

Adaptivni računalniški model skupinskega vedenja plena ob napadu plenilca

Dejan Grbec, Jure Demšar, Iztok Lebar Bajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: dejan.grbec50@gmail.com, jure.demsar@fri.uni-lj.si, ilb@fri.uni-lj.si

Povzetek. Raziskovanje skupinskega vedenja temelji na opazovanju in odkrivanju lastnosti vedenja večjih skupin med seboj podobnih entitet, kot so jate ptic in jate rib. Poleg opazovanja skupin živali v naravi so se v zadnjem času za tovrstne raziskave kot dobri pokazali tudi računalniški modeli. Za dana primera (jate rib in ptic) obstaja veliko različnih računalniških modelov, ki so jih raziskovalci uporabili pri raziskavah različnih lastnosti, kot so: prenos informacije med entitetami, koristnost združevanja v skupino (obramba pred plenilcem, hranjenje), proces odločanja skupine v različnih situacijah in režimi vedenja skupine. Glede na opažanja iz narave in obstoječe modele skupinskega vedenja poznamo štiri različne režime vedenja: neuskaljeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. V naravi je neuskaljeno prepletanje (angl. *swarming*) najbolj značilno za roje insektov, kroženja okrog praznega jedra (angl. *torus*, *milling*) se v posebnih primerih poslužujejo jate rib, delno in močno usklajeno gibanje pa je primarna vrsta gibanja tako jat ptic kot rib. V obstoječih modelih posamezne režime dosežemo s specifičnimi vrednostmi parametrov modela. V pričujočem članku predstavimo adaptivni model skupinskega vedenja plena, ki parametre prilagaja oddaljenosti od plenilca. Z uporabo genetskega algoritma preverimo, katera vrsta vedenja je najboljša protiobramba za različne taktike napada plenilca ter ali plen za učinkovitejšo obrambo pred napadi poseže po prehodih med naštetimi režimi vedenja.

Ključne besede: skupinsko vedenje, adaptivni model vedenja, genetski algoritmi, režimi vedenja, napad plenilca, taktike napada

An adaptive individual-based model of a prey group facing predator attacks

Computational models have been extensively used to investigate various properties of collective behaviour, such as: transfer of information across the group, benefits of grouping (defence against predation, foraging), group decision-making process, and group behaviour types. Based on empirical studies and existing models of collective behaviour there are four distinct types of behaviour: swarming, milling, dynamic parallel movement, and highly parallel movement. Swarming is most often associated with insects. Milling, where individuals perpetually rotate around an empty core, can at special occasions be exhibited by fish schools. Dynamic and highly parallel movement is most often associated with bird flocks and fish schools. In the existing models, these types of behaviour are achieved by tuning certain parameters of the model. In this paper we present an adaptive individual-based model of a prey group facing predator attacks; the prey group adapts its behaviour by changing specific parameters based on the predators' distance. Using a genetic algorithm we investigate a) which type of behaviour is the optimal defence against various predation tactics, and b) if the prey group will resort to transitions between various types of behaviour as a form of advanced defence tactic.

Keywords: collective animal behaviour, adaptive model, genetic algorithms, behaviour types, predator attack

Prejet 26. april, 2016
Odobren 30. junij, 2016

1 UVOD

Skupinsko vedenje je zelo zanimivo področje, ki obravnava skupine entitet, katerih vedenje je sicer preprosto, a opazovane kot celota izkazujejo kompleksno vedenje; vedenje, ki se ga posamezna entiteta ne zaveda. Tipični primeri so jate ptic, jate rib, črede kopitarjev in roji insektov — primeri, ki jih zlahka opazimo v naravi. Podobna vedenja lahko opazimo tudi pri ljudeh — cestni zastoji, množice ljudi na prireditvah itn. Zakaj se živa bitja združujejo v skupine, ni povsem znano. Nekatere študije pravijo, da to lahko pripomore k učinkovitejšemu iskanju hrane in parjenju [1], druge študije nakazujejo, da združevanje v skupine zaradi hidrodinamičnih in aerodinamičnih vplivov pripomore k varčevanju z energijo pri premagovanju razdalj [2], [3]. Ena najpogostejših hipotez pa pravi, da tako vedenje lahko zagotavlja boljšo obrambo pred plenilci [4], [5]. Ta hipoteza je podprta z dokazi, da živali v skupini hitreje odkrijejo plenilca [6] in da je verjetnost napada na določenega posameznika v večjih skupinah manjša [7].

Verjetno najbolj razširjen računalniški model skupinskega vedenja je leta 1987 razvil Reynolds [8]. V njem množica simuliranih živali (angl. *boids*) sledi trem zelo preprostim nagonom (angl. *drives*), končni rezultat pa je kompleksno vedenje skupine. Reynolds je uporabil tri

nagone — razmik (angl. *separation*), poravnavo (angl. *alignment*) in kohezijo (angl. *cohesion*). V takšni ali drugačni obliki se ti nagoni pojavljajo v tako rekoč vseh računalniških modelih skupinskega vedenja, sami modeli pa se uporabljajo na več različnih področjih (računalniška animacija [9], biologija [10], ekologija [11] in behaviorizem [12]).

Ena največkrat uporabljenih in citiranih izvedenk je model, ki so ga razvili Couzin in sod. [13], model smo tudi mi izbrali kot izhodišče naše raziskave. V tem modelu simulirana žival uporablja podobne nagone, kot jih je v svojem modelu uporabljal Reynolds, a tokrat se simulirana žival pri njihovem izračunu zanaša na podatke, ki jih o okolici pridobi s treh območij (območja razmika, območja poravnave in območja kohezije) ter ob vnaprej določenih utežeh istoimenskih nagonov. Couzin in sod. [13] so pokazali, da s spreminjanjem velikosti območja poravnave nastanejo štirje različni režimi vedenja skupine (neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje). Ugotovili so tudi, da obstaja tako imenovani *kolektivni spomin*, ki v odvisnosti od trenutnega režima vedenja ne omogoča prehoda v drug poljuben režim vedenja. Ta omejitev velja za režim kroženja okrog praznega jedra, kjer je prehod iz neusklajenega prepletanja v kroženje okrog praznega jedra mogoč, prehod iz usklajenih oblik gibanja v kroženje okrog praznega jedra pa ni mogoč. Gautrais in sod. [14] so pri konstantnem radiju poravnave enak rezultat dosegli zgolj s spreminjanjem razmerja med utežjo poravnave in utežjo kohezije. Z vpeljavo plenilca, ki je izpostavljen vplivom hidrodinamike je De Rosi [15] ob nespemljivih parameterih modela vedenja plena pokazal, da z višanjem koeficienta upora ob upoštevanju hidrodinamičnih lastnosti uspešnost plenilca pada. Demšar in Lebar Bajec [16] sta pozneje pokazala, da je uspešnost plenilca odvisna tudi od taktike, ki jo le-ta uporablja pri napadu. Kot dobra strategija izbire tarče se izkaže napad najbolj izoliranega posameznika.

Pri raziskavah skupinskega vedenja se v zadnjem času veliko uporabljajo tako imenovani adaptivni modeli. V nasprotju s klasičnimi računalniškimi modeli skupinskega vedenja se vedenje entitet v adaptivnih modelih skozi čas ali kako drugače spreminja. Pri časovnem spreminjanju se z uporabo genetskih algoritmov simulira nekakšna evolucija vedenja entitet. V katero smer bo evolucija vedenje potisnila, pa določajo pritiski, katerim so izpostavljene entitete. Na primer pričakujemo lahko, da bodo napadi plenilca usmerjali evolucijo plena proti čim bolj učinkoviti obrambi oziroma izmikanju plenilcu. Wood in Ackland [17] sta s časovnim prilagajanjem parametrov modela raziskovala vplive napadov plenilca in potrebe po hranjenju na evolucijo vedenja skupine. Rezultati njune študije nakazujejo, da je združevanje plena v skupino ključno pri napadu plenilca, kar pa ne velja za hranjenje. Kunz in sod. [18] so razisko-

vali vedenje plena v odvisnosti od zmotljivosti plenilca ter ugotovili, da je pri napadu nezmotljivega plenilca združevanje v skupino le redkokdaj koristno, medtem ko se pri napadu zmotljivega plenilca močno obrestuje. V primerjavi z [15], [16], [19] in našo raziskavo pa Kunz in sod. v modelu vedenja plena niso implementirali zaznave plenilca, kar pomeni da se plen plenilcu ni mogel aktivno izogibati z bežanjem. Demšar in sod. [19] so z evolucijo naprednih taktik napada plenilca pokazali, da je pri zmotljivem plenilcu razprševanje, ki mu sledi napad najbolj izoliranega posameznika, veliko učinkovitejša taktika napada kot zaporedni napadi z eno izmed preprostih taktik (napad najbolj središčnega, napad najbližjega in napad najbolj izoliranega posameznika) čeprav se lahko izbrana taktika med zaporednimi napadi spreminja. S tem, da so avtorji implementirali zaznavo plenilca ter plenu omogočili bežanje, so pokazali tudi, da je taktika razprševanja bistveno boljša pri izničevanju uspešnosti zakasnjene odziva plena kot enega mogočih načinov obrambe.

Čeprav so štirje različni režimi vedenja skupine dobro znani, pa ni še nihče raziskoval, ali bi oz. kako bi lahko plen z menjavanjem režimov vedenja ob napadu plenilca izboljšal svojo možnost za preživetje. V ta namen smo razširili osnovni model Couzina in sod. [13] tako, da lahko plen parametre modela prilagaja oddaljenosti plenilca, in z uporabo genetskih algoritmov izvedli analizo evolucije vedenja plena v odvisnosti od različnih taktik napada plenilca in njegove zmotljivosti. Tako smo želeli preveriti, katera vrsta vedenja je najboljše protiobramba za različne plenilčeve taktike napada ter ali prehodi med naštetimi režimi pripomorejo k učinkovitejši obrambi pred plenilcem. Pri evoluciji smo po vzoru Demšarja in sod. [19] uporabili zmotljive in nezmotljive plenilce z različnimi taktikami napada: napad najbližjega, napad najbolj središčnega, napad najbolj izoliranega posameznika in napad s pomočjo razprševanja, ki mu sledi napad najbolj izoliranega posameznika. Demšar in sod. [19] so s pomočjo genetskih algoritmov raziskovali razvoj parametrov vedenja naprednega plenilca. V naši raziskavi smo ubrali nasprotno smer in s pomočjo genetskih algoritmov optimizirali parametre vedenja plena, ki so se prilagajali glede na oddaljenost plenilca. V nadaljevanju najprej podrobneje predstavimo model in opazovane metrike, nato predstavimo in komentiramo rezultate, sledi sklep.

2 MODEL

Naš računalniški model skupinskega vedenja je zasnovan na delovanju modela, ki so ga razvili Couzin in sod. [13]. Posamezne entitete živijo v treh dimenzijah, vsak posameznik pa je opisan s svojo lokacijo v prostoru, c_i , ter smerjo gibanja, \hat{v}_i , kjer je \hat{x} enotski vektor vektorja x , definiran kot $\hat{x} = x/|x|$. Hitrost posameznikov, s , je konstantna in določena kot parameter modela, glej tabelo 1.

Tabela 1: Parametri modela vedenja plena in njihove vrednosti, v okviru katerih smo s pomočjo genetskega algoritma optimizirali vedenje skupine pri napadu plenilca

| Parameter | Enota | Oznaka | Vrednosti [privzeta vrednost] |
|------------------------|--------------------|----------|-------------------------------|
| Število posameznikov | / | N | 150 |
| Velikost plena | Enot | S | 0.2 |
| Radij razmika | Enot | r_r | 1 |
| Radij poravnave | Enot | r_o | 1–11 |
| Radij kohezije | Enot | r_a | 14 |
| Radij zaznave plenilca | Enot | r_e | 0–20 [20] |
| Utež razmika | / | w_r | 0–1 [1] |
| Utež poravnave | / | w_o | 0–1 [1] |
| Utež kohezije | / | w_a | 0–1 [1] |
| Utež bežanja | / | w_e | 0–2 [1] |
| Hitrost | Enot na sekundo | s | 3 |
| Največji kot zavijanja | Stopinj na sekundo | θ | 40 |
| Napaka (S.D.) | Stopinj | σ | 0.57 |
| Vidni kot | Stopinj | α | 270 |
| Časovni korak | Sekund | τ | 0.1 |

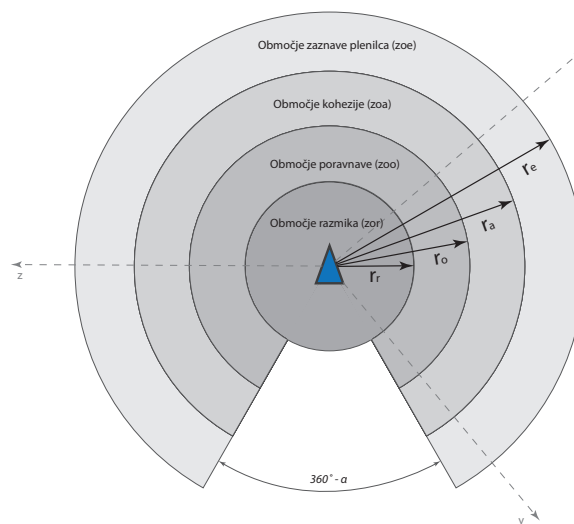
Na vsakem koraku simulacije, ki predstavlja 0.1 s (τ), se na podlagi informacij, pridobljenih iz okolice, izračuna vpliv na smer gibanja posameznika, kar povzroči rotacijo vektorja smeri \hat{v}_i . Pri rotaciji smeri je specifičan največji mogoči kot rotacije θ , ki ga lahko posameznik opravi v enem koraku simulacije. Če je kot med trenutnim smernim vektorjem $\hat{v}_i(t)$ in zelenim smernim vektorjem $\hat{d}_i(t + \tau)$ manjši od največjega dovoljenega kota zavijanja θ , potem v naslednjem koraku simulacije smerni vektor posameznika postane kar vektor želene smeri $\hat{v}_i(t + \tau) = \hat{d}_i(t + \tau)$. Če je kot med omenjenima vektorjema večji od največje dovoljene vrednosti, potem se izvede rotacija smernega vektorja posameznika proti vektorju želene smeri, a zgolj za kot θ . Vsak korak gibanja torej poteka po naslednjem postopku:

1. izračun zelenega smernega vektorja \hat{d}_i na podlagi vektorja lokacije posameznika, c_i , in informacij o okolici,
2. posodobitev vektorja smeri gibanja \hat{v}_i s pomočjo zelenega smernega vektorja \hat{d}_i z rotacijo za kot θ , če kot med vektorjema presega θ , sicer $\hat{v}_i(t + \tau) = \hat{d}_i(t + \tau)$,
3. sprememba lokacije glede na posodobljeno vrednost smeri gibanja $c_i(t + \tau) = c_i(t) + \tau s \hat{v}_i(t + \tau)$.

Koraka 1 in 2 se izvedeta za vse posameznike sočasno, šele nato se izvede korak 3. Najpomembnejša komponenta, ki vpliva na gibanje posameznika oz. cele skupine, je tako zeleni smerni vektor \hat{d}_i . Ta se izračuna na podlagi informacij o okolici, kar bomo podrobneje razložili v nadaljevanju.

2.1 Plen

Osnovni cilj plena je preživetje. Plen ima definirana štiri območja: območje razmika, območje poravnave,



Slika 1: Območja zaznave plena

območje kohezije in območje zaznave plenilca, kot nakazuje slika 1. Tako ima vsak posameznik podane naslednje parametre: vidni kot α , radij razmika r_r (ZOR, angl. *zone of repulsion*), radij poravnave r_o (ZOO, angl. *zone of orientation*), radij kohezije r_a (ZOA, angl. *zone of attraction*), radij zaznave plenilca r_e (ZOE, angl. *zone of escape*), nagonom pripadajoče uteži w_r , w_o , w_a , w_e , hitrost s , največji kot zavijanja θ in napako pri izračunu zelene smeri σ . Po vzoru Couzina in sod. [13] smo s σ simulirali napako, ki jo posameznik stori zaradi npr. napačne zaznave in drugih fizičnih oz. psihičnih razlogov. Omenjena napaka se s pomočjo sferično ovite Gaussove porazdelitve s standardno deviacijo σ izraža kot rotacija vektorja smeri gibanja \hat{v}_i za naključni kot v poljubni smeri. Pri vidnem polju

posameznika se v obliki odsekanega stožca z notranjim kotom $(360 - \alpha)^\circ$, kjer je α vidni kot, upošteva tudi slepi kot, ki je prisoten pri večini živih bitij. Slepi kot velja za območje poravnave, območje kohezije in območje zaznave plenilca, ko je razdalja do plenilca večja od radija razmika. V območju razmika se slepi kot ne uporablja, saj lahko npr. ribe z uporabo drugih čutil zaznavajo okolico tudi za sabo, a zgolj na kratki razdalji [20].

Če se v območju razmika (ZOR) nahaja eden ali več sosedov, potem se bo posameznik želel oddaljiti od njih in s tem zagotoviti ustrezno velik zasebni prostor. Smerni vektor za zagotavljanje ustrezne razdalje se za posameznika i izračuna kot:

$$\mathbf{d}_r = - \sum_{j \in \mathbf{N}_r} \hat{\mathbf{r}}_{ij}, \quad (1)$$

kjer je $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{c}_j - \mathbf{c}_i$ vektor od obravnavanega posameznika i do sosedu j in $\mathbf{N}_r = \{j \neq i : |\mathbf{r}_{ij}| < r_r\}$ množica zaznanih sosedov v območju ločevanja. To pravilo ima najvišjo prioriteto.

Če posameznik v območju razmika ne zazna nobenega sosedu, se osredini na območje poravnave (ZOO) in območje kohezije (ZOA). Območje poravnave skrbi za usklajeno smer gibanja, smerni vektor torej izračunamo kot vsoto vektorjev smeri gibanja vseh sosedov v območju:

$$\mathbf{d}_o = \sum_{j \in \mathbf{N}_o} \hat{\mathbf{v}}_j, \quad (2)$$

kjer je $\mathbf{N}_o = \{j \neq i : r_r \leq |\mathbf{r}_{ij}| < r_o, \hat{\mathbf{r}}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{v}}_i > \cos \alpha/2\}$ množica zaznanih sosedov v območju poravnave in $\hat{\mathbf{v}}_j$ trenutna smer gibanja sosedu j .

Če posameznik zazna sosede tudi v območju kohezije (ZOA), se le-ta usmeri proti njim:

$$\mathbf{d}_a = \sum_{j \in \mathbf{N}_a} \hat{\mathbf{r}}_{ij}, \quad (3)$$

kjer je $\mathbf{N}_a = \{j \neq i : r_o \leq |\mathbf{r}_{ij}| < r_a, \hat{\mathbf{r}}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{v}}_i > \cos \alpha/2\}$ množica zaznanih sosedov v območju kohezije.

Po vzoru De Rosisa [15] smo model nadgradili tudi z nagonom bežanja (ZOE). Nagon bežanja je po prioriteti enakovreden nagonu razmika in velja za enega ali več zaznanih plenilcev:

$$\mathbf{d}_e = - \sum_{p \in \mathbf{N}_e} \hat{\mathbf{r}}_{ip}, \quad (4)$$

kjer je $\mathbf{N}_e = \{p : |\mathbf{r}_{ip}| < r_e, \hat{\mathbf{r}}_{ip} \cdot \hat{\mathbf{v}}_i > \cos \alpha/2\}$ množica zaznanih plenilcev v območju zaznave plenilca in $\mathbf{r}_{ip} = \mathbf{c}_p - \mathbf{c}_i$ vektor od obravnavanega posameznika i do zaznanega plenilca p . Za plen je bežanje pred plenilcem esencialen nagon, zato ga izvaja v vseh primerih, ne glede na število zaznanih sosedov v drugih območjih.

Pri izračunu vektorja smeri smo po vzoru [14] vpleljali tudi uteži. Njihova naloga je zagotoviti prioriteto posameznih nagonov:

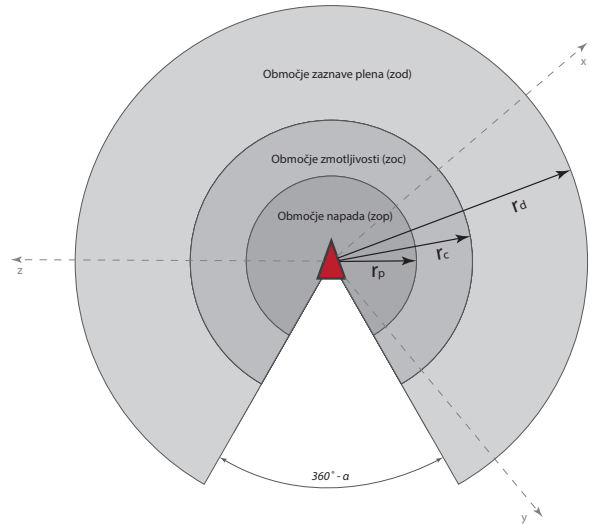
$$\mathbf{d}_i = \begin{cases} w_r \mathbf{d}_r + w_e \mathbf{d}_e, & \mathbf{N}_r \neq \emptyset \\ w_o \mathbf{d}_o + w_a \mathbf{d}_a + w_e \mathbf{d}_e, & \text{sicer.} \end{cases} \quad (5)$$

Pri evoluciji vedenja skupine smo poleg radijev območij prilagajali tudi uteži posameznih nagonov. Plen je omenjene parametre lahko prilagajal oddaljenosti plenilca, in sicer tako, da je za vsakega izmed naslednjih intervalov oddaljenosti plenilca hranil svoj nabor parametrov:

- $[0, 6.66)$ enot — majhna oddaljenost plenilca,
- $[6.66, 13.33)$ enot — srednja oddaljenost plenilca,
- $[13.33, 20)$ enot — velika oddaljenost plenilca,
- $[20, \infty)$ enot — odsotnost plenilca oz. plenilec zunaj vidnega polja.

2.2 Plenilec

Osnovni nagon plenilca je ujeti izbrani plen. Plenilec ima definirana tri območja (glej sliko 2): območje zaznave plena (ZOD, angl. *zone of detection*), območje zmotljivosti (ZOC, angl. *zone of confusion*) in območje, na katerem plenilec poskusi ujeti izbrani plen (ZOP, angl. *zone of predation*). V območju zaznave plena plenilec na podlagi taktike napada določi ciljnega posameznika in izračuna vektor zelene smeri $\hat{\mathbf{d}}_p(t + \tau)$, ki ga usmeri proti njemu.



Slika 2: Območja zaznave plenilca

Plenilec izvede napad, ko se izbrani plen pojavi v območju napada (ZOP). Verjetnost uspešnosti napada P_c je odvisna od števila posameznikov, ki se nahajajo v območju zmotljivosti plenilca [19], [18]:

$$P_c = \frac{1}{|\mathbf{N}_c|}, \quad (6)$$

Tabela 2: Parametri modela vedenja plenilca in njihove vrednosti, ki smo jih uporabili pri evoluciji plena

| Parameter | Enota | Oznaka | Vrednosti |
|--|--------------------|------------|-----------|
| Število plenilcev | / | N_p | 1 |
| Velikost plenilca | Enot | S_p | 1 |
| Radij območja napada | Enot | r_p | 1 |
| Radij območja zmotljivosti | Enot | r_c | 2.5 |
| Radij območja zaznave plena | Enot | r_d | 120 |
| Hitrost | Enot na sekundo | s_p | 4 |
| Največji kot zavijanja | Stopinj na sekundo | θ_p | 50 |
| Napaka (S.D.) | Stopinj | σ_p | 0.57 |
| Vidni kot | Stopinj | α_p | 360 |
| Čas ravnanja s plenom | Sekund | t_h | 15 |
| Čas za ponovni napad | Sekund | t_r | 15 |
| <i>Parameteri napada s pomočjo razprševanja, ki mu sledi napad najbolj izoliranega posameznika</i> | | | |
| Radij zaključka razprševanja | Enot | r_l | 2 |
| Radij območja iskanja najbolj izoliranega posameznika | Enot | r_t | 7 |

kjer je $N_c = \{j : |\mathbf{r}_{pj}| < r_c, \hat{\mathbf{r}}_{pj} \cdot \hat{\mathbf{v}}_p > \cos \alpha/2\}$ množica posameznikov v območju zmotljivosti. Če plenilcu uspe ujeti plen, potem za določen čas t_h neha iskati novo tarčo. S to lastnostjo simuliramo čas, potreben za ravnanje s plenom (angl. *handling time*). Če plenilcu ne uspe ujeti plena, potem za določen čas t_r preneha slediti jati, s čimer se ponovno osredini na nov plen ter pripravi napad (angl. *refocus time*). Po uspešnem ulovu izbranega plena se število posameznikov v jati zmanjša.

Z izjemo radijev navedenih območij je plenilec opredeljen z enakimi parametri kot plen (tabela 2) in ti imajo tudi enak vpliv na gibanje. Parametri so: hitrost, s_p , največji kot zavijanja, θ_p , napaka pri izračunu zelene smeri, σ_p , ter vidni kot, α_p .

Izbira ciljnega posameznika je odvisna od plenilčeve taktike napada. Implementirali smo štiri [19]:

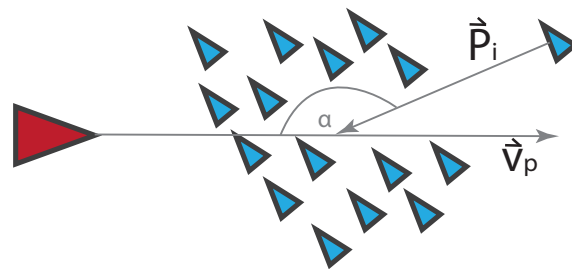
- napad najbližjega posameznika $\mathbf{d}_p = \hat{\mathbf{d}}_n$,
- napad najbolj središčnega posameznika $\mathbf{d}_p = \hat{\mathbf{d}}_c$,
- napad najbolj izoliranega posameznika $\mathbf{d}_p = \hat{\mathbf{d}}_i$ in
- napad s pomočjo razprševanja, ki mu sledi napad najbolj izoliranega posameznika.

Karakteristika plenilca je odvisna predvsem od njegove taktike napada. Pri taktiki napada na najbližjega posameznika plenilec v območju zaznave (ZOD) izbere najbližjega posameznika. Vektor zelene smeri izračunamo kot:

$$\mathbf{d}_n = \mathbf{r}_{pi}, \quad i = \arg \min_{i \in N_p} |\mathbf{r}_{pi}|, \quad (7)$$

kjer je $N_p = \{j : |\mathbf{r}_{pj}| < r_p, \hat{\mathbf{r}}_{pj} \cdot \hat{\mathbf{v}}_p > \cos \alpha/2\}$ množica posameznikov v območju zaznave plena, \mathbf{r}_{pi} pa vektor od plenilca p do izbranega plena i , tako da sta si plen in plenilec med seboj najbližja.

Za določitev najbolj središčnega in najbolj izoliranega posameznika smo uporabili mero obrobnosti $|\mathbf{P}_i|$ [19],

Slika 3: Najbolj izoliran plen, ki se nahaja za jato ($\alpha > 90^\circ$)

[21], [22], kjer je:

$$\mathbf{P}_i = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (8)$$

in $N_i = \{j : |\mathbf{r}_{ij}| < r_a\}$ množica posameznikov, ki so potencialno v interakciji s posameznikom i . Največja vrednost mere tako označuje najbolj izolirane posameznike, najmanjša pa najbolj središčne. Smerni vektor do plena, ki je najbolj središčen, torej izračunamo kot:

$$\mathbf{d}_c = \mathbf{r}_{pi}, \quad i = \arg \min_{i \in N_p} |\mathbf{P}_i|. \quad (9)$$

Pri izračunu smernega vektorja za najbolj izoliran plen moramo poiskati plen z največjo mero obrobnosti, hkrati pa je treba obravnavati tudi perspektivo plenilca, saj se lahko najbolj izoliran plen iz perspektive plenilca nahaja za jato in ga plenilec ne bi smel zaznati (glej sliko 3). Ta pomanjkljivost se odpravi z omejitvijo, da mora biti kot med vektorjem mere obrobnosti plena \mathbf{P}_i in vektorjem smeri gibanja plenilca $\hat{\mathbf{v}}_p$ v intervalu $[-90^\circ, 90^\circ]$. Smerni vektor do najbolj izoliranega plena tako izračunamo kot:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{r}_{pi}, \quad i = \arg \max_{i \in N_p^*} |\mathbf{P}_i|, \quad (10)$$

Tabela 3: Vrednosti metrik m_{group} in p_{group} pri različnih režimih vedenja skupine

| Režim vedenja | m_{group} | p_{group} |
|----------------------------------|-------------|-------------|
| Neusklajeno prepletanje | Nizek | Nizek |
| Kroženje okrog praznega jedra | Visok | Nizek |
| Delno in močno usklajeno gibanje | Nizek | Visok |

kjer je $\mathbf{N}_p^* = \mathbf{N}_p - \{j \in \mathbf{N}_p : \hat{\mathbf{P}}_j \cdot \hat{\mathbf{v}}_p \leq 0\}$ množica posameznikov, ki so v območju zaznave plenilca in se iz zornega kota plenilca nahajajo na sprednji strani jate.

Napad s pomočjo razprševanja je taktika, s katero plenilec razprši jato na manjše enote, takoj za tem pa napade najbolj izoliranega posameznika [19]. Plenilec v ta namen najprej identificira najbližjega posameznika, nato v množici posameznikov, ki so z njim potencialno v interakciji, poišče najbolj središčnega posameznika in ga zasleduje, dokler ni od njega oddaljen zgolj r_l enot. Takrat se razprševanje konča in sledi napad na najbolj izoliranega posameznika, ki pa ga plenilec izbere v radiju r_t . Smerne vektorje za razprševanje skupine (sledenje najbolj središčnemu posamezniku) in napad na najbolj izoliranega posameznika izračunamo enako kot v enačbah (9) in (10).

2.3 Opazovane metrike

Couzin in sod. [13] so za analizo vedenja skupine uporabili dve metriki, ki skupaj določata režim vedenja: polarizacija p_{group} in vrtilni moment skupine m_{group} . Polarizacija skupine nam sporoča stopnjo usklajenosti skupine v smeri in hitrosti. Izračunamo jo kot:

$$p_{group} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i \right|. \quad (11)$$

Večje vrednosti (blizu 1) pomenijo višjo stopnjo polarizacije, skupina pa se pod takimi pogoji giba delno usklajeno ali močno usklajeno.

Druga metrika, vrtilni moment skupine, specificira stopnjo gibanja posameznikov pravokotno na smer proti središču skupine v enaki krožni smeri. Večje vrednosti (blizu 1) tako pomenijo veliko število posameznikov, ki se gibajo pravokotno na smer proti središču skupine v enaki smeri (krožijo okrog praznega središča). Vrtilni moment skupine izračunamo kot:

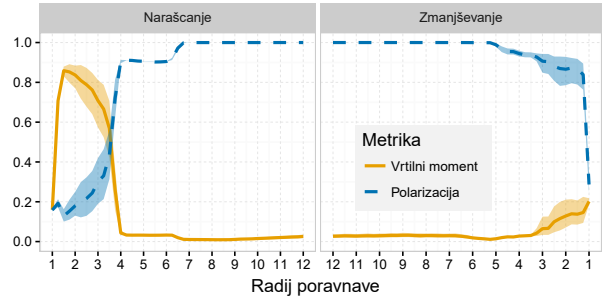
$$m_{group} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{r}}_{ic} \times \hat{\mathbf{v}}_i \right|, \quad (12)$$

kjer je

$$\mathbf{r}_{ic} = \mathbf{c}_i - \mathbf{c}_{group} \quad (13)$$

in

$$\mathbf{c}_{group} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{c}_i. \quad (14)$$



Slika 4: Gibanje povprečja in intervala zaupanja metrik vrtilnega momenta in polarizacije skupine pri povečevanju in zmanjševanju radija poravnave (št. ponovitev: 30, CI: 95 %, velikost jate: 100, vsi drugi parametri kot v tabeli 1)

Tabela 3 povzema relacije med režimi vedenja ter metrikama p_{group} in m_{group} , kot so jih ugotovili Couzin in sod. [13]. Poskus, pri katerem smo z izjemo intervala spreminjanja radija poravnave uporabili enake vrednosti parametrov kot Couzin in sod. [13, slika 4], smo ponovili tudi v naši raziskavi in prišli do enakih ugotovitev. Na levem grafu slike 4 sta prikazani metriki pri povečevanju radija poravnave, kjer lahko izluščimo prehode med različnimi režimi vedenja skupine (prepletanje → kroženje → usklajeno gibanje). Na desnem grafu slike 4 pa prikazujemo vrednosti metrik pri zmanjševanju radija poravnave, kjer lahko opazimo odsotnost prehoda v režim kroženja okrog praznega jedra (usklajeno gibanje → prepletanje).

Za namene analize evolucij vedenja skupine smo vpeljali še štiri dodatne metrike. Te so povprečna razdalja do najbližjega soseda (nnd), število ulovov (n_k), število trkov (n_c) in število jat ob koncu simulacije (n_F). Povprečna razdalja do najbližjega soseda pomeni zgoščenost skupine in jo izračunamo kot:

$$nnd = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min_{j \in \mathbf{N}_i} |\mathbf{r}_{ij}|. \quad (15)$$

Pri vsaki simulaciji, ki traja $T\tau$ časa, beležimo število plenilčevih ulovov in trkov med posamezniki. Trk smo zabeležili, ko sta bila dva posameznika bliže drug drugemu, kot je njuna velikost:

$$n_c = \sum_{t=0}^T \frac{|\mathbf{C}(t)|}{2}, \quad \mathbf{C}(t) = \{i | \exists j : j \neq i, |\mathbf{r}_{ij}(t)| \leq S\}. \quad (16)$$

Naj bo i ciljni posameznik, ki ga v času t izbere plenilec. Plenilec ujame plen z verjetnostjo P_c , ko se plen i pojavi v območju napada:

$$n_k = \sum_{t=0}^T \mathbf{K}(t), \quad \mathbf{K}(t) = \begin{cases} 1, & |\mathbf{r}_{pi}(t)| \leq r_p \wedge P_c < \chi \\ 0, & \text{sicer.} \end{cases} \quad (17)$$

kjer je χ naključno enakomerno porazdeljeno realno število na intervalu $[0, 1]$.

Po vsaki končani simulaciji smo izračunali tudi število samostojnih jat. Samostojna jata je sklenjena veriga posameznikov [23], ki v območjih razmika, poravnave ali kohezije posredno ali neposredno zaznajo vsaj enega sosedu. Vsi člani samostojne jate torej ne zaznavajo članov drugih samostojnih jat, kar pomeni, da samostojne jate nimajo medsebojnega vpliva. Samostojno jato lahko rekurzivno definiramo kot:

$$1. i \leq N, \quad 2. i \in \mathbf{G}_i, \quad 3. i \in \mathbf{G}_i \Rightarrow \mathbf{N}_i \subset \mathbf{G}_i. \quad (18)$$

Razbitje množice posameznikov $\{1, \dots, N\}$ na samostojne jate je tedaj:

$$\mathbf{F} = \{\mathbf{G}_{i_1}, \dots, \mathbf{G}_{i_n}\} \quad (19)$$

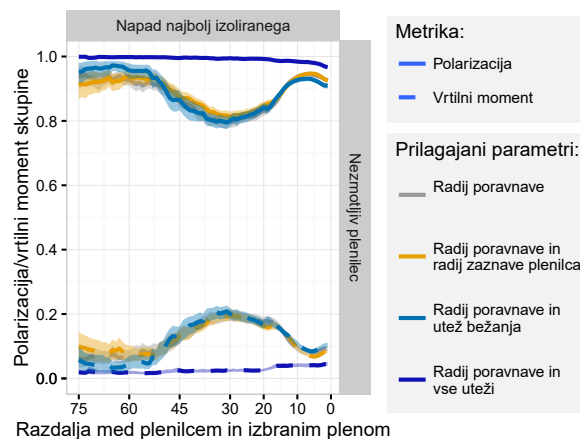
in metrika števila jat:

$$n_F = |\mathbf{F}|. \quad (20)$$

3 REZULTATI

Analizo vedenja skupine pri napadu plenilca smo izvedli z opazovanjem metrik polarizacije skupine p_{group} , vrtilnega momenta skupine m_{group} in povprečne razdalje do najbližjega sosedu nnd . Metrike smo beležili na samostojni jati, v kateri se je nahajal izbran plen. Metrike smo beležili v relaciji z razdaljo med izbranim plenom in plenilcem, ko je le-ta izvajal napad. Omenjenih metrik nismo beležili, ko se je plenilec pripravljal na nov napad (angl. *refocus*) ali ko je ravnal s plenom (angl. *handling*). Za vsak nabor parametrov, ki jih je plen lahko prilagajal v odvisnosti od oddaljenosti plenilca (radij poravnave, radij poravnave in radij zaznave plenilca, radij poravnave in utež bežanja, radij poravnave in uteži vseh nagonov) smo izvedli 14–15 evolucij. Za vsako rešitev smo nato izvedli 10 ponovitev beleženja metrik. Za vsak nabor optimiziranih parametrov to skupaj pomeni 140–150 ponovitev beleženja metrik. Poleg naštetih metrik smo beležili tudi splošne metrike, ki določajo uspešnost skupine pri napadu plenilca. Splošne metrike smo beležili 3500 časovnih korakov, ko je po uvodnih 500 časovnih korakih, v katerih se je vedenje stabiliziralo, plenilec zaporedno napadal skupino z različnimi taktikami napada. Splošne metrike so bile: povprečno število ulovov n_k , povprečno število trkov med posamezniki n_c , povprečna cenilka genetskega algoritma f in število samostojnih jat n_F (razpadi skupine) ob koncu simulacije, tj. po skupaj 4000 časovnih korakih.

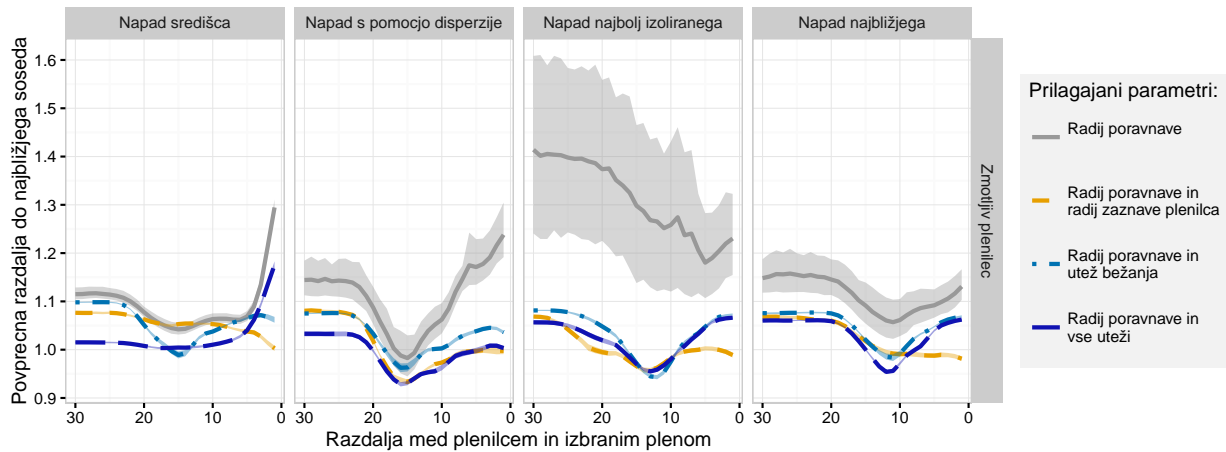
Pri evolucijah z napadi zmotljivega plenilca smo pri vseh taktikah napada opazili ponavljajoči se vzorec, pri katerem se je v območju razdalje med plenilcem in izbranim plenom [5, 20] spreminjal režim vedenja iz močnega v delno in nato znova v močno usklajeno gibanje. Tako vedenje je konsistentno s parametri vedenja, pri katerih so vrednosti radija poravnave na intervalih srednje oddaljenosti, velike oddaljenosti in odsotnosti plenilca nihale v enakem zaporedju v okviru vrednosti, ki ustrezajo navedenim režimom vedenja.



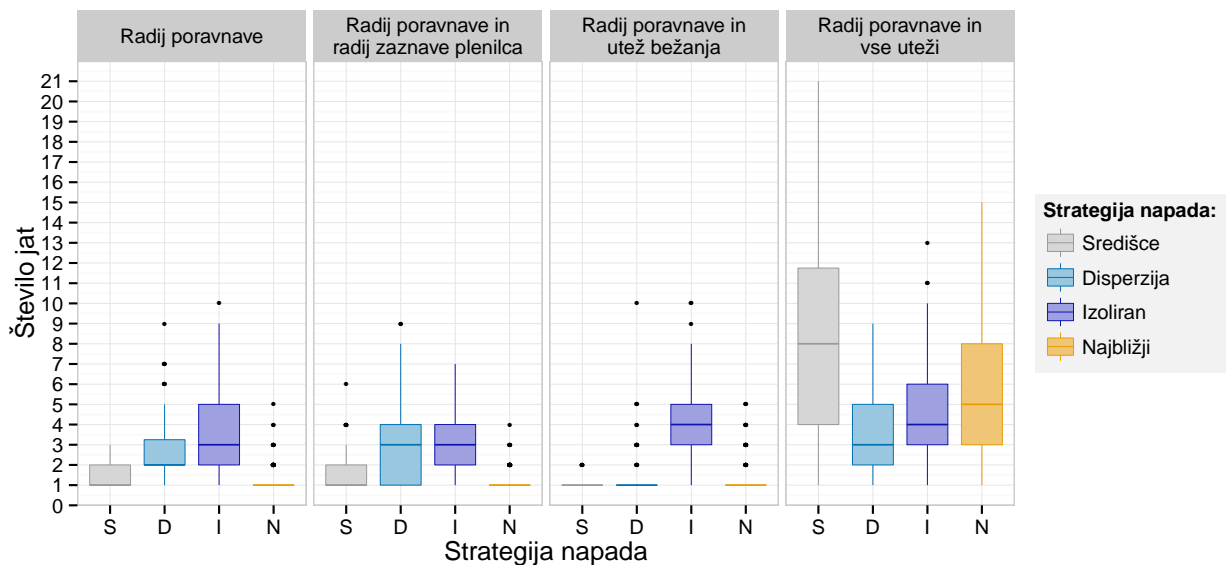
Slika 5: Prikaz poskusa vzpostavitve režima kroženja okrog praznega jedra

Posebna izjema so bile evolucije vedenja pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. V teh primerih je vrednost radija poravnave na intervalu odsotnosti pri večini naborov prilagodljivih parametrov konvergirala proti vrednostim, ki so značilne za kroženje okrog praznega jedra. Ta vzorec ni bil prisoten zgolj tedaj, ko je plen lahko prilagajal radij poravnave in uteži vseh nagonov. Vrednosti radija poravnave so bile v tem primeru namreč zunaj intervala, ki je značilen za ta režim vedenja. To potrjuje tudi graf polarizacije in vrtilnega momenta (glej sliko 5), kjer se metrike za to vrsto evolucije močno razlikujeta od preostalih treh, pri katerih je plen lahko prilagajal zgolj radij poravnave, radij poravnave in radij zaznave plenilca ali radij poravnave in utež bežanja. Gibanje vrednosti metrik teh treh evolucij nakazuje poskus vzpostavitve režima kroženja okrog praznega jedra, vendar vrtilni moment in polarizacija skupine ne dosežeta ustreznih vrednosti. V danih primerih se polarizacija skupine zmanjša na ~ 0.8 in vrtilni moment poveča na ~ 0.2 , kar pa ne zadošča stabilnemu kroženju okrog praznega jedra (glej vrednosti metrik na intervalu [1.5, 3] na sliki 4). Vzrok za to pripisujemo kolektivnemu spominu [13], ki onemogoča neposreden prehod vedenja skupine iz usklajenega gibanja, ki ga povzroči plenilec, v kroženje okrog praznega jedra.

Nato smo se osredinili na analizo metrike povprečne razdalje do najbližjega sosedu (nnd). Pri napadih zmotljivega plenilca poskuša skupina ohraniti čim manjšo razdaljo do najbližjega sosedu (slika 6), kar ji poveča verjetnost preživetja (manjša $nnd \Rightarrow$ manjša verjetnost uspešnosti napada). Tukaj želimo opozoriti tudi na zgoštevitev skupine na intervalu razdalje med plenilcem in izbranim plenom [10, 25], kjer v nekaterih primerih nnd pade pod radij razmika (< 1). Tak odziv je najbolj izrazit pri napadu na najbolj izoliran plen, ko plen prilagaja radij poravnave in utež bežanja, kjer se je nnd zmanjšala z 1.08 (SD: 0.007) na 0.94 (SD: 0.026) ($t = 61.5210$, $df = 278$, $P < 0.0001$).



Slika 6: Prikaz gibanja povprečne vrednosti in 95 % intervala zaupanja povprečne razdalje do najbližjega soseda pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom



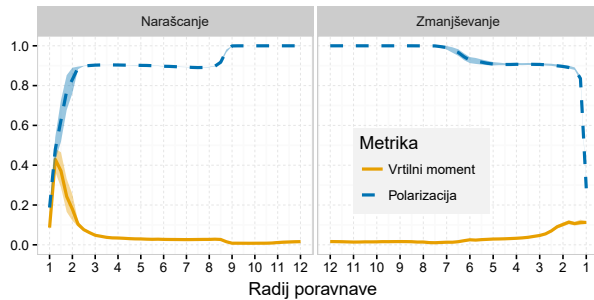
Slika 7: Prikaz povečanega števila jat, ko plen prilagaja radij poravnave in uteži vseh nagonov in v primerih, ko evolucija naborov parametrov poteka z nezmotljivim plenilcem, ki napada najbolj izoliranega posameznika

Pri napadih zmotljivega plenilca nismo opazili očitnega povečanja *ndd* tik pred napadom plenilca. Ta odziv smo poimenovali ignoriranje plenilca, ki plenu poveča možnosti za preživetje zaradi ohranitve še vedno dovolj visoke gostote skupine. Visoka gostota plena v plenilčevem območju zmotljivosti namreč zmanjša verjetnost uspešnosti plenilčevega napada (glej enačbo (6)). Ko je plen lahko prilagajal zgolj radij poravnave, je bil odziv ignoriranja plenilca še neučinkovit, ko pa smo med prilagodljive parametre dodali tudi radij zaznave plenilca oz. uteži nagonov, se je omenjeni odziv izpopolnil.

Pri vseh prilagodljivih modelih so prevladovali usklajene oblike gibanja z izjemo primerov, ko je evolucija potekala z nezmotljivim plenilcem, ki je napadal najbolj izoliranega posameznika. V teh primerih so na intervalu odsotnosti plenilca prevladovali vrednosti radija poravnave, značilne za režim kroženja okrog praznega jedra.

Zaznali smo tudi večje število trkov med posamezniki v primerjavi z evolucijami, ki so potekale z drugimi taktikami napada. Vzrok za povečano število trkov med posamezniki pripisujemo nižji vrednosti polarizacije skupine in večji vrednosti vrtilnega momenta (glej sliko 5), ki povzročita bolj intenzivno delno usklajeno gibanje s težnjo kroženja. Enak vzorec (povečano število) smo zasledili tudi pri številu samostojnih jat ob koncu simulacij. Podobno filozofijo obrambe z razpadi skupine smo zaznali tudi tedaj, ko je plen lahko prilagajal radij poravnave in uteži vseh nagonov ne glede na taktiko plenilca (slika 7).

Pri pregledu posnetkov simulacij smo pri nezmotljivem plenilcu, ki napada najbolj izoliranega posameznika, v uvodnih 500 časovnih korakih odkrili vzpostavitev kroženja okrog praznega jedra, ki se je občasno ohranilo do prvega napada. V tem času je bil režim



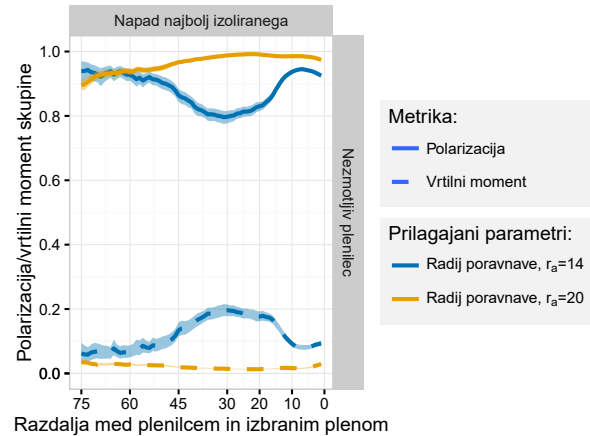
Slika 8: Gibanje povprečja ter intervala zaupanja metrik vrtilnega momenta in polarizacije skupine pri povečevanju in zmanjševanju radija poravnave (št. ponovitev: 30, CI: 95 %, velikost jate: 150, vsi ostali parametri kot v tabeli 1)

kroženja zelo nestabilen, kar pojasnjuje povečano število jat ob koncu simulacije. Nestabilno kroženje okrog praznega jedra je namreč povzročilo razpade skupine in prehode v delno usklajeno gibanje. Kroženja okrog praznega jedra na sliki 5 ne moremo jasno identificirati, ker se je pojavilo samo v uvodni, stabilizacijski, fazi simulacije, tj. v prvih 500 časovnih korakih. Sprva smo tako vedenje pripisali kolektivnemu spominu [13], zato smo poskus režimov vedenja, ki ga prikazuje slika 4, ponovili, tokrat z velikostjo jate 150.

Na sliki 8 je viden neuspešen prehod v režim kroženja okrog praznega jedra. Izkaže se, da povečana velikost jate vpliva na uspešnost vzpostavitve in stabilnost režima kroženja okrog praznega jedra. Pri nadaljnjih poskusih smo prišli do zaključka, da je glavni vzrok za to premajhno območje kohezije ($r_a = 14$). Ponovljen poskus s povečanim radijem kohezije ($r_a = 20$) je prikazal uspešno vzpostavitev režima kroženja okrog praznega jedra, ki je stabilno na intervalu radija poravnave [1.5, 3]. Za stabilno kroženje okrog praznega jedra je tako treba uskladiti radij kohezije z velikostjo jate, česar Couzin in sod. [13] niso poudarili.

Z namenom, da bi preverili, ali bo uskladitev radija kohezije z velikostjo jate pri evoluciji z nezmotljivim plenilcem, ki napada najbolj izolirane posameznike, vodilo v vzpostavitev stabilnega kroženja okrog praznega jedra, smo izvedli dodatne evolucije vedenja plena, ki lahko prilagaja radij poravnave. S tem smo želeli preveriti tudi ali bo stabilno kroženje okrog praznega jedra ob odsotnosti plenilca še vedno najboljši režim vedenja. Rezultate smo primerjali s predhodnimi, ko je bil radij kohezije manjši ($r_a = 14$). Gibanje metrik polarizacije in vrtilnega momenta skupine je enako pri vseh taktikah napada in vrstah plenilca z izjemo napada nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. Tokrat se je skupina pri tej vrsti napada gibala močno polarizirano (slika 9), kar je bila stalnica pri drugih taktikah napada. Število ulovov se je v primerjavi s predhodno evolucijo povečalo, število trkov pa zaradi močno usklajenega gibanja zmanjšalo.

Analiza dodatne evolucije s povečanim radijem kohe-



Slika 9: Vpliv radija kohezije na evolucijo vedenja plena, ko le-ta prilagaja radij poravnave oddaljenosti plenilca

zije nakazuje, da stabilen režim kroženja okrog praznega jedra pri napadu plenilca verjetno ni najboljši, čeprav so pogoji za to izpolnjeni. Razlog, zakaj se kroženje pojavi pri manjšem radiju kohezije, sta po našem mnenju nestabilnost jate in narava napada na najbolj izoliran plen. Z razpadom jate je manjša skupina ali osamelec (posameznik, ki se odcepi) usmerila plenilca stran od preostalih posameznikov, s čimer je bila jati zagotovljena večja možnost za preživetje.

4 SKLEP

Cilj raziskave je bila evolucija parametrov prilagodljivega modela vedenja skupine pri napadu plenilca s pomočjo genetskih algoritmov. Implementirali smo model skupinskega vedenja, s pomočjo katerega so Couzin in sod. [13] ob spreminjanju parametra radija poravnave odkrili več režimov vedenja skupine: neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. S pomočjo evolucije prilagodljivih parametrov vedenja smo želeli preveriti obstoj naprednih tehnik izogibanja ob napadu plenilca, denimo s prehodi med različnimi režimi vedenja. V simulaciji smo uporabili več vrst plenilca z različnimi taktikami napada in lastnostjo zmotljivosti oz. nezmotljivosti. Izvedli smo več evolucij prilagodljivih modelov z različnim naborom parametrov ob različnih vrstah plenilca in jih analizirali. Nabori parametrov prilagodljivih modelov so bili: radij poravnave, radij poravnave in radij zaznave plenilca, radij poravnave in utež bežanja ter radij poravnave in uteži vseh nagonov, ki opredeljujejo vedenje.

Pri vseh rezultatih evolucij so prevladovala usklajena vrste gibanja. Izjema je bila evolucija vedenja skupine ob nezmotljivem plenilcu s taktiko napada na najbolj izoliran plen, kjer je skupina v odsotnosti plenilca nestabilno krožila okrog praznega jedra. Skupina se je k tej vrsti gibanja nagibala zaradi manjše stabilnosti (preprost razpad) in zaradi narave taktike napada, pri čemer je

najbolj izoliran posameznik (osamelec) ali manjša skupina postala vaba in s tem plenilca potencialno usmerila stran od preostalih posameznikov. Pri vseh drugih evolucionih vedenja skupine pri napadu nezmotljivega plenilca so se taktike obrambe pred plenilcem nagibale proti usklajenim vrstam gibanja s prehodi med močno usklajenim in delno usklajenim gibanjem. Pri evolucionih z manjšim naborom parametrov (radij poravnave in radij zaznave plenilca oz. utež bežanja) skupine pri napadu plenilca praviloma niso razpadle. To se je spremenilo pri evolucionih z naborom parametrov radij poravnave in uteži vseh nagonov, saj so skupine postale zelo nestabilne (veliko razpadov). S to taktiko izogiba so jate uporabile podobno filozofijo obrambe, kot smo jo predstavili pri strategiji napada na najbolj izoliran plen (nestabilno kroženje okrog praznega jedra z razpadi).

Pri nezmotljivem plenilcu je uspešnost napada odvisna od zgoščenosti jate v njegovi okolici. Pri odsotnosti plenilca se je skupina v vseh primerih gibala delno ali močno usklajeno. Pri analizi rezultatov smo odkrili dva zanimiva odziva jate ob napadu plenilca. Ko se je plenilec približal jati, se je skupina sprva zgostila, nato pa je sledilo ignoriranje plenilca. Zato plenilcu ni uspelo razpršiti skupine, hkrati pa si je skupina zaradi visoke zgoščenosti zagotovila večjo verjetnost preživetja.

Kot je bilo že povedano, so prevladovale usklajene oblike gibanja z izjemo evolucije ob napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. V tem primeru so vrednosti radija poravnave konvergirale proti režimu kroženja okrog praznega jedra, ki pa se med zaporednimi napadi plenilca ni nikoli uspešno vzpostavil. Vzpostavitev tega režima gibanja smo zasledili samo v začetni fazi stabilizacije vedenja do prvega napada plenilca. V tej fazi je bilo kroženje okrog praznega jedra zelo nestabilno in je prehajalo v delno usklajeno gibanje. Nadaljnja analiza je pokazala, da je bila vzrok za to nestabilnost prenizka vrednost radija kohezije za izbrano velikost jate ($N = 150$). Z dodatno evolucijo prilagodljivega modela z zgolj parametrom radija poravnave ob povečanem radiju kohezije smo preverili, ali je ta režim vedenja še vedno najboljši pri napadu plenilca in ali se ta režim gibanja ohrani oz. okrepi. Rezultati dodatne evolucije kažejo, da stabilno kroženje okrog praznega jedra verjetno ni najboljši režim vedenja, saj vrednosti radijev poravnave težijo proti delno in močno usklajenim vrstam gibanja. V primerjavi z istim prilagodljivim modelom ob manjšem radiju kohezije se je število trkov in jat zmanjšalo. Po drugi strani pa se je število ulovov povečalo, a očitno v primerjavi z zmanjšanjem števila trkov in naštetih jat ne dovolj, da bi prevladovalo.

ZAHVALA

Raziskavo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v okviru programa P2-0359, Vseprisotno računalništvo.

LITERATURA

- [1] J. R. Krebs, N. B. Davies, Behavioural ecology: An evolutionary approach, Oxford: Blackwell Science, 1997.
- [2] R. G. Bill, W. F. Herrnkind, Drag reduction by formation movement in spiny lobsters, *Science* 193 (4258) (1976) 1146–1148.
- [3] B. L. Partridge, T. J. Pitcher, Evidence against a hydrodynamic function for fish schools, *Nature* 279 (5712) (1979) 418–419.
- [4] I. Lebar Bajec, F. H. Heppner, Organized flight in birds, *Animal Behaviour* 78 (4) (2009) 777–789.
- [5] S. I. Nishimura, T. Ikegami, Emergence of collective strategies in a prey-predator game model, *Artificial Life* 3 (4) (1997) 243–260.
- [6] F. Galton, Gregariousness in cattle and men, *MacMillan's Magazine* 23 (136) (1871) 353–357.
- [7] W. D. Hamilton, Geometry for the selfish herd, *Journal of Theoretical Biology* 31 (2) (1971) 295–311.
- [8] C. W. Reynolds, Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 21 (4) (1987) 25–34.
- [9] J. Shopf, J. Barczak, C. Oat, N. Tatarchuk, March of the froblins: Simulation and rendering massive crowds of intelligent and detailed creatures on GPU, in: *ACM SIGGRAPH 2008 Games, ACM*, 2008, pp. 52–101.
- [10] T. S. Deisboeck, I. D. Couzin, Collective behavior in cancer cell populations, *Bioessays* 31 (2) (2009) 190–197.
- [11] H. Hildenbrandt, C. Carere, C. K. Hemelrijk, Self-organized aerial displays of thousands of starlings: A model, *Behavioral Ecology* 21 (6) (2010) 1349–1359.
- [12] D. J. T. Sumpter, The principles of collective animal behaviour, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 361 (1465) (2006) 5–22.
- [13] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton, N. R. Franks, Collective memory and spatial sorting in animal groups, *Journal of Theoretical Biology* 218 (1) (2002) 1–11.
- [14] J. Gautrais, C. Jost, G. Theraulaz, Key behavioural factors in a self-organised fish school model, *Annales Zoologici Fennici* 45 (5) (2008) 415–428.
- [15] A. De Rosis, Hydrodynamic effects on a predator approaching a group of preys, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 414 (2014) 329–339.
- [16] J. Demšar, I. Lebar Bajec, Simulated predator attacks on flocks: A comparison of tactics, *Artificial Life* 20 (3) (2014) 343–359.
- [17] A. J. Wood, G. J. Ackland, Evolving the selfish herd: Emergence of distinct aggregating strategies in an individual-based model, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274 (1618) (2007) 1637–1642.
- [18] H. Kunz, T. Zublin, C. K. Hemelrijk, On prey grouping and predator confusion in artificial fish schools, in: *10th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, MIT Press*, 2006, pp. 365–371.
- [19] J. Demšar, C. K. Hemelrijk, H. Hildenbrandt, I. Lebar Bajec, Simulating predator attacks on schools: Evolving composite tactics, *Ecological Modelling* 304 (2015) 22–33.
- [20] M. Larsson, Schooling fish: A multisensory approach, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2014) 1–15.
- [21] C. K. Hemelrijk, Towards the integration of social dominance and spatial structure, *Animal Behaviour* 59 (5) (2000) 1035–1048.
- [22] C. K. Hemelrijk, J. Wantia, Individual variation by self-organisation: A model, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 29 (1) (2005) 125–136.
- [23] I. Lebar Bajec, N. Zimic, M. Mraz, The computational beauty of flocking: Boids revisited, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 13 (4) (2007) 331–347.

Dejan Grbec je leta 2016 končal bolonjski magistrski študij na Fakulteti za računalništvo in informatiko. Zaposlen je v zasebnem sektorju, v podjetju, ki se ukvarja z razvojem ter integracijo informacijskih sistemov in svetovanjem na področju poslovnih procesov na področju zavarovalništva, poslovne inteligence, upravljanja odnosov v strankami in načrtovanja virov podjetja. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo evalvacijo, razvoj in izboljšanje razvojnih procesov informacijskih sistemov za načrtovanje virov podjetja.

Jure Demšar je diplomiral (2011) na Fakulteti za računalništvo in informatiko, kjer je trenutno doktorski študent-asistent. Raziskovalno se ukvarja z modeliranjem in simulacijo skupinskega vedenja v relaciji plenilec plen. Iz tematike je objavil že več znanstvenih prispevkov.

Iztok Lebar Bajec je diplomiral (2000), magistriral (2002) in doktoriral (2005) na Fakulteti za računalništvo in informatiko. Na isti fakulteti je trenutno izredni profesor. Raziskovalno se ukvarja z modeliranjem in simulacijo skupinskega vedenja ter večvrednostno logiko v kvantnih celičnih avtomatih.