hre zbabelca. Populácia je rovnomerne rozprestretá v mriežke o rozmeroch 100 x 100, podobne ako to bolo pri modeli hier pomoci. Jednotlivci interagujú so svojimi susedmi, a to buď podľa Von Neumannovského susedstva alebo podľa Moorovho susedstva. Použili aj mriežky šesťuholníkového tvaru, kde agent má 6 susedov alebo trojuholníkového tvaru, kde má 3 susedov. Zmena stratégie je v simulácii zabezpečená pomocou replikácie. Tá prebieha tak, že v momente, kedy je príslušné miesto aktualizované, súčasný okupant a jeho susedia súťažia o to, kto obsadí príslušné miesto svojim potomkom. Individuálny úspech potencionálnych rodičov sa udáva ako rozdiel ich výnosov z interakcií s ich susedmi. Aktualizácia môže prebiehať synchrónne naprieč celou populáciou, čím dôjde k diskrétnym neprekrývajúcim sa generáciám agentov alebo asynchrónne. Z replikačnej dynamiky vyplýva, že ekvilibrium vo frekvencii kooperátorov v prípade hry jastrab – holub je

$$1 - r \tag{1.8}$$

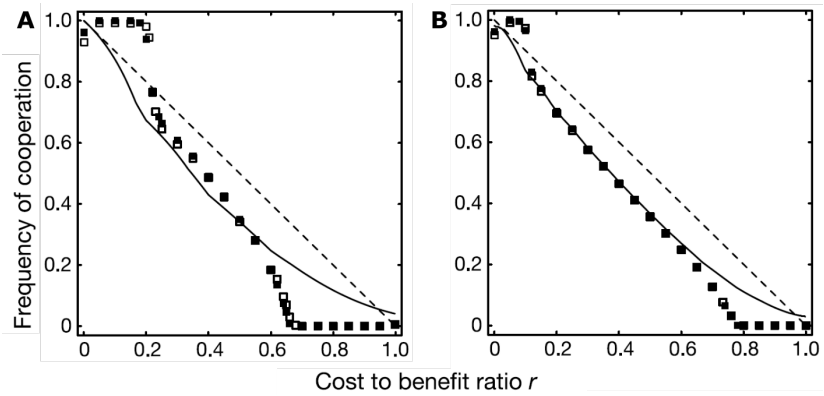
Kde r je pomer nákladov a výnosov zo vzájomnej spolupráce.

$$r = c/(2b - c) \tag{1.9}$$

Je dôležité spomenúť, že priemerné zisky ekvilibria sú menšie ako priemerné zisky populácie zloženej len z kooperátorov. To znamená, že podobne ako pri dileme väzňa aj pri hre zbabelec existuje paradox pri vzájomnej kooperácii.

Výsledky modelu jastrab – holub

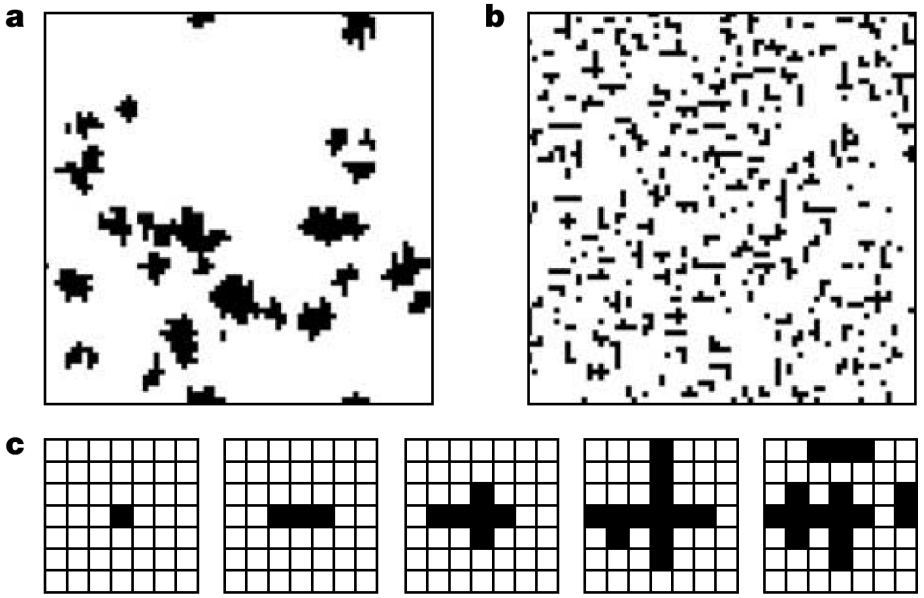
Záverom modelu jastrab – holub je, že priestorová štruktúra nedokáže posilniť kooperáciu pri hre zbabelec. V skutočnosti je jej efekt práve opačný a má tendenciu znižovať



Obr. 1.5: Frekvencia kooperátorov ako funkcia pomeru nákladov a benefitu [15]. (A) pre hodnotu $N = 4$, (B) pre hodnotu $N = 8$

podiel kooperátorov. Iba v prípade malých hodnôt r (veľký benefit, malé náklady) bol podiel kooperátorov vyšší ako bol predpoklad (Obr. 1.5).

Pri dileme väzňa sa kooperátori dokážu udržať pomocou sformovania veľkých kompaktných zhlukov, čím obmedzia vykorisťovanie nespolupracujúcimi agentmi. Takéto správanie môžeme sledovať napríklad aj v modeli hier pomoci. Naopak, pri hre zbabelec môžeme sledovať ako kooperátori tvoria vláknam podobné zhluky (Obr. 1.6). Osamotení kooperátori fungujú ako zdroj dendrických štruktúr, ktoré sa však ťažko rozvinú do kompaktných zhlukov. Práve tieto vláknovité štruktúry zvýhodňujú nespolupracujúce správanie, čo samozrejme vedie k zníženiu počtu kooperátorov.



Obr. 1.6: Štruktúry charakteristické pre model jastrab – holub [15]. (A) Dilema väzňa, (B) Hra zbabelec, (C) Šírenie kooperujúcej stratégie pri hre zbabelec

1.6.4 Model lovu na jeleňa

Zaujímavosťou tohto modelu [23] je, že autori sa snažili poskytnúť dostatočný dôkaz, že medzi hry, v ktorých má priestorová štruktúra pozitívny efekt na spoluprácu, patrí aj hra lov na jeleňa. Základná situácia tejto hry pochádza od francúzskeho filozofa Jean Jacques Rousseaua. Dvaja lovci sa rozhodujú, či budú loviť jeleňa alebo zajaca. Jeleň je cennejší, ale dokážu ho uloviť len vzájomnou spoluprácou, zatiaľ čo zajaca dokáže uloviť každý sám. Ak sa však jeden rozhodne spolupracovať a druhý sa rozhodne individuálne uloviť zajaca, spolupracujúci lovec zostane bez zisku. Ak nebude spolupracovať ani jeden z lovcov a každý si uloví svojho zajaca, ten už nebude mať takú cenu. Ak by sme túto situáciu prepísali do podoby výnosovej matice, zistili by sme, že sa jedná o hru na istotu.

Model pracoval s populáciou agentov o veľkosti $N = 10^4$, kde počiatočný pomer kooperátorov v populácii bol 0,5. Aktualizácia stratégie agentov prebiehala synchrónne, a teda nevznikali spojité generácie. Každý agent počas jedného kola simulácie zahral príslušnú hru s každým svojím susedom. Následne rozhodol o novej stratégii v ďalšom kole, a to pomocou jednej z funkcií zmeny stratégie, ktoré boli až na jeden prípad (bezpodmienečná imitácia) stochastickými procesmi. Tu sa stretávame s podobným prístupom ako v modeli hier pomoci, pretože agenti po vyhodnotení stratégie vynulovali svoje predchádzajúce výnosy, z čoho vyplýva, že výber stratégie určuje výnos z posledného kola a nie z celého behu simulácie. Agent získava výnos na základe nasledujúcej výnosovej matice (Tabuľka. 1.10)

Tabuľka 1.10: Výnosová matica pre model lovu na jeleňa

	C2	D2
C1	1	S
D1	T	0

Obmedzením hodnôt koeficientov T a S môžeme získať prípady hier:

- Dilema väzňa:

$$-1 < S < 0$$
$$1 < T < 2$$

- Hra na istotu:

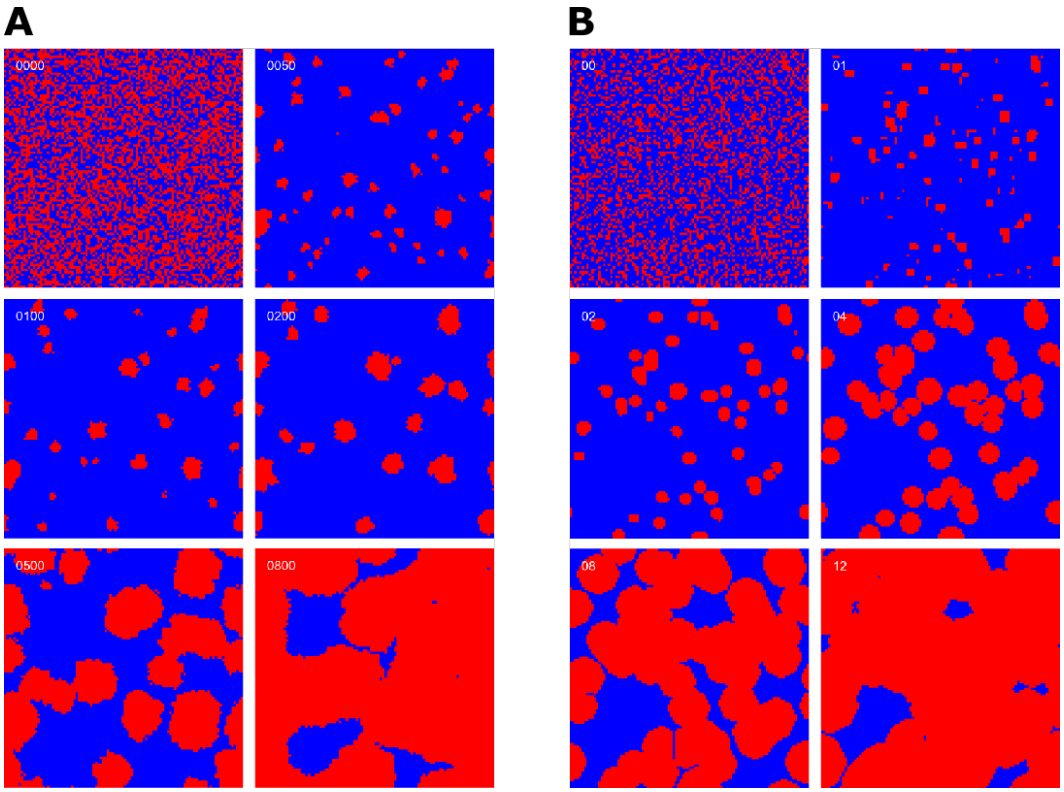
$$-1 < S < 0 < T < 1$$

- Hra zbabelec:

$$0 < S < 1 < T < 2$$

Výsledky modelu lovu na jeleňa

Výstupom modelu je porovnanie výsledkov obzvlášť hier lov na jeleňa a hry zbabelec. Tie preukázali, že hra lov na jeleňa, ktorá sa ukázala ako prototyp hry, kde môžeme sledovať pozitívny efekt priestorovej štruktúry na evolúcii kooperácie, vykazuje podobne vytváranie veľkých zhlukov, ako to bolo pri hre založenej na dileme väzňa. Zároveň preukázali, že funkcia zmeny stratégie zásadne ovplyvňuje čas, za ktorý vznikne ekvilibrium. Príklad je uvedený na obrázku (Obr. 1.7), kedy v prípade A bolo pri počiatočnej hustote kooperátorov 0,5 a parametroch ($S = -0,65$ a $T = 0,65$) ako funkcia zmeny stratégie použité replikačné pravidlo. (S určitou pravdepodobnosťou si agent adoptuje stratégiu náhodného suseda.) Posledná snímka (vpravo dole) bola zachytená v čase $t = 800$. V prípade B bolo pri rovnakých parametroch, ale hustote kooperátorov 0,3 použitá funkcia zmeny stratégie imitácia (voľba stratégie najúspešnejšieho suseda). Rozšírenie kooperácie prebehlo oveľa rýchlejšie, pretože posledná snímka je v čase $t = 12$.



Obr. 1.7: Evolúcia populácie v modeli lovu na jeleňa s parametrami ($S = -0,65$ a $T = 0,65$) [23]. Spolupracujúci (červení) a nespolupracujúci (modrí) agenti. (A) s použitím replikačného pravidla, (B) nepodmienená imitácia

Kapitola 2

Návrh a implementácia

V nasledujúcej časti prezentujeme náš návrh modelu vplyvu priestorovej štruktúry populácie na emergenciu kooperácie. Stručne predstavíme modelovacie prostredie a našu implementáciu. Obsahom kapitoly je aj opis jednotlivých ovládacích prvkov modelu, aby mohol mať čitateľ jasnejšiu predstavu o tom, ako model funguje a čo konkrétne ukazovatele symbolizujú.

2.1 Design

Na základe existujúcich vedomostí sme sa rozhodli založiť náš model na princípoch sformulovaných Kollockom a Heckathornom, a to konkrétne na piatich modeloch sociálnych dilem. Z tohto dôvodu bolo potrebné pripraviť výnosové matice pre každú jednu z hier, kde b bude symbolizovať istý benefit alebo získanú výhodu a naopak c bude odzrkadľovať isté náklady spojené s kooperáciou. Dôležité je však na začiatku spomenúť, že nami navrhované výnosové matice hier nereprezentujú jediné možné riešenie a podobných matíc by sme k prislúchajúcim hrám mohli nájsť viacero. Avšak pri dodržaní všetkých podmienok by sa v konečnom dôsledku aj tak jednalo o model tej istej hry. My sme sa však snažili výnosové matice odvodiť od reálnej situácie, ktorá reprezentuje danú sociálnu dilemu tak, aby jednotlivé hodnoty matíc boli dostatočne zrozumiteľné. Nasleduje predstavenie vzorových situácií a odôvodnenie navrhnutých matíc.

- Dilema väzňa
  Dilema väzňa je najznámejšou sociálnou dilemou a veľmi často ju autori používajú vo svojich modeloch. Preto aj podoba výnosovej matice zapísanej pomocou parametrov b a c je pomerne známa. V prípade dilemy väzňa sme sa nechali inšpirovať modelom hier pomoci. Pri určitých vlastnostiach môžeme dokonca povedať, že sme sa ich pokúsili replikovať.

Ako dostatočný príklad na vysvetlenie matice výnosov poslúži samotný príbeh s väzňami. Predstavte si, že príbeh je formulovaný tak, že spolupracujúci väzeň poskytuje druhému väzňovi alibi. V matici si toto alibi môžeme reprezentovať ako b. Poskytnutím alibi druhému však väzeň ohrozí sám seba, preto toto riskovanie označíme v matici ako c. Výsledná matica bude mať tvar (Tabuľka. 2.1)

Tabuľka 2.1: Výnosová matica pre hru dilemy väzňa

	C2	*D2*
C1	**b - c** ; b - c	**-c** ; b
D1	**b** ; -c	**0** ; *0*

Ak berieme do úvahy fakt, že poskytnutý benefit je väčší ako vynaložené úsilie a zároveň obe sa nerovnajú nule, výsledná matica spĺňa vzťah charakteristický pre dilemu väzňa.

- Hra na istotu
  Ako sme už spomínali v kapitole o sociálnych dilemách, v prípade hry na istotu sa jedná o takzvanú koordinačnú hru. Teda hru, kde si aktéri musia vzájomne dôverovať, že ten druhý ho nezradí. Preto aj príbeh schovaný za našou výnosovou maticou je založený na vzájomnej dôvere.

  Dvaja lovci, žijúci v spoločnej osade, sa chystajú zohnať si niečo na jedenie. V osade chovajú sliepku (ktorej hodnota je b), ale v priľahlých lesoch sa nachádza aj oveľa hodnotnejší úlovok – jeleň ($4b$). Uloviť jeleňa je však náročnejšie, preto je potrebné, aby obaja lovci spolupracovali a dostavili sa na miesto lovu (náklady reprezentujúce cestu označíme c). Na lovcovi je, aby sa rozhodol, či pôjde k jeleňovi (C) alebo si zoberie sliepku (D). Ak si obaja vyberú jeleňa alebo sliepku, musia si jedlo rozdeliť. Výnosová matica pre oboch lovcov vyzerá nasledovne (Tabuľka. 2.2).

Tabuľka 2.2: Výnosová matica pre hru na istotu

	C2	*D2*
C1	**2b - c** ; $2b$ - c	**-c** ; b
D1	**b** ; -c	**b/2** ; $b/2$

- Hra zbabelec
  V prípade hry zbabelec sme sa rozhodli prevziať výnosovú maticu z modelu jastrab – holub. Keďže tento model mal dobre spracovanú situáciu vodičov, ktorí zapadli v snežnej víchrici, vrátané parametrov b a c. Preto pri tejto hre z dôvodu vyhnutia sa duplicite odkazujeme na sekciu zaoberajúcu sa modelom jastrab –

holub. Ďalej uvádzame len maticu (Tabuľka. 2.3) výnosov pre oboch hráčov pri hre zbabelec.

Tabuľka 2.3: Výnosová matica pre hru zbabelec

	C2	*D2*
C1	**b - c/2** ; *b - c/2*	**b - c** ; *b*
D1	**b** ; *b - c*	**0** ; *0*

- Privilegovaná hra

  Základným princípom privilegovanej hry je, že aktéri získajú viac, ak budú vzájomne spolupracovať. Tento jav dobre reprezentuje situácia so študentmi. Predstavme si dvoch študentov, ktorí musia pracovať na spoločnom zadaní projektu, na ktorého konci získajú spoločné hodnotenie. Študent sa môže rozhodnúť, či bude pracovať na projekte alebo nerobiť nič. Vynaložené úsilie jedného študenta c stačí na ohodnotenie b pre oboch. Ak by ale pracovali obaja študenti súčasne, obaja by získali by vyššie ohodnotenie, ako keď pracuje len jeden. Matica výnosov privilegovanej hry vyzerá nasledovne (Tabuľka. 2.4).

Tabuľka 2.4: Výnosová matica pre privilegovanú hru

	C2	*D2*
C1	**2b - c** ; *2b - c*	**b - c** ; *b*
D1	**b** ; *b - c*	**0** ; *0*

- Altruistická dilema

  Na ilustráciu tejto dilemy sme sa rozhodli použiť situáciu, kde dvaja priatelia si navzájom posielajú darčeky. Obaja priatelia majú pripravený jeden darček v hodnote b. Bohužiaľ, nežijú v jednom meste, a preto darček pre toho druhého musia poslať poštou, čo ich prirodzene stojí isté náklady c. Ak by sa ale rozhodli darček neposlať, zostal by im. Zosumarizovaním jednotlivých prípadov dostávame výnosovú maticu (Tabuľka. 2.5).

Tabuľka 2.5: Výnosová matica pre hru altruistickej dilemy

	C2	*D2*
C1	**b - c** ; *b - c*	**-c** ; *2b*
D1	**2b** ; *-c*	**b** ; *b*

2.2 Model

Náš model obsahuje agentov len jedného typu, to však neznamená, že sú všetci identickí. Na základe ich internej stratégie ich môžeme rozdeliť na spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov. Títo agenti po dobu t kôl vzájomne interagujú v štvorcovej sieti s rozmermi 10 x 10. Každé políčko v tejto sieti je obsadené práve jedným agentom, z čoho vyplýva, že celkový počet agentov v našom modeli sa rovná $n = 100$. Na začiatku každého behu simulácie sú agenti náhodne rozdistribuovaní po celej ploche. Následne, každé kolo simulácie zahrá agent jednu inštanciu zvolenej hry s jeho náhodne vybraným susedom. Zvolený sused sa náhodne vyberá z Moorovho susedstva, teda nielen z horizontálnych a vertikálnych susedov, ale aj z tých na diagonálach. Aby sme zabezpečili to, že každý z agentov má práve 8 susedov, je potrebné, aby naša štvorcová sieť tvorila povrch torusu.

Zisky jednotlivých aktérov hry sa určujú podľa zvolenej hry a podľa stratégií zapojených agentov. Rovnako dôležitými parametrami, ktoré ovplyvňujú zisky, sú hodnoty b a c. Implementované sú dva spôsoby ako vyhodnocujeme zisky. A to buď ako sumu výnosov získaných agentom počas všetkých predchádzajúcich kôl, alebo ako hodnotu výnosu získaného len v poslednom kole. Tento parameter je v modeli označený ako TP (total payoff).

Keďže sa nejedná o statických agentov, ich stratégia či kooperovať alebo nie sa môže meniť v závislosti od priebehu simulácie. K zmene stratégie pristúpi agent len v prípade, že je nespokojný. Taký stav nastane, ak je zisk agenta menší ako priemerný zisk v jeho susedstve. V ostatných prípadoch, kedy agent dosahuje priemerné či dokonca nadpriemerné zisky, je jeho stav neutrálny alebo spokojný, agent nemení stratégiu.

V našom modeli existujú vo všeobecnosti dva spôsoby zmeny stratégie. Jedným z nich je imitácia, teda imitovanie podľa majority či úspešnosti jednotlivých stratégií. V tomto prípade sme sa inšpirovali modelom hier pomoci, odkiaľ sme jednotlivé funkcie zmien stratégie prevzali. Implementovali sme teda tri druhy imitácie, a to imitáciu majority, imitáciu stratégie s vyšším priemerným ziskom a imitáciu stratégie najúspešnejšieho suseda. Druhým spôsobom je zmena stratégie na opačnú. Inak povedané, ak je agent nespokojný s aktuálnou stratégiou, v ďalšom kole bude pracovať s opozitnou stratégiou. Celkovo máme teda štyri rôzne funkcie zmeny stratégie.

Z modelovacieho hľadiska obsahuje náš model šesť globálnych parametrov (Tabuľka. 2.6).

Samotní agenti majú však ešte nasledujúcich osem interných premenných (Tabuľka. 2.7).

Tabuľka 2.6: Výpis parametrov modelu

Parameter	Popis
b	Parameter reprezentuje benefit získaný v hre.
c	Parameter reprezentuje náklady spojené s kooperáciou.
Cooperators	Udáva počiatočný diel kooperátorov v populácii.
TP	Označuje či agent pracuje s kumulatívnym ziskom alebo len so ziskom z posledného kola.
Game	Reprezentuje zvolenú hru pre daný beh simulácie.
Change_function	Reprezentuje zvolenú funkciu zmeny stratégie pre daný beh simulácie.

Tabuľka 2.7: Výpis premenných modelu

Premenná	Popis
id	id agenta
gotLast	Suma získaného benefitu za posledné kolo.
gotAll	Suma získaného benefitu počas celého behu programu.
costLast	Vynaložené náklady za posledné kolo.
costs	Vynaložené náklady počas celého behu programu.
score	zisk agenta. Ak sa parameter TP behu simulácie rovná hodnote „true“ zisk sa rovná vzťahu $gotAll - costs$. V opačnom prípade sa zisk rovná vzťahu $gotLast - costLast$
success	úspešnosť agenta v porovnaní s jeho susedmi. Ak je agent podpriemerný, premenná nadobúda hodnotu -1, pri priemerných ziskoch hodnotu 0 a ak je agent nadpriemerne ziskový success ma hodnotu 1.
sharing_per	je premenná booloského typu a reprezentuje stratégiu agenta. Môže nadobúdať hodnoty 100 (kooperuje) alebo 0 (nespolupracuje).

2.3 NetLogo

NetLogo [34] je agentovo-orientovaný programovací jazyk a modelovacie prostredie pre simuláciu prírodných a spoločenských javov. Netlogo bolo navrhnuté Uri Wilenským

v roku 1999 na princípoch programovacieho jazyka Logo a v súčasnosti predstavuje voľne šíriteľný otvorený softvér (open-source softwere) pod licenciou GPL. Aplikácia v desktopovom prostredí beží na Java Virtual Machine (JVM), čo zabezpečuje jej chod na väčšine operačných systémoch (Windows, MAC, Linux). Netlogo je vhodný nástroj na modelovanie sociálneho správania. Koordinátor môže spravovať stovky nezávislých agentov a sledovať ich vzájomné interakcie na micro, ale aj macro úrovni. Náš model je implementovaný v Netlogo ver. 5.3.1.

2.4 Používateľské rozhranie a ovládanie

Užívateľské prostredie modelu zastupuje významnú úlohu pri zostavovaní simulácie, ale aj pri jej následnom vyhodnocovaní. Keďže okrem prvkov, ktorými ovládame samotný model, obsahuje naše užívateľské prostredie aj prvky vizualizácie, popíšeme si ich v nasledujúcej časti nielen z hľadiska funkcionality, ale aj významu, ktorý reflektujú experimentátorovi.

Užívateľské prostredie môžeme rozdeliť do troch základných častí

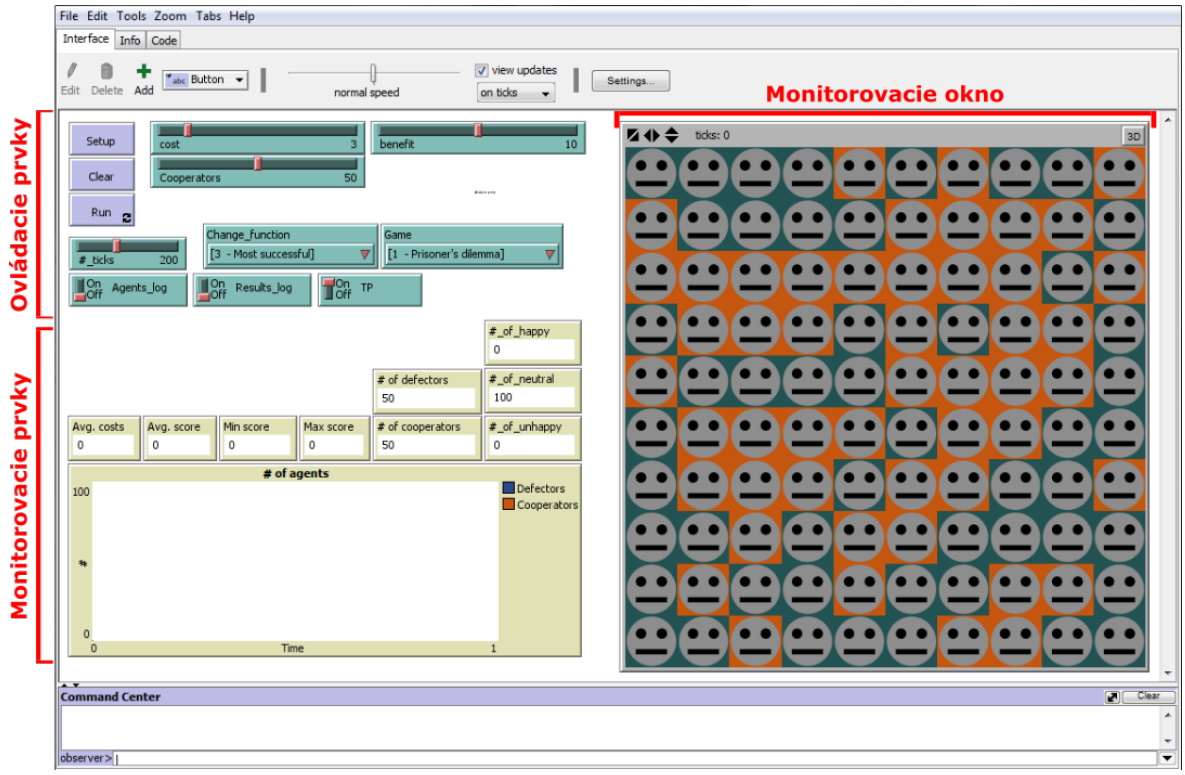
- Ovládacie prvky simulácie
- Monitorovacie prvky simulácie
- Monitorovacie okno populácie

2.4.1 Ovládacie prvky simulácie

Ovládacie prvky simulácie poskytujú používateľovi možnosť ovládať simuláciu, ale aj meniť testované parametre (Obr. 2.1). Prvou skupinou ovládacích prvkov sú tri tlačidlá v ľavom hornom rohu užívateľského prostredia. Tie slúžia na inicializáciu simulačných podmienok (Setup), vyčistenie simulačného prostredia (Clear) a spustenie samotnej simulácie (Run). Tlačidlo Run obsahuje symbol šípok, tie označujú, že sa jedná o prepínacie tlačidlo. Po jeho stlačení zostáva tlačidlo aktívne počas celého behu simulácie až do doby, kým simulácia skončí. Opätovným stlačením počas behu simulácie môže používateľ simuláciu pozastaviť. Beh simulácie sa dá spomaliť alebo zrýchliť upravením posuvníka v hornej časti prostredia Netlogo.

Napravo od ovládacích tlačidiel sa nachádza trojica posuvníkov, ktorými používateľ môže meniť hodnotu získaných benefitov (benefit), hodnotu nákladov spojených s kooperáciou (cost) a počiatočný počet kooperujúcich agentov v populácii (Cooperators).

Pod týmito prvkami sa nachádza niekoľko ďalších ovládačov. Posuvníkom s nápisom #_ticks nastavujeme počet kôl, ktoré simulácia vykoná. Dvojicou rozbaľovacích zoznamov nastavíme aktuálnu simulačnú hru a funkciu zmeny stratégie. Pod nimi sa nachádza prepínač s názvom TP, ktorým prepíname medzi kumulatívnym ziskom agentov



Obr. 2.1: Grafické užívateľské rozhranie modelu

a ziskom z posledného kola. Posledná dvojica ovládacích prvkov v podobe prepínačov slúži na zapisovanie údajov prebiehajúcej simulácie do súborov.

Pri zmene akýchkoľvek parametrov simulácie je vhodné, aby používateľ znova inicializoval simuláciu. V prípade, ak sú jeden alebo oba prepínače zapisovania pri inicializácii zapnuté, používateľ musí v dialógových oknách postupne vybrať súbory, do ktorých sa budú údaje zapisovať. Prvým súborom je výpis interných hodnôt jednotlivých agentov počas každého kola v podobe: tick, student id, gotLast, gotAll, costLast, costs, score, success, sharing_per, kde jednotlivé hodnoty sú oddelené bodkočiarkou. Druhým súborom je výpis globálnych hodnôt v každom kole simulácie v podobe: tick, # of cooperators, # of defectors, # of happy, # of neutral, # of unhappy, max score, min score, avg score, avg costs, kde je ako oddeľovač rovnako použitá bodkočiarka.

2.4.2 Monitorovacie prvky simulácie

Monitorovacie prvky v užívateľskom prostredí slúžia na reflektovanie žiadaných hodnôt simulácie. Medzi monitorované hodnoty, ktoré používateľ vidí počas celého behu simulácie, patria priemerné náklady a priemerné skóre agentov, minimálne a maximálne skóre v populácii, aktuálny počet spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov, počet spokojných, neutrálnych a nespokojných agentov. Ďalším monitorovacím prvkom je graf vývoja počtu agentov s príslušnou stratégiou počas behu programu, v ktorom podiel spolupracujúcich agentom je označený oranžovou a podiel nespolupracujúcich

modrou farbou.

2.4.3 Monitorovacie okno populácie

Samotné monitorovacie okno populácie zohráva rovnako významnú úlohu pri vyhodnocovaní simulácií, pretože zobrazuje agentov v ich prostredí a ich správanie. Každé políčko v prostredí je obsadené práve jedným agentom, ktorého reprezentuje symbol emotikona (Obr. 2.2). Z výrazu emotikona môžeme usúdiť, ako spokojný je so svojím ziskom. Usmiata tvár reprezentuje spokojného agenta, teda takého, ktorý dosahuje nadpriemerné zisky vo svojom okolí. Priemerne zisková agenti sú charakterizovaní neutrálnym emotikonom. Smutná tvar reprezentuje agenta s podpriemerným ziskom. Farebné štvorcové pozadie agenta odzrkadľuje aktuálnu stratégiu daného agenta. Modrou farbou sú označení nespolupracujúci agenti, a naopak oranžovou farbou sú podfarbení agenti so stratégiou spolupracovať.

Obr. 2.2: Emotikony použité v modeli reprezentujúce spokojnosť agenta

Z monitorovacieho okna okrem úspešnosti agenta v rámci jeho okolia vieme pozorovať aj jeho úspešnosť vzhľadom na celú populáciu. Emotikony, reprezentujúci jednotlivých agentov, môžu nadobúdať jednu z 13 farieb, ktorá odzrkadľuje ich ziskovosť (Obr. 2.3). Najziskovejší agenti sú označení najtmavšou zelenou farbou. Postupný prechod zelenej farby do bielej reprezentuje približovanie sa k priemerne ziskovým hodnotám. Priemerná hodnota je označená šedou farbou. Farebný prechod od svetloružovej až po sýtočervenú predstavuje podpriemernú časť populácie. Najmenej zisková agenti sú označení tmavočervenou farbou.

Obr. 2.3: Farebná škála znázorňujúca úspešnosť agenta. Vzostupne zľava doprava.

Používateľ má prístup k aktuálnym interným hodnotám každého agenta aj počas simulácie. Pravým kliknutím na agenta v monitorovacom okne populácie otvoríme roletové menu, kde v poslednej položke student id máme 3 možnosti. Kliknutím na inspect otvoríme kartu agenta, kde vidíme všetky interné hodnoty daného agenta. Navyše sa tieto hodnoty dajú priamo v tomto okne upravovať, čo poskytuje používateľovi

možnosti modulácie simulácií. Možnosť watch vysvieti zvoleného agenta v monitorovacom okne. Kliknutím na možnosť follow v ponuke vycentruje monitorovacie okno na zvoleného agenta. Tieto funkcionality prichádzajú vhod, ak chcem sledovať vývoj konkrétneho agenta alebo sociálnej skupiny.

Kapitola 3

Výsledky

Jedným z cieľov nášho modelovania a simulácií bolo zostrojiť vhodný model, ktorý by prinášal dostatok dát tak, aby bolo možné na základe nich predpovedať správanie agentov v populácii. Navyše sme náš model podrobili niekoľkým simuláciám s rozdielnymi parametrami s cieľom nielen predpovedať správanie populácie, ale aj pochopiť zákonitosti platiace v nej. Medzi hlavné parametre, s ktorými sme manipulovali, jednoznačne patril parameter Game, ktorý reprezentuje jednu z piatich pripravených hier. Okrem toho sme sa pozerali aj na vplyv príslušnej funkcie zmeny stratégie, pomeru nákladov k benefitom, ale aj počiatočnej hustoty stratégií v populácii. Náš model sme teda testovali s hodnotami uvedenými v tabuľke 3.1.

Tabuľka 3.1: Testované parametre

Parameter	Použité hodnoty
Ticks	{200}
Game	{1 – Dilema väzňa, 2 – Hra na istotu, 3 – Hra zbabelec, 4 – Privilegovaná hra, 5 – Atruistická dilema}
TP	{0 – jednorazový zisk, 1 – kumulatívny zisk}
Change_function	{1 – Imitácia majority, 2 – Imitácia priemerne najziskovejšej stratégie, 3 – Imitácia najziskovejšieho agenta, 4 – Opačná stratégia}
%COOP	{25, 50, 75}
c:b	{1:10, 3:10, 5:10, 7:10, 9:10}

Samozrejme na presnejšie objasnenie princípov týkajúcich sa priestorovej štruktúry populácie je potrebné testovať model s danými hodnotami viac než jedenkrát, čím eliminujeme efekt náhodnosti. Preto sme aj my každú nami spustenú simuláciu zopakovali trikrát, tým pádom celkový počet simulácií v našom testovaní dosiahol počet

1800. Tieto testovania sme zaznamenávali do súboru. Všetky súbory, rovnako ako aj tabuľka o stave v jednotlivých pokusoch, sa nachádzajú na priloženom CD. Nasledujúca kapitola obsahuje najzásadnejšie zistenia z testovania nášho modelu.

3.1 Dilema väzňa

3.1.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo

Prvou testovanou funkciou zmeny stratégie v prípade hry dilemy väzňa ($T > R > P > S$) so ziskom za posledné kolo bola imitácia majority. Tá sa preukázala ako veľmi závislá od počiatočnej hustoty spolupracujúcich agentov. Zatiaľ čo v prípadoch, kedy bolo na začiatku len 25 % z agentov kooperátormi, po skončení simulácie sa v populácii nenachádzal ani jeden spolupracujúci agent. Tento jav nazývame úplná nespolupráca a pretrvával nezávisle od zmeny hodnoty nákladov. Pri počiatočnej 50 % hustote kooperátorov, rovnako vo viac ako 73 % prípadov, skončila simulácia úplnou nespoluprácou. Avšak vo zvyšných štyroch prípadoch (vo všetkých behoch kedy $c = 1$ a v jednom prípade kedy $c = 3$) nedošlo k úplnému rozšíreniu jednej zo stratégií. Naďalej boli majoritou v populácii nespolupracujúci agenti, no pri nižších nákladoch na spoluprácu sa darilo udržať aj spolupracujúcim agentom v prípade, ak vytvorili kompaktný zhluk, ako je znázornený na obr. 3.1.

V simuláciách, kedy na začiatku 75 % agentov tvorili kooperátori, sa imitácia majority ukázala ako správna funkcia zmeny stratégie, ak chceme rozšíriť stratégiu kooperácie. V prípadoch kedy $c = 1$, $c = 3$ a $c = 5$ simulácia skončila úplnou kooperáciou. V ostatných prípadoch(pre $c = 7$ a $c = 9$) bola kooperácia stále vysoko prevažujúcou stratégiou, kedy viac ako tri štvrtiny celej populácie boli kooperátori.

Pri imitácii majority s podmienkou $TP = 0$ (jednorázový zisk) sa stretávame s veľmi zaujímavým javom, a to s takzvanými osamotenými parazitmi. Parazit je nespolupracujúci agent, ktorý sa nachádza v okolí spolupracujúcich agentov, ktorých nazývame obete, a získava benefit na ich úkor. Pri simuláciách s počiatočným 75 % podielom kooperátorov môžeme sledovať vznik parazitov jednotlivcov (Obr. 3.2), čiže nespolupracujúcich agentov, ktorí sú úplné obklopení kooperátormi. Celá populácia nespolupracujúcich agentov je tvorená len parazitmi jednotlivcami, ktorí sú rozprestretí po celej populácii. Zatiaľ čo pri hodnote $c = 5$ a menej takíto paraziti vznikajú tiež, nedokážu sa však udržať a nakoniec sa aj oni stávajú kooperátormi. Pri hodnote $c = 7$ a viac sa im však naopak darí veľmi dobre udržať a patria medzi najziskovejších agentov.

Druhou testovanou funkciou zmeny stratégie bola imitácia podľa najvyššieho priemerného zisku v susedstve. V prípade tejto funkcie sa neprejavila závislosť od hustoty kooperátorov v populácii, pretože pri všetkých počiatočných hodnotách hustoty kooperátorov môžeme sledovať podobné správanie populácie, ktoré bližšie popíšeme

Obr. 3.1: Ukážka kompaktného zhluku tvoreného kooperátormi

v nasledujúcich odsekoch.

Táto funkcia však poukázala na vplyv hodnoty nákladov, pretože v behoch simulácie, kedy bola hodnota $c = 1$, nedošlo ani v jednom prípade k úplnému rozšíreniu jednej zo stratégií. Navyše nedošlo ani k vytvoreniu ekvilibria, tak by sme mohli jasne povedať, ktorá stratégia dominovala. Namiesto toho z priebehu simulácie môžeme sledovať, že každá zo stratégií striedavo získavala prevahu v populácii (Obr. 3.3). Tento jav môžeme vysvetliť tým, že počas behu sa počet nespolupracujúcich agentov rozšíril až natoľko, že bolo pre nich ťažké nájsť obeť, na ktorej by parazitovali. To malo za následok pokles ich ziskov, zatiaľ čo malé zhluky kooperujúcich agentov naďalej tvorili zisk, čím sa stávali najúspešnejšími agentmi v populácii. A teda nespokojní agenti preberali ich stratégiu do doby, kým počet kooperujúcich agentov nedosiahol hodnotu, kedy nespolupracujúci agenti znova dokázali dostatočne dobre profitovať.

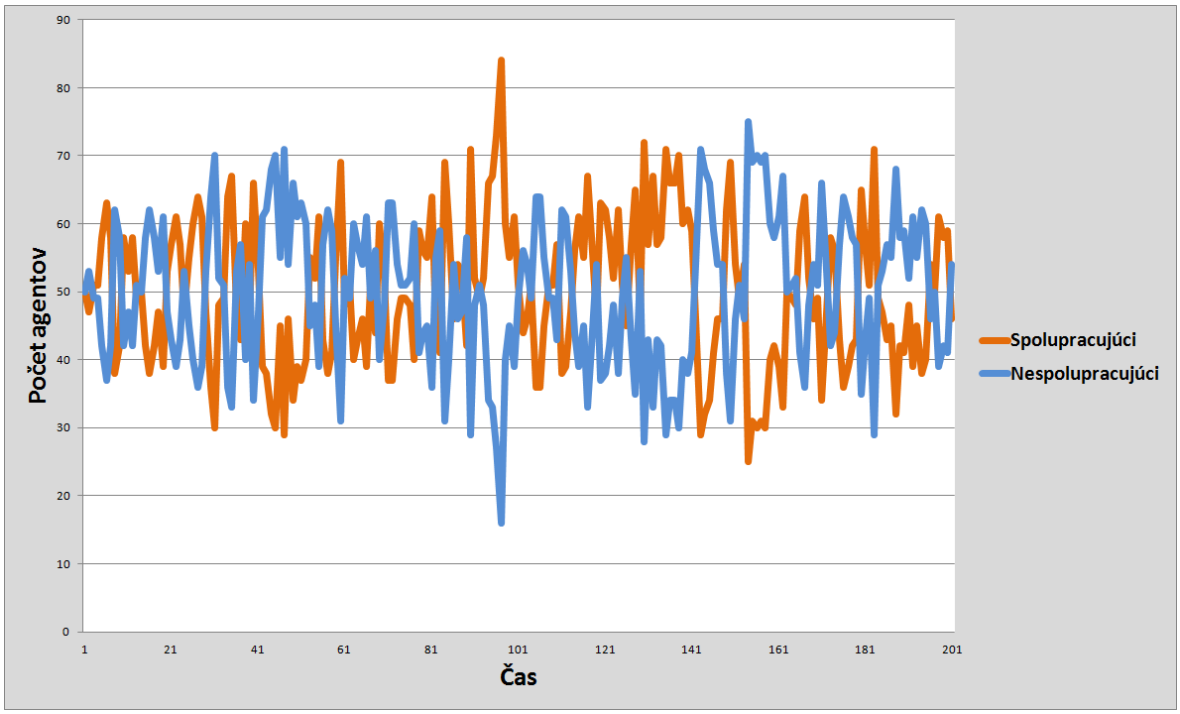
Simulácie, kedy hodnota nákladov bola väčšia ako 1, skončili vo všetkých prípadoch úplnou nespoluprácou. To bolo spôsobené tým, že náklady boli tak vysoké, že kooperujúci agenti neboli schopní sa udržať ani pomocou toho, že vytvorili zhluk.

Ďalšou testovanou funkciou je imitácia stratégie najúspešnejšieho agenta, ktorá sa

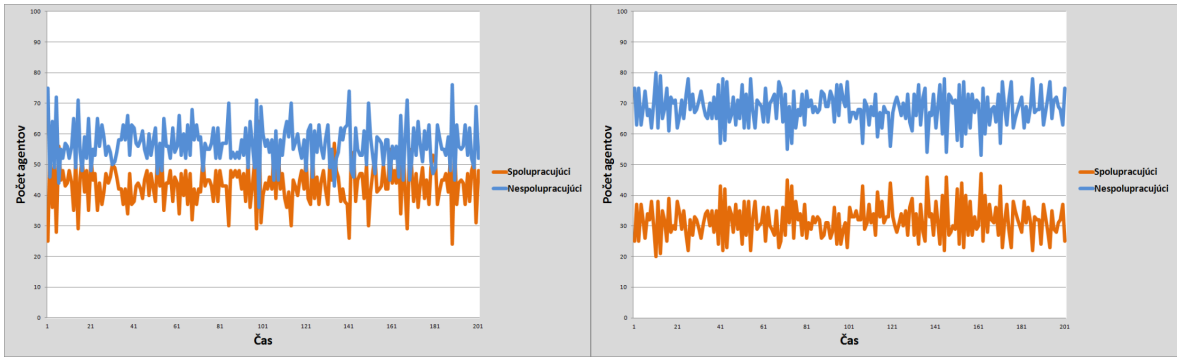
Obr. 3.2: Paraziti jednotlivci patria k najziskovejším agentov v prípade dilemy väzňa

ukázala v našom modeli pri podmienke $TP = 0$ ako najhoršia pre spolupracujúcich agentov. Pretože v každom prípade za akýchkoľvek testovaných parametrov skončila simulácia úplnou nespoluprácou. Tento výsledok však logicky vyplýva zo samotnej definície dilemy väzňa. Pretože najziskovejšou stratégiou pri tejto dileme je zrada, čo sa odzrkadlilo aj v našom modeli.

Poslednou testovanou funkciou bola voľba opačnej stratégie. Pri tejto funkcii ani jeden beh simulácie neskončil úplným rozšírením jednej zo stratégií. Navyše nedošlo ani k vytvoreniu jednoznačných štruktúr v populácii. Napriek tomu však môžeme vo výsledkoch jednotlivých simulácií vidieť vyššie spomínané závislosti. Napríklad aj tu sa odzrkadlil fakt, že stratégia zrady je najziskovejšia, preto celkový počet nespolupracujúcich agentov je vo väčšine prípadov vyšší ako počet tých, ktorí spolupracujú. Navyše môžeme sledovať, že so zvyšujúcou hodnotou nákladov sa rozdiel medzi počtom spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov zvyšuje (Obr. 3.4).



Obr. 3.3: Graf vývoja počtu agentov v čase pre simuláciu s jednorázovým ziskom, imitáciou priemerne najziskovejšej stratégie a hodnotou $c = 1$ (Pokus 1-2)



Obr. 3.4: Porovnanie počtu agentov v čase pre simulácie s jednorázovým ziskom, zmenou na opačnú stratégiu a rôzne hodnoty c

3.1.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom

Dilemu väzňa sme testovali aj v simuláciách s kumulatívnym ziskom, čo znamená, že úspešnosť agenta sa počítala nielen za posledné kolo, ale z celého priebehu simulácie. Tieto simulácie potvrdili zákonitosti pozorované pri predchádzajúcich simuláciách.

V simuláciách s imitáciou majority a počiatočnou 25 % hustotou kooperátorov sme pozorovali rovnaké výsledky, ako v simuláciách s parametrom $TP = 0$ a to úplnú nespoluprácu. Avšak v behoch, kedy počiatočná hustota spolupracujúcich a nespolupracujúcich bola vyrovnaná, sme zaznamenali vytváranie zhlukov kooperátorov, a to nielen v simuláciách kedy hodnota nákladov $c = 1$ a 3, ale aj v behoch kedy $c = 7$.

Z toho vyplýva, že z dlhodobého hľadiska dokážu agenti zvládnuť vykompenzovať aj väčšie náklady. V simuláciách s počiatočnou 75 % hustotou kooperácie sme nedosiahli úplné rozšírenie jednej zo stratégií ani v jednom prípade. Vo všetkých behoch bola majoritnou stratégiou práve kooperácia. Nespolupracujúci agenti sa správali ako paraziti jednotlivci alebo boli sústredení v zhlukoch. Práve paraziti jednotlivci prípadne nespolupracujúci agenti na hranici zhluku patrili k najziskovejším agentom v populácii (Obr. 3.5). Samotné štrukturálne rozmiestnenie parazitov, ale aj zhlukov, závisí od počiatočného rozmiestnenia.

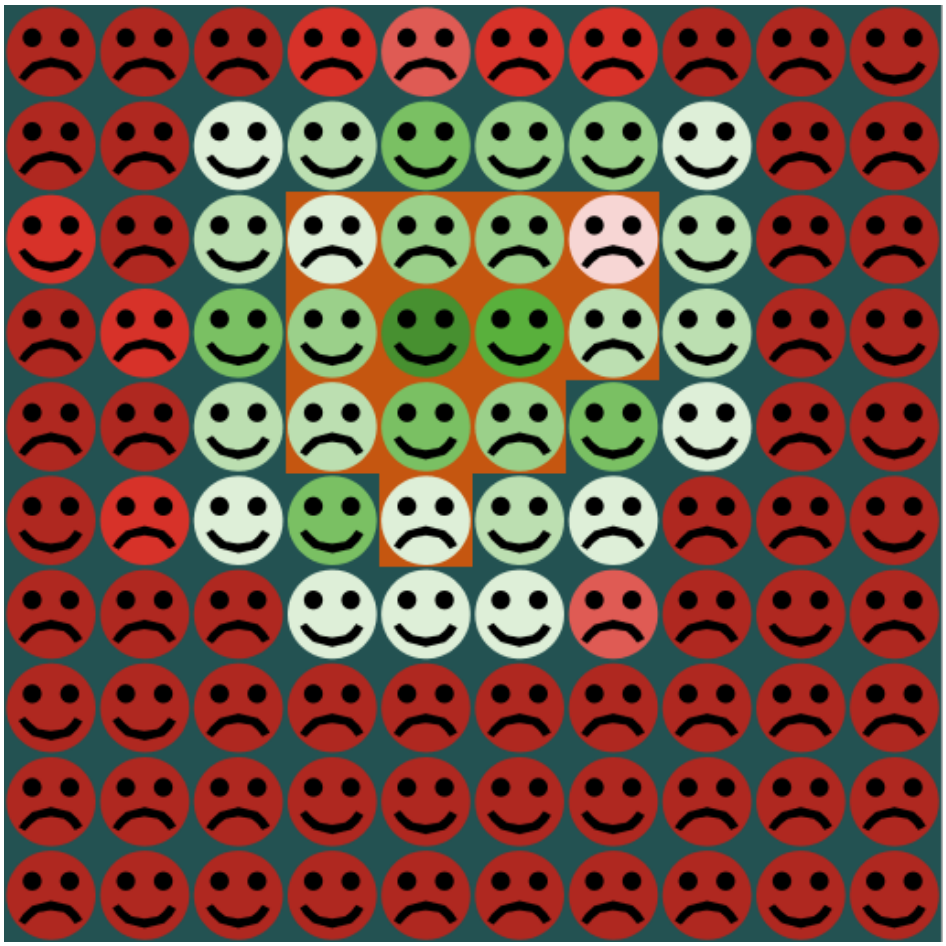
Obr. 3.5: Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov, ktorá dobre znázorňuje ziskovosť rôznych typov agentov v dileme väzňa

Pri imitácii stratégie s priemerným najvyšším dlhodobým ziskom sa bez ohľadu na počiatočnú hustotu kooperácie vo väčšine prípadov skončila simulácia úplnou nespoluprácou. Iba v behoch, kedy sa hodnota $c = 1$, sa dokázali sformovať a udržať zhluky kooperujúcich agentov. So stúpajúcim počiatočným percentom kooperátorov je toto sformovanie prístupnejšie, a teda šanca udržania sa spolupracujúcej stratégie je vyššia.

Na základe výkonu funkcie imitácie najziskovejšieho agenta v simuláciách s parametrom $TP = 0$ sme boli zvedaví, aké výsledky prinesie z dlhodobého pohľadu. Pri

počiatočnej 25 % hustote kooperátorov v populácii sa len pri hodnote nákladov $c = 1$ podarilo udržať stratégiu kooperácie vytvorením zhluku. Naďalej však bola stratégia nespolupracovať dominantnou v populácii. Pri počiatočnom vyrovnanom pomere spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov sa rovnako iba pri hodnote $c = 1$ podarilo vytvoriť zhluky spolupracujúcim agentom. V dvoch prípadoch však tieto zhluky tvorila viac ako polovica agentov. Pri 75 % hustote kooperátorov sa podarilo vytvoriť zhluky pri hodnote $c = 1$ a to tak, že tvorili viac ako polovicu populácie. Navyše sa to podarilo aj pri hodnotách $c = 3$ a 5. V týchto simuláciách však spolupracujúci agenti tvorili menšinu.

Zaujímavým faktom však je, že najziskovejšími agentmi v populácii boli práve spolupracujúci agenti nachádzajúci sa vo vnútri zhlukov (Obr. 3.6). Ako je teda možné, že pri funkcii zmeny stratégie, ktorá preberá stratégiu najziskovejšieho agenta, sa kooperácia nerozšírila do celej populácie? Tomuto zabránili paraziti, agenti nachádzajúci sa na hranici zhluku, ktorí profitujú na spolupracujúcich agentoch. Keďže produkovali dostatočný zisk, nemali prečo meniť stratégiu a izolovali kooperujúcich agentov od zvyšku populácie.



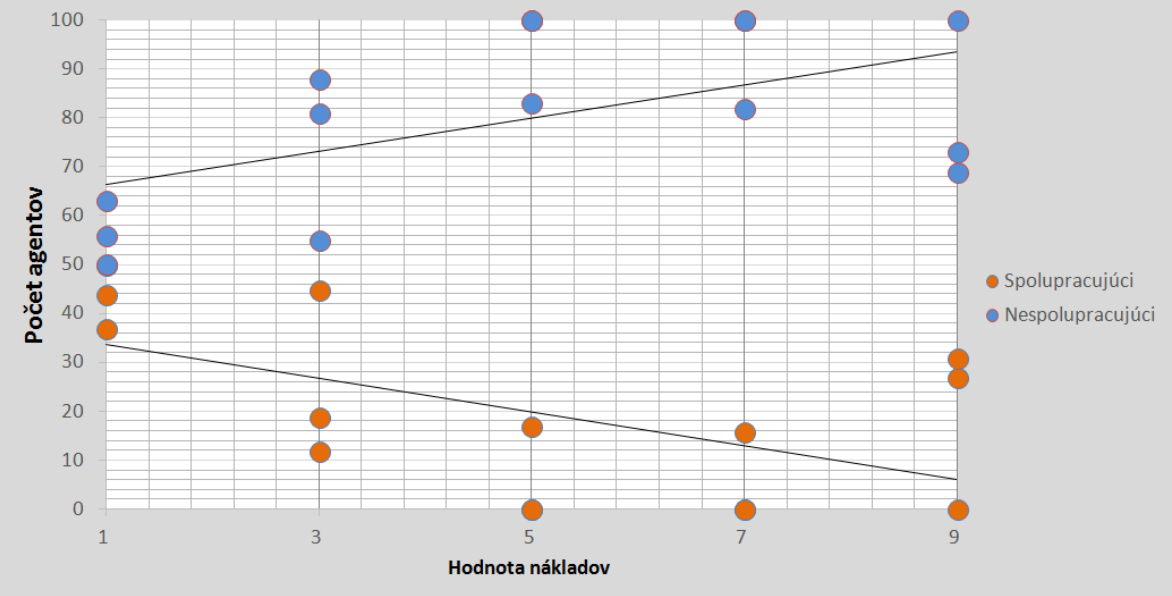
Obr. 3.6: Izolácia kooperujúcich agentov

Pri zmene na opačnú stratégiu sme spozorovali rovnaké výsledky ako v simuláciách s parametrom $TP = 0$. Ani jedna zo stratégií sa nedokázala úplne rozšíriť, podobne nevznikla žiadna štruktúra.

3.2 Hra na istotu

3.2.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo

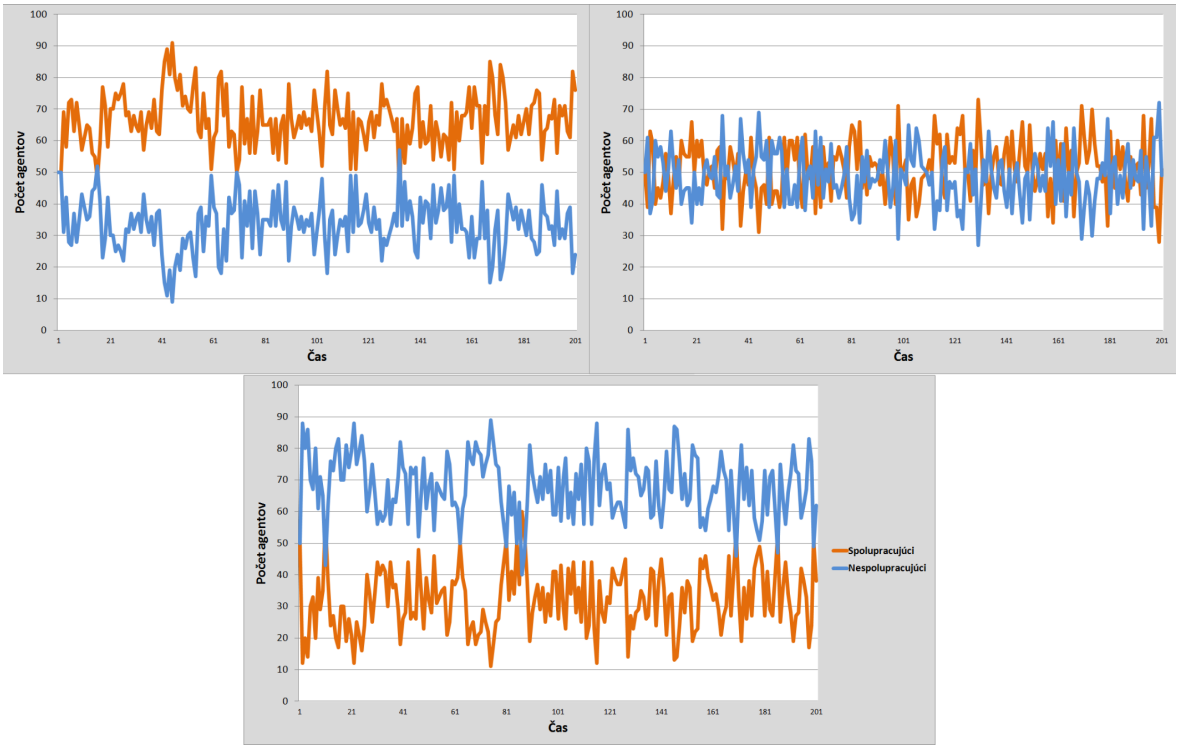
V hre na istotu sú prvé dve najziskovejšie prípady oproti dileme väzňa vymenené ($R > T > P > S$), preto nás zaujímalo, či sa táto zmena prejaví aj v našom modeli. Pri imitácii majority sa prejavila veľká závislosť od počiatočnej hustoty kooperátorov v populácii. Pri 25 % hustote sa nepodarilo pri akejkoľvek testovanej hodnote nákladov spolupracujúcej stratégie udržať sa, a preto tieto simulácie skončili úplnou nespoluprácou. Pri 50 % hustote sa schopnosť kooperátorov udržať sa zlepšila, obzvlášť pri hodnote nákladov $c = 1$, kedy môžeme povedať, že pomer spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov v populácii bol takmer vyrovnaný (Obr. 3.7). S vyššími hodnotami c sa podiel spolupracujúcich agentov v populácii zmenšoval, no napriek tomu aj pri hodnote nákladov $c = 9$ boli stále schopní udržať sa. Pri 75 % počiatočnej hustote spolupracujúcich agentov sa podarilo kooperácii vo všetkých simuláciách s akoukoľvek testovanou hodnotou c nielenže udržať, ale navyše sa úplne rozšíriť do celej populácie.



Obr. 3.7: Bodový graf konečného počtu agentov pre všetky testované parametre s počiatočnou hustotou 50 %

Imitácia stratégie s najvyšším priemerným ziskom odkryla, že hodnota nákladov má aj v hre na istotu veľký vplyv. Pri 25 % a 50 % počiatočnej hustote spolupracujúcich agentov sa pre hodnoty nákladov $c = 1$ a 3 dokázala kooperácia úplne rozšíriť. Naopak,

pre hodnoty nákladov vyššie ako 5 nedokázali spolupracujúci agenti vykompenzovať straty spôsobené parazitovaním nespolupracujúcich agentov, a preto sa nespolupracujúca stratégia postupne úplne rozšírila (Obr. 3.8). Pri 75 % počiatočnej hustote spolupracujúcich agentov vidíme opäť vplyv počiatočného podielu spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov, pretože okrem hodnôt nákladov $c = 1$ a 3 sa kooperácii darilo úplne rozšíriť aj pri hodnote $c = 5$.



Obr. 3.8: Porovnanie počtu agentov v čase pre simulácie s 50 % hustotou a hodnotami $c = 5$ (vľavo hore), $c = 7$ (vpravo hore) a $c = 9$ (dole)

Pri imitácii stratégie najlepšieho agenta môžeme pozorovať podobné správanie, ako tomu bolo pri predchádzajúcej stratégii. Pri 25 % hustote spolupracujúcich agentov sa pre hodnoty $c = 1$ a 3 všetky simulácie skončili úplnou spoluprácou. Čo však nemôžeme tvrdiť o simuláciách s hodnotou nákladov $c = 5$, pretože v jednom prípade skončila simulácia naopak úplnou nespoluprácou. Pre hodnoty $c = 7$ a viac všetky simulácie skončili úplným rozšírením nespolupracujúcej stratégie. V simuláciách s 50 % a 75 % počiatočnou hustotou kooperátorov sa táto hraničná hodnota dokonca opäť zvýšila, pretože aj simulácie s hodnotou nákladov $c = 7$ skončili úplnou spoluprácou. Naďalej však platí, že agenti nedokázali udržať kooperáciu v simuláciách, kde hodnota nákladov bola $c = 9$.

V prípadoch, kedy funkciou zmeny stratégie bola voľba opačnej stratégie, sme pozorovali podobný priebeh ako v prípade dilemy väzňa. To hlavne tým, že ani v jednom prípade nedošlo k úplnému rozšíreniu jednej zo stratégií. Rovnako nedošlo ani k vytvo-

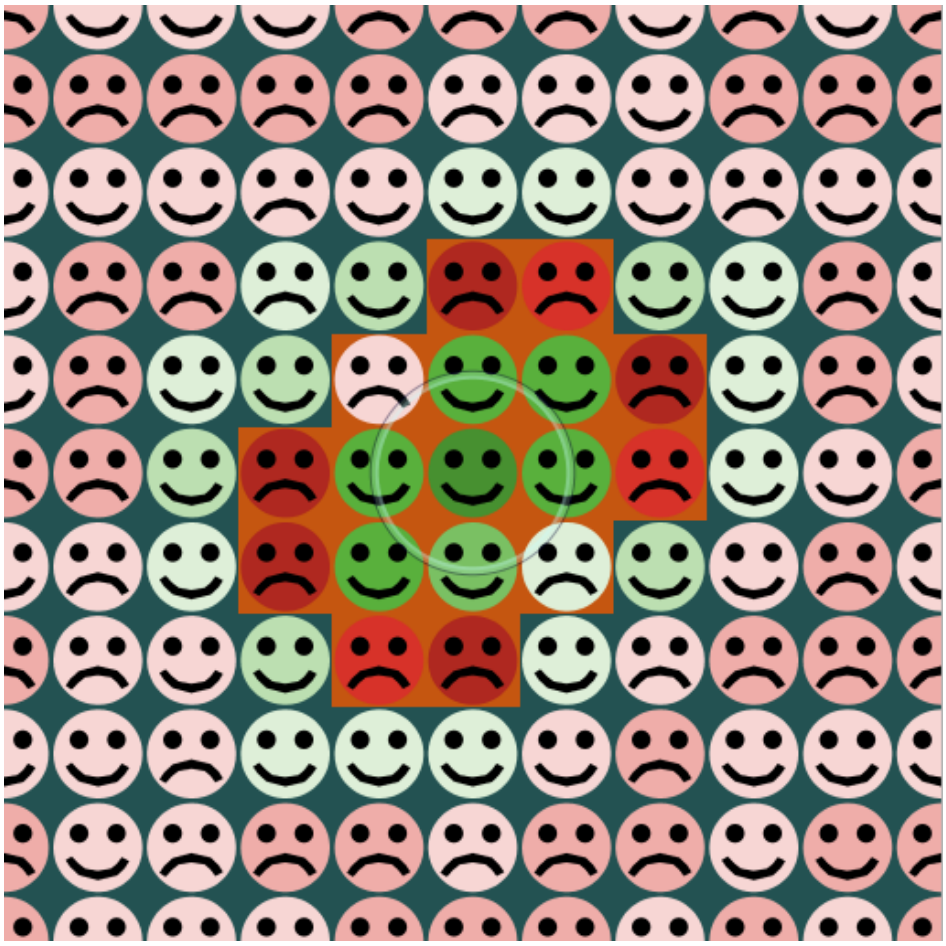
reniu stabilných štruktúr. Z celkových výsledkov však opäť môžeme pozorovať vplyv počiatočnej hustoty a hodnoty nákladov. Pri nízkej počiatočnej hustote spolupracujúcich agentov sa len pre hodnotu nákladov $c = 1$ dokázali spolupracujúci agenti stať prevažujúcou skupinou v populácii. So stúpajúcou počiatočnou hustotou kooperátorov sa aj pri hodnote nákladov $c = 3$ dokázali stať spolupracujúci agenti väčšinovým podielom v populácii. Avšak so zvyšujúcimi sa nákladmi na kooperáciu sa podiel spolupracujúcich agentov v populácii zmenšoval.

3.2.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom

Následne sme testovali hru na istotu aj pri podmienke kumulatívneho zisku. V simuláciách, kde funkciou zmeny stratégie bola imitácia majority, sa pri nízkych počiatočných hustotách spolupracujúcich agentov nepodarilo udržať v populácii, a preto sa skončili úplnou nespoluprácou pre všetky testované hodnoty nákladov. Pri počiatočnom vyrovnanom pomere spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov sa schopnosť udržať sa v populácii opäť zvýšila, podobne ako to bolo v simuláciách so ziskom z posledného kola. Pre simulácie s hodnotou nákladov $c = 1$ opäť platí, že spolupracujúci agenti tvoria väčšinu v populácii. Avšak schopnosť kooperátorov vykryť vynaložené náklady sa so stúpajúcou hodnotou nákladov znižovala. Preto pre hodnoty $c = 7$ a 9 skončili všetky simulácie úplnou nespoluprácou, zatiaľ čo v simuláciách so ziskom z posledného kola aj pri týchto hodnotách sa dokázali spolupracujúci agenti naďalej udržať.

Pri 75 % počiatočnej hustote nákladov sa opäť stretávame s parazitickým správaním, konkrétne s parazitmi jednotlivcami. Simulácie s hodnotami nákladov $c = 5$ a menej skončili všetky úplnou spoluprácou, avšak simulácie, v ktorých hodnota nákladov bola $c = 7$ a 9, iba v jednom prípade skončili úplnou spoluprácou. V ostatných prípadoch bola nespolupracujúca stratégia naďalej menšinou v populácii. Nespolupracujúci agenti vytvorili totiž stabilné štruktúry, a to buď vo forme malých parazitických zhlukov alebo vo forme parazitov jednotlivcov. Oproti parazitom jednotlivcom, ktorých sme pozorovali pri dileme väzňa, paraziti pri hre na istotu nepatria k celkovo najziskovejším agentom. Naďalej však produkujú nadpriemerné zisky a patria k najziskovejším agentom vo svojom okolí (Obr. 3.10). Toto správanie vyplýva z definície výnosovej matice pre hru na istotu.

V simuláciách s imitáciou priemerne najziskovejšej stratégie aj pri kumulatívnom zisku pozorujeme vplyv hodnoty nákladov rovnako ako aj počiatočnej hustoty kooperátorov v populácii. Prahová hodnota nákladov pri 25 % hustote spolupracujúcich agentov začína na hodnote $c = 3$, kedy sa v dvoch prípadoch vytvorili malé zhluky nespolupracujúcich agentov a v jednom prípade dokonca simulácia skončila úplnou nespoluprácou. Simulácie s hodnotou nákladov $c = 1$ skončili úplnou spoluprácou. To, že prahová hodnota sa nachádza medzi hodnotami nákladov $c = 3$ a 5 naznačuje aj fakt,



Obr. 3.9: Ukážka zhluku spolupracujúcich agentov, ktorá dobre znázorňuje ziskovosť rôznych typov agentov v hre na istotu

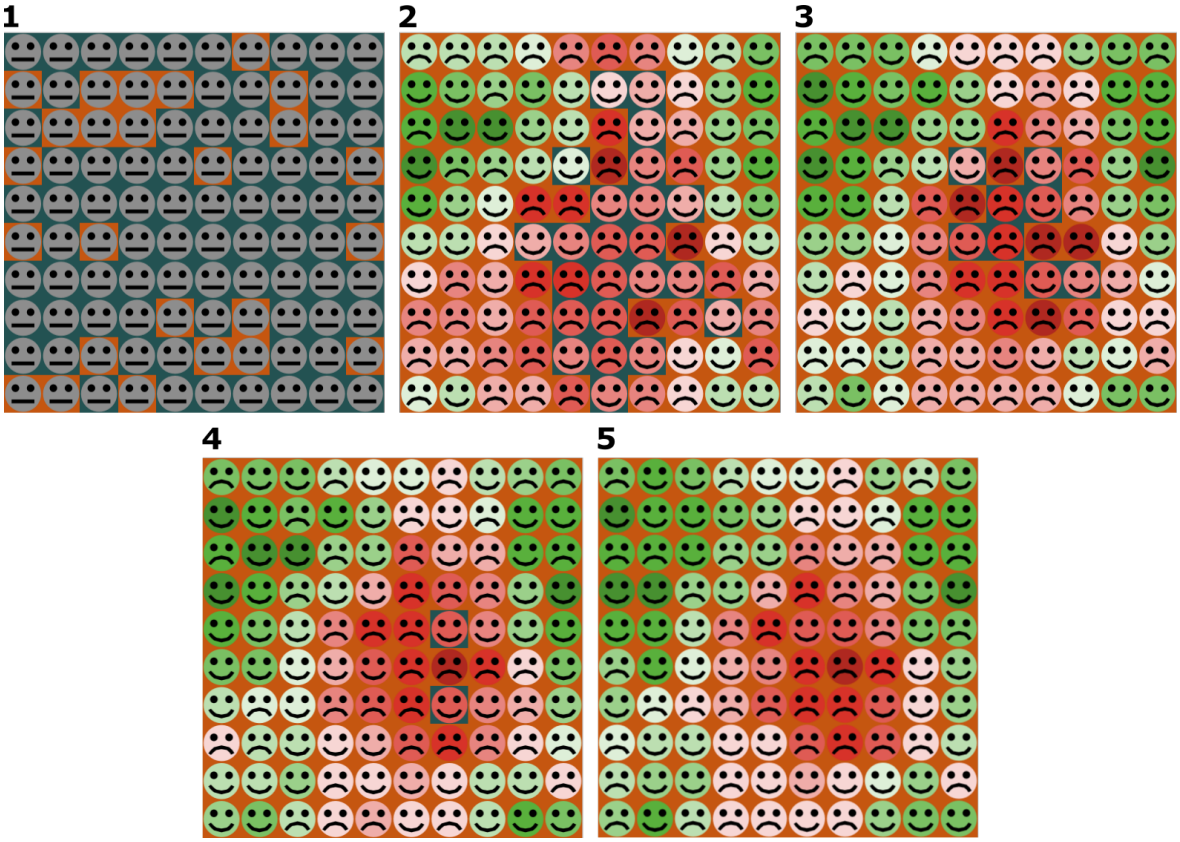
že zatiaľ čo v simuláciách s hodnotou $c = 3$ boli spolupracujúci agenti väčšinou v populácii, s hodnotou $c = 5$ jeden simulačný beh skončil malým zhlukom kooperujúcich agentov a zvyšok úplným rozšírením nespolupracujúcej stratégie. Pri simuláciách, kde počiatočná hustota kooperátorov bola 50 % sa aj pri hodnote $c = 3$ dokázala spolupracujúca stratégia úplne rozšíriť. Preto prahová hodnota sa zvýšila na hodnotu $c = 5$, pretože v dvoch prípadoch simulácia skončila väčšinovou prevahou nespolupracujúcich agentov a v jednom prípade bol podiel stratégií v populácii takmer vyrovnaný. Simulácie s hodnotou $c = 7$ a viac skončili úplnou nespoluprácou. Tento trend pokračoval aj v simuláciách s počiatočnou 75 % hustotou spolupracujúcich agentov, kde aj pri hodnote $c = 5$ došlo k úplnej spolupráci v jednom prípade a v ostatných prípadoch tvorili spolupracujúci agenti značnú prevahu v populácii. Nespolupracujúci agenti získali prevahu až v simuláciách s hodnotou nákladov $c = 7$. K úplnej nespolupráci však došlo až v simuláciách s hodnotou $c = 9$.

Imitácia najúspešnejšieho agenta prezentovala podobné výsledky ako imitácia priemerne najúspešnejšej stratégie. V simuláciách s malým podielom kooperátorov nastal

Obr. 3.10: Ukážka parazitov jednotlivcov v hre na istotu

zlom v šírení kooperácie v simulácii s hodnotou nákladov $c = 3$, kedy sa v jednom prípade vytvoril zhluk nespolupracujúcich agentov. V simuláciách s hodnotou nákladov $c = 5$ a viac došlo k úplnému rozšíreniu nespolupracujúcej stratégie. Pri počiatočnom vyrovnanom pomere spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov sa pri hodnotách $c = 5$ skončili simulácie s malým počtom nespolupracujúcich agentov. Pri simuláciách s hodnotou $c = 7$ sa naopak lepšie darilo nespolupracovať, preto simulácie končili prevahou nespolupracujúcich agentov. Pre hodnoty $c = 9$ simulácie končili úplnou nespoluprácou. Pri 75 % počiatočnom pomere kooperujúcich agentov sa aj simulácie s hodnotou $c = 5$ končili úplnou spoluprácou a dokonca ešte pri hodnote nákladov $c = 9$ bol podiel spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov v populácii vyrovnaný.

Funkcia zmeny stratégie na opačnú stratégiu v simuláciách s kumulatívnym ziskom prestala vykazovať vplyv počiatočnej hustoty kooperátorov. Naďalej však reflektovala vplyv hodnoty nákladov, pretože pri všetkých testovaných počiatočných hustotách len pri hodnote nákladov $c = 1$ dokázali spolupracujúci agenti tvoriť väčšinu v populácii. V ostatných prípadoch naďalej tvorili menej než polovicu z celkového počtu agentov. Tento jav bol spôsobený tým, že čím bola vyššia hodnota nákladov, tým menej sa



Obr. 3.11: Šírenie stratégie spolupracovať v hre na istotu v čase (1) $t = 0$, (2) $t = 50$,(3) $t = 100$,(4) $t = 150$,(5) $t = 200$

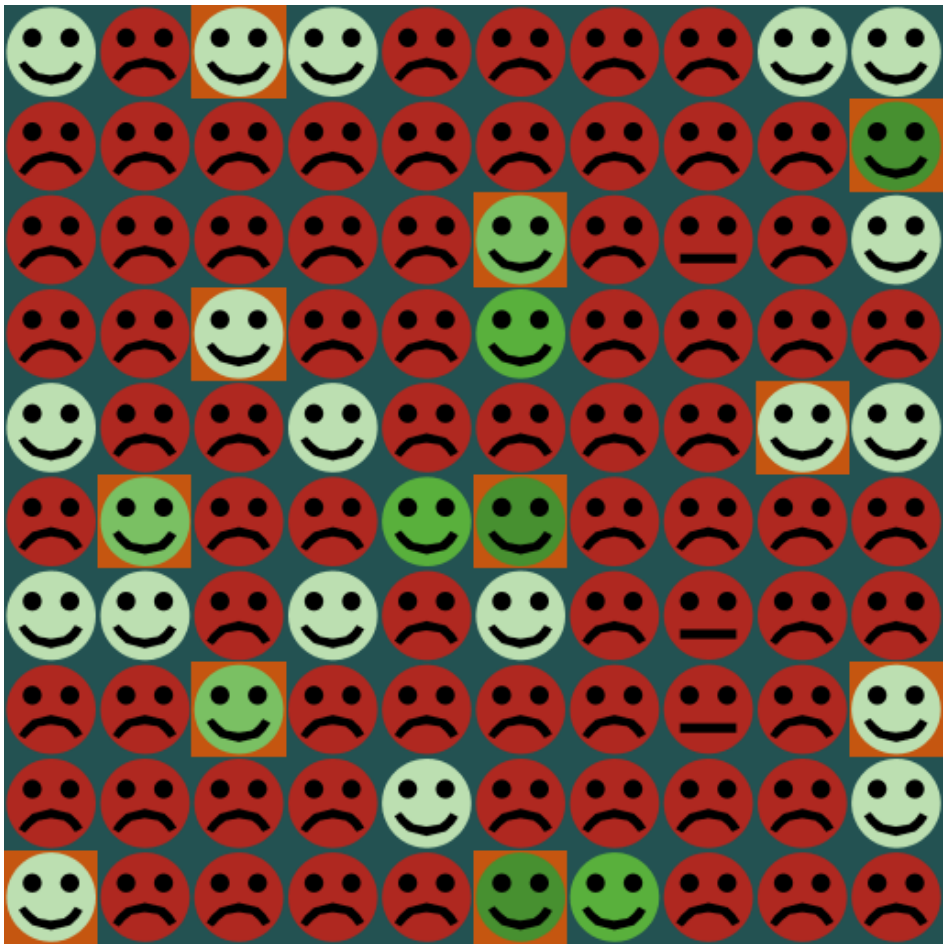
oplatila obojstranná kooperácia v porovnaní s nespoluprácou akéhokoľvek typu. Navyše jednostranná kooperácia sa stávala oveľa riskantnejšou, pretože strata pri nej narastala.

3.3 Hra zbabelec

3.3.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo

Ďalšou testovanou hrou bola hra zbabelec ($T > R > S > P$). Pri funkcii zmeny stratégie imitácie majority sa v simuláciách s 25 % počiatočnou hustotou kooperátorov vo všetkých behoch udržiavali spolupracujúci agenti veľmi ťažko. Dokonca v behoch, kedy hodnota nákladov bola $c = 9$, došlo k úplnej nespolupráci. Zaujímavým javom je však vznik doteraz nepozorovaných štruktúr. Jedná sa o osamotených kooperátorov, čiže spolupracujúcich agentov, ktorých susedstvo tvoria výhradne agenti s nespolupracujúcou stratégiou (Obr. 3.12). Takýchto agentov budeme nazývať altruisti. Celková populácia spolupracujúcich agentov v simuláciách s počiatočnou 25 % hustotou kooperujúcich agentov za akýchkoľvek testovaných hodnôt nákladov bola tvorená práve altruistami. Pri vyrovnanom počiatočnom pomere spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov sa prejavil vplyv hodnoty nákladov. V simuláciách s hodnotou $c = 1$ sa

v jednom prípade nespolupracujúci agenti udržali v populácii tým, že vytvorili zhluk, ostatné behy skončili úplnou nespoluprácou. Podobne pre simulácie, kedy hodnota nákladov bola $c = 3$, vytvorili nespolupracujúci agenti zhluk, vďaka ktorému pretrvali. Za prahovú hodnotu pri takomto nastavení môžeme považovať práve $c = 5$, kedy v dvoch prípadoch skončila spolupracujúca stratégia ako prevládajúca v populácii, no napriek tomu pomer jednotlivých stratégií bol takmer vyrovnaný. Pre hodnoty $c = 7$ a vyššie sa počet spolupracujúcich agentov postupne znižoval. V simuláciách, kde mali spolupracujúci agenti na začiatku simulácie jednoznačnú prevahu, došlo vo všetkých prípadoch k jej úplnému rozšíreniu, a teda k vytlačeniu nespolupracujúcej stratégie.



Obr. 3.12: Ukážka altruistov pri hre zbabelec

Imitácia stratégie s priemerne najvyšším ziskom nám opäť demonštrovala výskyt prahovej hodnoty. Môžeme povedať, že pre všetky simulácie bez rozdielu počiatočnej hustoty s hodnotou nákladov $c = 1$, všetky skončili úplnou spoluprácou. Simulácie s hodnotou nákladov $c = 3$ (takmer 80 %) skončili rovnako úplnou spoluprácou. Avšak v simulácii, kde hodnota nákladov bola $c = 5$, nedošlo k úplnému rozšíreniu jednej zo stratégií. Napriek tomu na grafe vývoja počtu agentov môžeme vidieť, že pre hodnotu $c = 5$ bola stále dominujúcou stratégiou spolupráca. Pre hodnotu $c = 7$ bol pomer

medzi spolupracujúcimi a nespolupracujúcimi agentmi vyrovnaný. V simuláciách, kedy bola hodnota nákladov $c = 9$, už nedokázali kooperátori kompenzovať straty, a preto sa nespolupracujúci agenti stali dominujúcou skupinou.

Podobné správanie pozorujeme aj v simuláciách s funkciou zmeny stratégie imitáciou najúspešnejšieho agenta z okolia. Bez ohľadu na počiatočnú hustotu kooperátorov sa všetky simulácie s hodnotami nákladov $c = 5$ a menej skončili úplnou spoluprácou. Zlomovou nám vyšla hodnota $c = 7$, kedy nedošlo ani v jednom prípade k úplnému rozšíreniu jednej zo stratégií. Oproti výsledkom z imitácie priemerne najziskovejšej stratégie však táto prahová hodnota nebola vôbec tak vyrovnaná, pretože nespolupracujúci agenti tvorili väčšinu v populácii. Toto naznačuje, že imitácia stratégie najúspešnejšieho agenta je citlivejšia na zmenu hodnoty nákladov. Simulácie s hodnotou $c = 9$ skončili úplnou nespoluprácou.

V simuláciách so zmenou stratégie na opačnú nedošlo ani v tomto prípade k vytvoreniu určitej štruktúry, a ani k úplnému rozšíreniu jednej stratégie. Napriek tomu môžeme stále vidieť vplyv hodnoty nákladov. Prahovou hodnotou v prípade voľby opačnej stratégie vychádza hodnota $c = 5$, pretože v 1/3 prípadov skončili simulácie úplným vyrovnaným pomerom spolupracujúcej a nespolupracujúcej stratégie. V simuláciách pod touto hodnotou tvorili spolupracujúci agenti väčšinovú časť populácie. Naopak, v simuláciách s hodnotou vyššou ako $c = 5$ tvorili menšinovú zložku populácie.

3.3.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom

Môžeme povedať, že v simuláciách hry zbabelec s kumulatívnym ziskom sme dostávali podobne výsledky ako pri simuláciách, kde sa zisk počítal len za posledné kolo. Pri imitácii majority pri počiatočnom 25 % zastúpení kooperátorov rovnako prevládala nespolupracujúca stratégia s pretrvávajúcimi altruistami. Tí sa dokázali udržať len v simuláciách s hodnotou nákladov $c = 7$ a menej. Zmena však nastala pri simuláciách s vyrovnaným pomerom spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov. Pri kumulatívnom zisku sa začali objavovať osamotení paraziti (Obr. 3.13). So stúpajúcou hodnotou nákladov sa počet nespolupracujúcich agentov zväčšoval, čím sa aj vytrácala možnosť pre agentov stať sa osamoteným parazitom. Namiesto toho sa vytvárali veľké zhluky nespolupracujúcich agentov. Pri 75 % hustote kooperátorov sa osamotení paraziti vyskytli takmer v každej simulácii bez ohľadu na testovanú hodnotu nákladov.

Pri imitácii priemerne najziskovejšej stratégie s kumulatívnym ziskom sme dostali výsledky, ktoré nám lepšie reflektujú prahovú hodnotu nákladov. V simuláciách s menšinovým podielom kooperátorov a hodnotou nákladov $c = 1$ skončili simulácie úplnou spoluprácou. Kľúčová bola hodnota $c = 5$, pri ktorej simulácie končili takmer vyrovnaným pomerom spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov. Podobne tomu bolo aj v simuláciách s 50 % a 75 % počiatočnou hustotou kooperujúcich agentov.

Obr. 3.13: Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov a parazitov, ktorá dobre znázorňuje ziskovosť rôznych typov agentov v hre zbabelec

Rovnako aj imitácia stratégie najziskovejšieho agenta s kumulatívnym ziskom dobre reflektovala prahovú hodnotu, pri ktorej spolupracujúci agenti dokážu ešte konkurovať nespolupracujúcim. Avšak ani pri jednom behu bez ohľadu na počiatočnú hustotu kooperátorov nedošlo k úplnému rozšíreniu kooperácie. Zvyšujúca sa hodnota nákladov mala za následok úbytok spolupracujúcich agentov, ale aj parazitov v populácii.

Imitácia priemerne najziskovejšej stratégie, ale aj imitácia stratégie najziskovejšieho agenta sú funkcie zmeny stratégie, ktoré najlepšie ukazujú štrukturálne zloženie populácie agentov charakteristických pre hru zbabelec. Spolupracujúci agenti sa potrebujú naďalej zhlukovať, aby odolali vykorisťovaniu, no tieto zhluky nemajú formu kompaktných zhlukov (Obr. 3.14).

Pri funkcii zmeny stratégie na opačnú stratégiu kumulatívny zisk zabezpečil, že simulácie viacej reagujú na počiatočnú hustotu spolupracujúcich agentov. Naďalej však prahovou hodnotou zostáva $c = 5$, kedy je pomer spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov v populácii najviac vyrovnaný.

Obr. 3.14: Ukážka vlaknovitých štruktúr charakteristických pre hru zbabelec

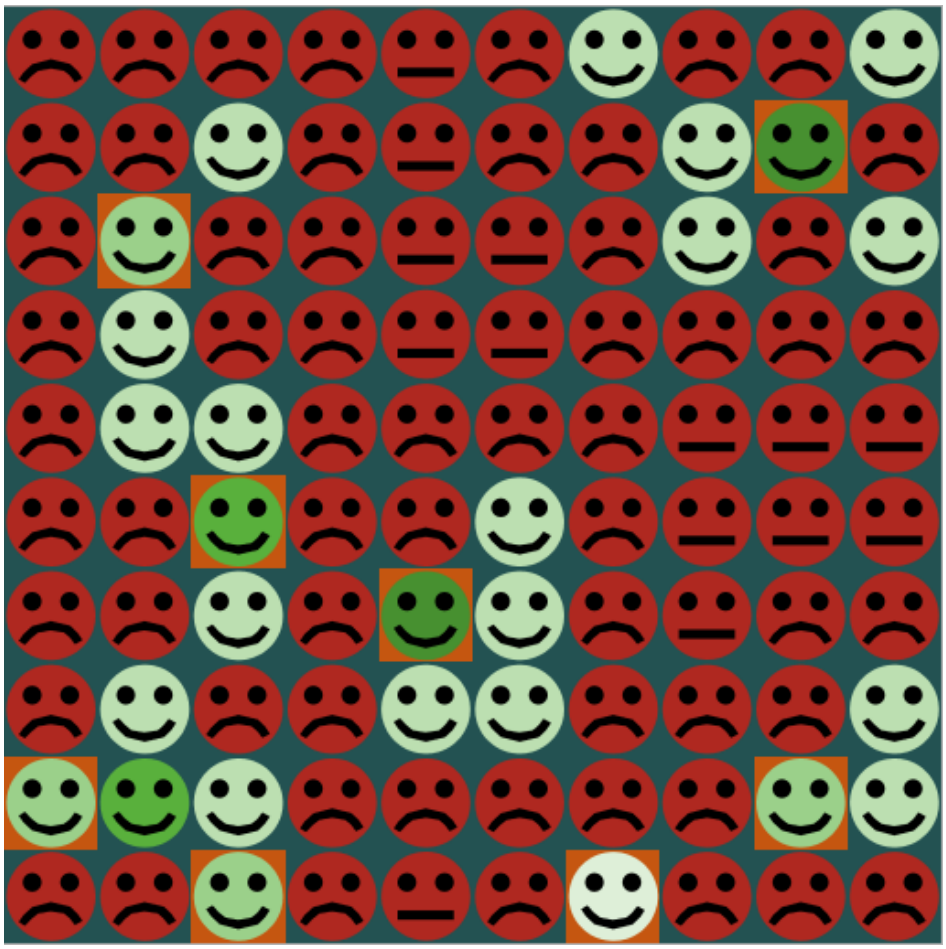
3.4 Privilegovaná hra

3.4.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo

Ako vyplýva z matice výnosov privilegovanej hry ($R > T > S > P$), najziskovejšou stratégiou v simuláciách je vzájomná spolupráca. Avšak druhou najziskovejšou stratégiou je jednostranná nespolupráca. Ako uvidíme vo výsledkoch, oba tieto faktory mali vplyv na správanie sa agentov v populácii.

Hustota počiatočnej kooperácie zohrala veľký vplyv aj v simuláciách privilegovanej hry s imitáciou majority. Pri menšinovom podieli kooperátorov sa spolupracujúcej stratégii darilo veľmi ťažko. Ich počet bol zredukovaný na niekoľko jedincov, ktorí naďalej fungovali ako altruisti (Obr. 3.15). Zaujímavé však je, že dosahovali jednoznačne najvyššie zisky v populácii. Dôvodom, prečo sa ich stratégia nerozšírila pri imitácii majority, bol práve ich malý počet a roztrúsenosť po populácii.

Už zmena na počiatočný vyrovnaný stav spolupracujúcich a nespolupracujúcich agentov mala za následok, že pri hodnote nákladov $c = 1$ sa dokázala spolupracujúca stratégia rozšíriť do celej populácie. Bolo to spôsobené tým, že spolupracujúci agenti



Obr. 3.15: Ukážka altruistov pri privilegovanej hre

mali väčšiu šancu vytvoriť kompaktné zhluky, ktoré sa vďaka lokálnej majorite mohli ďalej rozrastať. Avšak, so stúpajúcou hodnotou nákladov prestával byť zisk zo vzájomnej kooperácie atraktívny, čo malo za následok pokles počtu spolupracujúcich agentov. Simulácie, v ktorých už na začiatku tvorili 75 % populácie spolupracujúci agenti, skončili rozšírením spolupracujúcej stratégie pri všetkých testovaných hodnotách nákladov.

Očakávaný výsledok pri imitácii priemerne najziskovejšej stratégie, ale aj imitácie stratégie najúspešnejšieho agenta sa potvrdil, pretože vo všetkých testovaných počiatočných podmienkach bez ohľadu na hodnotu nákladov skončili simulácie úplnou spoluprácou. Z toho vyplýva, že vzájomná kooperácia je v prípade privilegovanej hry jednoznačne najstabilnejšou stratégiou.

Prevládajúca spolupracujúca stratégia bola typická aj pre simulácie, kde funkcia zmeny stratégie bola zmena na opačnú stratégiu. Pri menšinovom zastúpení kooperátorov všetky simulácie skončili prevahou spolupracujúcej stratégie. V simuláciách, kedy bol pomer vyrovnaný alebo boli nespolupracujúci agenti v menšine, pri hodnote nákladov $c = 9$ bol konečný pomer agentov vyrovnaný. Z výsledkov môžeme opäť pozorovať vplyv hodnoty nákladov, nakoľko so stúpajúcou hodnotou c sa pomer medzi

spolupracujúcimi a nespolupracujúcimi agentmi postupne vyrovnával.

3.4.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom

V simuláciách s imitáciou majority, kde bol zisk počítaný kumulatívne, naďalej pretrvávali spomínané závislosti. Pri 25 % hustote kooperátorov rovnako vznikali altruisti. Z celkového pohľadu sa však spolupracujúcej stratégii darilo lepšie, čomu nasvedčuje okrem počtu agentov s touto stratégiou aj fakt, že vo všetkých prípadoch, kedy sa spolupracujúca stratégia dokázala udržať, vznikali zhluky kooperátorov. Čo sme v simuláciách, kedy sa zisk počítal len z posledného kola, nepozorovali. Zvýšením počiatočnej hustoty kooperátorov sa vznik altruistov v populácii zastavil. Namiesto toho sa vo väčšine prípadov skončila simulácia úplnou kooperáciou. Ak sa nespolupracujúca stratégia udržala v populácii, tak len vďaka tomu, že nespolupracujúci agenti vytvorili kompaktný zhluk (Obr. 3.16), kde šírenie spolupracujúcej stratégie bolo náročné. Iba pre hodnotu $c = 9$ tvorili spolupracujúci agenti naďalej menšinu v populácii. Pri počiatočnej prevahe spolupracujúcej stratégie sa rovnako iba pri hodnote $c = 9$ dokázala nespolupracujúca stratégia udržať vo forme niekoľko osamotených parazitov.

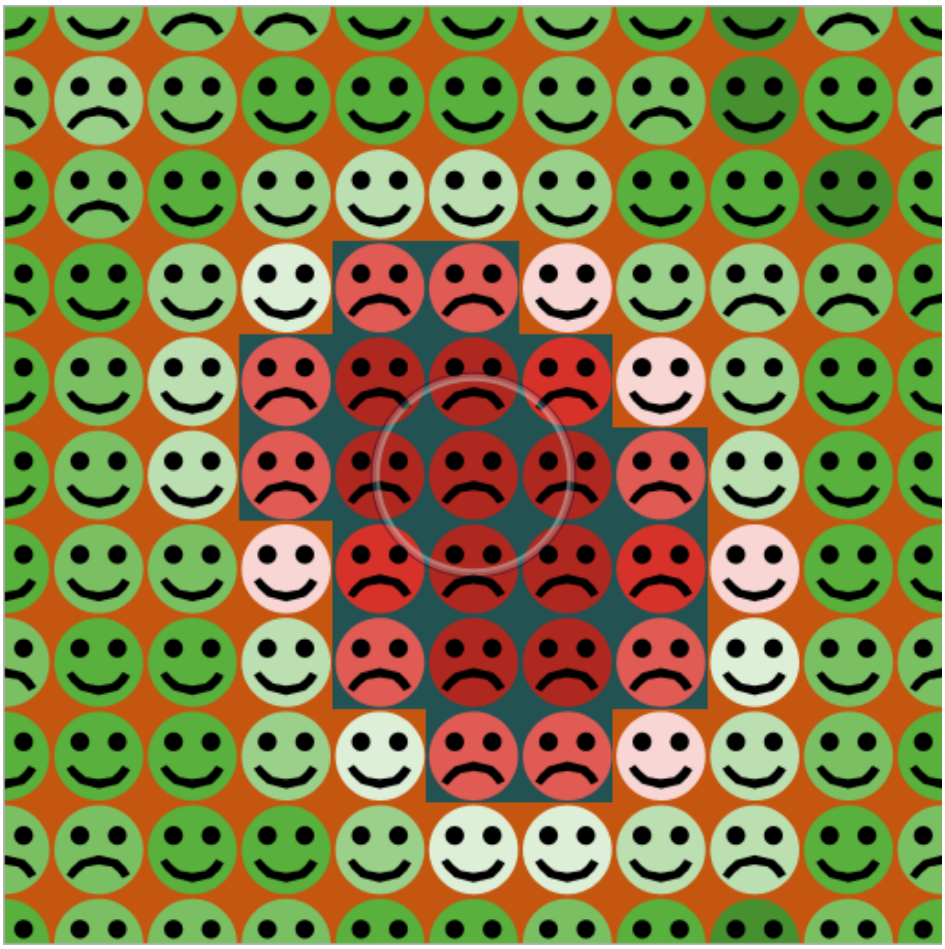
Podobne ako pri simuláciách so ziskom za posledné kolo aj pri kumulatívnom zisku sa imitácia priemerne najziskovejšej stratégie a imitácia najúspešnejšieho agenta pre hodnoty nákladov $c = 1$ až 7 skončila vo všetkých prípadoch úplnou spoluprácou, bez ohľadu na počiatočnú hustotu. K úplnému rozšíreniu kooperujúcej stratégie nedošlo pri simuláciách s hodnotou nákladov $c = 9$ a počiatočnými hustotami 25 % a 50 %. V týchto simuláciách niekoľko nespolupracujúcich agentov zostávalo v podobe osamelých parazitov, prípadne vytvárali menšie zhluky. Počiatočná prevaha kooperátorov urýchlila rozšírenie spolupracujúcej stratégie, preto pri oboch imitáciách niekoľko behov skončilo úplnou spoluprácou. Fakt, že hodnota $c = 9$ je prahovou hodnotou, dokazuje aj funkcia zmeny stratégie na opačnú stratégiu. V simulačných behoch s hodnotou nižšou ako 9 tvorili kooperátori väčšinový podiel v populácii, zatiaľ čo v behoch s hodnotou nákladov $c = 9$ bol pomer v prospech nespolupracujúcich agentov.

3.5 Altruistická dilema

3.5.1 Výsledky simulácií so ziskom za posledné kolo

Charakteristickým prvkom altruistickej dilemy ($T > P > R > S$) je fakt, že oba prípady nespolupráce prinášajú agentom väčšie výnosy ako kooperácia. To vytvára veľký predpoklad, že nespolupracujúca stratégia bude v simuláciách s altruistickou dilemou oveľa viacej stabilnejšia ako stratégia spolupracovať.

Všetky simulácie s imitáciou majority a počiatočnou 25 % a 50 % hustotou koope-

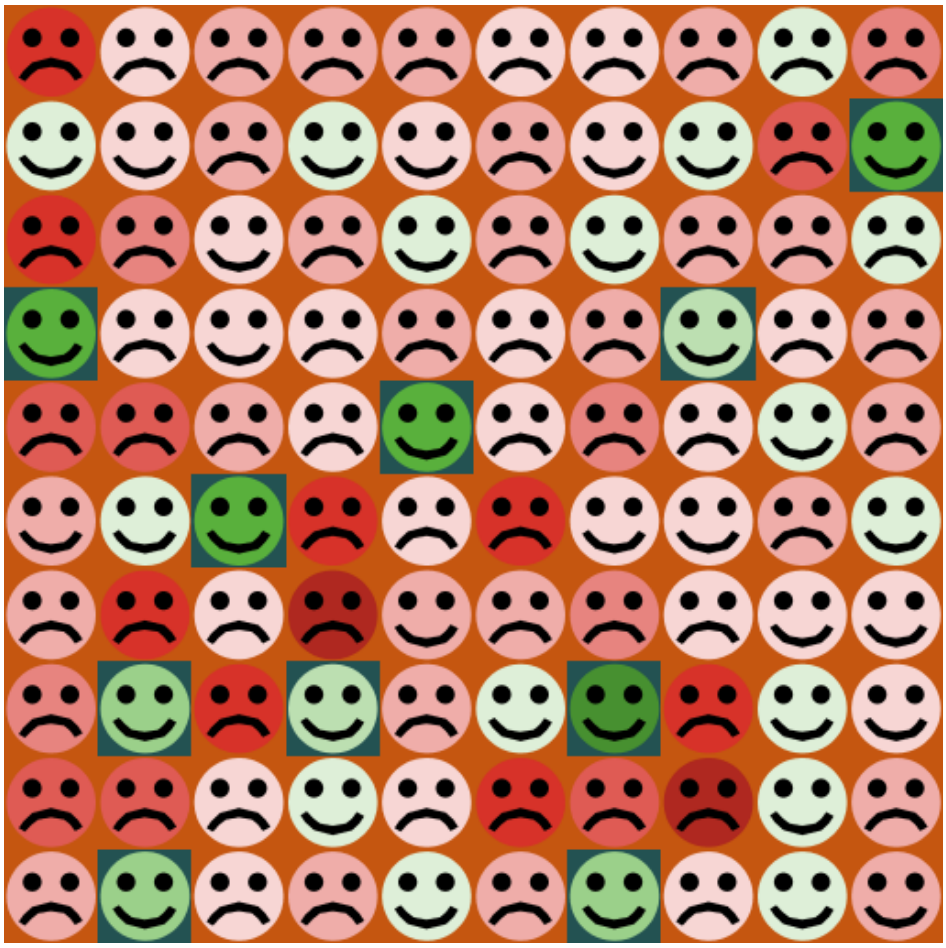


Obr. 3.16: Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov, ktorá dobre znázorňuje ziskovosť rôznych typov agentov v privilegovanej hre

rátorov skončili úplnou nespoluprácou. Simulačné behy so 75 % hustotou kooperátorov však ukázali, aký veľký je vplyv počiatočnej hustoty kooperátorov v simuláciách s imitáciou majority, pretože všetky behy síce neskončili úplným rozšírením jednej zo stratégií, ale spolupracujúca stratégia tvorila väčšinovú časť populácie. Zvyšní nespolupracujúci agenti fungovali ako osamotení paraziti (Obr. 3.17), prípadne sa zhlukovali tak, aby každý mohol parazitovať aspoň na jednej obeti.

Imitácia priemerne najziskovejšej stratégie a imitácia najúspešnejšieho agenta vo všetkých prípadoch za akýchkoľvek podmienok skončila úplným rozšírením nespolupracujúcej stratégie. Tento výsledok je však očakávaný, nakoľko tieto funkcie zmeny stratégie sa odvíjajú od ziskov agentov.

Zaujímavé však je, že pri zmene stratégie na opačnú nepozorujeme vplyv zmeny hodnoty nákladov. Všetky simulačné behy skončili prevahou nespolupracujúcej stratégie a pomer medzi agentmi sa so zvyšujúcou hodnotou nemenil. Z výsledkov s rôznymi počiatočnými hustotami kooperátorov vyplýva, že optimálny počet spolupracujúcich agentov pri zmene na opačnú stratégiu sa pohybuje medzi 20 – 30 % populácie.



Obr. 3.17: Ukážka parazitov jednotlivcov v hre altruistickej dilemy

3.5.2 Výsledky simulácií s kumulatívnym ziskom

Výsledky simulácií altruistickej dilemy s kumulatívnym ziskom sa len veľmi málo odlišujú od tých so ziskom za posledné kolo. Naďalej môžeme pozorovať vplyv počiatočnej hustoty pri imitácii majority, kde v prípadoch 25 % a 50 % hustote všetky simulácie skončili úplnou nespoluprácou. V simuláciách, kde mali pri inicializácii spolupracujúci agenti prevahu, nedošlo k úplnému rozšíreniu ani v jednom behu. Pri kumulatívnom zisku navyše úplne zaniká vplyv hodnoty nákladov. Populácie nespolupracujúcich agentov sa vyznačujú tvorením osamelých parazitov, prípadne zhlukov parazitov (Obr. 3.18), ktoré patria k najziskovejším zoskupeniam v populácii.

Zavedením kumulatívneho zisku sme nedocielili, aby sa v simuláciách s imitáciou majority ani imitáciou najlepšieho agenta udržala kooperujúca stratégia. Všetky behy modelu s týmito funkciami zmeny stratégie skončili úplnou nespoluprácou.

Kumulatívny zisk sa však prejavil pri zmene na opačnú stratégiu, kedy oproti simuláciám altruistickej dilemy so ziskom za posledné kolo môžeme pozorovať vplyv počiatočnej hustoty kooperácie. V simuláciách s počiatočným 25 % podielom kooperujúcich agentov sa konečný podiel spolupracujúcich agentov pohyboval okolo 25 %, pri

Obr. 3.18: Ukážka zhluku nespolupracujúcich agentov a parazitov, ktorá dobre znázorňuje ziskovosť rôznych typov agentov v hre altruistickej dilemy

50 % a 75 % počiatočnej hustote sa už konečný podiel pohyboval okolo hodnoty 39 %.

Kapitola 4

Analýza výsledkov

V nasledujúcej časti uvedieme zistené zákonitosti platiace pri konkrétnych hrách, zhrnieme vplyv testovaných parametrov na model a popíšeme preukázané rozdiely v jednotlivých implementovaných funkciách zmeny stratégie.

Samotný výber hry mal veľký vplyv na výsledky simulácie, ktoré boli v prvom rade následkom poradia štyroch výnosových hodnôt. V prípade dilemy väzňa a hry na istotu udržanie sa kooperujúcich agentov záviselo od vytvorenia kompaktného zhluku, vďaka ktorému dokázali obete kompenzovať straty spôsobené parazitovaním. Pre hru zbabelec je zhlukovanie tiež jedným z charakteristických čŕt, avšak zhluky nemajú podobu kompaktných útvarov, ale skôr vláknovitých štruktúr. Táto zmena je spôsobená tým, že v poradí ziskovosti je oproti hrám dilemy väzňa a hry na istotu možnosť byť zradený ziskovejšia, ako možnosť obojstrannej nespolupráce. Inak povedané, ak tento fakt prevedieme do reálneho príkladu zapadnutých vodičov, je lepšie pre vodiča obetovať sa a odhádzať cestu sám, ako keby to nespravil nikto.

Privilegovaná hra sa vyznačuje rovnakým poradím posledných dvoch výnosových hodnôt, avšak obojstranná spolupráca je najziskovejším prípadom. To bolo dôvodom, že v našom modeli pri privilegovanej hre bola favorizovaná práve spolupracujúca stratégia. Naopak v prípade altruistickej dilemy, kedy posledné dve možnosti sú kooperačné, model jednoznačne favorizoval nespolupracujúcu stratégiu.

Okrem toho charakteristickým prvkom obzvlášť hier dilemy väzňa, hry na istotu a altruistickej dilemy je vznik parazitov jednotlivcov, čiže nespolupracujúcich agentov, ktorí sú úplne obklopení kooperátormi. Tento jav je spôsobený tým, že najmenej ziskovým prípadom je byť zradený. Pre hru zbabelec a privilegovanú hru je charakteristickým vznik altruistov, spolupracujúcich agentov, ktorí vo svojom okolí nemajú iného spolupracujúceho agenta. V týchto prípadoch je totiž obojstranná nespolupráca jednoznačne najhorším prípadom.

Kumulatívny zisk mal oproti jednorazovému zisku za následok výraznejšie favorizovanie najprofitujúcejšej stratégie danej hry. Dobrým príkladom je hra zbabelec,

kde v simuláciách s kumulatívnym ziskom sme sledovali nárast počtu parazitujúcich jedincov oproti výsledkom s jednorazovým ziskom. Okrem toho kumulatívna metóda priniesla v niektorých prípadoch presnejšiu predstavu o prahovej hodnote nákladov.

Vďaka použitiu rôznych funkcií zmeny stratégie v našom modeli môžeme stručne popísať aj ich charakteristické črty. Imitácia majority je najviac závislá funkcia od počiatočnej distribúcie stratégií v populácii. Vo veľa prípadoch nebola najrozšírenejšia stratégia zároveň aj najziskovejšia. To však neznamená, že nemôže odzrkadľovať reálnu situáciu, ako v prípade altruistickej dilemy. Aj keď vzájomné obdarovávanie sa darčekmi je z pohľadu ziskovosti iracionálne, v praxi naďalej funguje, nakoľko ho stále vykonáva dostatok ľudí a jedná sa o dodržiavanie tradícií.

Imitácia priemerne najziskovejšej stratégie a imitácia najúspešnejšieho agenta dosahovali porovnateľné výsledky. S tým rozdielom, že imitácia najúspešnejšieho agenta potrebovala menší počet kôl. O zmene stratégie na opačnú môžeme povedať, že nikdy nevytvorí stabilnú štruktúru a nie je veľmi závislá od počiatočnej hustoty kooperátorov.

Počiatočný podiel spolupracujúcich agentov je v modeli veľmi významným faktorom, obzvlášť pri imitácii majority, ale aj pri ostatných metódach dokáže zrýchliť alebo spomaliť rozšírenie jednej zo stratégií. Pomocou neho môžeme simulovať napríklad reálne situácie, kedy noví zamestnanci sa pričleňujú už k spolupracujúcemu tímu. Náš model simuluje, ako by tieto prípady mohli skončiť.

Okrem intuitívneho záveru, že so stúpajúcimi nákladmi na kooperáciu sa stáva kooperácia náročnejšou, simulácie ukázali aj existenciu prahovej hodnoty, nad ktorou kooperácia už nie je udržateľná.

Kapitola 5

Záver

Cieľom tejto práce bolo ukázať, že dilema väzňa ako jediný model sociálnych interakcií v spojitosti s kooperáciou nie je dostatočný. Preto sme implementovali komplexnejší model zameraný na priestorovú štruktúru populácie umiestnenej na povrchu torusu. K interakciám medzi agentmi dochádzalo len na lokálnej báze v Moorovskom okolí a vo forme jednej z piatich sociálnych hier založených na Heckathgornových definíciách, konkrétne: dilema väzňa ($T > R > P > S$), hra na istotu ($R > T > P > S$), hra zbabelec ($T > R > S > P$), privilegovaná hra ($R > T > S > P$) a atruistická dilema ($T > P > R > S$), pretože celý stavový priestor kolektívnej akcie sa dá popísať pomocou týchto piatich hier. Hry sme následne podložili pre lepšie pochopenie aj ukážkou reálnych situácií z ľudskej spoločnosti.

Model sme testovali s obmenami niekoľkých rôznych hodnôt, či už to bola hodnota nákladov spojených s kooperáciou alebo počiatočný pomer spolupracujúcich agentov v populácii. Tým sme sa snažili dosiahnuť čo najširší záber, aby sme lepšie reflektovali rozmanitosť situácií v reálnom svete. Simulácie s aktuálnym ziskom za posledné kolo sme následne porovnávali so simuláciami, kedy sa zisk počítal kumulatívne počas celého behu simulácie. V modeli je rovnako implementovaných niekoľko odlišných funkcií zmeny stratégie inšpirovaných imitáciou. Konkrétne sa jedná o imitáciu majority, imitáciu priemerne najziskovejšej stratégie a imitáciu najúspešnejšieho agenta. Okrem týchto troch funkcií model navyše obsahuje ešte aj funkciu zmeny na opačnú stratégiu. Celkovo sme model podrobili 1800 simuláciám, z ktorých záznamy spoločne s tabuľkou výsledkov sú na priloženom CD.

Výsledky modelu naznačujú, že počiatočná hustota má obzvlášť veľký vplyv pri imitácii majority vo všetkých hrách. Podobne existuje prahová hodnota nákladov, kedy môžeme povedať, že spolupráca sa už ďalej neopláca. Schopnosť vytvoriť kompaktný zhluk kooperátorov, pomocou ktorého sú schopní sa udržať v populácii, je charakteristická pre viaceré hry. Aj v reálnom svete ľudia často vyhľadávajú spoločnosť iných kooperátorov a sú ochotní spolupracovať len do určitého bodu. Dilema väzňa, hra na

istotu a altruistická dilema sú hry, kde sledujeme výskyt parazitujúcich jednotlivcov. Práve preto tieto hry najlepšie odzrkadľujú reálne situácie v ktorých sa môžeme stretnúť s ľuďmi, ktorí vykorisťujú svoje okolie. Naproti tomu v hre zbabelec a privilegovanej hre sa objavujú altruistickí agenti. Práve toto má za následok, že pri hre zbabelec pozorujeme vytváranie vláknovitých štruktúr v populácii.

Prínosom tejto práce je zvýraznenie, že tak komplexné sociálne správanie, ako je kooperácia, nemôžeme simulovať pomocou jednej dilemy. Rovnako sme pomocou nášho modelu dokázali nasimulovať prípady situácií, v ktorých bola kooperácia považovaná za iracionálnu, napriek tomu sa však v populácii praktikuje.

V budúcnosti by sa model mohol rozšíriť aj o interakcie medzi viacerými aktérmi, napríklad o dilemu verejných statkov alebo dilemy tragédie spoločného. Rovnako zaujímavým faktorom by mohlo byť pridanie individuálnej pamäte agentom či možnosti pohybu a implementácia sociálnych noriem, ako je zlaté pravidlo alebo oko za oko.

Literatúra

[1] Robert Axelrod. An evolutionary approach to norms. *American political science review*, 80(04):1095–1111, 1986.

[2] Ján Badinský. *Modely sociálnych dilem.* Univerzita Komenského» Filozofická fakulta» Katedra sociológie, 2007.

[3] Gary S Becker. *The economic approach to human behavior*. University of Chicago press, 2013.

[4] Cristina Bicchieri. *The grammar of society: The nature and dynamics of social norms*. Cambridge University Press, 2005.

[5] Ken Binmore. *Game theory: a very short introduction*. OUP Oxford, 2007.

[6] Giangiacomo Bravo. Imitation and cooperation in different helping games. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(1):8, 2008.

[7] James S Coleman and James Samuel Coleman. *Foundations of social theory*. Harvard university press, 1994.

[8] Jon Elster. Social norms and economic theory. *The Journal of Economic Perspectives*, 3(4):99–117, 1989.

[9] Joshua M Epstein. Learning to be thoughtless: Social norms and individual computation. *Computational economics*, 18(1):9–24, 2001.

[10] Ernst Fehr and Urs Fischbacher. Third-party punishment and social norms. *Evolution and human behavior*, 25(2):63–87, 2004.

[11] Martha Finnemore and Kathryn Sikkink. International norm dynamics and political change. *International organization*, 52(04):887–917, 1998.

[12] Jack P Gibbs. Norms: The problem of definition and classification. *American Journal of Sociology*, pages 586–594, 1965.

[13] Jürgen Habermas. The theory of communicative action, volume i. *Boston: Beacon*, 1984.

[14] Garrett Hardin. The tragedy of the commons. *science*, 162(3859):1243–1248, 1968.

[15] Christoph Hauert and Michael Doebeli. Spatial structure often inhibits the evolution of cooperation in the snowdrift game. *Nature*, 428(6983):643–646, 2004.

[16] Douglas D Heckathorn. The dynamics and dilemmas of collective action. *American sociological review*, pages 250–277, 1996.

[17] Peter Kollock. Social dilemmas: The anatomy of cooperation. *Annual review of sociology*, pages 183–214, 1998.

[18] Philipp Langer, Martin A Nowak, and Christoph Hauert. Spatial invasion of cooperation. *Journal of Theoretical Biology*, 250(4):634–641, 2008.

[19] Ludwig Johann Neumann and Oskar Morgenstern. *Theory of games and economic behavior*, volume 60. Princeton university press Princeton, 1947.

[20] Pamela E Oliver. Formal models of collective action. *Annual Review of Sociology*, pages 271–300, 1993.

[21] Mancur Olson. *The logic of collective action*, volume 124. Harvard University Press, 2009.

[22] Karl-Dieter Opp. How do norms emerge? an outline of a theory. *Mind & Society*, 2(1):101–128, 2001.

[23] Carlos P Roca, José A Cuesta, and Angel Sánchez. Effect of spatial structure on the evolution of cooperation. *Physical Review E*, 80(4):046106, 2009.

[24] Alicia Ruvinsky. Computational ethics. *Quigley M (ed) Encyclopedia of information ethics and security*, page 76, 2007.

[25] Bastin Tony Roy Savarimuthu and Stephen Cranefield. Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems. *Multiagent and Grid Systems*, 7(1):21–54, 2011.

[26] Yoav Shoham and Moshe Tennenholtz. Emergent conventions in multi-agent systems: Initial experimental results and observations. *KR-92*, pages 225–231, 1992.

[27] Yoav Shoham and Moshe Tennenholtz. On the synthesis of useful social laws for artificial agent societies (preliminary report). In *AAAI*, pages 276–281, 1992.

[28] Yoav Shoham and Moshe Tennenholtz. On the emergence of social conventions: modeling, analysis, and simulations. *Artificial Intelligence*, 94(1):139–166, 1997.

[29] Raimo Tuomela. The importance of us: A philosophical study of basic social notions. 1995.

[30] Edna Ullmann-Margalit. *The emergence of norms*. OUP Oxford, 2015.

[31] Robert N Van Wyk. *Introduction to ethics*. St. Martin's Press, 1990.

[32] Harko Verhagen. Simulation of the learning of norms. *Social Science Computer Review*, 19(3):296–306, 2001.

[33] Adam Walker and Michael Wooldridge. Understanding the emergence of conventions in multi-agent systems. In *ICMAS*, volume 95, pages 384–389, 1995.

[34] Uri Wilensky. Netlogo home page. `https://ccl.northwestern.edu/netlogo/`, 2016. [Online; cit. 2016-05-25].

[35] Michael Wooldridge. *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, 2009.

[36] Jaroslava Palčáková Zimmermann. Modely kolektívnych akcií. *Sociálne a politické analýzy*, (1):67–137, 2010.

Prílohy

CD obsahujúce:

- Model spolu so zdrojovými kódmi
- Záznamy z vykonaných simulácií
- Tabuľky výsledkov jednotlivých hier