

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Dejan Grbec

**Uporaba genetskih algoritmov za  
optimizacijo parametrov adaptivnega modela  
skupinskega obnašanja ob napadu plenilca**

MAGISTRSKO DELO  
ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

doc. dr. Iztok Lebar Bajec  
MENTOR

Ljubljana, 2016



© 2016, Dejan Grbec

Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja ter Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



## IZJAVA O AVTORSTVU MAGISTRSKEGA DELA

Spodaj podpisani izjavljam, da sem avtor dela, da slednje ne vsebuje materiala, ki bi ga kdorkoli predhodno že objavil ali oddal v obravnavo za pridobitev naziva na univerzi ali drugem visokošolskem zavodu, razen v primerih, kjer so navedeni viri.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Iztoka Lebarja Bajca,
- so elektronska oblika dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko in
- soglašam z javno objavo elektronske oblike dela v zbirki "Dela FRI".

— Dejan Grbec, Ljubljana, februar 2016.



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za računalništvo in informatiko

Dejan Grbec

## Uporaba genetskih algoritmov za optimizacijo parametrov adaptivnega modela skupinskega obnašanja ob napadu plenilca

### POVZETEK

Raziskovanje skupinskega vedenja temelji na opazovanju in odkrivanju lastnosti vedenja večjih skupin med seboj podobnih entitet. Najbolj raziskovane vrste skupin so jate ptic in jate rib. Za dana primera obstaja mnogo različnih modelov skupinskega vedenja, 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. V naši magistrski nalogi smo se osredotočili na različne režime vedenja skupin, prehode med njimi in njihovo koristnost pri napadu plenilca.

V raziskavi uporabljen model vedenja skupine temelji na članku Couzina in sod. [doi:10.1006/jtbi.2002.3065], ki so ugotovili, da s prilagajanjem radija območja poravnave dosežemo štiri različne režime vedenja skupine: neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. Neusklajeno prepletanje (angl. *swarming*) je najbolj značilno za roje insektov, kroženja okrog praznega jedra (angl. *torus*) se v posebnih primerih poslužujejo jate rib, delno in močno usklajeno gibanje pa je primarna vrsta gibanja tako jate ptic kot rib. Z naštetimi režimi vedenja skupine smo želeli preveriti, katera vrsta vedenja je najbolj optimalna protiobramba za različne taktike napada plenilca ter ali prehodi med naštetimi režimi pripomorejo k bolj učinkoviti obrambi pred njim.

**Ključne besede:** Jata ptic, jata rib, skupinsko vedenje, genetski algoritmi, evolucija, adaptivni model vedenja, režimi vedenja, napad plenilca, odziv na plenilca, taktike napada.





University of Ljubljana  
Faculty of Computer and Information Science

Dejan Grbec

## Using genetic algorithms to optimize the parameters of the adaptive model of collective behavior of the predator attack

### ABSTRACT

Collective behaviour research focuses on behaviour properties of large groups of similar entities. The most studied collective behaviour species are flocks of birds and schools of fish. There exist many different computational models of collective behaviour, which researchers used to investigate various properties of collective behaviour like: transfer of information across the group, benefits of grouping (defence against predator, foraging), group decision-making process and group behaviour types. In this thesis we focused on various group behaviour types, transitions between them and their benefits when the prey group is exposed to predator attacks.

In our study we implemented the collective behaviour computational model originally presented by Couzin et al. [doi:10.1006/jtbi.2002.3065], who discovered four different behaviour types by adjusting the radius of the orientation zone: swarming, rotating around an empty core, dynamic parallel movement and highly parallel movement. Swarming is typical for insects, rotating around an empty core (torus) is in special cases exhibited by fish schools and dynamic/highly parallel movement is primary associated with bird flocks and fish schools. With known behaviour types and using various attack tactics we tried to verify which behaviour type is the most efficient defence against predator attacks, and whether transitions between these behaviour types contribute to a more efficient defence.

**Key words:** Flocking, schooling, collective behaviour, genetic algorithms, evolution, adaptive model, behaviour types, predator attack, prey response, attack tactics.



## ZAHVALA

*Zahvaljujem se vsem, ki so mi na kakršenkoli način pomagali in me podpirali pri izdelavi magistrske naloge. Še posebno bi se zahvalil mentorju doc. dr. Iztoku Lebarju Bajcu in asistentu Juretu Demšarju za vso pomoč, podporo in odlično sodelovanje. Zahvalil bi se tudi fakulteti FRI za posojilo super računalnika, ki je mesece prizadevno simuliral evolucije vedenja.*

— Dejan Grbec, Ljubljana, februar 2016.



## KAZALO

<b>Povzetek</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Zahvala</b>	<b>v</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Model skupinskega vedenja</b>	<b>9</b>
2.1 Opis plena . . . . .	10
2.2 Opis plenilca . . . . .	13
2.3 Opazovane metrike in znani režimi vedenja . . . . .	17
<b>3 Genetski algoritem</b>	<b>23</b>
3.1 Cenilka . . . . .	24
3.2 Selekcija . . . . .	24
3.3 Križanje in mutacija . . . . .	25
3.4 Metodologija evolucije plena . . . . .	26
<b>4 Rezultati evolucij</b>	<b>29</b>
4.1 Evolucija radija poravnave . . . . .	30
4.2 Evolucija radija poravnave in radija zaznave plenilca . . . . .	30
4.3 Evolucija radija poravnave in uteži bežanja . . . . .	32
4.4 Evolucija radija poravnave in vseh uteži . . . . .	35
<b>5 Analiza</b>	<b>37</b>
5.1 Analiza rezultatov evolucij . . . . .	38
5.2 Analiza referenčnih režimov vedenja . . . . .	44

5.3	Vpliv radija kohezije na stabilnost kroženja okrog praznega jedra . . . . .	48
5.4	Rezultati dodatne evolucije . . . . .	50
5.5	Analiza dodatne evolucije . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Sklepne ugotovitve in zaključek</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Gibanja cenilk</b>	<b>65</b>

# 1 Uvod

Skupinsko vedenje je zelo zanimivo področje, ki obravnava skupine entitet, katerih vedenje je sila enostavno, skupaj kot celota pa predstavljajo zelo kompleksno vedenje, ki se ga posamezna entiteta predvidoma ne zaveda. Tipični primeri so jate ptic, jate rib in roji insektov – fenomeni, ki jih lahko opazujemo 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 pripomore k bolj učinkovitemu 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 izmed najbolj pogostih teorij pravi, da tako vedenje zagotavlja boljšo obrambo pred plenilci [4, 5]. Ta hipoteza je podprta z dokazi, da živali v skupini hitreje odkrijejo plenilca [6] ter da je verjetnost napada na določenega posameznika v večjih skupinah manjša [7].

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

uporabil 3 nagone – razmik (angl. *separation*), poravnavo (angl. *alignment*) in kohezijo (angl. *cohesion*). V takšni ali drugačni obliki se ti nagoni pojavljajo v praktično vseh modelih skupinskega vedenja. Ti se uporabljajo na mnogo področjih, kot so računalniška animacija [9], biologija [10], ekologija [11] in behaviorizem [12]. V svetu biologov, ekologov in etologov se poskuša algoritme razširjati in nadgrajevati, da bi postali bolj verodostojni za raziskave področja.

Ena izmed največkrat uporabljenih in citiranih nadgradenj je model, ki so ga razvili Couzin in sod. [13], in v magistrski nalogi smo se osredotočili prav na slednjega. V tem modelu simulirana žival uporablja podobne nagone, kot jih je v svojem modelu uporabljal Reynolds, a tokrat se pri njihovem izračunu zanaša na podatke, ki jih simulirana žival o okolici pridobi s treh območij (območja razmika, območja poravnave in območja kohezije) ter ob vnaprej določenih utežeh istonamenskih nagonov. Couzin in sod. [13] so pokazali, da s spreminjanjem velikosti posameznega izmed območij nastanejo štirje različni režimi vedenja skupine (neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje).

V magistrski nalogi smo želeli s pomočjo genetskih algoritmov preveriti možnost evolucije naprednih tehnik izogibanja ob napadu plenilca (npr. spreminjanje režima vedenja skupine). Pri evoluciji smo po vzoru Demšarja in sod. [14] uporabili zmotljive ter nezmotljive plenilce z različnimi taktikami napada: napad najbližjega, napad sredine, napad najbolj izoliranega in napad s pomočjo razpršitve, po kateri sledi napad najbolj izoliranega. Demšar in sod. [14] so s pomočjo genetskih algoritmov raziskovali razvoj naprednega plenilca. V naši magistrski nalogi smo ubrali nasprotno smer in s pomočjo genetskih algoritmov optimizirali reakcije plena ob zaznavi plenilca. Raziskava je potekala postopno v več korakih, pri katerih smo uporabili več taktik napada ter več različnih vrst plenilca. V prvem koraku smo pričeli z osnovnim naborom parametrov vedenja, v vseh nadaljnjih korakih pa smo nabor postopoma nadgrajevali in poskušali s pomočjo genetskega algoritma najti čim bolj optimalne velikosti območij zaznavanja okolice (razmik, poravnava, kohezija, zaznava plenilca) ter uteži ustreznih nagonov. S pomočjo opisanega postopka smo v raziskavi želeli preveriti obstoj naprednih tehnik izogibanja napadu plenilca s spremenljivimi parametri vedenja skupine (velikosti območij in uteži), ki se prilagajajo glede na prisotnost oz. oddaljenost plenilca.

Kot že omenjeno, so Couzin in sod. [13] raziskovali dinamiko skupinskega vedenja. Želeli so razkriti obstoj prehodov med režimi vedenja na ravni skupine ob manjših



spremembah v interakciji na ravni posameznih entitet. S pomočjo spreminjanja radija območja poravnave so odkrili štiri režime vedenja skupine: neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. Ugotovili so, da obstaja tako imenovani *kolektivni spomin*, ki povzroči prehod vedenja skupine iz neusklajenega prepletanja v delno usklajeno gibanje z vmesnim kroženjem okrog praznega jedra, ko sprememba parametrov interakcije poteka v eni smeri, in brez, ko poteka v obratni smeri. V eksperimentu so spreminjali radij območja poravnave, območji razmika in kohezije pa sta ostali enaki. V okviru iste študije so avtorji raziskovali, kako spremembe lastnosti vedenja skupine vplivajo na položaj posameznikov v skupini, torej ali se nahajajo v ospredju, središču ali ozadju skupine. Pri tem so se osredotočili na naslednje parametre: hitrost, kot zavijanja, radij območja razmika, radij območja poravnave in napaka posameznika. Razlike v hitrosti, kotu zavijanja, radiju območja razmika in radiju območja poravnave vplivajo na distribucijo posameznikov v ospredju in središču skupine, medtem ko napaka vpliva zgolj na distribucijo posameznikov v ospredju. Prišli so do naslednjih ugotovitev:

- hitrejši posamezniki se vedno nahajajo v ospredju, hkrati pa so bolj oddaljeni od središča,
- posamezniki z visokim kotom zavijanja se v nasprotju s posamezniki z manjšim kotom zavijanja bolj nagibajo k ozadju skupine ali bližini središča skupine,
- posamezniki z manjšim radijem območja razmika se nahajajo v ospredju ali središču skupine, posamezniki z večjim radijem pa se omenjenim nahajališčem izogibajo,
- posamezniki z manjšim radijem območja poravnave se nahajajo v ozadju skupine, pri večjih radijih pa prehajajo v ospredje skupine,
- posamezniki z višjo stopnjo napake se nahajajo v ozadju skupine.

Gautrais, Jost in Theraulaz [15] so raziskovali model skupinskega vedenja, ki so ga predstavili in analizirali Couzin in sod. [13]. Avtorji so analizirali vplive uteži nagonov in drugih parametrov modela na režime vedenja skupine. Pri tem so si pomagali z metrikama polarizacije celotne skupine in povprečne polarizacije posameznikov v skupini v relaciji z njimi najbolj oddaljenimi sosedi. To zadnjo metriko so izračunali s povprečenjem skalarnih produktov smernih vektorjev vseh posameznikov in njim pripadajočih najbolj oddaljenih sosedov. Poleg teh metrik so opazovali tudi stopnjo povezan-

osti skupin, s čimer so identificirali razpade skupin. Raziskava jih je pripeljala do enakih ugotovitev, kot so jih že predstavili Couzin in sod. [13]. Couzin in sod. so s spreminjanjem radija poravnave odkrili štiri režime vedenja: neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno polarizirano gibanje. Gautrais in sod. so dosegli enak rezultat s spreminjanjem rezmerja med utežjo poravnave in utežjo kohezije, pri čemer je radij poravnave ostal enak. Poleg tega so raziskovali vpliv preostalih parametrov modela na našete režime vedenja skupine. Med njimi so bili slepi kot, kot zavijanja in napaka posameznika. Slepi kot velikosti  $120^\circ$  je povzročil večjo verjetnost razpada skupine, slepi kot velikosti  $180^\circ$  pa je drastično vplival na režim neusklajenega prepletanja, ki je zaradi razpada skupine povsem izginil. Kot zavijanja definira hitrost spreminjanja smeri posameznika. Nizke vrednosti posamezniku ne omogočajo dovolj hitre spremembe vektorja smeri. Posledično se taki posamezniki hitreje razpršijo (razpad jate). V nasprotnem primeru (visok kot zavijanja) so imeli posamezniki visoko zmožnost spremembe vektorja smeri, zaradi česar so se gibali v režimu neusklajenega prepletanja in režimu kroženja okrog praznega jedra. Tretji opazovani parameter je bila napaka posameznika, ki ni vplivala na rezultate opazovanih metrik.

Evolucijo skupinskega vedenja plena s pomočjo genetskega algoritma sta raziskovala tudi Wood in Ackland [16]. Avtorja sta s prilagajanjem parametrov modela raziskovala vedenje skupine pri hranjenju in napadu plenica. Uporabila sta model Couzina in sod. [13], pri katerem sta s pomočjo genetskega algoritma prilagajala parametre radija poravnave, radija kohezije, hitrosti, uteži hranjenja, uteži bežanja pred plenilcem in napake. Pri plenilcu sta vpliv na vedenje plena raziskovala s parametroma vidnega kota in hitrosti. V nasprotju z našo raziskavo sta avtorja izvajala evolucijo plena na individualni ravni, kjer ima vsak posameznik v populaciji edinstvene karakteristike v primerjavi z ostalimi, med drugim pa sta avtorja uporabila konstantne parametre, ki so neodvisni od oddaljenosti plenilca. Rezultati študije nakazujejo, da je združevanje plena v skupino ključno pri napadu plenilca, kar pa ne velja pri hranjenju. Pri napadu plenilca sta avtorja odkrila dva režima vedenja: delno usklajeno gibanje in kroženje okrog praznega jedra. Skupina je uporabila režim delno usklajenega gibanja v primeru manjše stopnje mutacije (5 %), pri kateri je plen izbral visoko hitrost in višji radij poravnave. Učinkovitost vedenja plena pri obrambi pred plenilcem je bila praviloma večja pri manjšem vidnem kotu plenilca. Dani režim gibanja je bil manj pogost, če je imel plen zmanjšan vidni kot zaznave. Druga zaznana vrsta gibanja je bilo kroženje okrog praznega jedra, ki je konsistentno nastalo

pri višji stopnji mutacije (20 %), pri čemer se je plen gibal z nizko hitrostjo in imel manjši radij poravnave. Avtorja sta raziskovala tudi vpliv parametrov napake in uteži bežanja pred plenilcem. Omenjena parametra nista imela vpliva na opazovane metrike. Pri evoluciji vedenja skupine pri hranjenju so posamezniki vedno izbrali visok radij zaznave in majhen vidni kot ( $90^\circ$ ). Posamezniki so se v primeru večje količine hrane na enem mestu združili v skupino in zelo počasi preiskovali prostor. V primeru enakomerno porazdeljene hrane po prostoru so se posamezniki hitreje gibal po prostoru, hkrati pa opustili združevanje v skupino.

De Rosis [17] je model Couzina in sod. [13] nadgradil s plenilcem, ki je podvržen vplivom hidrodinamike, in raziskoval vpliv hidrodinamike na uspešnost plenilca ob napadu na plen. Plen je v njegovi raziskavi ohranjal konstantne radije območij razmika, poravnave in kohezije. Po drugi strani pa je De Rosis pri plenilcu poleg analize vpliva hidrodinamičnega upora v raziskavo vključil tudi analizo vpliva radija območja zaznave oz. načina zaznave plena. Obravnaval je tri načine zaznave: nespremenljiv radij območja zaznave, linearno spremenljiv radij območja zaznave in eksponentno spremenljiv radij območja zaznave. Različni načini zaznavanja plena vplivajo predvsem na uspešnost plenilca, ko mu plen pobegne iz vidnega polja. V trenutku, ko plenilec v svojem vidnem polju ne zazna plena, se mu pri naprednejših metodah radij območja zaznave prične povečevati, linearno ali eksponentno. V omenjenih dveh primerih je bil plenilec bistveno bolj uspešen, ker je v dovolj hitrem času ponovno zaznal plen in ga tudi napadel. Izkazalo se je, da je linearno povečevanje bolj učinkovito od eksponentnega, saj se pri slednjem območje zaznave povečuje prehitro, kar privede do tega, da se plenilec zaradi prevelikega območja zaznavega zmede, ko se jata razdeli na več manjših samostojnih skupin, ločenih med seboj. De Rosis je ugotovil, da hidrodinamične lastnosti močno vplivajo na uspešnost plenilca. Z večjim koeficientom upora uspešnost plenilca pada.

Področje skupinskega vedenja plena pri napadu plenilca so raziskovali tudi Kunz in sod. [18]. Avtorji so raziskovali preživetje plena v odvisnosti zmotljivosti plenilca in združevanja plena v skupino. V primerjavi z našo raziskavo Kunz in sod. v modelu vedenja plena niso implementirali zaznave plenilca, torej se plen ni izogibal plenilcu. V prvi fazi raziskave so preverili preživetje plena ob spreminjanju hitrosti plenilca, časa ravnanja s plenom in zmotljivosti plenilca v prisotnosti plena. Ugotovili so, da je združevanje plena v skupino pri napadu nezmotljivega plenilca le redko koristno. Združevanje v skupino je bilo uspešno le v primeru daljšega časa ravnanja s plenom, saj se je medtem

lahko skupina dovolj oddaljila od plenilca. Hitrost plenilca je močno vplivala na število preživelih plenov. Pri napadu zmotljivega plenilca se je združevanje plena v skupino močno obrestovalo, saj je bilo število preživelega plena visoko kljub nizkemu času ravnanja s plenom in visoki hitrosti plenilca. V drugem delu raziskave so avtorji s pomočjo genetskih algoritmov preverili obstoj taktik vedenja plena pri napadu plenilca. Najpogostejša vrsta vedenja plena pri napadu zmotljivega plenilca je bilo močno usklajeno gibanje. Ostale manj uspešne vrste vedenja so bile (padajoče urejene): kroženje okrog praznega jedra, nihanje (posamezniki se ponavljajoče gibajo proti središču in stran od njega), zelo gosta premikajoča se ali stacionarna skupina in neusklajeno prepletanje. Pri vseh naštetih režimih vedenja skupine so posamezniki občasno zapustili skupino, ki jih je nato običajno ujel plenilec. Ta čas, ko je bil plenilec zaseden z lovom in prebavljanjem posameznika, je imela premikajoča se skupina dovolj časa za pobeg. Ta učinek je bil manj koristen pri stacionarnih režimih vedenja (kroženje, nihanje, gosta stacionarna skupina in neusklajeno prepletanje).

Demšar in Lebar Bajec [19] sta primerjala uspešnost različnih taktik napada na jato ptic. Raziskava je temeljila na obstoječem modelu skupinskega vedenja [20], ki je zasnovan s pomočjo mehke logike. Uporabila sta osnovne nagone, ki jih je postavil že Reynolds (razmik, poravnava in kohezija) [8], le da se ti tokrat izračunavajo na osnovi podatkov, ki jih ptica pridobi o sedmih najbližjih vidnih sosedih. Pticam so dodali še nagon bežanja in uravnavanja hitrosti. Avtorja sta implementirala in analizirala tri različne taktike napada: napad središča jate ptic, napad najbližjega in napad vizualno najbolj izoliranega posameznika. Izkazalo se je, da je v primeru delno usklajenega gibanja plena najboljša taktika prvega napada napad na najbolj izoliran plen.

V kasnejšem članku [14] sta avtorja v navezi s sodelavci z univerze v Groningenu s pomočjo genetskih algoritmov raziskovala evolucijo kompozitnih taktik napada. Raziskava se je osredotočila na dve vrsti kompozitnih taktik: a) zaporedni napadi z eno od enostavnih taktik napada (napad središča, napad najbližjega in napad najbolj izoliranega posameznika), pri čemer se lahko izbrana taktika med zaporednimi napadi menja, in b) napad najbolj središčnega posameznika skupine s ciljem razpršiti skupino in nato napad najbolj izoliranega posameznika. Plenilca so izpostavili trem vrstam plena, ki je izkazoval delno usklajeno gibanje: privzeti plen, plen z zakasnjnim odzivom na plenilca in privzeti plen, pri katerem je bil plenilec vedno uspešen. V prvih dveh primerih je bila uspešnost plenilca odvisna od števila posameznikov v okolici izbrane tarče. S

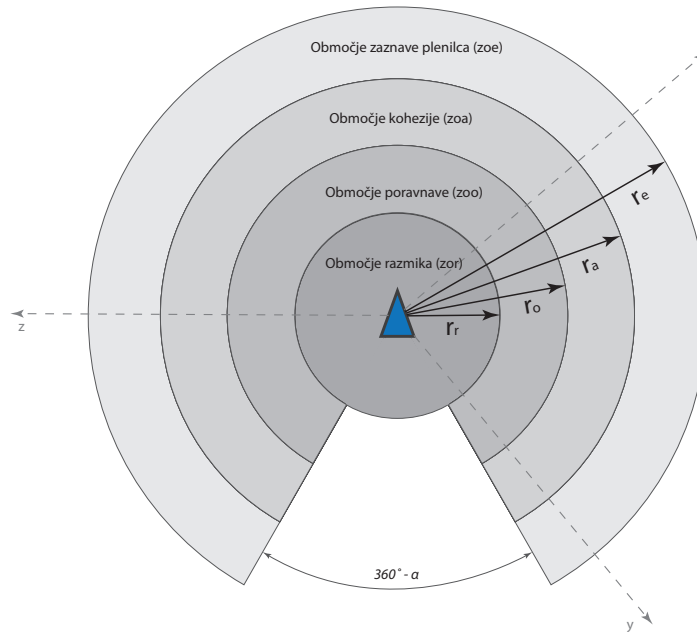
pomočjo genetskih algoritmov so poskušali izpopolniti napadalca za vse tri vrste plena in za omenjene strategije napada. V primeru napada s pomočjo mešanice enostavnih taktik so avtorji želeli najti najbolj optimalno verjetnost izbire posamezne izmed enostavnih taktik, z mešanico katerih bi bil napadalec čim bolj uspešen. Rezultati raziskave kažejo, da je distribucija taktik napada na privzeti plen najbolj naklonjena taktiki napada na najbližjega posameznika (96 %), ostalim taktikam pa je preostalo 4 % (2 % in 1,3 %). Pri napadu na plen z zakasnjnim odzivom je bila distribucija taktik bolj naklonjena strategiji napada na najbolj izoliranega posameznika (84 %), v 12 % primerov je bila izbrana taktika napada najbližjega, napad središča pa je bil izbran v 4 %. Pri napadu na privzeti plen, pri katerem je bil plenilec vedno uspešen, so bili rezultati precej drugačni. Največkrat izbrana strategija je bil napad središča skupine (55 %), napad najbližjega je bil izbran v 40 % primerov, napad najbolj izoliranega pa samo v 4 % primerov. V primeru druge kompozitne taktike (razprševanje jate) so avtorji iskali najbolj primerno razdaljo, na kateri plenilec zaključi razprševanje, in radij, v katerem plenilec nato išče najbolj izoliranega posameznika, svojo končno tarčo. Izkazalo se je, da je taktika razprševanja, ki mu sledi napad najbolj izoliranega posameznika, veliko bolj učinkovita od mešanice enostavnih taktik, predvsem v primerih napada na plen, pri katerem je uspešnost plenilca odvisna od števila posameznikov v okolici tarče (stopnja izoliranosti). Rezultati kažejo tudi, da je ta taktika bistveno boljša pri izničenju uspešnosti zakasnjene odziva kot obrambe.



## 2 Model skupinskega vedenja

V tem poglavju bomo predstavili podrobnosti delovanja modela skupinskega vedenja plena, ki smo ga implementirali po Couzinu in sod. [13]. Model smo razvili v treh dimenzijah, vsak posameznik je opisan z lokacijo,  $\vec{c}_i$  ter smerjo gibanja,  $\hat{v}_i$ , kjer je  $\hat{x}$  enotski vektor vektorja  $\vec{x}$ , definiran kot  $\hat{x} = \frac{\vec{x}}{|\vec{x}|}$ . Hitrost posameznikov,  $s$ , je konstantna in določena kot parameter modela, glej tabelo 2.1.

Na vsakem koraku simulacije, ki predstavlja 0,1 s ( $\tau$ ), 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 specificiran največji možen kot rotacije  $\theta$ , ki ga lahko posameznik opravi v enem koraku simulacije. Če je kot med trenutnim smernim vektorjem  $\hat{v}_i(t)$  in želenim smernim vektorjem  $\hat{d}_i(t + \tau)$  manjši od največjega dovoljenega kota zavijanja  $\theta$ , potem v naslednjem koraku simulacije smerni vektor posameznika postane kar vektor želene smeri  $\hat{v}_i(t + \tau) = \hat{d}_i(t + \tau)$ . V kolikor 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  $\theta$ . Vsak korak gibanja torej poteka po naslednjem postopku:



Slika 2.1: Območja zaznave posameznika.

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

Koraka 1 in 2 se izvedeta za vse posameznike sočasno, šele nato se izvede korak 3. Najbolj pomembna komponenta, ki vpliva na gibanje posameznika oz. celotne skupine, je tako zeleni smerni vektor  $\hat{d}_i$ . Želeni smerni vektor se izračuna na podlagi informacij o okolici.

## 2.1 Opis plena

Osnovni cilj plena je preživetje. Plen ima definirana štiri območja: območje razmika, območje poravnave, območje kohezije in območje zaznave plenilca, kot nakazuje slika

2.1. Vsak posameznik ima tako podane sledeče parametre: vidni kot  $\alpha$ , 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  $\theta$  in napako pri izračunu zelene smeri  $\sigma$ . Po vzoru Couzina in sod. [13] smo z lastnostjo napake  $\sigma$  simulirali napako posameznika, ki jo stori zaradi npr. napačne zaznave in ostalih fizičnih oz. psihičnih razlogov. Namen napake je rotacija vektorja smeri gibanja  $\hat{v}_i$  za naključen kot v poljubni smeri s pomočjo sferično ovite Gaussove porazdelitve s standardno deviacijo,  $\sigma$ . Posameznik ima implementiran tudi slepi kot v obliki odsekanega stožca z notranjim kotom  $(360 - \alpha)^\circ$ , kjer je  $\alpha$  vidni kot. 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 to zgolj na kratki razdalji [21].

Če se v območju razmika (zor) nahaja 1 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 do sosedov se za posameznika  $i$  izračuna kot:

$$\vec{d}_r = - \sum_{\substack{j \in \mathbf{N}_r \\ j \neq i}} \hat{r}_{ij}, \quad \mathbf{N}_r = \left\{ j \mid 0 \leq |\vec{r}_{ij}| < r_r \right\} \quad (2.1)$$

kjer je  $\mathbf{N}_r$  množica zaznanih sosedov znotraj območja ločevanja in  $\vec{r}_{ij} = \vec{c}_j - \vec{c}_i$  vektor od obravnavanega posameznika  $i$  do soseda  $j$ . To pravilo ima najvišjo prioriteto.

Če posameznik v območju razmika ne zazna nobenega soseda, se osredotoči 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 znotraj območja:

$$\vec{d}_o = \sum_{\substack{j \in \mathbf{N}_o \\ j \neq i}} \hat{v}_j, \quad \mathbf{N}_o = \left\{ j \mid r_r \leq |\vec{r}_{ij}| < r_o, \hat{r}_{ij} \cdot \hat{v}_i > \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (2.2)$$

kjer je  $\mathbf{N}_o$  množica zaznanih sosedov znotraj območja poravnave in  $\hat{v}_j$  trenutna smer gibanja soseda  $j$ .

Če posameznik zazna sosede tudi znotraj območja kohezije (zoa), se le ta usmeri proti njim:

$$\vec{d}_a = \sum_{\substack{j \in \mathbf{N}_a \\ j \neq i}} \hat{r}_{ij}, \quad \mathbf{N}_a = \left\{ j \mid r_o \leq |\vec{r}_{ij}| < r_a, \hat{r}_{ij} \cdot \hat{v}_i > \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (2.3)$$

kjer je  $\mathbf{N}_a$  množica zaznanih sosedov znotraj območja kohezije.

Parameter	Enota	Oznaka	Vrednosti [privzeto]
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	$\theta$	40
Napaka (S.D.)	Stopinj	$\sigma$	0,57
Vidni kot	Stopinj	$\alpha$	270
Časovni korak	Sekund	$\tau$	0,1

Tabela 2.1: Tabela prikazuje parametre modela vedenja plena ter njihove vrednosti, v okviru katerih smo s pomočjo genetskega algoritma optimizirali vedenje skupine pri napadu plenilca.

Po vzoru De Rosisa [17] smo model nadgradili tudi z nagonom bežanja (zoe). Nagon bežanja je po prioriteti enakovreden nagonu razmika in velja za enega ali več zaznanih plenilcev:

$$\vec{d}_e = - \sum_{p \in \mathbf{N}_e} \hat{r}_{ip}, \quad \mathbf{N}_e = \left\{ p \mid 0 \leq |\vec{r}_{ip}| < r_e, |\vec{r}_{ip}| < r_r \vee \hat{r}_{ip} \cdot \hat{v}_i > \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (2.4)$$

kjer je  $\mathbf{N}_e$  množica zaznanih plenilcev znotraj območja zaznave plenilca in  $\vec{r}_{ip} = \vec{c}_p - \vec{c}_i$  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 ostalih območjih.

Pri izračunu vektorja smeri smo vpeljali tudi uteži. Njihova naloga je zagotoviti prioriteto posameznih nagonov. Pri evoluciji vedenja skupine smo tako poleg radijev območij prilagajali tudi uteži posameznih nagonov. Končni izračun vektorja zelene smeri  $\vec{d}_i(t + \tau)$  z uporabo zgoraj naštetih pravil je naslednji:

$$\vec{d}_i(t + \tau) = \begin{cases} w_r \hat{d}_r + w_e \hat{d}_e, & |\mathbf{N}_r| > 0, \\ w_o \hat{d}_o + w_e \hat{d}_e, & |\mathbf{N}_r| = 0 \wedge |\mathbf{N}_o| > 0 \wedge |\mathbf{N}_a| = 0, \\ w_a \hat{d}_a + w_e \hat{d}_e, & |\mathbf{N}_r| = 0 \wedge |\mathbf{N}_o| = 0 \wedge |\mathbf{N}_a| > 0, \\ \frac{1}{2}(w_o \hat{d}_o + w_a \hat{d}_a) + w_e \hat{d}_e, & |\mathbf{N}_r| = 0 \wedge |\mathbf{N}_o| > 0 \wedge |\mathbf{N}_a| > 0, \\ w_e \hat{d}_e, & \text{sicer.} \end{cases} \quad (2.5)$$

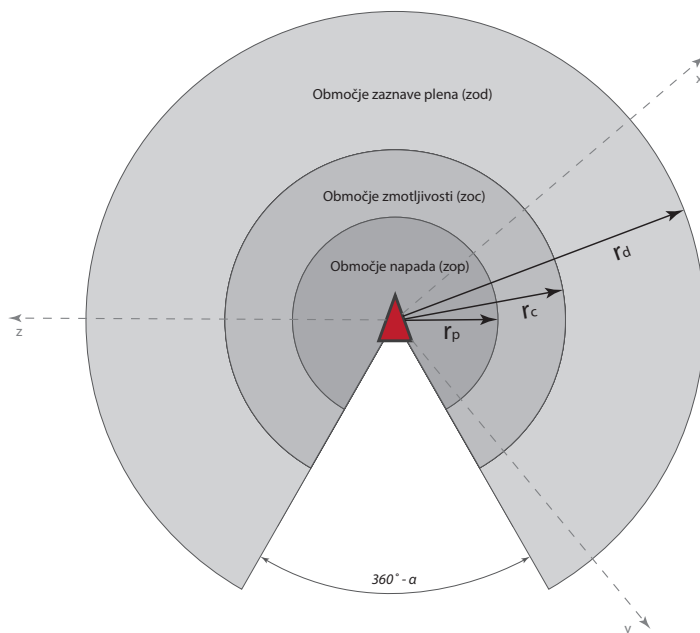
## 2.2 Opis plenilca

Osnovni nagon plenilca je ujeti izbran plen. Plenilec ima definirana tri območja: območje zaznave plena (zod, angl. *zone of detection*), območje zmotljivosti (zoc, angl. *zone of confusion*) in območje, na katerem plenilec poskusi ujeti izbran plen (zop, angl. *zone of predation*) (slika 2.2). V območju zaznave plenilec na podlagi taktike napada določi ciljnega posameznika in izračuna vektor zelene smeri  $\hat{d}_p(t + \tau)$ , ki ga usmeri proti izbranemu posamezniku.

Plenilec izvede napad, ko se plen pojavi v območju napada. Verjetnost uspešnosti napada  $P_c$  je odvisna od števila posameznikov v območju zmotljivosti:

$$P_c = \frac{1}{|\mathbf{N}_c|}, \quad \mathbf{N}_c = \left\{ i \mid 0 \leq |\vec{r}_{pi}| < r_c, \hat{r}_{pi} \cdot \hat{v}_p > \cos \frac{\alpha_p}{2} \right\} \quad (2.6)$$

kjer je  $\mathbf{N}_c$  množica posameznikov v območju zmotljivosti. Če plenilcu uspe ujeti plen, potem preneha iskanje nove tarče za določen čas  $t_h$ . S to lastnostjo simuliramo čas,



Slika 2.2: Območja zaznave plenilca.

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 osredotoči na nov plen ter pripravi napad (angl. *refocus time*). Po uspešnem napadu izbranega plena se število posameznikov v jati zmanjša.

Z izjemo navedenih radijev območij je plenilec opredeljen z enakimi parametri kot plen (tabela 2.2), in ti imajo enak vpliv na gibanje. Parametri so hitrost  $s_p$ , največji kot zavijanja  $\theta_p$ , napaka pri izračunu želene smeri  $\sigma_p$  in vidni kot  $\alpha_p$ .

Izbira ciljnega posameznika je odvisna od plenilčeve taktike napada. Implementirali smo štiri [14]:

- napad najbližjega plena  $\vec{d}_p(t + \tau) = \hat{d}_n$ ,
- napad središča jate  $\vec{d}_p(t + \tau) = \hat{d}_c$ ,
- napad najbolj izoliranega plena  $\vec{d}_p(t + \tau) = \hat{d}_i$  in
- napad s pomočjo disperzije, ki ji sledi napad najbolj izoliranega plena.

Karakteristika plenilca je predvsem odvisna od njegove taktike napada. Pri taktiki napada na najbližji plen plenilec v območju zaznave (zod) izbere najbližjega posameznika.

Parameter	Enota	Oznaka	Vrednosti
Število plenilcev	/	$N_p$	1
Velikost plenilca	Enot	$S_p$	1
Radij napada	Enot	$r_p$	1
Radij zmedenosti	Enot	$r_c$	2,5
Radij zaznave	Enot	$r_d$	120
Hitrost	Enot na sekundo	$s_p$	4
Največji kot zavijanja	Stopinj na sekundo	$\theta_p$	50
Napaka (S.D.)	Stopinj	$\sigma_p$	0,57
Vidni kot	Stopinj	$\alpha_p$	360
Čas ravnanja s plenom	Sekund	$t_h$	15
Čas za ponovni napad	Sekund	$t_r$	15
Parameteri strategije napada s pomočjo disperzije			
Radij zaključka razpršitve	Enot	$r_l$	2
Radij izbire plena	Enot	$r_t$	7

Tabela 2.2: Tabela prikazuje parametre modela vedenja plenilca ter njihove vrednosti, ki smo jih uporabili pri evoluciji plena.

Vektor zelene smeri izračunamo tako:

$$\vec{d}_n(t + \tau) = \vec{r}_{pi} , \quad i = \arg \min_{i \in \mathbf{N}_p} (|\vec{r}_{pi}|) , \quad \mathbf{N}_p = \left\{ i \mid |\vec{r}_{pi}| \leq r_d , \hat{r}_{pi} \cdot \hat{v}_p > \cos \frac{\alpha_p}{2} \right\} \quad (2.7)$$

kjer je  $\vec{r}_{pi}$  vektor od plenilca  $p$  do izbranega plena  $i$  in sta si plen in plenilec med seboj najbližja.

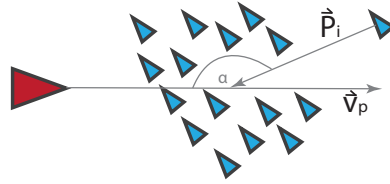
Za določitev najbolj središčnega in najbolj izoliranega plena smo uporabili mero obrobnosti  $|\vec{P}_i|$  [14, 22, 23], kjer je:

$$\vec{P}_i = \frac{1}{|\mathbf{N}_j|} \sum_{\substack{j \in \mathbf{N}_j \\ j \neq i}} \hat{r}_{ij} , \quad \mathbf{N}_j = \left\{ j \mid |\vec{r}_{ij}| < r_a \right\} \quad (2.8)$$

in  $\mathbf{N}_j$  množica sosedov v območju kohezije plena  $i$ . Največja vrednost mere tako označuje najbolj izolirane posameznike, najmanjša pa najbolj središčne. Smerni vektor do plena, ki je najbolj središčen, izračunamo tako:

$$\vec{d}_c(t + \tau) = \vec{r}_{pi} , \quad i = \arg \min_{i \in \mathbf{N}_p} (|\vec{P}_i|) , \quad \mathbf{N}_p = \left\{ i \mid |\vec{r}_{pi}| \leq r_d , \hat{r}_{pi} \cdot \hat{v}_p > \cos \frac{\alpha_p}{2} \right\} \quad (2.9)$$

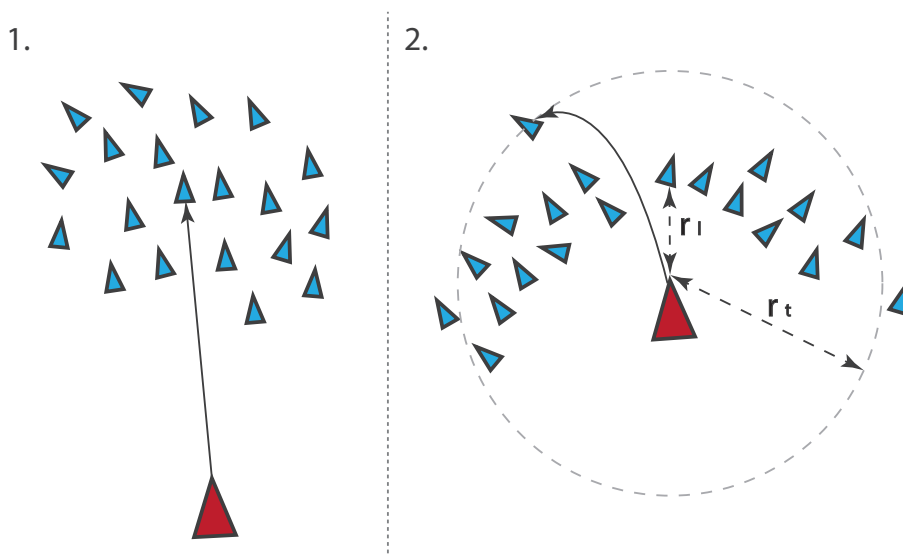
kjer je  $i$  tisti plen v področju zaznave, katerega mera obrobnosti  $|\vec{P}_i|$  je najmanjša. Pri izračunu smernega vektorja za najbolj izoliran plen moramo poiskati plen z največjo mero obrobnosti, hkrati pa je treba obravnavati tudi perspektivo plenilca, saj se lahko najbolj izoliran plen iz perspektive plenilca nahaja za jato in ga plenilec ne bi smel zaznati (slika 2.3).



Slika 2.3: Najbolj izoliran plen, ki se nahaja za jato ( $\alpha > 90^\circ$ ).

To pomanjkljivost se odpravi z omejitvijo, da mora biti kot med vektorjem mere obrobnosti plena  $\vec{P}_i$  in vektorjem smeri gibanja plenilca  $\hat{v}_p$  v intervalu  $[-90^\circ; 90^\circ]$ . Smerni vektor do najbolj izoliranega plena tako izračunamo kot:

$$\vec{d}_i(t + \tau) = \vec{r}_{pi} , \quad i = \arg \max_{i \in \mathbf{N}_p} (|\vec{P}_i|) , \quad \mathbf{N}_p = \left\{ i \mid |\vec{r}_{pi}| \leq r_d , \hat{r}_{pi} \cdot \hat{v}_p > \cos \frac{\alpha_p}{2} , \vec{P}_i \cdot \hat{v}_p > 0 \right\} \quad (2.10)$$



Slika 2.4: Postopek disperzije: razpršitev jate in napad najbolj izolirane tarče.

kjer je  $i$  tisti plen v področju zaznave, katerega mera obrobnosti  $|\vec{P}_i|$  je največja in se z zornega kota plenilca nahaja na sprednji strani jate.

Napad s pomočjo disperzije je taktika, s katero plenilec razprši jato na manjše enote, takoj po razpršitvi pa napade najbolj izoliranega posameznika (slika 2.4). Taktika napada s pomočjo disperzije je zelo učinkovita, ko je plenilec zmotljiv [14]. Plenilec razprši jato, kar povzroči več izoliranih posameznikov in s tem večjo možnost za uspešen napad tarče. Plenilec za razkrop najprej identificira najbližji plen, nato pa znotraj njegovega območja kohezije izbere najbolj središčni plen, ki ga zasleduje, dokler ni od njega oddaljen zgolj  $r_l$  enot. Ko se plenilec približa središčnemu plenu na razdaljo, manjšo od  $r_l$ , se razpršitev skupine zaključi in sledi napad na najbolj izoliran plen, ki ga plenilec izbere znotraj radija  $r_t$ . Plenilec ima torej specificirana dva parametra, od katerih je odvisna uspešnost taktike ( $r_l$  in  $r_t$ ). Smerne vektorje za razpršitev skupine (sledenje najbolj središčnemu posamezniku) in napada najbolj izoliranega plena izračunamo enako kot v enačbah (2.9) in (2.10).

## 2.3 Opazovane metrike in znani režimi vedenja

Naša magistrska naloga temelji na članku Couzina in sod. [13], ki so ugotovili, da s prilaganjem radija poravnave dosežemo štiri različne režime vedenja skupine: neusklajeno

prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje (slika 2.5). Neusklajeno prepletanje (angl. *swarming*) je najbolj značilno za roje insektov, kroženja okrog praznega jedra (angl. *torus*) se v posebnih primerih poslužujejo jate rib, delno in močno usklajeno gibanje pa je primarna vrsta gibanja tako jate ptic kot rib. Z vsemi naštetimi režimi vedenja skupine smo torej želeli preveriti, katera vrsta vedenja je najbolj optimalna protiobramba za različne plenilčeve taktike napada ter ali prehodi med naštetimi režimi pripomorejo k bolj učinkoviti obrambi pred plenilcem. Ko smo že omenili prehode med naštetimi režimi vedenja, moramo v račun vzeti tudi tako imenovani kolektivni spomin [13], ki v odvisnosti od trenutnega režima skupine 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. Omenjen pojav so Couzin in sod. [13] odkrili z enostavnim eksperimentom, pri katerem so postopno povečevali in nato zmanjševali radij poravnave  $r_o$ , ki vpliva na režim vedenja. Pričeli so z neobstoječim območjem poravnave. Njegov radij,  $r_o$ , so postopno povečevali do  $r_o = 4$ . Pri  $r_o = 1$  se je skupina neusklajeno prepletala, pri  $r_o = 1,5$  je skupina prešla v režim kroženja okrog praznega jedra, pri vrednostih, večjih od 3 pa vse do 4, se je skupina pričela gibati delno usklajeno (angl. *dynamic parallel group*). Pri še večjih radijih poravnave ( $r_o > 6,5$ ) smo v našem eksperimentu zaznali prehod v močno usklajeno gibanje (angl. *highly parallel group*). Cousin in sod. so ugotovili, da pri zmanjševanju  $r_o$  od 4 do 1 ni zaznati prehoda iz delno usklajenega gibanja v kroženje okrog praznega jedra, pač pa se zgodi neposreden prehod v neusklajeno prepletanje.

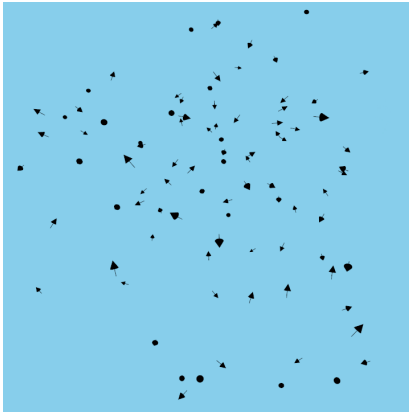
Couzin in sod. so pri analizi eksperimenta uporabili dve metriki, ki skupaj določata režim vedenja: polarizacija skupine  $p_{group}$  in vrtilni moment skupine  $m_{group}$ . Polarizacija skupine  $p_{group}$  nam sporoča stopnjo poravnave med posamezniki v skupini in jo izračunamo kot:

$$p_{group} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \hat{v}_i \right|, \quad (2.11)$$

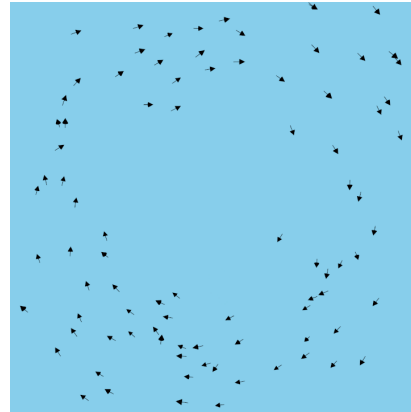
kjer je  $\hat{v}_i$  vektor smeri gibanja plena  $i$ . Večje vrednosti (blizu 1) predstavljajo višjo stopnjo polarizacije, skupina pa se pod takimi pogoji giba delno usklajeno ali močno usklajeno.

Druga metrika je vrtilni moment skupine  $m_{group}$ , ki specificira stopnjo gibanja posameznikov pravokotno na smer proti središču skupine v enaki krožni smeri. Večje vrednosti

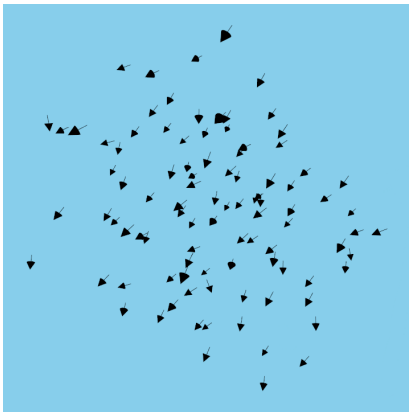




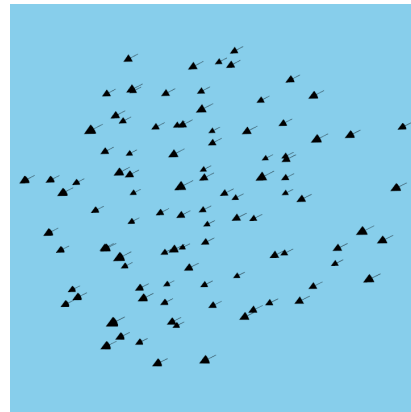
(a) Neusklajeno prepletanje.



(b) Kroženje okrog praznega jedra.



(c) Delno usklajeno gibanje.



(d) Močno usklajeno gibanje.

Slika 2.5: Slika prikazuje štiri režime vedenja skupine.

Režim vedenja	$m_{group}$	$p_{group}$
Neuskrajeno prepletanje	Nizek	Nizek
Kroženje okrog praznega jedra	Visok	Nizek
Delno in močno usklajeno gibanje	Nizek	Visok

Tabela 2.3: Tabela prikazuje vrednosti metrik  $m_{group}$  in  $p_{group}$  pri različnih režimih vedenja.

(blizu 1) predstavljajo visoko število posameznikov, ki se gibajo pravokotno na smer proti središču skupine v enaki smeri (krožijo okrog praznega središča). Vrtilni moment skupine  $m_{group}$  izračunamo kot:

$$m_{group} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \hat{r}_{ic} \times \hat{v}_i \right|, \quad (2.12)$$

kjer je

$$\vec{r}_{ic} = \vec{c}_i - \vec{c}_{group} \quad (2.13)$$

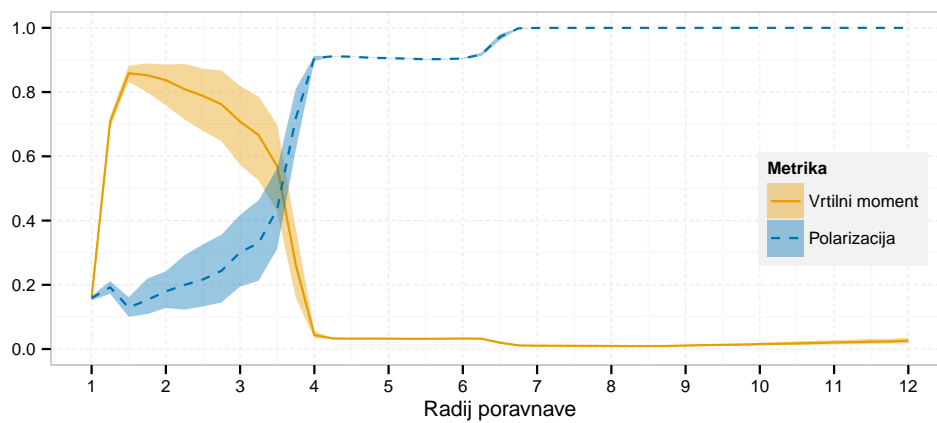
in

$$\vec{c}_{group} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{c}_i. \quad (2.14)$$

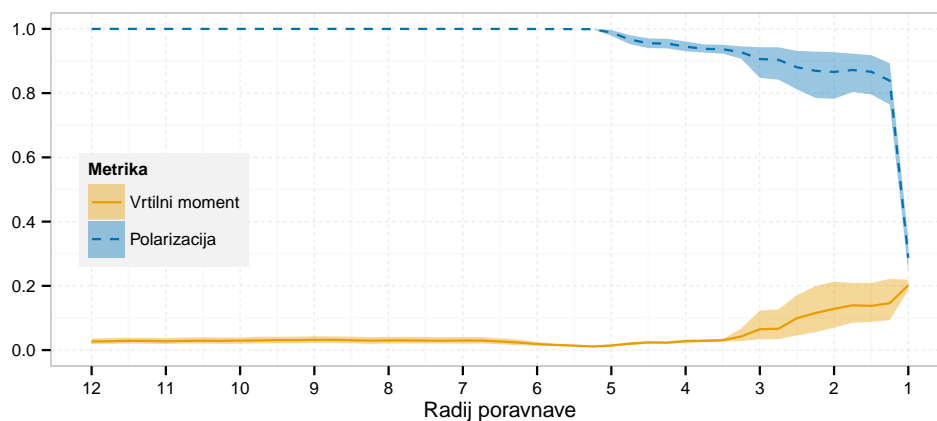
Tabela 2.3 povzema relacije med režimi vedenja ter metrikama  $p_{group}$  in  $m_{group}$ , kot so jih ugotovili Couzin in sod. [13]. Enak eksperiment smo ponovili tudi v naši raziskavi, kjer smo prišli do enakih ugotovitev, ki jih potrjujeta grafa na sliki 2.6. Na sliki 2.6.a sta prikazani metriki pri povečevanju radija poravnave, kjer lahko izluščimo prehode med različnimi režimi vedenja skupine (prepletanje  $\rightarrow$  kroženje  $\rightarrow$  usklajeno gibanje). Na sliki 2.6.b pa prikazujemo vrednosti metrik pri zmanjševanju radija poravnave, kjer lahko opazimo odsotnost prehoda v režim kroženja okrog praznega jedra (usklajeno gibanje  $\rightarrow$  prepletanje). Z izjemo intervala spreminjanja radija poravnave smo ekperiment izvedli z enakimi vrednostmi parametrov kot Couzin in sod. [13, slika 4].

Za namene analize evolucij vedenja skupine smo vpeljali še štiri dodatne metrike. Med njimi so povprečna razdalja do najbližjega soseda ( $NND$ ), število ulovov ( $n_k$ ), število trkov ( $n_c$ ) in število jat ob zaključku simulacije ( $n_f$ ). Povprečna razdalja do najbližjega soseda predstavlja zgoščenost skupine in jo izračunamo kot:

$$NND = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min_{n \in \mathbf{N}_n} |\vec{r}_{in}|, \quad \mathbf{N}_n = \left\{ n \mid i \neq n, |\vec{r}_{in}| \leq r_a \right\}, \quad (2.15)$$



(a) Povečevanje radija poravnave.



(b) Zmanjševanje radija poravnave.

Slika 2.6: Gibanje metrik vrtilnega momenta in polarizacije skupine pri povečevanju in zmanjševanju radija poravnave (CI: 95 %, št. ponovitev: 30, velikost jate: 100).

kjer je  $\mathbf{N}_n$  množica potencialnih najbližjih sosedov v območju kohezije in  $\vec{r}_{in} = \vec{c}_n - \vec{c}_i$ .

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

$$n_c = \sum_{t=0}^T \frac{|\mathbf{C}(t)|}{2}, \quad \mathbf{C}(t) = \left\{ i \mid \exists j : j \neq i, |\vec{r}_{ij}(t)| \leq S \right\} \quad (2.16)$$

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:

$$n_k = \sum_{t=0}^T \mathbf{K}(t), \quad \mathbf{K}(t) = \begin{cases} 1, & |\vec{r}_{pi}(t)| \leq r_p \wedge P_c < \chi \\ 0, & \text{šicer.} \end{cases} \quad (2.17)$$

kjer je  $\chi$  naključno enakomerno porazdeljeno realno število na intervalu  $[0; 1]$ .

Po vsaki zaključeni simulaciji smo izračunali število samostojnih jat. Samostojna jata je sklenjena veriga posameznikov [24], ki v območjih razmika, poravnave ali kohezije posredno ali neposredno zaznajo vsaj enega soseda. Vsi posamezniki samostojne jate torej ne zaznavajo posameznikov iz ostalih samostojnih jat, kar pomeni, da samostojne jate nimajo medsebojnega vpliva. Samostojno jato lahko rekurzivno definiramo kot:

$$1. i \leq N, \quad 2. i \in \mathbf{G}_i, \quad 3. i \in \mathbf{G}_i \Rightarrow \mathbf{N}_n \subset \mathbf{G}_i. \quad (2.18)$$

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

$$\mathbf{F} = \{\mathbf{G}_{i_1}, \dots, \mathbf{G}_{i_n}\} \quad (2.19)$$

in metrika števila jat:

$$n_f = |\mathbf{F}|. \quad (2.20)$$

# 3 Genetski algoritem

Genetski algoritem (GA) je metoda za reševanje optimizacijskih problemov, ki spada v skupino evolucijskih algoritmov, ki temeljijo na naravni selekciji in tako simulirajo biološko evolucijo. Genetski algoritem poskuša naključno generirano populacijo osebkov optimizirati skozi generacije, pri tem pa uporablja tehnike naravne evolucije, kot so selekcija, križanje in mutacija. V vsaki generaciji GA oceni kvaliteto vseh osebkov v generaciji, na podlagi katere izbere starše za nastanek otrok s pomočjo križanja in/ali mutacije, ki nato tvorijo populacijo naslednje generacije. Skozi več zaporednih generacij lahko pričakujemo konvergenco kvalitete populacije proti optimalni rešitvi. Uspešnost izvajanja genetskega algoritma je odvisna od specifičnih parametrov, ki jih moramo prilagoditi vsakemu optimizacijskemu problemu posebej. Najbolj ključna parametra sta velikost populacije  $P$  in stopnja mutacije  $mr$ . Velikost populacije moramo prilagoditi glede na težavnost problema, ki ga želimo optimizirati. Če izberemo premajhno populacijo, bo GA potreboval več generacij in časa za optimizacijo rešitve, v obratni situaciji (velika populacija) pa GA sicer ne potrebuje veliko generacij, vendar pa znotraj generacij izvaja večje število selekcij, križanj in mutacij. Drugi prav tako pomemben parameter je

stopnja mutacije  $mr$ , ki nam predstavlja verjetnost mutacije (v odstotkih) osebkov populacije. Slednji parameter prav tako vpliva na hitrost izvajanja algoritma in kvaliteto najdenih rešitev. Ob preveliki stopnji mutacije se lahko zgodi, da zaradi nenadzorovanega nihanja v kvaliteti posameznikov GA ne bo nikoli našel optimalne rešitve. Premajhna stopnja mutacije pa povzroči daljše izvajanje algoritma zaradi nizke stopnje odkrivanja še nepreizkušenih rešitev. V nadaljevanju bomo predstavili cenilko, funkcijo križanja in mutacije ter nekaj postopkov selekcije.

### 3.1 Cenilka

V vsaki generaciji izvajanja genetskega algoritma izračunamo kvaliteto njenih osebkov. To storimo z izračunom cenilke (angl. *fitness function*), ki jo v splošnem želimo optimizirati. Oceno kvalitete posameznikov v generaciji nato uporabimo pri selekciji posameznikov, primernih za križanje in mutacijo. V naši raziskavi smo pri evoluciji vedenja plena pri napadu plenilca uporabili cenilko, ki je enaka seštevku števila ujetih plenov in števila trkov med posamezniki v okviru 400 s trajajoče simulacije. Število trkov med posamezniki smo v cenilko vključili, ker smo želeli optimizirati parametre vedenja jate tudi tako, da bi bilo število trkov med posamezniki čim manjše. Kvaliteta parametrov predstavlja kumulativno oceno večkratnih ponovitev ( $R$ ) simulacije vedenja jate in plenilca. Cenilko izračunamo tako:

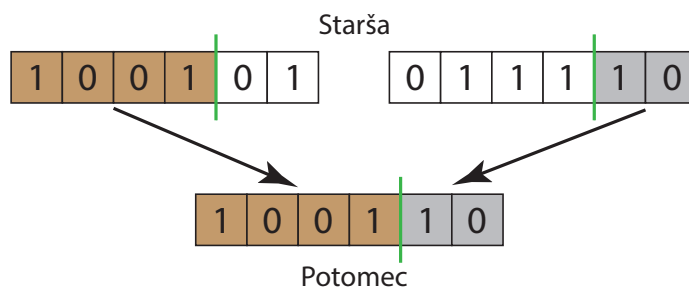
$$f = \sum_{r=1}^R \frac{4}{100} n_k(r) + \frac{1}{10000} n_c(r), \quad (3.1)$$

kjer sta  $n_k(r)$  in  $n_c(r)$  kumulativno število ulovov in trkov v ponovitvi  $r$ . Uteži sta bili izbrani empirično.

### 3.2 Selekcija

Po izračunu ocene kvalitete posameznikov sledita križanje in mutacija posameznikov na podlagi selekcije. Pri genetskih algoritmih poznamo več vrst selekcije [25, 26]:

- proporcionalna izbira (angl. *proportionate roulette wheel selection*),
- izbira na podlagi linearne razvrstitve (angl. *linear ranking selection*),
- izbira na podlagi eksponentne razvrstitve (angl. *exponential ranking selection*),



Slika 3.1: Križanje staršev in nastanek potomca.

- izbira s turnirjem (angl. *tournament selection*) in
- elitizem (angl. *elitism*).

V naši raziskavi smo uporabili selekcijo s turnirjem, ker je zelo enostavna in tudi precej uspešna metoda v primerjavi z ostalimi strategijami selekcije [25, 26]. Pri tej vrsti selekcije naključno izberemo  $n$  (2 ali več) posameznikov populacije, ki nato sodelujejo na turnirju. Uporabili smo binarni turnir, pri čemer na turnirju sodelujeta 2 osebka populacije. Posameznik z najboljšo oceno na turnirju zmagaja in tako postane kandidat za križanje in mutacijo. Ta vrsta selekcije nam zagotavlja, da bo posameznik z najvišjo oceno vedno zmagal in bo tako izbran za križanje in mutacijo, najslabši posameznik pa nikoli. Za križanje potrebujemo dva osebka, torej za vsako produkcijo enega potomca izvedemo dva turnirja. Zmagovalca dveh turnirjev smo nato uporabili pri tvorjenju potomca s pomočjo križanja in mutacije. Ker smo skozi evolucije ohranili enako veliko populacijo  $P$ , smo morali organizirati  $2P$  turnirjev selekcije posameznikov. V našem procesu evolucije vedenja plena smo pri selekciji posameznikov uporabili še optimizacijo z neposrednim prenosom najboljšega osebka v naslednjo generacijo, kar običajno izboljša hitrost iskanja optimalne rešitve.

### 3.3 Križanje in mutacija

Po selekciji dveh osebkov sledita križanje in mutacija, pri čemer nastane potomec naslednje generacije. Lastnosti vsakega osebka so zapisane v tako imenovanem genotipu, ki sestoji iz bitov, vektorja števil, niza ali druge podatkovne strukture. Cilj križanja je kombiniranje in prenos genetskega materiala obeh staršev na potomca. Pri križanju izberemo naključno točko križanja, kot prikazuje slika 3.1.

Tabela 3.1: Parametri genetskega algoritma, ki smo jih uporabili pri evoluciji vedenja plena.

Parameter	Enota	Oznaka	Vrednosti
Velikost populacije	/	$P$	100, 200
Stopnja mutacije	Odstotkov	$mr$	5
Število generacij	/	$G$	60
Ponovitev simulacij v generaciji za nabor parametrov	/	$R$	5
Trajanje simulacije	Sekund	$t_s$	400
Čas stabilizacije	Sekund	$t_a$	50
Število ponovitev evolucije	/	$E$	10, 14, 15

Mutacija genotipa omogoča preiskovanje rešitev, ki nam jih s samim križanjem ne bi uspelo producirati. Z mutacijo na naključno izbranem mestu spremenimo genotip nekega osebka. Verjetnost mutacije ne sme biti prevelika, saj s tem lahko pokvarimo preveč potencialno koristnih lastnosti osebka, evolucija pa postane podobna naključnemu preiskovanju rešitev.

### 3.4 Metodologija evolucije plena

Pri evoluciji vedenja plena smo v vsaki generaciji za vsak osebek GA ( $P$ ), ki je predstavljal parametre plena, izvedli večkratno ( $R$ ) ponovitev simulacije, ki je potekala na naslednji način. Jato velikosti 150 posameznikov smo generirali v prostoru  $12 \times 12 \times 12$  enot z naključnimi lokacijami in naključnimi začetnimi smermi gibanja. V začetnem delu simulacije smo jati prepustili, da se njeno vedenje stabilizira ( $t_a$ ), po pretečenem času stabilizacije pa smo proti jati iz naključne smeri usmerili plenilca, ki je  $t_s - t_a$  časa neprekinjeno napadal jato. Po preteku  $t_s$  časa se je simulacija zaključila. Pri izvajanju simulacije smo beležili število ulovov in število trkov med posamezniki jate, ki smo ju uporabili pri izračunu cenilke, na podlagi katere smo izvajali selekcijo parametrov plena za križanje in mutacijo. Evolucijo plena smo ločeno izvedli s štirimi taktikami napada (napad najbolj središčnega plena, napad s pomočjo disperzije, napad najbolj izoliranega in napad najbližjega plena) in dvema vrstama plenilca (zmotljiv in nezmotljiv).



Optimizirali smo prilagodljivi model vedenja plena, za katerega je značilno prilaganje parametrov (radiji območij in uteži nagonov) v odvisnosti od oddaljenosti do plenilca. Plen je imel štiri sklope vrednosti parametrov, in sicer za vsakega izmed naslednjih intervalov oddaljenosti od plenilca:

1. nizka oddaljenost plenilca:  $[0; 6,66)$  enot,
2. srednja oddaljenost plenilca:  $[6,66; 13,33)$  enot,
3. visoka oddaljenost plenilca:  $[13,33; 20)$  enot,
4. odsotnost plenilca:  $[20; \infty)$  enot.

V naslednjem poglavju bomo predstavili rezultate evolucij prilagodljivega modela vedenja plena pri napadu plenilca s prilagajanjem naslednjih parametrov:

1. radij poravnave,
2. radij poravnave in radij zaznave plenilca,
3. radij poravnave in utež bežanja,
4. radij poravnave ter uteži razmika, poravnave, kohezije in bežanja.

V tabeli 3.1 so navedeni parametri genetskega algoritma, ki smo jih uporabili pri evoluciji vedenja plena ob napadu plenilca. Pri evoluciji manjšega števila parametrov plena smo uporabili populacijo velikosti 100 osebkov, pri evoluciji večjega števila parametrov (radij poravnave in vse uteži) pa smo uporabili populacijo 200 osebkov. Vsaka evolucija je zajemala 60 generacij ( $G$ ), kar je zadoščalo za uspešno konvergenco cenilke proti optimalni rešitvi. Vsako evolucijo smo v celoti ponovili vsaj desetkrat ( $E$ ).



## 4 Rezultati evolucij

V tem poglavju se bomo osredotočili na pridobljene rezultate evolucij parametrov vedenja skupine pri napadu plenilca. Cilj magistrske naloge je bila evolucija vedenja skupine ob zaporednih napadih zmotljivega oz. nezmotljivega plenilca, ki uporablja različne taktike napada. Pri evolucijah vedenja smo uporabili prilagodljivi model vedenja skupine, ki skupini omogoča potencialne prehode med različnimi režimi vedenja glede na oddaljenost od plenilca. Izvedli smo evolucije s prilagajanjem različnih naborov parametrov: a) radij poravnave, b) radij poravnave in radij zaznave plenilca, c) radij poravnave in utež bežanja ter d) radij poravnave in vse uteži. Cilj tega poglavja je opredelitev rezultatov posameznih evolucij in predstavitev pričakovanih vedenj skupine. V naslednjem poglavju bomo rešitve tovrstnih evolucij bolj podrobno analizirali z različnimi metrikami, ki nam bodo bolj natančno predstavile vedenje skupine. Sledijo opisi rezultatov posameznih evolucij s prilagajanjem različnih naborov parametrov.

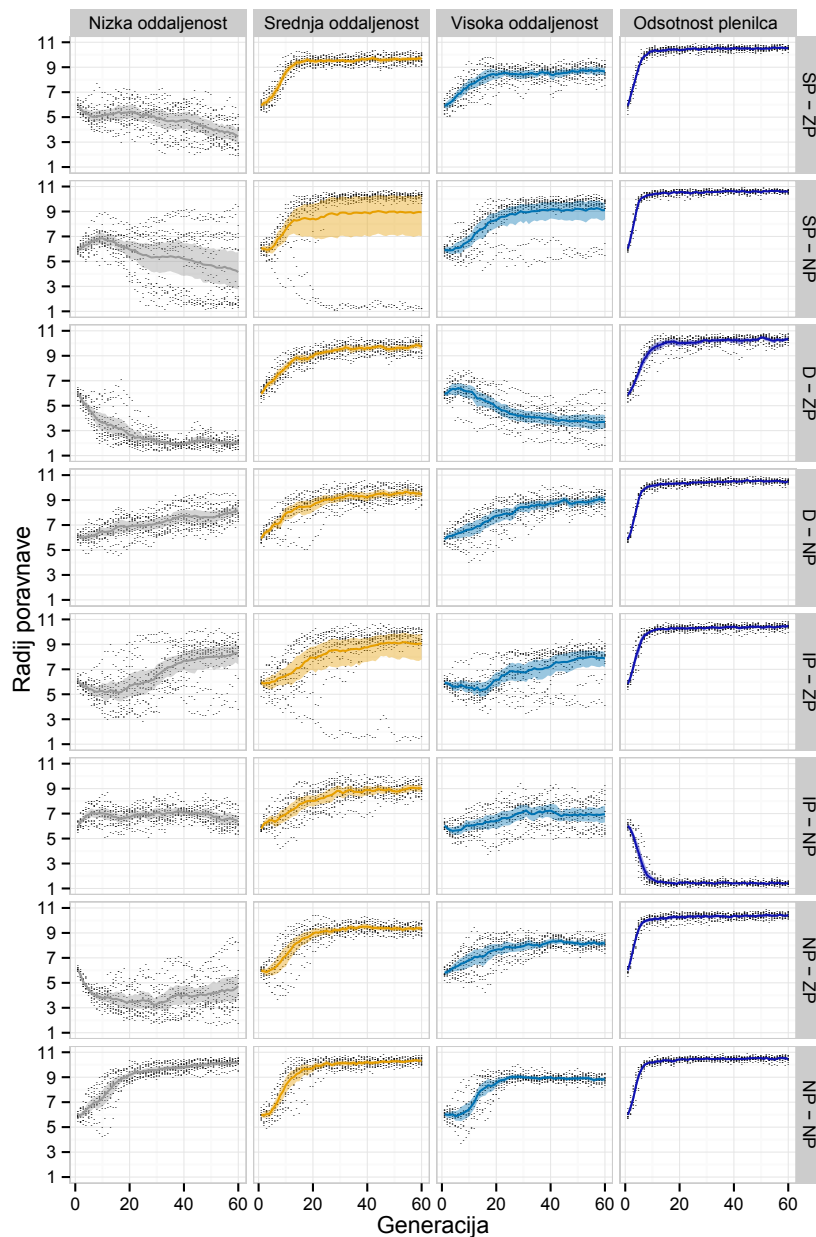
## 4.1 Evolucija radija poravnave

V prvem koraku evolucij skupinskega vedenja pri napadu plenilca smo s pomočjo genetskega algoritma prilagajali samo radij poravnave, ki primarno vpliva na režim vedenja skupine. Kot smo videli v poglavju 2.3 *Opazovane metrike in znani režimi vedenja*, je od njegove vrednosti namreč odvisno, ali se bo skupina neusklajeno prepletala, krožila okrog praznega jedra ali uporabila kakšen drug režim gibanja. Evolucijo izogibanja jate pred plenilcem smo izvedli za štiri taktike napada: napad najbližjega plena, napad najbolj središčnega plena, napad najbolj izoliranega plena ter napad s pomočjo disperzije, ki ji sledi napad najbolj izoliranega plena. Poleg naštetih taktik plenilca smo opazovali tudi vpliv lastnosti zmotljivosti in nezmotljivosti plenilca. Vsak posameznik jate (plen) je prilagajal radij poravnave glede na razdaljo od plenilca v okviru intervalov, ki smo jih definirali v poglavju 3.4 *Metodologija evolucije plena*.

Na sliki 4.1 lahko izluščimo, da z evolucijo parametri vedenja plena v večini primerov konvergirajo proti delno usklajenim in močno usklajenim vrstam gibanja. To še posebno velja za interval odsotnosti plenilca pri večini taktik napada, kjer vrednosti zanesljivo konvergirajo proti največji možni vrednosti radija poravnave. Visoka vrednost radija poravnave namreč zagotavlja močno usklajeno gibanje skupine. Izjema na intervalu odsotnosti plenilca je taktika napada na najbolj izoliran plen (nezmotljiv plenilec), pri kateri so vrednosti radijev poravnave konvergirale proti nizki vrednosti, ki je značila za kroženje okrog praznega jedra. Na ostalih intervalih oddaljenosti plenilca (nizka, srednja in visoka) smo pri večini taktik napada opazili vzorec vrednosti radijev poravnave, ki si po vrsti sledijo: nižja vrednost (nizka oddaljenost), višja vrednost (srednja oddaljenost), nižja/srednja vrednost (visoka oddaljenost). Tak vzorec pripisujemo odzivu zgojitve, ki je natančneje opredeljen v poglavju 5.1 *Analiza rezultatov evolucij*.

## 4.2 Evolucija radija poravnave in radija zaznave plenilca

V drugem koraku evolucij smo med prilagajane parametre vedenja skupine poleg radija poravnave vpeljali tudi radij zaznave plenilca. Plen smo optimizirali v odvisnosti od že omenjenih taktik napada in zmotljivosti plenilca. S pomočjo dodatnega parametra smo plenu omogočili evolucijo zakasnjene ali povsem odsotnega odziva na plenilca. Kot lahko opazimo na sliki 4.2, tovrstna lastnost močno koristi skupinam, ki jih napada zmotljiv plenilec, saj je v teh primerih vrednost radija zaznave plenilca močno konver-



Slika 4.1: Evolucije prilagodljivega radija poravnave ob napadu zmotljivega (ZP) in nezmotljivega plenilca (NP) s taktikami napada na središče skupine (SP), napada s pomočjo disperzije (D), napada na najbolj izoliran plen (IP) in napada najbližjega plena (NP) (CI: 95 %, št. ponovitev: 14, št. generacij: 60, interval prilagajanja vrednosti radija poravnave: [1; 11],  $r_r = 1$ ,  $r_a = 14$ ,  $r_e = 20$ ,  $w_r = w_o = w_a = w_e = 1$ , ostali parametri: glej tabelo 2.1).

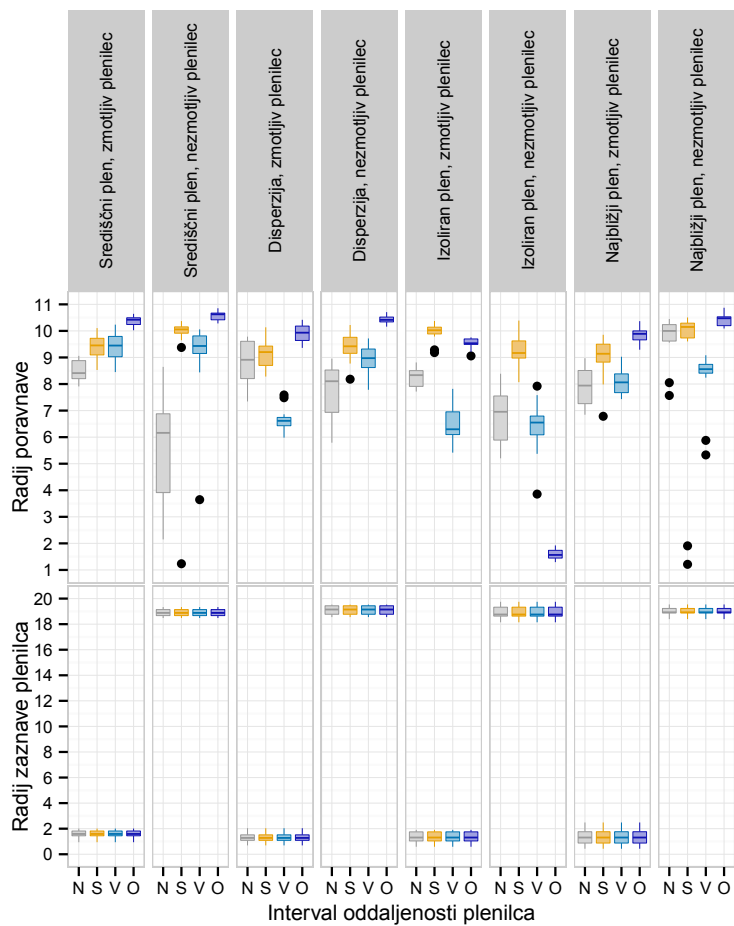
girala proti zelo nizki vrednosti 1,4 (SD: 0,44). To nam sporoča, da je plen reagiral na plenilca zadnji trenutek pred izvedbo napada. Poleg tega je radij poravnave tradicionalno konvergirala proti vrednostim, ki so značilne za delno in močno usklajeno gibanje, predvsem na intervalu odsotnosti plenilca.

V nasprotju z rešitvami pri napadu zmotljivega plenilca so pri napadih nezmotljivega plenilca vrednosti radija zaznave konvergirale proti zelo visoki vrednosti 19 (SD: 0,36) (slika 4.2). Nezmotljiv plenilec je torej prisilil plen, da je nanj reagiral v najkrajšem možnem času. Radiji poravnave so pri napadu nezmotljivega plenilca na vseh intervalih oddaljenosti konvergirali proti enakim vrednostim, ki smo jih zabeležili pri predhodni evoluciji (glej poglavje 4.1, *Evolucija radija poravnave*). Pri končnih rešitvah obeh evolucij lahko torej pričakujemo podoben odziv skupine pri napadu nezmotljivega plenilca.

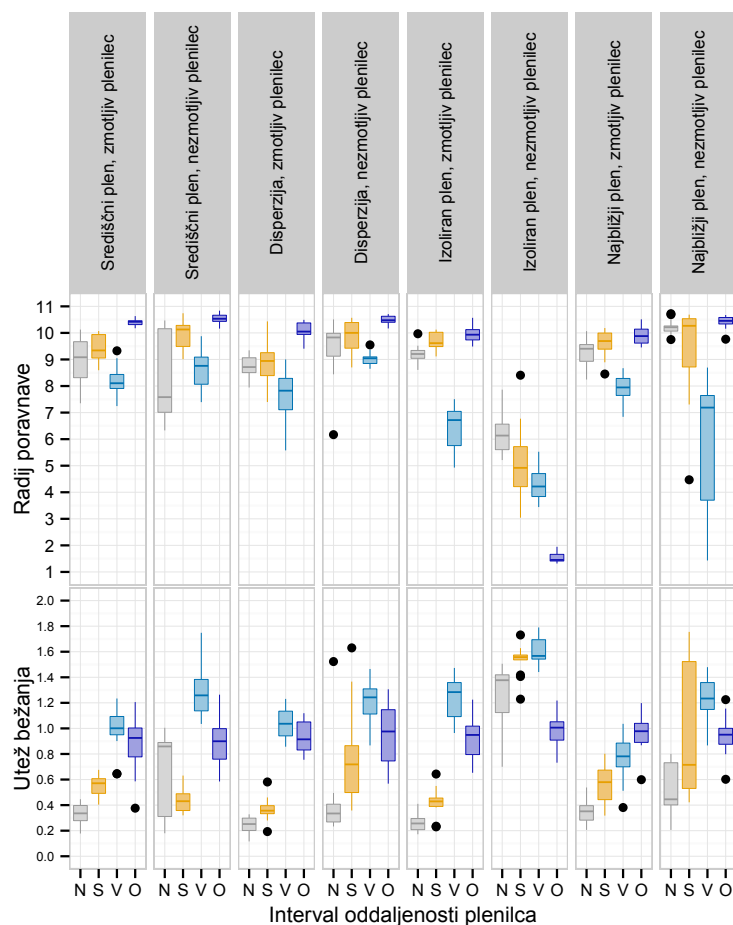
### 4.3 Evolucija radija poravnave in uteži bežanja

Po evoluciji vedenja skupine s prilagajanjem radija poravnave in radija zaznave plenilca smo izvedli evolucijo s prilagajanjem radija poravnave in uteži bežanja. Pri tej kombinaciji parametrov smo želeli preveriti, ali spremembe uteži bežanja glede na oddaljenost plenilca vplivajo na uspešnost skupine. Pri predhodni evoluciji je plen na optimizirani razdalji reagiral na plenilca z utežjo bežanja 1, s trenutno metodo pa omogočamo evolucijo plena, da se glede na interval oddaljenosti od plenilca (nizka, srednja, visoka, odsotnost plenilca) odziva s poljubno intenziteto bežanja, ki je najbolj optimalna za posameznika in posledično celotno skupino.

Med trenutno (slika 4.3) in predhodno evolucijo (slika 4.2) smo opazili vzporednice pri napadih s strani zmotljivega plenilca. Pri predhodni so radiji zaznave plenilca konvergirali proti nižjim vrednostim 1,4 (SD: 0,44), tokrat pa smo zabeležili postopno zmanjševanje uteži bežanja na intervalih visoke, srednje in nizke oddaljenosti. Evolucija radijev poravnave je potekala skladno s pričakovanji, saj so radiji konvergirali proti vrednostim, značilnim za delno in močno usklajeno gibanje, še posebno na intervalu odsotnosti plenilca. Iz predhodnih evolucij se je ohranila tudi nizka vrednost radija poravnave pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen, ki je značilna za kroženje okrog praznega jedra.



Slika 4.2: Rezultati evolucije prilagodljivega radija poravnave in radija zaznave plenilca ob napadu plenilca s pomočjo različnih taktik napada (št. ponovitev: 14, št. generacij: 60, območje prilagajanja vrednosti radija poravnave:  $[1; 11]$ , območje prilagajanja vrednosti radija zaznave plenilca:  $[0; 20]$ ,  $r_r = 1$ ,  $r_a = 14$ ,  $w_r = w_o = w_a = w_e = 1$ , ostali parametri: glej tabelo 2.1).



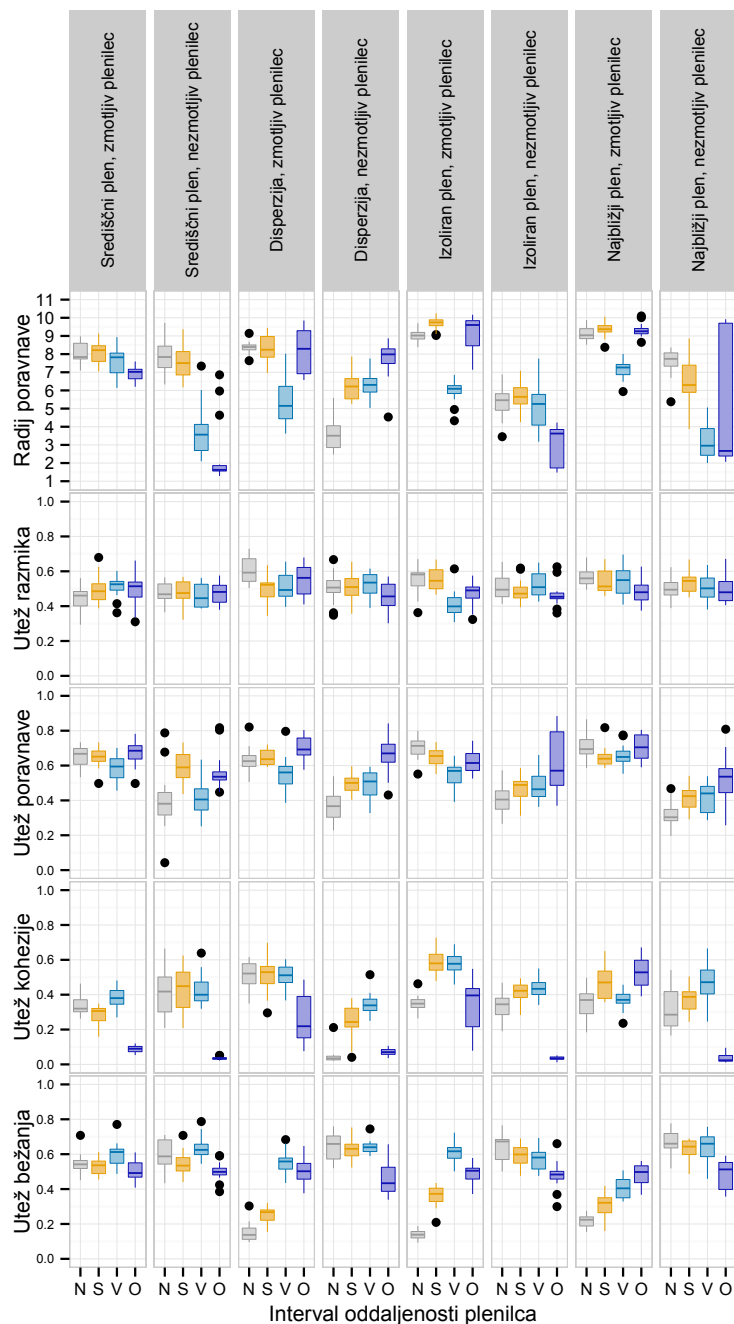
Slika 4.3: Rezultati evolucije prilagodljivega radija poravnave in uteži bežanja ob napadu plenilca s pomočjo različnih taktik napada (št. ponovitev: 14, št. generacij: 60, območje prilagajanja vrednosti radija poravnave:  $[1; 11]$ , območje prilagajanja vrednosti uteži bežanja:  $[0; 2]$ ,  $r_r = 1$ ,  $r_a = 14$ ,  $r_e = 20$ ,  $w_r = w_o = w_a = 1$ , ostali parametri: glej tabelo 2.1).



## 4.4 Evolucija radija poravnave in vseh uteži

V naslednjem koraku evolucij vedenja skupine pri napadu plenilca smo prilagajali radij poravnave ter uteži vseh nagonov, ki opredeljujejo vedenje: razmika, poravnave, kohezije in bežanja. S tem naborom parametrov smo plenu omogočili prilagajanje tudi ostalih nagonov vedenja, ki bi lahko potencialno izboljšali uspešnost skupine pri napadu plenilca. Pri tej evoluciji smo pri izračunu vektorja smeri  $\vec{d}_i(t+\tau)$  iz enačbe (2.5) izjemoma opustili deljenje uteži nagona poravnave in kohezije z  $\frac{1}{2}$ , če so sosedi zaznani v obeh območjih. S to odločitvijo smo se zaradi večje kompleksnosti evolucije (večje število parametrov, ki vpliva na vedenje) želeli izogniti morebitnim težavam, medtem pa smo genetskemu algoritmu omogočili bolj enakovredno obravnavo vseh uteži vedenja.

Radij poravnave je na intervalu odsotnosti pri napadih nezmotljivega plenilca za taktiko napada na središčni plen konvergiral proti nižji vrednosti, ki je značilna za kroženje okrog praznega jedra (slika 4.4). To smo pri predhodnih evolucijah zabeležili samo pri taktiki napada na najbolj izoliran plen. Pri uteži kohezije smo na intervalu odsotnosti pri napadih nezmotljivega plenilca odkrili močno konvergenco k nižjim vrednostim, iz česar lahko predvidimo razpad skupine še pred zaznavo plenilca. Vrednosti uteži bežanja so pri napadih zmotljivega plenilca sledile analogiji rezultatov predhodne evolucije (radij poravnave in utež bežanja). Razen v primeru napada na središčni plen so se vrednosti uteži na intervalih visoke, srednje in nizke oddaljenosti namreč prav tako postopoma zmanjševale, kar privede do postopnega ignoriranja plenilca.



Slika 4.4: Rezultati evolucije prilagodljivega radija poravnave in vseh uteži ob napadu plenilca s pomočjo različnih taktik napada (št. ponovitev: 15, št. generacij: 60, območje prilagajanja vrednosti radija poravnave:  $[1; 11]$ , območje prilagajanja vrednosti vseh uteži:  $[0; 1]$ ,  $r_r = 1$ ,  $r_a = 14$ ,  $r_e = 20$ , ostali parametri: glej tabelo 2.1).

## 5 Analiza

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 soseda  $NND$ . Metrike smo beležili na samostojni jati, v kateri se je nahajal izbran plen, in to v relaciji z razdaljo med izbranim plenom in plenilcem, ko je le-ta izvajal napad. Omenjenih metrik nismo beležili, ko je bil plenilec v načinu ponovnega napada (angl. *refocus*) ali ravnanja s plenom (angl. *handling*). Za vsako rešitev evolucije nabora parametrov smo izvedli 10 ponovitev beleženja metrik. Za vsak nabor optimiziranih parametrov to skupaj predstavlja 140–150 ponovitev beleženja metrik. Poleg naštetih metrik smo beležili tudi splošne metrike, ki določajo uspešnost skupine pri napadu plenilca. Splošne metrike smo merili skozi celotno simulacijo  $t_s$  časa, kjer je plenilec zaporedno napadal skupino z različnimi taktikami napada. Tvrstne metrike so: povprečno število ulovov  $n_k$ , povprečno število trkov med posamezniki  $n_c$ , povprečna cennilka genetskega algoritma  $f$  in število samostojnih jat ob koncu simulacije  $n_f$  (razpadi skupine).

S pridobljenimi rešitvami evolucij smo izvedli primerjalno analizo z referenčnimi

vrstami vedenja, ki vključujejo: neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. Referenčne vrste vedenja so imele nespremenljive parametre vedenja, razlikovale pa so se le v velikosti radija poravnave. Vmesne ugotovitve so nas pripeljale do odkritja neustreznega izbora nespremenljivih parametrov, ki vplivajo na stabilnost režima kroženja okrog praznega jedra. Vplive spremenjenega parametra smo nato preverili z dodatno evolucijo, pri kateri smo prilagajali radij poravnave s povečanim radijem kohezije.

### 5.1 Analiza rezultatov evolucij

V raziskavi smo želeli preveriti, ali obstajajo prehodi med različnimi režimi vedenja, ki bi skupini koristili pri napadu plenilca. V ta namen smo beležili metriki polarizacije skupine in vrtilnega momenta, ki jasno definirata režim vedenja skupine. Na sliki 5.1 smo prikazali gibanje omenjenih metrik za štiri vrste evolucij, vse taktike napada in dve vrsti plenilca (zmotljiv in nezmotljiv). Rezultati jasno nakazujejo, da se je skupina pri napadu plenilca ves čas gibala delno ali močno usklajeno, kar smo tudi predvidevali v predhodnem poglavju. Močno usklajeno gibanje smo kvalificirali, ko je polarizacija skupine zelo blizu ali enaka 1 in vrtilni moment zelo blizu ali enak 0.

Pri evolucijah napada z zmotljivim plenilcem smo pri vseh taktikah napada opazili ponavljajoč se vzorec, ko se v območju razdalje med plenilcem in izbranim plenom [5; 20] spreminja režim vedenja iz močnega v delno in nato ponovno v močno usklajeno gibanje. Tako vedenje je konsistentno z rezultati parametrov vedenja, pri katerih so vrednosti radija poravnave na intervalih srednje oddaljenosti, visoke oddaljenosti in odsotnosti plenilca nihale v enakem zaporedju v okviru vrednosti, ki ustrezajo navedenim režimom vedenja.

Posebna izjema pri rezultatih evolucij so bile evolucije vedenja pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. V teh primerih je vrednost radija poravnave na intervalu odsotnosti pri večini evolucij konvergirala proti vrednostim, ki so značilne za kroženje okrog praznega jedra. Ta vzorec se je spremenil pri zadnji evoluciji, pri kateri smo poleg radija poravnave prilagajali tudi vse uteži nagonov. Vrednosti radija poravnave so se namreč nahajale izven intervala, ki je značilen za to vrsto gibanja. To potrjuje tudi graf, kjer se polarizacija skupine za to vrsto evolucije močno razlikuje od ostalih treh, pri katerih smo prilagajali zgolj radij poravnave in utež bežanja oz.

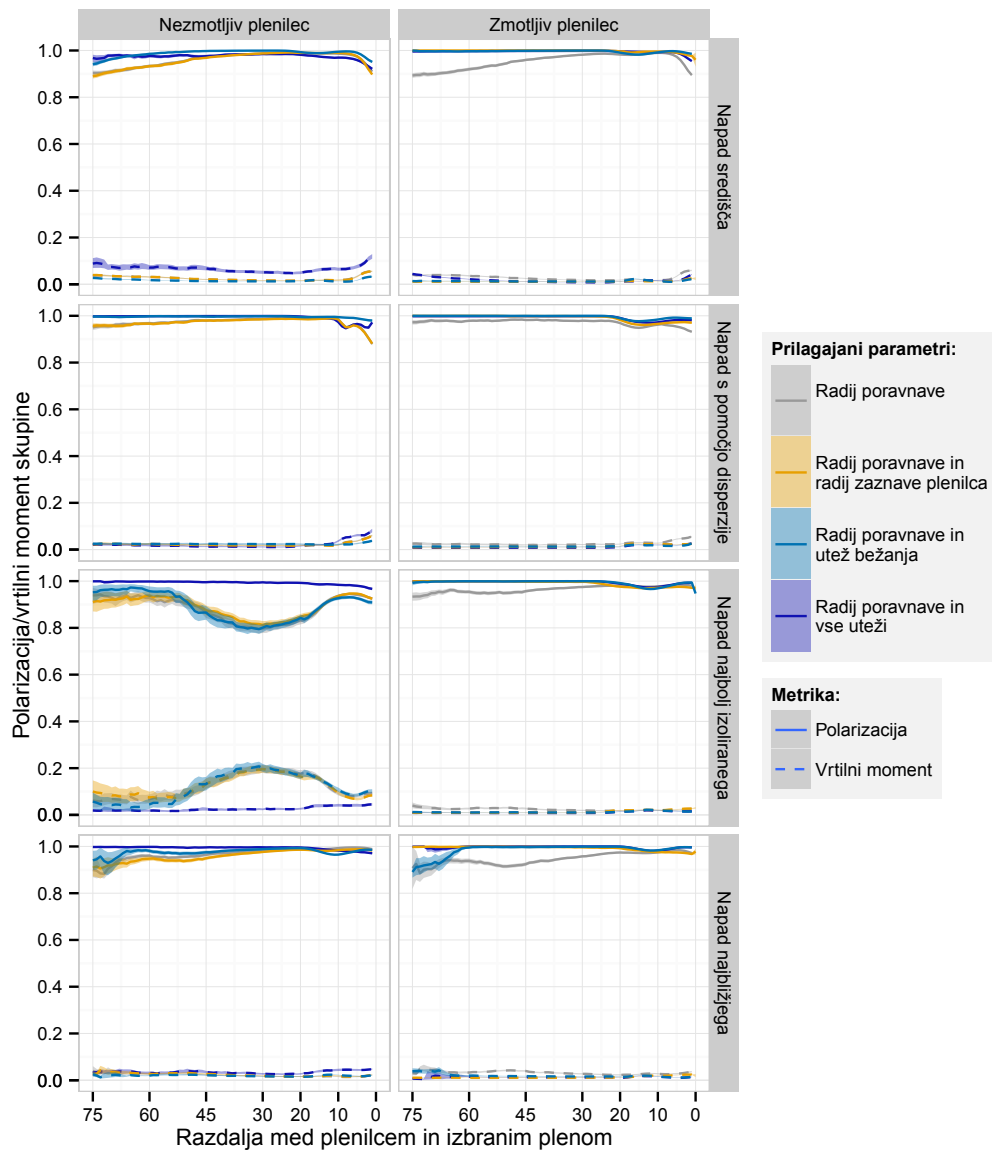
radij zaznave plenilca. Rezultati slednjih treh evolucij nakazujejo poskus vzpostavitve režima kroženja okrog praznega jedra, vendar vrtilni moment in polarizacija skupine ne dosežeta ustreznih vrednosti. V danih primerih se polarizacija skupine zmanjša na  $\sim 0,8$  ter vrtilni moment poveča na  $\sim 0,2$ , kar pa ne zadošča stabilnemu kroženju okrog praznega jedra (glej vrednosti metrik na intervalu  $[1,5; 3]$  na sliki 2.6). Vzrok za to pripisujemo kolektivnemu spominu [13], ki smo ga predstavili v poglavju 2.3 *Opazovane metrike in znani režimi vedenja*. Ta lastnost onemogoča neposreden prehod vedenja skupine iz usklajenega gibanja, ki ga povzroči plenilec, v kroženje okrog praznega jedra.

Nato smo se osredotočili na analizo metrike povprečne razdalje do najbližjega soseda (NND). Pri napadih zmotljivega plenilca poskuša skupina ohranjati čim manjšo razdaljo do najbližjega soseda (slika 5.2), kar ji poveča verjetnost preživetja (manjša NND  $\Rightarrow$  manjša verjetnost uspešnosti napada). Tukaj želimo izpostaviti tudi zgostitev 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 (evolucija radija poravnave in uteži bežanja), kjer se je NND zmanjšala z 1,08 (SD: 0,007) na 0,94 (SD: 0,026) ( $t = 61,5210$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ). Enako reakcijo smo opazili tudi pri nekaterih rezultatih evolucij z napadom nezmotljivega plenilca (napad središča in napad najbližjega v primeru evolucije radija poravnave in uteži bežanja), kar nas je presenetilo, saj tovrsten odziv neposredno ne koristi plenu, ker plenilec ne glede na stopnjo zgoščenosti skupine vedno ujame izbran plen.

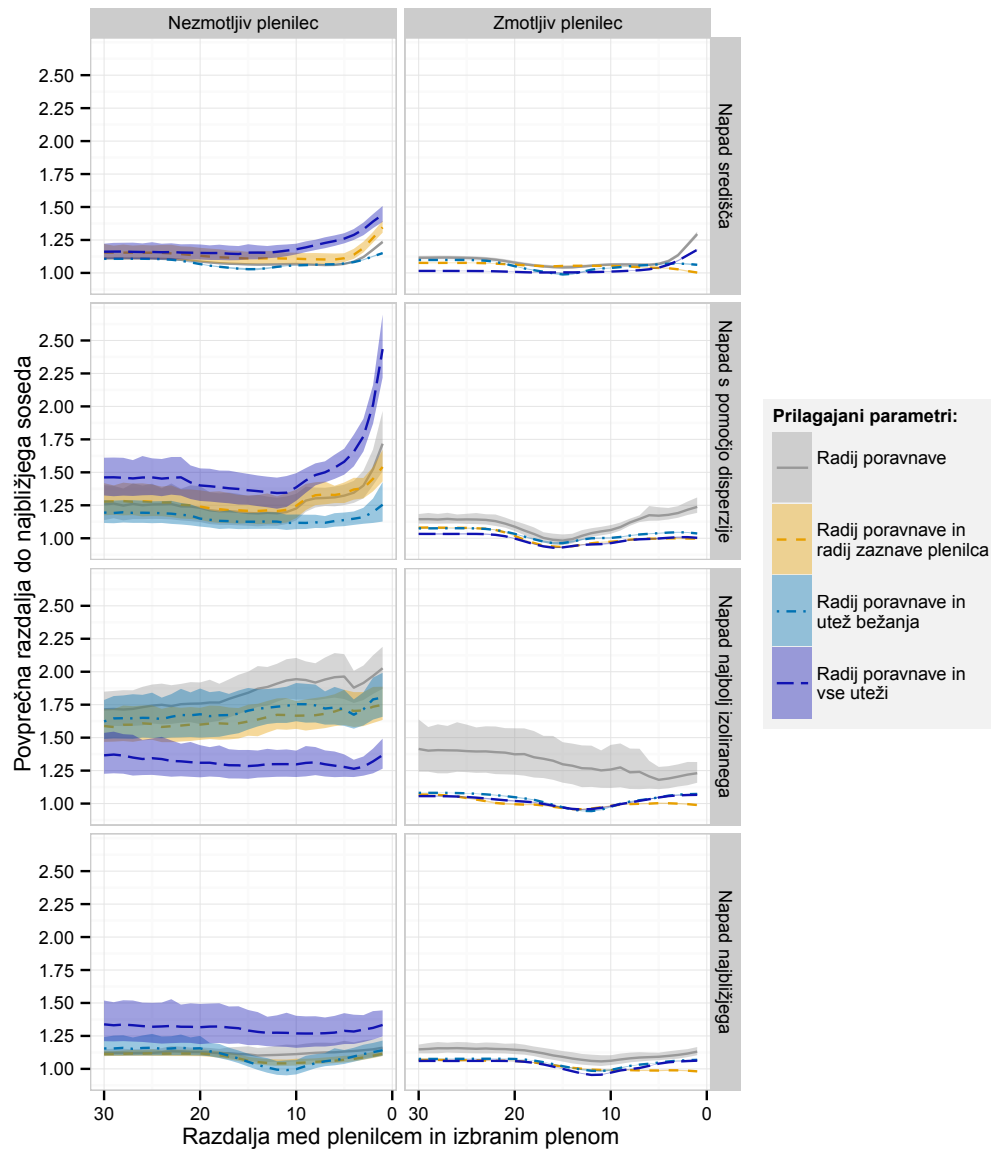
Pri napadih zmotljivega plenilca nismo opazili očitnega povečanja NND tik pred napadom plenilca. Ta odziv smo poimenovali ignoriranje plenilca, ki plenu poveča možnosti preživetja zaradi ohranitve še vedno dovolj visoke gostote skupine. Pri rešitvah evolucije s prilagajanjem zgolj radija poravnave je bil odziv ignoriranja plenilca še neučinkovit, ko pa smo med prilagajane parametre dodali tudi radij zaznave plenilca oz. uteži nagonov, se je omenjen odziv izpopolnil.

Pri napadih nezmotljivega plenilca so odzivi plena v primerjavi z zmotljivim plenilcem v večini ravno nasprotni. Povprečna razdalja do najbližjega soseda se tik pred napadom močno poveča, s čimer se plen na račun hitre spremembe smeri želi izogniti plenilcu. Izjema so rešitve evolucij vedenja pri napadu najbližjega plena, pri katerih smo zaznali odziv ignoriranja plenilca. Vzrok za to pripisujemo položaju izbranega posameznika, ki se nahaja na obrobju skupine, zaradi česar jata kasneje reagira na napad plenilca.

V tabeli (5.1) so prikazane povprečne vrednosti osnovnih metrik v zadnji generaciji



Slika 5.1: Prikaz gibanja metrik polarizacije skupine in vrtilnega momenta skupine pri napadu plenilca. Za vsako kombinacijo taktike napada, vrste plenilca in optimiziranega nabora parametrov smo izvedli simulacijo v dolžini  $t_s$  in beležili gibanje opazovanih metrik ob vsakem napadu plenilca, ko se le-ta približuje izbranemu plenu. Na grafu je prikazano gibanje opazovanih metrik v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom (CI: 95 %, število ponovitev: 140 oz. 150 = 10 ponovitev  $\times$  14 oz. 15 rešitev za posamezen nabor parametrov).



Slika 5.2: Prikaz gibanja povprečne razdalje do najbližjega soseda pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom. Ostali parametri enaki kot pri sliki 5.1.

evolucij različnih naborov parametrov. Evolucija vedenja s prilagajanjem radija poravnave in radija zaznave plenilca pri napadu zmotljivega plenilca je prinesla znatne izboljšave števila ulovov v primerjavi z evolucijo zgolj radija poravnave. Pri napadu na središče se je število ulovov zmanjšalo z 0,67 (SD: 0,72) na 0,15 (SD: 0,36) ( $t = 7,6433$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu s pomočjo disperzije s 4,72 (SD: 1,07) na 0,71 (SD: 0,76) ( $t = 36,1517$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu najbolj izoliranega plena z 1,31 (SD: 1,06) na 0,52 (SD: 0,7) ( $t = 7,3586$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ) in pri napadu najbližjega plena z 1,24 (SD: 1,06) na 0,68 (SD: 0,74) ( $t = 5,1255$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ).

Pri napadu nezmotljivega plenilca je v primerjavi z evolucijo s prilagajanjem zgolj radija poravnave število ulovov najbolj zmanjšala evolucija vedenja s prilagajanjem radija poravnave in uteži bežanja. Pri napadu na središče se je število ulovov zmanjšalo s 4,97 (SD: 0,54) na 4,49 (SD: 0,5) ( $t = 7,7173$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu s pomočjo disperzije s 5,24 (SD: 0,9) na 4,04 (SD: 0,57) ( $t = 13,3280$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu najbolj izoliranega plena s 3,88 (SD: 1,48) na 3,06 (SD: 1,2) ( $t = 5,0921$ ,  $df = 278$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu na najbližji plen pa je število ulovov ostalo enako.

V primerjavi z evolucijo s prilagajanjem zgolj radija poravnave je število trkov med posamezniki ob napadu nezmotljivega plenilca najbolj zmanjšala evolucija s prilagajanjem radija poravnave in vseh uteži nagonov vedenja. Pri napadu na središče se je število trkov zmanjšalo z 122,45 (SD: 27,29) na 16,31 (SD: 12,26) ( $t = 43,1963$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu s pomočjo disperzije z 115,86 (SD: 28,51) na 3,19 (SD: 2,72) ( $t = 48,1728$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu najbolj izoliranega plena z 246,93 (SD: 70,96) na 6,63 (SD: 5,43) ( $t = 41,3505$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ) in pri napadu na najbližji plen z 91,15 (SD: 36,75) na 4,63 (SD: 3,63) ( $t = 28,6879$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ). Zasluga tako nizkemu številu trkov gre močno usklajenemu režimu gibanja in nizki uteži kohezije, ki omogoča enostaven razpad skupine. To tezo potrjujejo podatki o številu samostojnih jat na koncu simulacij. Število le-teh se je povečalo pri vseh taktikah napada. V primerjavi z evolucijo s prilagajanjem zgolj radija poravnave se je število jat pri napadu na središče povečalo z 1,43 (SD: 0,62) na 8,23 (SD: 4,64) ( $t = 17,1956$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu s pomočjo disperzije z 2,73 (SD: 1,59) na 3,39 (SD: 1,95) ( $t = 3,1458$ ,  $df = 288$ ,  $P = 0,0018$ ), pri napadu najbolj izoliranega plena s 3,68 (SD: 1,77) na 4,55 (SD: 2,09) ( $t = 3,8120$ ,  $df = 288$ ,  $P = 0,0002$ ) in pri napadu na najbližji plen z 1,34 (SD: 0,71) na 5,55 (SD: 3,39) ( $t = 14,4008$ ,  $df = 288$ ,  $P < 0,0001$ ).

V primerih, kjer so na intervalu odsotnosti plenilca prevladovali vrednosti radija



Tabela 5.1: Rezultati splošnih metrik evolucije vedenja skupine pri napadu plenilca s pomočjo različnih taktik napada (št. ponovitev: 140 oz. 150 = 10 ponovitev  $\times$  14 oz. 15 rešitev za posamezen nabor parametrov).

Zmotljivost plenilca	Taktika napada	Število ulovov	Število trkov	Število jat	Cenilka
Radij poravnave (10 ponovitev $\times$ 14 rešitev):					
Da	Središče	0,67 (SD: 0,72)	138,89 (SD: 33,81)	1,71 (SD: 0,85)	0,041 (SD: 0,029)
Da	Disperzija	4,72 (SD: 1,07)	111,94 (SD: 32,45)	2,85 (SD: 1,58)	0,200 (SD: 0,044)
Da	Izoliran	1,31 (SD: 1,06)	119,41 (SD: 51,42)	1,25 (SD: 0,51)	0,065 (SD: 0,043)
Da	Najbližji	1,24 (SD: 1,06)	149,66 (SD: 48,43)	2,06 (SD: 0,94)	0,064 (SD: 0,042)
Ne	Središče	4,97 (SD: 0,54)	122,45 (SD: 27,29)	1,43 (SD: 0,62)	0,211 (SD: 0,022)
Ne	Disperzija	5,24 (SD: 0,90)	115,86 (SD: 28,51)	2,73 (SD: 1,59)	0,221 (SD: 0,038)
Ne	Izoliran	3,88 (SD: 1,48)	246,93 (SD: 70,96)	3,68 (SD: 1,77)	0,180 (SD: 0,058)
Ne	Najbližji	5,37 (SD: 0,62)	91,15 (SD: 36,75)	1,34 (SD: 0,71)	0,224 (SD: 0,026)
Radij poravnave in radij zaznave plenilca (10 ponovitev $\times$ 14 rešitev):					
Da	Središče	0,15 (SD: 0,36)	79,50 (SD: 27,44)	1,00 (SD: <0,001)	0,014 (SD: 0,014)
Da	Disperzija	0,71 (SD: 0,76)	139,37 (SD: 74,56)	1,00 (SD: <0,001)	0,043 (SD: 0,032)
Da	Izoliran	0,52 (SD: 0,70)	97,21 (SD: 34,71)	1,00 (SD: <0,001)	0,031 (SD: 0,029)
Da	Najbližji	0,68 (SD: 0,74)	140,33 (SD: 62,31)	1,01 (SD: 0,08)	0,041 (SD: 0,030)
Ne	Središče	5,03 (SD: 0,61)	132,47 (SD: 33,99)	1,66 (SD: 0,89)	0,214 (SD: 0,026)
Ne	Disperzija	5,20 (SD: 1,04)	119,70 (SD: 29,68)	2,82 (SD: 1,65)	0,220 (SD: 0,044)
Ne	Izoliran	4,23 (SD: 1,71)	244,04 (SD: 70,44)	3,16 (SD: 1,50)	0,194 (SD: 0,067)
Ne	Najbližji	5,63 (SD: 0,58)	113,04 (SD: 57,06)	1,27 (SD: 0,57)	0,236 (SD: 0,026)
Radij poravnave in utež bežanja (10 ponovitev $\times$ 14 rešitev):					
Da	Središče	0,30 (SD: 0,48)	66,54 (SD: 17,56)	1,00 (SD: <0,001)	0,019 (SD: 0,019)
Da	Disperzija	0,43 (SD: 0,61)	62,80 (SD: 18,19)	1,01 (SD: 0,08)	0,023 (SD: 0,025)
Da	Izoliran	0,67 (SD: 0,70)	66,79 (SD: 18,56)	1,00 (SD: <0,001)	0,034 (SD: 0,028)
Da	Najbližji	0,69 (SD: 0,74)	60,69 (SD: 21,40)	1,01 (SD: 0,08)	0,034 (SD: 0,029)
Ne	Središče	4,49 (SD: 0,50)	81,19 (SD: 25,51)	1,04 (SD: 0,19)	0,188 (SD: 0,020)
Ne	Disperzija	4,04 (SD: 0,57)	54,21 (SD: 21,00)	1,35 (SD: 1,10)	0,167 (SD: 0,024)
Ne	Izoliran	3,06 (SD: 1,20)	236,50 (SD: 62,76)	3,91 (SD: 1,83)	0,146 (SD: 0,046)
Ne	Najbližji	5,37 (SD: 0,75)	80,64 (SD: 58,29)	1,42 (SD: 0,94)	0,223 (SD: 0,033)
Radij poravnave in vse uteži (10 ponovitev $\times$ 15 rešitev):					
Da	Središče	0,21 (SD: 0,47)	13,96 (SD: 8,13)	1,66 (SD: 0,88)	0,010 (SD: 0,019)
Da	Disperzija	0,53 (SD: 0,75)	41,01 (SD: 22,03)	1,06 (SD: 0,24)	0,025 (SD: 0,030)
Da	Izoliran	0,71 (SD: 0,74)	43,63 (SD: 19,85)	1,00 (SD: <0,001)	0,033 (SD: 0,029)
Da	Najbližji	0,89 (SD: 0,92)	31,85 (SD: 15,04)	1,01 (SD: 0,08)	0,039 (SD: 0,037)
Ne	Središče	5,35 (SD: 0,96)	16,31 (SD: 12,26)	8,23 (SD: 4,64)	0,216 (SD: 0,039)
Ne	Disperzija	3,85 (SD: 1,21)	3,19 (SD: 2,72)	3,39 (SD: 1,95)	0,154 (SD: 0,048)
Ne	Izoliran	3,60 (SD: 1,43)	6,63 (SD: 5,43)	4,55 (SD: 2,09)	0,145 (SD: 0,057)
Ne	Najbližji	5,50 (SD: 1,66)	4,63 (SD: 3,63)	5,55 (SD: 3,39)	0,220 (SD: 0,066)

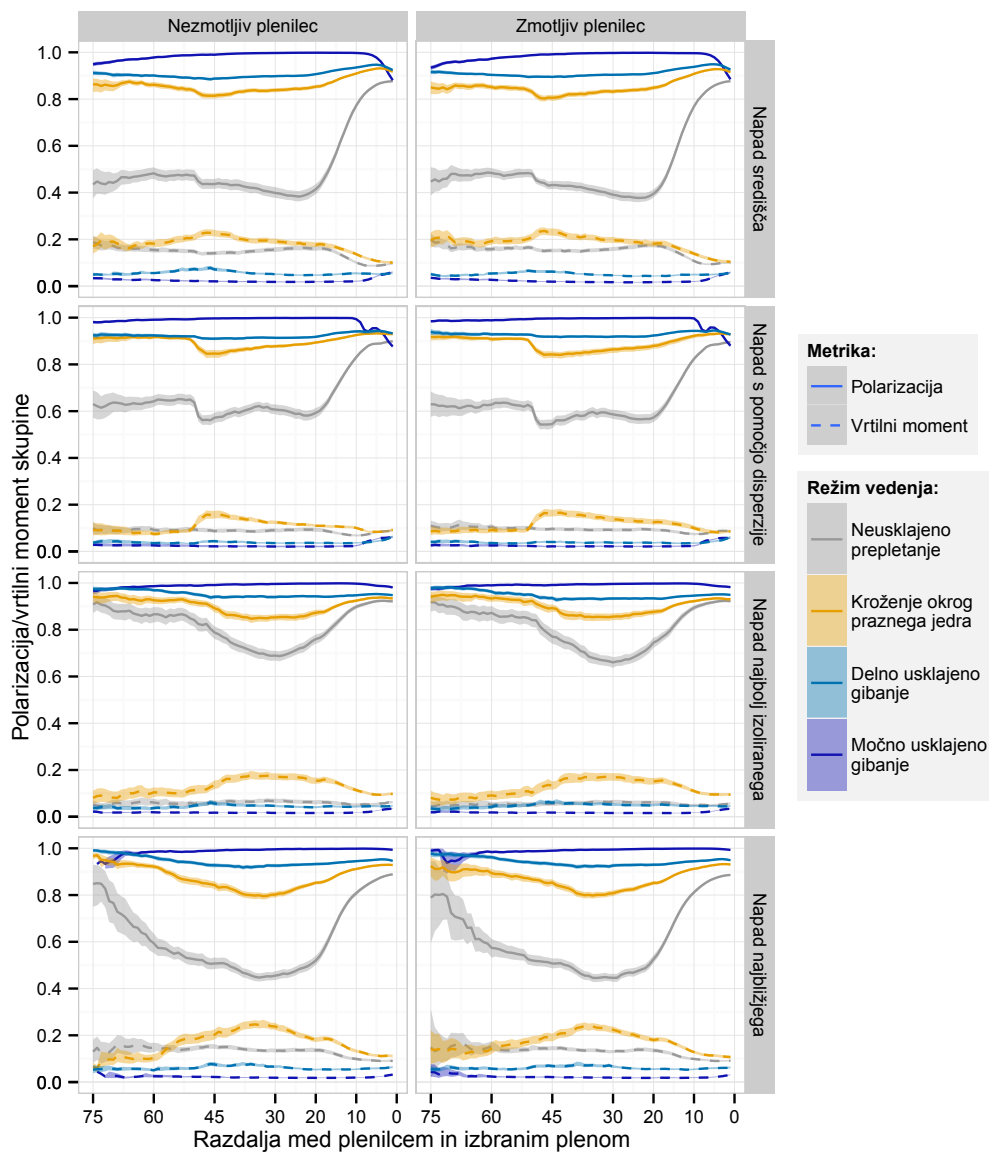
poravnave, značilne za režim kroženja okrog praznega jedra (napad na izoliran plen, nezmotljiv plenilec), smo opazili večje število trkov med posamezniki v primerjavi z ostalimi taktikami napada. Vzrok za povečano število trkov med posamezniki pripisujemo nižji vrednosti polarizacije skupine in večji vrednosti vrtilnega momenta (slika 5.1), ki povzročita bolj intenzivno delno usklajeno gibanje s težnjo kroženja. Enak vzorec smo zasledili tudi pri številu jat na koncu simulacij, ki je bilo povečano. Pri pregledu posnetkov simulacij smo v začetni fazi stabilizacije vedenja odkrili vzpostavitev kroženja okrog praznega jedra, ki se je občasno ohranilo do prvega napada plenilca. V tem času je bil režim kroženja zelo nestabilen, kar pojasnjuje povečano število jat na koncu simulacije. Kroženja okrog praznega jedra na sliki 5.1 ne moremo jasno identificirati, ker se je pojavilo samo v začetni fazi simulacije.

## 5.2 Analiza referenčnih režimov vedenja

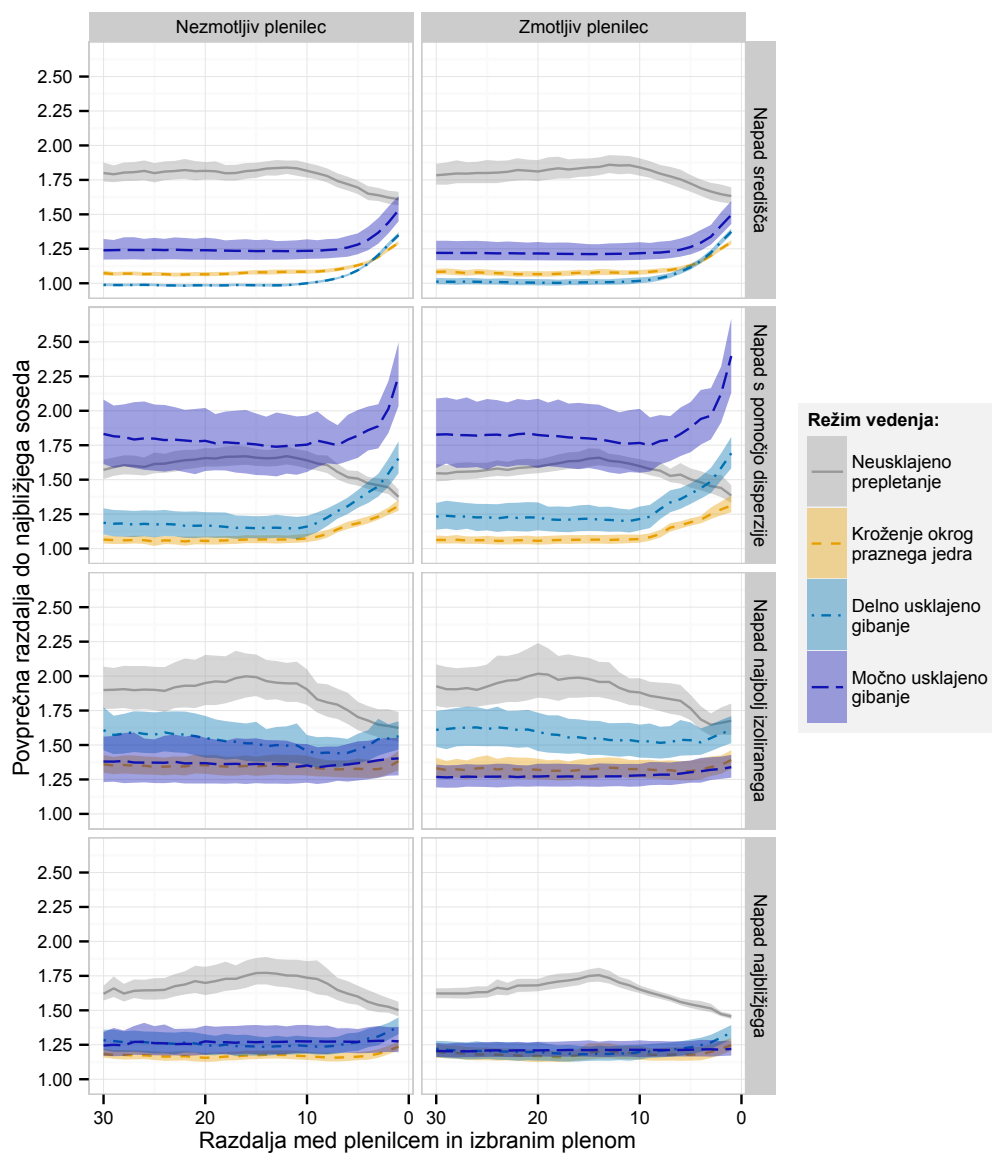
Enake meritve smo aplicirali na modelu, pri katerem je bil radij poravnave usklajen z referenčnimi režimi vedenja skupine, ki vključujejo neusklajeno prepletanje, kroženje okrog praznega jedra, delno usklajeno gibanje in močno usklajeno gibanje. Graf na sliki 5.3 prikazuje rezultate meritev polarizacije in vrtilnega momenta skupine pri napadu plenilca. Značilnost vseh referenčnih režimov gibanja je prehod v delno usklajeno gibanje, ko je plenilec tik pred napadom izbranega plena (razdalja med plenilcem in izbranim plenom = 1). Polarizacija skupine se v danih primerih nahaja na intervalu  $[0,85; 0,95]$ , ki je značilen za delno usklajeno gibanje.

Kot lahko opazimo, se režim kroženja okrog praznega jedra srečuje z enako težavo, ki smo jo predstavili v predhodni sekciji (primer napada nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen s slike 5.1). Na intervalu razdalje med plenilcem in izbranim plenom  $[30; 45]$  skupina namreč poskuša vzpostaviti režim kroženja okrog praznega jedra, kar ji ne uspe. Vrednost vrtilnega momenta se ne poveča na ustrezno raven, ki zadošča stabilnemu kroženju ( $>0,8$ ). Vzrok za to je kolektivni spomin [13], ki preprečuje neposreden prehod iz usklajenih oblik gibanja v kroženje okrog praznega jedra.

Na sliki 5.4 so prikazane meritve povprečne razdalje do najbližjega soseda pri napadu plenilca. Pri referenčnih vrstah vedenja nismo zaznali odziva zgojitve skupine ali ignoriranja plenilca, ki sta bili glavni značilnosti prilagodljivih modelov vedenja pri napadu zmotljivega plenilca. Izjema pri zgojitvi je režim neusklajenega prepletanja,



Slika 5.3: Prikaz gibanja metrik polarizacije in vrtilnega momenta skupine pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom. Za vsako kombinacijo taktike napada, vrste plenilca in režima vedenja smo izvedli simulacijo v dolžini  $t_s$  (CI: 95 %, število ponovitev: 150, neusklajeno prepletanje:  $r_o = 1$ , kroženje okrog praznega jedra:  $r_o = 2,25$ , delno usklajeno gibanje:  $r_o = 5$ , močno usklajeno gibanje:  $r_o = 12$ ).



Slika 5.4: Prikaz gibanja povprečne razdalje do najbližjega soseda pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom. Ostali parametri enaki kot na sliki 5.3.

Tabela 5.2: Rezultati splošnih metrik referenčnih vrst vedenja pri napadu plenilca s pomočjo različnih taktik napada (št. ponovitev: 150).

Zmotljivost plenilca	Taktika napada	Število ulovov	Število trkov	Število jat	Cenilka
Neusklajeno prepletanje ( $r_o = 1$ ):					
Da	Središče	3,64 (SD: 1,43)	316,91 (SD: 31,25)	7,45 (SD: 3,12)	0,177 (SD: 0,057)
Da	Disperzija	6,04 (SD: 1,71)	346,71 (SD: 34,86)	8,21 (SD: 3,99)	0,276 (SD: 0,068)
Da	Izoliran	2,53 (SD: 1,20)	360,55 (SD: 33,89)	2,30 (SD: 1,41)	0,137 (SD: 0,048)
Da	Najbližji	4,39 (SD: 1,45)	326,29 (SD: 33,41)	7,66 (SD: 3,08)	0,208 (SD: 0,057)
Ne	Središče	8,29 (SD: 1,05)	307,23 (SD: 33,87)	6,62 (SD: 2,93)	0,362 (SD: 0,041)
Ne	Disperzija	7,16 (SD: 1,65)	344,93 (SD: 32,87)	7,61 (SD: 3,53)	0,321 (SD: 0,065)
Ne	Izoliran	4,26 (SD: 2,09)	348,65 (SD: 38,64)	2,37 (SD: 1,63)	0,205 (SD: 0,082)
Ne	Najbližji	8,26 (SD: 1,44)	316,62 (SD: 31,88)	7,12 (SD: 3,24)	0,362 (SD: 0,057)
Kroženje okrog praznega jedra ( $r_o = 2,25$ ):					
Da	Središče	1,73 (SD: 1,22)	207,67 (SD: 39,62)	5,06 (SD: 1,80)	0,090 (SD: 0,049)
Da	Disperzija	5,10 (SD: 1,49)	227,05 (SD: 45,06)	4,10 (SD: 1,92)	0,227 (SD: 0,058)
Da	Izoliran	2,39 (SD: 1,34)	244,59 (SD: 55,84)	3,23 (SD: 1,29)	0,120 (SD: 0,054)
Da	Najbližji	2,51 (SD: 1,37)	209,84 (SD: 46,53)	5,77 (SD: 2,33)	0,122 (SD: 0,055)
Ne	Središče	6,59 (SD: 0,82)	199,04 (SD: 42,16)	5,38 (SD: 2,18)	0,284 (SD: 0,030)
Ne	Disperzija	6,37 (SD: 0,97)	224,98 (SD: 53,16)	4,14 (SD: 2,06)	0,277 (SD: 0,036)
Ne	Izoliran	5,10 (SD: 1,83)	239,85 (SD: 60,20)	3,27 (SD: 1,44)	0,228 (SD: 0,070)
Ne	Najbližji	7,39 (SD: 1,15)	194,32 (SD: 48,81)	5,60 (SD: 2,10)	0,315 (SD: 0,044)
Delno usklajeno gibanje ( $r_o = 5$ ):					
Da	Središče	1,81 (SD: 1,17)	307,67 (SD: 49,29)	5,75 (SD: 1,89)	0,103 (SD: 0,047)
Da	Disperzija	5,59 (SD: 1,29)	334,41 (SD: 56,76)	3,38 (SD: 1,81)	0,257 (SD: 0,049)
Da	Izoliran	3,08 (SD: 1,51)	367,51 (SD: 61,18)	2,99 (SD: 1,43)	0,160 (SD: 0,059)
Da	Najbližji	2,82 (SD: 1,56)	331,50 (SD: 60,69)	5,08 (SD: 2,51)	0,146 (SD: 0,062)
Ne	Središče	6,47 (SD: 0,62)	290,36 (SD: 44,29)	5,35 (SD: 1,65)	0,288 (SD: 0,024)
Ne	Disperzija	6,16 (SD: 1,27)	338,21 (SD: 55,03)	3,46 (SD: 1,80)	0,280 (SD: 0,047)
Ne	Izoliran	5,32 (SD: 1,69)	359,49 (SD: 65,55)	2,82 (SD: 1,42)	0,249 (SD: 0,064)
Ne	Najbližji	6,95 (SD: 1,21)	320,01 (SD: 57,53)	4,79 (SD: 2,26)	0,310 (SD: 0,045)
Močno usklajeno gibanje ( $r_o = 12$ ):					
Da	Središče	0,80 (SD: 0,83)	72,90 (SD: 18,13)	1,90 (SD: 1,07)	0,039 (SD: 0,033)
Da	Disperzija	4,30 (SD: 1,16)	57,69 (SD: 17,70)	3,05 (SD: 1,78)	0,178 (SD: 0,047)
Da	Izoliran	2,49 (SD: 1,23)	42,72 (SD: 20,25)	1,20 (SD: 0,43)	0,104 (SD: 0,049)
Da	Najbližji	2,24 (SD: 1,22)	41,10 (SD: 20,44)	1,41 (SD: 0,79)	0,094 (SD: 0,049)
Ne	Središče	4,69 (SD: 0,58)	67,76 (SD: 16,44)	1,91 (SD: 1,04)	0,194 (SD: 0,024)
Ne	Disperzija	4,37 (SD: 1,12)	59,19 (SD: 18,63)	2,69 (SD: 1,52)	0,181 (SD: 0,046)
Ne	Izoliran	4,83 (SD: 1,09)	40,14 (SD: 16,87)	1,15 (SD: 0,40)	0,197 (SD: 0,044)
Ne	Najbližji	5,57 (SD: 0,75)	36,71 (SD: 16,53)	1,55 (SD: 0,88)	0,226 (SD: 0,030)

kjer je NND padal pri vseh taktikah napada. Pri napadu na središče pade z 1,84 (SD: 0,335) na 1,61 (SD: 0,315) ( $t = 6,1259$ ,  $df = 298$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu s pomočjo disperzije z 1,67 (SD: 0,415) na 1,38 (SD: 0,291) ( $t = 7,0074$ ,  $df = 298$ ,  $P < 0,0001$ ), pri napadu na najbolj izoliran plen z 1,99 (SD: 1,04) na 1,624 (SD: 0,66) ( $t = 3,6392$ ,  $df = 298$ ,  $P = 0,0003$ ) in pri napadu najbližjega plena z 1,77 (SD: 0,6) na 1,5 (SD: 0,342) ( $t = 4,7881$ ,  $df = 298$ ,  $P < 0,0001$ ).

Čeprav so bila v primerjavi s prilagodljivimi modeli vedenja zmanjšanja NND glede na začetno stanje pri režimu neusklajenega prepletanja v odstotkih večja, se število ulovov pri napadih zmotljivega plenilca ni zmanjšalo. Vzrok za to je nezadostno zmanjšana

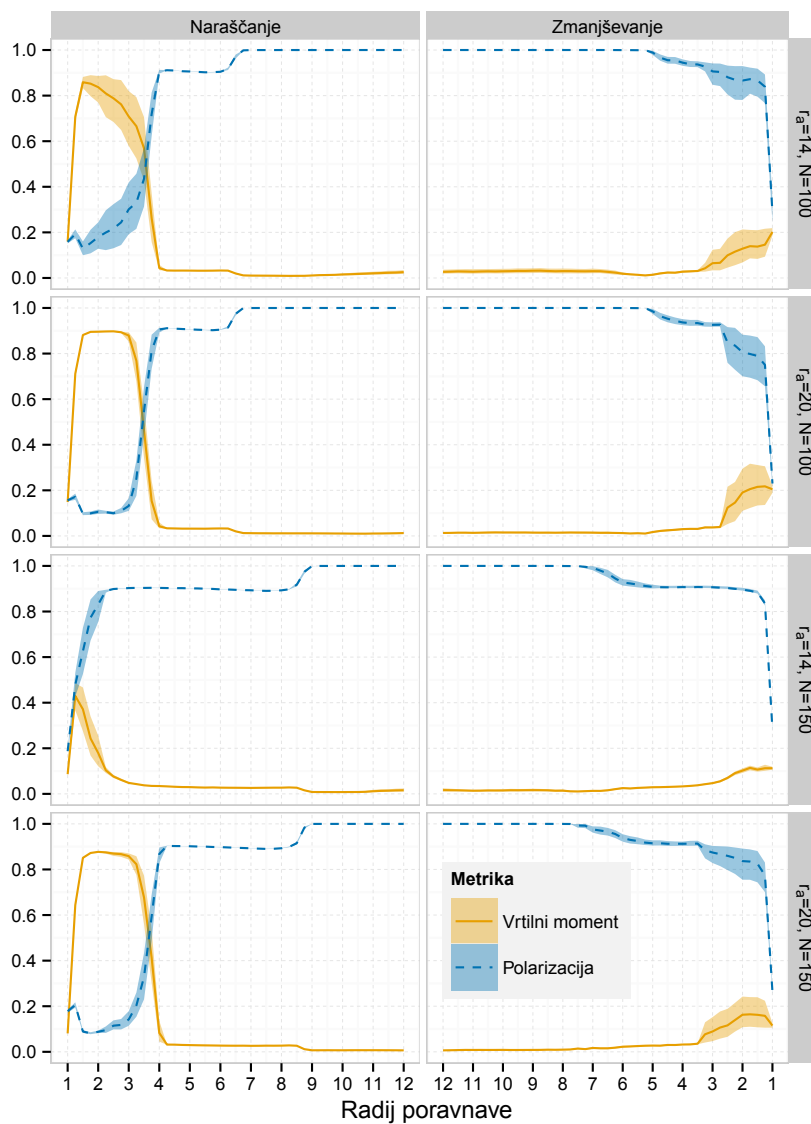
NND tik pred napadom plenilca (razdalja med plenilcem in izbranim plenom = 1). Pri režimu neusklajenega prepletanja se NND v najboljšem primeru (disperzija) zmanjša na 1,38 (SD: 0,291), pri prilagodljivih modelih vedenja pa se pri enaki taktiki napada v povprečju zmanjša na 1,068 (SD: 0,212) ( $t = 14,7420$ ,  $df = 718$ ,  $P < 0,0001$ ). Pri ostalih referenčnih režimih vedenja (kroženje, delno usklajeno in močno usklajeno gibanje) se NND pri napadu plenilca v večini povečuje.

Najbolj uspešen referenčni režim vedenja pri napadu plenilca je močno usklajeno gibanje (tabela 5.2), ki ima najnižje število ulovov in trkov med posamezniki. Manjše je tudi število samostojnih jat na koncu simulacije, kar nakazuje na večjo stabilnost skupine. Zaradi omenjenih lastnosti je bila ta vrsta vedenja osnova za večino prilagodljivih modelov vedenja. Na intervalu odsotnosti plenilca je predvsem pripomogla k nižjemu številu trkov med posamezniki, na intervalih visoke, srednje in nizke oddaljenosti od plenilca pa smo odkrili kombinacijo prehodov med delnim in močno usklajenim gibanjem, ki so bili posledica taktike obrambe z zgostitvijo skupine.

### 5.3 Vpliv radija kohezije na stabilnost kroženja okrog praznega jedra

Pri vseh prilagodljivih modelih so prevladovale usklajene oblike gibanja z izjemo napada nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. V tej situaciji so vrednosti radija poravnave na intervalu odsotnosti plenilca težile proti režimu kroženja okrog praznega jedra, ki pa se ni nikoli uspešno vzpostavil (slika 5.1). Meritve polarizacije in vrtilnega momenta skupine nakazujejo na poskuse vrtenja okrog praznega jedra, vendar vrednosti vrtilnega momenta niso nikoli dosegle ustrezne vrednosti. Sprva smo tako vedenje pripisali kolektivnemu spominu [13], o čemer pa smo kasneje pričeli delno dvomiti. Dvom je nastal pri pregledu posnetkov posameznih rešitev, kjer smo zaznali nestabilno kroženje okrog praznega jedra v začetku simulacije (faza stabilizacije vedenja), ki je povzročilo razpade skupine (glej povečano število jat v tabeli 5.1) in prehode v delno usklajeno gibanje. Iz tega razloga smo se odločili raziskati, kaj povzroča tako vedenje skupine. Eksperiment režimov vedenja, ki ga prikazuje slika 2.6, je bil izveden z istimi vrednostmi parametrov, kot Couzin in sod. [13, slika 4], vključno z velikostjo jate 100. Eksperiment smo ponovili, a tokrat s povečano velikostjo jate, 150. Rezultat prikazuje slika 5.5.

Graf na sliki 5.5 prikazuje presenetljive rezultate, ki so upravičili naš dvom. Na sliki



Slika 5.5: Gibanje metrik vrtilnega momenta in polarizacije skupine pri povečevanju in zmanjševanju radija poravnave ob različnih radijih kohezije in velikostih jate (CI: 95 %, število ponovitev: 30, velikost jate: 100 oz. 150, radij kohezije: 14 oz. 20).

je viden neuspešen prehod v režim kroženja okrog praznega jedra. Izkazalo se je, da povečana velikost jate vpliva na uspešnost vzpostavitve in stabilnost režima kroženja okrog praznega jedra. V nadaljnjih korakih smo prišli do zaključkov, da je glavni vzrok za tako vedenje prenizka velikost območja kohezije ( $r_a = 14$ ). Za stabilno kroženje okrog praznega jedra je torej treba uskladiti radij kohezije in velikost jate. Nato smo ponovili eksperiment s povečanim radijem kohezije ( $r_a = 20$ ) in prišli do rezultatov s slike 5.5. Graf prikazuje uspešno vzpostavitve režima kroženja okrog praznega jedra, ki je stabilno na intervalu radija poravnave [1,5; 3]. Zaradi predstavljenih ugotovitev smo se odločili opraviti dodatno evolucijo s prilagajanjem radija poravnave ob povečanem radiju kohezije.

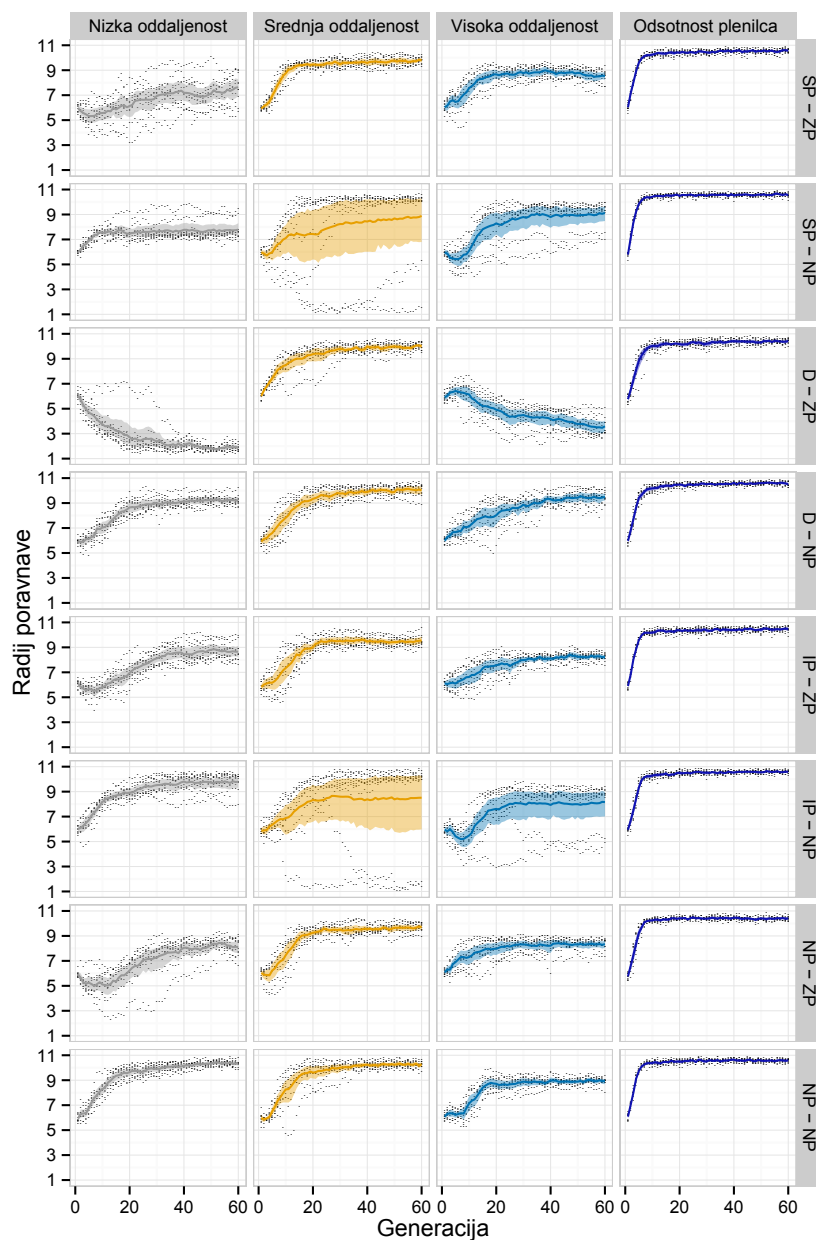
#### 5.4 Rezultati dodatne evolucije

V predhodnem poglavju smo ugotovili, da nezadostna velikost radija kohezije močno vpliva na stabilnost režima kroženja okrog praznega jedra. Pri manjših vrednostih radija kohezije smo zaznali neuspele poskuse vzpostavitve omenjenega režima gibanja in nestabilnost, ki je povzročila razpad skupine. V ta namen smo izvedli dodatno evolucijo radija poravnave ob povečanem radiju kohezije ( $r_a = 20$ ). S tem smo želeli ugotoviti, ali se bo kroženje okrog praznega jedra vzpostavilo pri večkratnih zaporednih napadih nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen in ali bo stabilno kroženje okrog praznega jedra na intervalu odsotnost plenilca še vedno najbolj optimalen režim vedenja. Rezultate smo nato primerjali s predhodnimi, kjer smo uporabili manjši radij kohezije ( $r_a = 14$ ).

Na sliki 5.6 je prikazana evolucija radijev poravnave na vseh štirih intervalih oddaljenosti od plenilca. Pri rezultatih evolucije smo odkrili veliko vzporednic s predhodno evolucijo. Razlike so se pojavile predvsem pri taktikah napada na središče skupine (zmotljiv in nezmotljiv plenilec) ter pri napadu na najbližji plen (zmoljiv plenilec), in sicer na intervalu nizke oddaljenosti, kjer smo zabeležili višje vrednosti radija poravnave, ki so značilne za delno usklajeno gibanje. Na ostalih intervalih oddaljenosti od plenilca se vrednosti radijev poravnave niso spremenile.

Dodano evolucijo s povečanim radijem poravnave smo v prvi vrsti izvedli zaradi odkritja težnje kroženja okrog praznega jedra pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. Na intervalu odsotnosti je namreč vrednost radija poravnave konvergirala proti vrednosti, značilni za to vrsto gibanja (1,4; SD: 0,12). Dodatna evolucija je prinesla





Slika 5.6: Evolucije prilagodljivega radija poravnave ob napadu zmotljivega (ZP) in nezmotljivega plenilca (NP) s taktikami napada na središče skupine (SP), napada s pomočjo disperzije (D), napada na najbolj izoliran plen (IP) in napada najbližjega plena (NP) (CI: 95 %, št. ponovitev: 10, št. generacij: 60, območje prilagajanja vrednosti radija poravnave: [1; 11],  $r_r = 1$ ,  $r_a = 20$ ,  $r_e = 20$ ,  $w_r = w_o = w_a = w_e = 1$ , ostali parametri: glej tabelo 2.1).

presenetljive rezultate. Vrednost radija poravnave je tokrat na intervalu odsotnosti plenilca konvergirala proti vrednosti, značilni za močno usklajeno gibanje (10,6; SD: 0,13). Rešitev nas je presenetila, saj smo pričakovali ohranitev kroženja okrog praznega jedra na intervalu odsotnosti plenilca. Rezultati dodatne evolucije vedenja plena pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen nakazujejo, da se bo skupina gibala usklajeno.

## 5.5 Analiza dodatne evolucije

V tem poglavju bomo s pomočjo metrik analizirali rezultate evolucij modelov s prilagodljivim radijem poravnave, ki se razlikujeta zgolj v velikosti radija kohezije. Gibanje metrike polarizacije in vrtilnega momenta skupine je enako pri vseh taktikah napada in vrstah plenilca z izjemo napada nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen. Kot smo predvidevali, se je skupina pri tej vrsti napada tokrat gibala močno polarizirano, kar je stalnica pri ostalih taktikah napada (slika 5.7).

Gibanje povprečne razdalje do najbližjega soseda se ni bistveno spremenilo pri taktikah: napad na središče skupine, napad s pomočjo disperzije in napad na najbližji plen. Pričakovano je najbolj opazna razlika pri napadu na najbolj izoliran plen (slika 5.8), kjer plen s povečanim radijem kohezije ohranja precej nižjo razdaljo do najbližjega soseda. Sedaj je tudi precej bolj izrazita zgostitev skupine, kjer se na intervalu razdalje med plenilcem in izbranim plenom [10; 20] zmanjša z 1,1 (SD: 0,138) na 1,01 (SD: 0,125) ( $t = 4,8336$ ,  $df = 198$ ,  $P < 0,0001$ ). Tik pred napadom zmotljivega plenilca je NND v primerjavi z evolucijo, ko je  $r_a = 14$ , zmanjšana z 1,23 (SD: 0,511) na 1,11 (SD: 0,134) ( $t = 2,2915$ ,  $df = 238$ ,  $P = 0,0228$ ) kar poveča možnost preživetja skupine pri napadu.

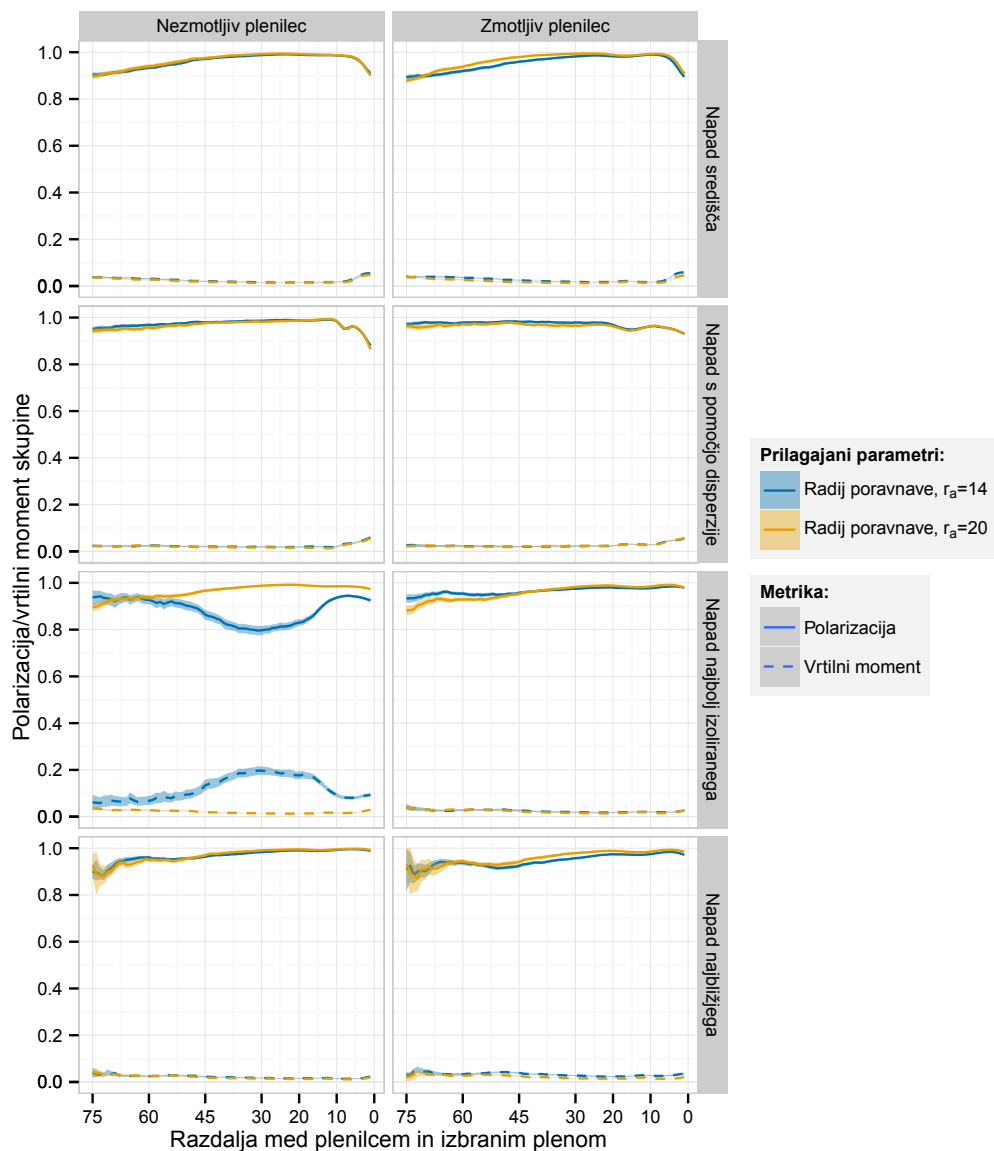
V tabeli 5.3 so navedeni rezultati splošnih metrik. Število ulovov se je pri napadu nezmotljivega plenilca na najbolj izoliran plen povečalo s 3,88 (SD: 1,48) na 5,05 (SD: 0,52) ( $t = 7,5747$ ,  $df = 238$ ,  $P < 0,0001$ ). Med drugim se je zmanjšalo število trkov z 246,93 (SD: 70,96) na 105,18 (SD: 44,26) ( $t = 17,6660$ ,  $df = 238$ ,  $P < 0,0001$ ) in število samostojnih jat na koncu simulacije s 3,68 (SD: 1,77) na 1,0 (SD: < 0,001) ( $t = 15,1322$ ,  $df = 238$ ,  $P < 0,0001$ ). Prilagodljivi model je ob povečanem radiju kohezije glede na število ulovov manj uspešen kot enak model z manjšim radijem kohezije.

Analiza dodatne evolucije s povečanim radijem kohezije nakazuje, da stabilen režim kroženja okrog praznega jedra pri napadu plenilca verjetno ni najbolj optimalen, čeprav

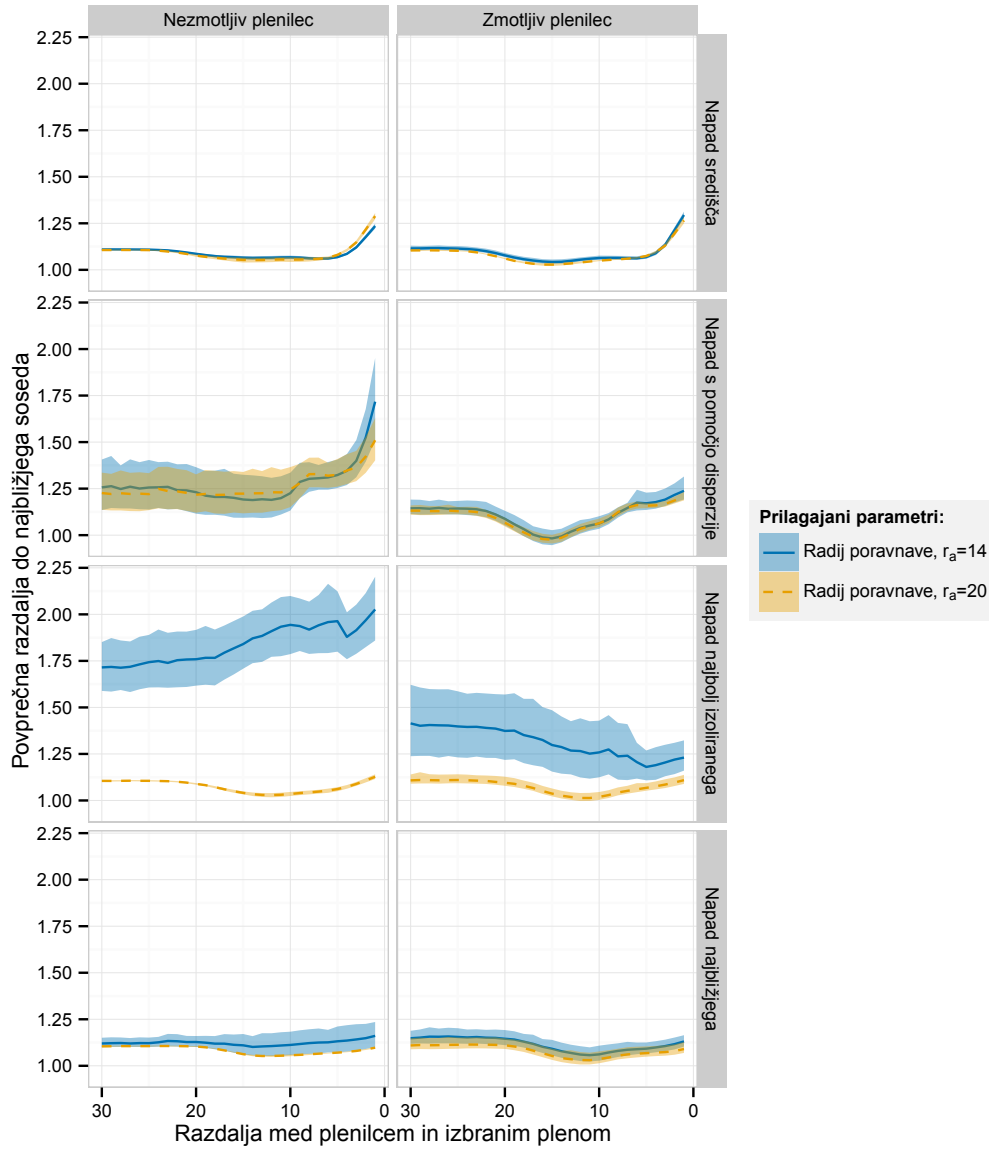
Tabela 5.3: Rezultati splošnih metrik evolucije vedenja skupine s prilagajanjem radija poravnave pri napadu plenilca z različnimi taktikami napada (št. ponovitev: 100 oz. 140 = 10 ponovitev  $\times$  10 oz. 14 rešitev za posamezen nabor parametrov).

Zmotljivost plenilca	Taktika napada	Število ulovov	Število trkov	Število jat	Cenilka
Radij poravnave, $r_a = 14$ (št. ponovitev: 10 $\times$ 14 rešitev):					
Da	Središče	0,67 (SD: 0,72)	138,89 (SD: 33,81)	1,71 (SD: 0,85)	0,041 (SD: 0,029)
Da	Disperzija	4,72 (SD: 1,07)	111,94 (SD: 32,45)	2,85 (SD: 1,58)	0,200 (SD: 0,044)
Da	Izoliran	1,31 (SD: 1,06)	119,41 (SD: 51,42)	1,25 (SD: 0,51)	0,065 (SD: 0,043)
Da	Najbližji	1,24 (SD: 1,06)	149,66 (SD: 48,43)	2,06 (SD: 0,94)	0,064 (SD: 0,042)
Ne	Središče	4,97 (SD: 0,54)	122,45 (SD: 27,29)	1,43 (SD: 0,62)	0,211 (SD: 0,022)
Ne	Disperzija	5,24 (SD: 0,90)	115,86 (SD: 28,51)	2,73 (SD: 1,59)	0,221 (SD: 0,038)
Ne	Izoliran	3,88 (SD: 1,48)	246,93 (SD: 70,96)	3,68 (SD: 1,77)	0,180 (SD: 0,058)
Ne	Najbližji	5,37 (SD: 0,62)	91,15 (SD: 36,75)	1,34 (SD: 0,71)	0,224 (SD: 0,026)
Radij poravnave, $r_a = 20$ (št. ponovitev: 10 $\times$ 10 rešitev):					
Da	Središče	0,62 (SD: 0,79)	132,28 (SD: 28,11)	1,05 (SD: 0,22)	0,038 (SD: 0,032)
Da	Disperzija	4,75 (SD: 1,15)	132,54 (SD: 33,73)	1,78 (SD: 1,02)	0,203 (SD: 0,047)
Da	Izoliran	0,77 (SD: 0,94)	126,51 (SD: 47,67)	1,02 (SD: 0,14)	0,043 (SD: 0,039)
Da	Najbližji	0,80 (SD: 0,92)	125,54 (SD: 47,00)	1,08 (SD: 0,27)	0,045 (SD: 0,037)
Ne	Središče	4,55 (SD: 0,63)	126,60 (SD: 32,53)	1,06 (SD: 0,24)	0,195 (SD: 0,026)
Ne	Disperzija	5,14 (SD: 0,70)	128,62 (SD: 29,41)	1,42 (SD: 0,81)	0,218 (SD: 0,029)
Ne	Izoliran	5,05 (SD: 0,52)	105,18 (SD: 44,26)	1,00 (SD: <0,001)	0,213 (SD: 0,023)
Ne	Najbližji	5,24 (SD: 0,53)	89,85 (SD: 36,40)	1,03 (SD: 0,17)	0,219 (SD: 0,023)

so pogoji za to izpolnjeni. Razlog, zakaj se je kroženje pojavilo pri predhodni evoluciji, je 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 ostalih posameznikov, s čimer je bila jati zagotovljena večja možnost preživetja.



Slika 5.7: Prikaz gibanja metrik polarizacije in vrtilnega momenta skupine pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom (CI: 95 %, število ponovitev: 100 ( $r_a = 20$ ) oz. 140 ( $r_a = 14$ ) = 10 ponovitev  $\times$  10 oz. 14 rešitev za posamezen nabor parametrov).



Slika 5.8: Prikaz gibanja povprečne razdalje do najbližjega soseda pri napadu plenilca v relaciji z razdaljo med plenilcem in izbranim plenom. Parametri enaki kot na sliki 5.7.



## 6 Sklepne ugotovitve in zaključek

Cilj magistrske naloge 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 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 ter 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 naslednji: radij poravnave, radij poravnave in radij zaznave plenilca, radij poravnave in utež bežanja ter radij poravnave in vse uteži nagonov, ki opredeljujejo vedenje.

Pri vseh rezultatih evolucij so prevladovala usklajena vrste gibanja, kar je skupini po napadu omogočalo čim večjo oddaljitev od plenilca, ko poteka čas ravnanja s plenom ali

čas za ponovni napad. 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 nižje stabilnosti (enostaven 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 ostalih posameznikov. Pri vseh ostalih evolucijah 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. Ko se je plenilec približeval skupini, smo v nekaterih primerih zaznali kratkotrajno ignoriranje plenilca po katerem je v neposredni bližini sledil hiter izogib (razpršitev). Pri evolucijah z manjšim naborom parametrov (radij poravnave in radij zaznave plenilca oz. utež bežanja) skupine praviloma niso razpadle pri napadu plenilca. To se je spremenilo pri evoluciji z naborom parametrov radija 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. Plenilcu zato ni uspelo razpršiti skupine, hkrati pa si je skupina zaradi visoke zgoščenosti zagotovila večjo verjetnost preživetja. Omenjene odzive jate smo zasledili tako pri evoluciji prilagodljivega modela s parametroma radija poravnave in radija zaznave plenilca kot tistemu s parametroma radija poravnave in uteži bežanja. Pri evoluciji prilagodljivega modela z zgolj parametrom radija poravnave plen ni imel izpopolnjenih odzivov zgostitve in ignoriranja plenilca.

Kot 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 bil 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 najbolj optimalen pri napadu plenilca in ali se ta režim gibanja ohrani oz. okrepi. Rezultati dodatne evolucije kažejo, da stabilno kroženje okrog praznega jedra verjetno ni najbolj optimalen 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.

Pri izdelavi magistrske naloge smo odkrili veliko priložnosti za nadaljnje raziskave področja skupinskega vedenja pri napadu plenilca. Zaradi visoke časovne kompleksnosti izvajanja evolucij skupinskega vedenja smo lahko raziskali le specifično podmnožico naborov parametrov, ki smo jih opisali v našem delu. Ta nabor parametrov bi bilo smiselno pri nadaljnjih raziskavah razširiti, hkrati pa bi lahko uvedli tudi model vedenja skupine s spremenljivo hitrostjo posameznikov, na katere vpliva sila gibanja. Sam model vedenja bi lahko še dodatno nadgradili z lastnostmi, ki so značilne v naravi: utrujenost plena in plenilca, različne lastnosti med posamezniki (npr. najvišja hitrost), uvedba potovalne hitrosti in hitrosti bežanja, uvedba različnih načinov bežanja pred plenilcem itd. Z vsemi naštetimi predlogi bi naredili simulacijo vedenja bolj naravno. Poleg naštetega bi lahko preverili, ali način simulacije pri evoluciji plena vpliva na rezultate parametrov vedenja. V naši raziskavi smo izvedli simulacijo dolžine 400 s v kateri je plenilec neprekinjeno napadal jato, alternativno bi lahko izvedli več zaporednih enkratnih napadov in s tem odkrili morebitno odstopanje. Z vsemi naštetimi predlogi bi lahko potencialno odkrili nove načine obrambe pred plenilcem.



## 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.

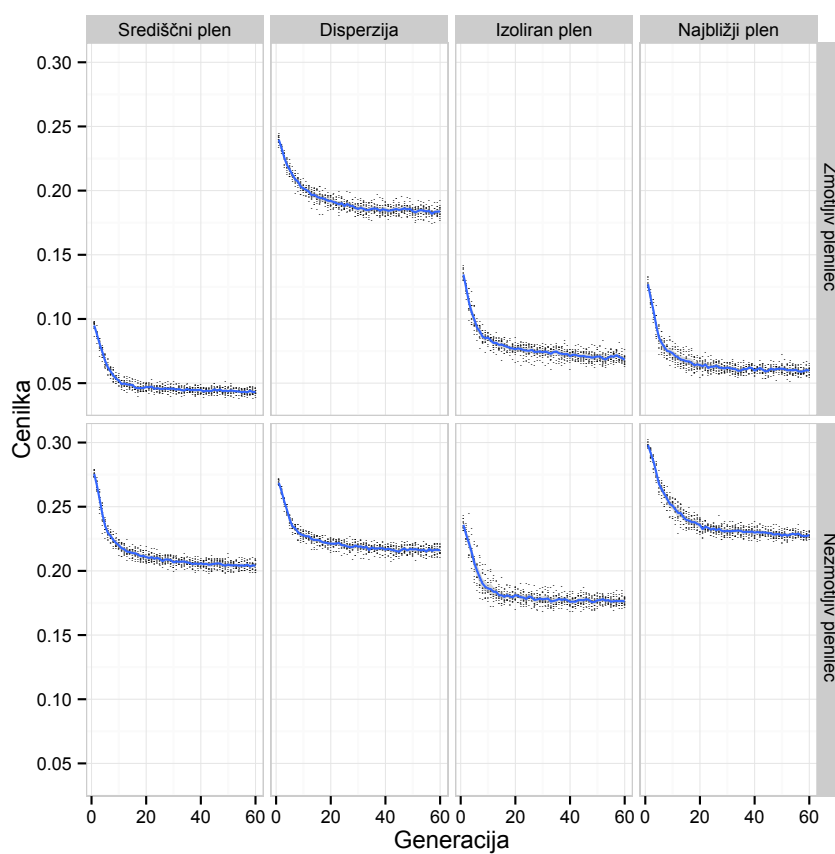
- [11] H. Hildenbrandt, C. Carere, C. K. Hemelrijk, Self-organized aerial displays of thousands of starlings: A model, *Behavioral Ecology* 21 (6) (2010) 1349–1359.
- [12] D. J. T. Sumpter, The principles of collective animal behaviour, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 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. Demšar, C. K. Hemelrijk, H. Hildenbrandt, I. Lebar Bajec, Simulating predator attacks on schools: Evolving composite tactics, *Ecological Modelling* 304 (2015) 22–33.
- [15] J. Gautrais, C. Jost, G. Theraulaz, Key behavioural factors in a self-organised fish school model, *Annales Zoologici Fennici* 45 (5) (2008) 415–428.
- [16] 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.
- [17] A. De Rosis, Hydrodynamic effects on a predator approaching a group of preys, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 414 (2014) 329–339.
- [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, I. Lebar Bajec, Simulated predator attacks on flocks: A comparison of tactics, *Artificial Life* 20 (3) (2014) 343–359.
- [20] I. Lebar Bajec, N. Zimic, M. Mraz, Simulating flocks on the wing: The fuzzy approach, *Journal of Theoretical Biology* 233 (2) (2005) 199–220.
- [21] M. Larsson, Schooling fish: A multisensory approach, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2014) 1–15.
- [22] C. K. Hemelrijk, Towards the integration of social dominance and spatial structure, *Animal Behaviour* 59 (5) (2000) 1035–1048.

- [23] C. K. Hemelrijk, J. Wantia, Individual variation by self-organisation: A model, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 29 (1) (2005) 125–136.
- [24] I. L. Bajec, N. Zimic, M. Mraz, The computational beauty of flocking: Boids revisited, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 13 (4) (2007) 331–347.
- [25] A. Shukla, H. M. Pandey, D. Mehrotra, Comparative review of selection techniques in genetic algorithm, in: *Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, pp. 515–519.
- [26] C. Chudasama, S. M. Shah, M. Panchal, Comparison of parents selection methods of genetic algorithm for TSP, *IJCA Proceedings on International Conference on Computer Communication and Networks CSI-COMNET-2011 comnet* (1) (2011) 102–105.



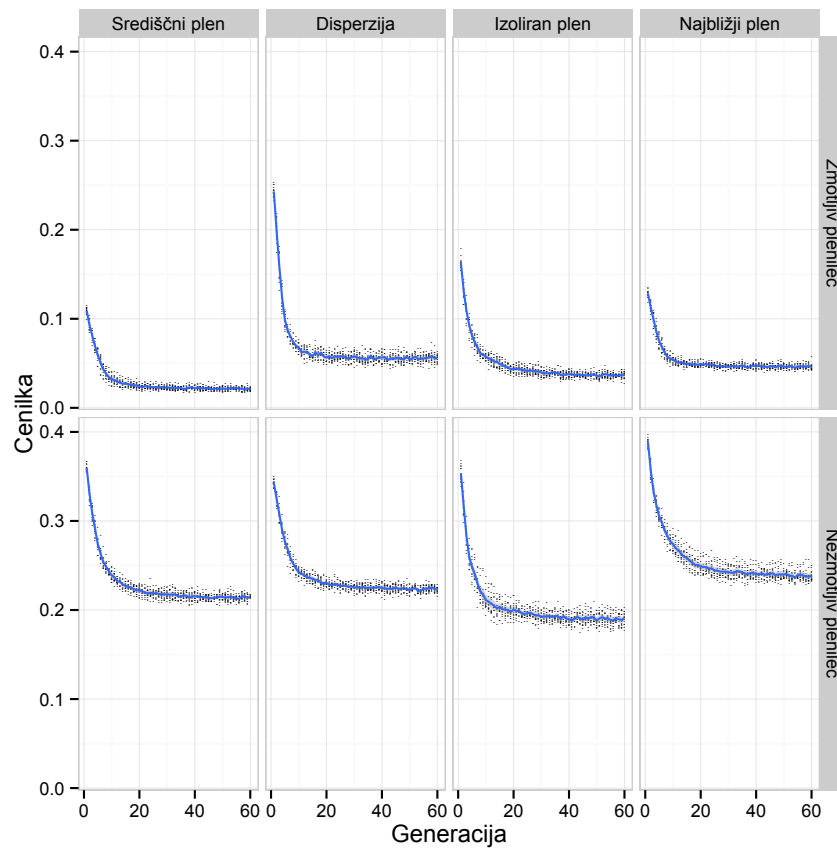
# A Gibanja cenilk



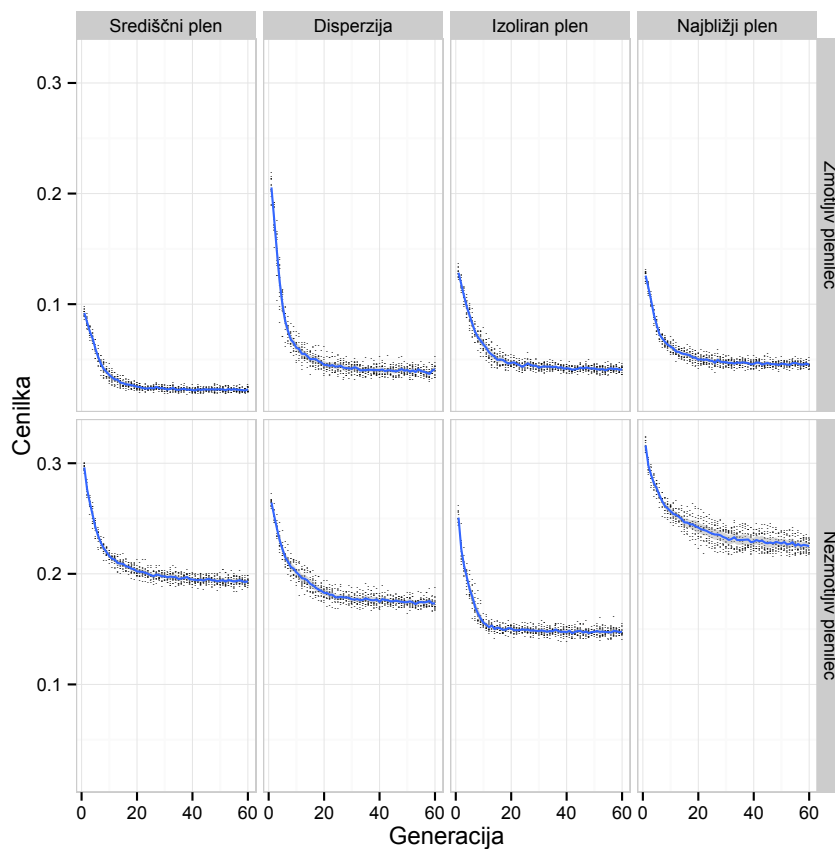


Slika A.1: Gibanje cenilk optimizacije radija poravnave (CI: 95 %, št. ponovitev: 14).

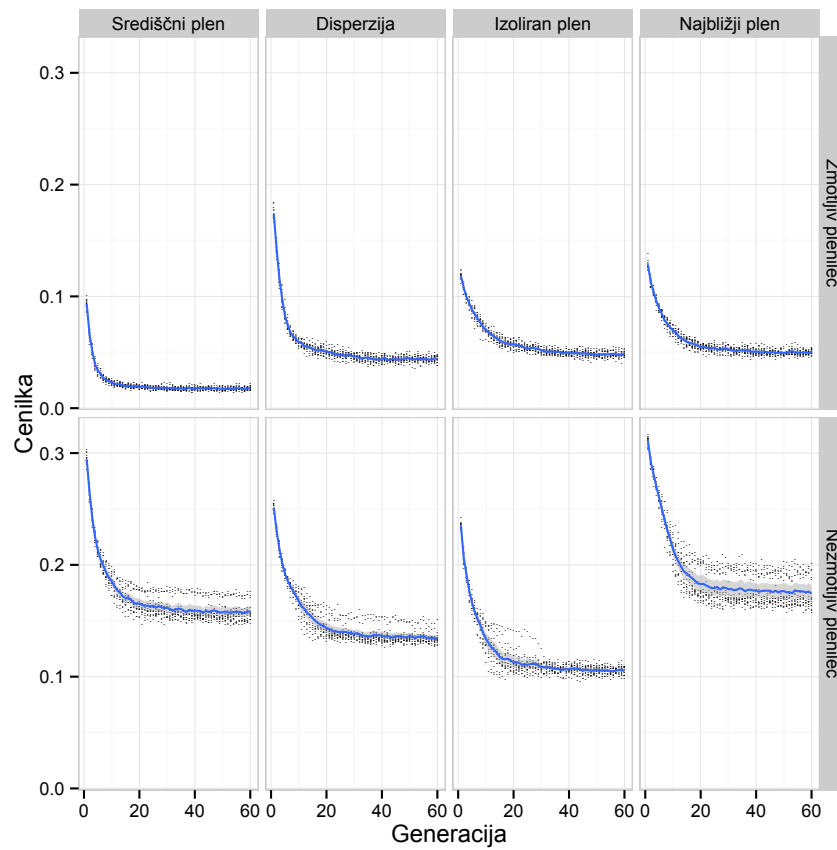




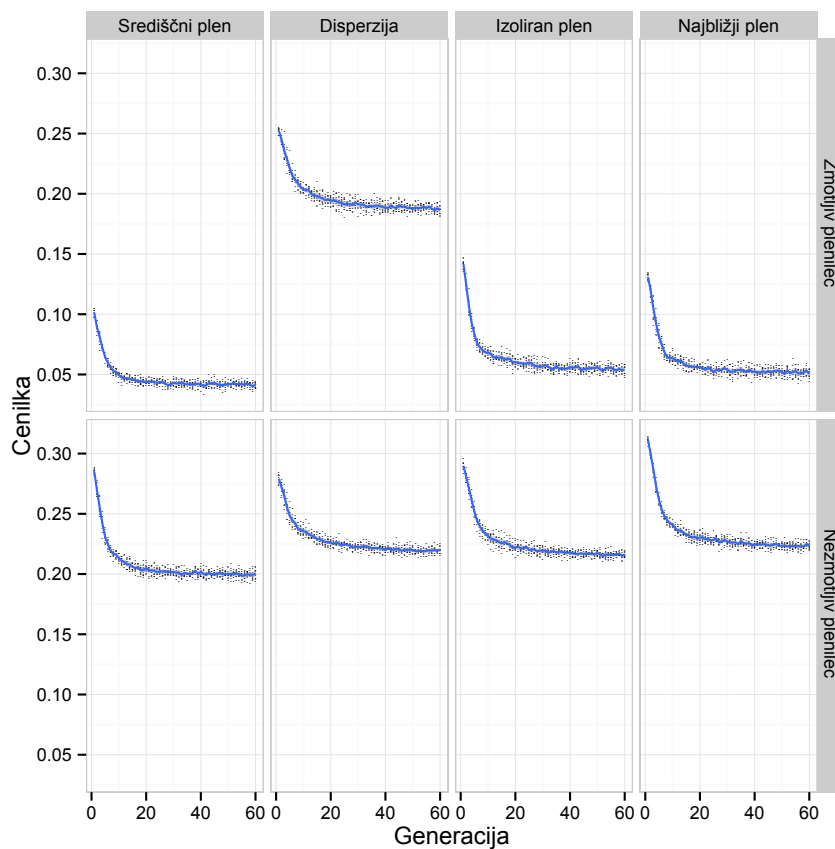
Slika A.2: Gibanje cenilk optimizacije radija poravnave in radija zaznave plenilca (CI: 95 %, št. ponovitev: 14).



Slika A.3: Gibanje cenilk optimizacije radija poravnave in uteži bežanja (CI: 95 %, št. ponovitev: 14).



Slika A.4: Gibanje cenilk optimizacije radija poravnave in vseh uteži nagonov, ki opredeljujejo vedenje (CI: 95 %, št. ponovitev: 15).



Slika A.5: Gibanje cenilk optimizacije radija poravnave ob povečanem radiju kohezije (CI: 95 %, št. ponovitev: 10).