

Simetrična i asimetrična iterirana zatvorenikova dilema

Cilj rada je određivanje optimalnih strategija za igranje iterirane zatvorenikove dileme (IZD) u određenom evolutivnom okruženju korišćenjem genetičkog algoritma. Računarskom simulacijom evolucije strategija ispitane su njihove osobine i ponašanje – pojave kooperativnosti, agresivnosti i prevara. Korišćene su simetrična i asimetrične matrice poena. Prvi deo rada sa simetričnom matricom poena služio je kao test valjanosti implementiranog genetičkog algoritma (GA). Realizovani su turniri strategija po uzoru na Akselrodove turnire. To su turnir slučajno generisanih strategija protiv reprezentativnih, i turnir na kome se međusobno sukobljavaju slučajno generisane strategije. Pošto smo se rezultatima koji su saglasni sa do sada rađenim simulacijama IZD uverili u efikasnost napisanog GA, istraživali smo asimetričnu igru. Dobijeni su fazni prelazi kooperacija → agresivnost i kooperacija → naizmenične prevare u asimetričnim turnirima.

Teorijski uvod

Zatvorenikova dilema (ZD) je problem u teoriji igara. Najčešće se ilustruje kao priča o dvojici prestupnika koje policija uhvati, ali protiv njih nema dovoljno materijalnih dokaza, te ih razdvaja kako bi ih naterala da se okrenu jedan protiv drugog. Pred njima je izbor: da ćute ili priznaju prestup. Ukoliko obojica ćute, obojica dobijaju kaznu od jedne godine zatvora. Ukoliko prvi zatvorenik izda drugog, a drugi odluči da ćuti, prvi zatvorenik odlazi slobodan, a drugi dobija pet godina zatvora; i obrnuto. Ako obojica izdaju, obojica dobijaju po tri godine zatvora.

Uočava se da je za jednog zatvorenika najbolje, racionalno, da izda partnera.

U uopštenju ZD, zatvorenici su igrači koji biraju da saraduju sa svojim partnerom (potez C od engleskog *cooperate*), ili da izdaju partnera (potez D od engleskog *defect*). Pritom se, nakon što odaberu svoj potez, igračima dodeljuju poeni iz matrice poena prikazane u tabeli 1. Ovde je cilj dobiti više poena, za razliku od zatvorenika koji nastoje da smanje kaznu. Da bi igra ZD bila definisana potrebno je da važe određene nejednakosti. Te nejednakosti slede iz uslova da je prevara protivnika najsplativija za oba igrača, a dilema se uspostavlja tako što se omogućuje bolja zarada poena u slučaju obostrane kooperacije nego u slučaju obostrane izdaje. Dakle, važi: $DC > > CC > DD > CD$ za oba igrača. Druga važna nejednakost osigurava prednost uzastopnim saradnjama nad uzastopnim naizmeničnim prevarama: $CC > (CD + DC) / 2$.

Tabela 1. Matrica poena za zatvorenikovu dilemu

		Igrač 2	
		C	D
Igrač 1	C	3, 3	0, 5
	D	5, 0	1, 1

Racionalna odluka pri igranju zatvorenikove dileme je, dakle, D. Međutim, situacija je potpuno drugačija ako se zatvorenikova dilema ponavlja određen broj puta (iteracija). Ponavljena zatvorenikova dilema naziva se iterirana zatvorenikova dilema (IZD) i najčešće se koristi pri ispitivanju razvoja kooperacije u populaciji ljudi ili životinja, pri čemu je zatvorenikova dilema uprošćeni, apstraktni model

Miljan Dašić (1990), Paraćin, Majora Marka 13, učenik 3. razreda Gimnazije u Paraćinu

Marija Janković (1991), Beograd, Bele Bartoka 8/32, učenica 2. razreda Računarske gimnazije u Beogradu

MENTORI:

dr Aleksandar Bogojević, Institut za fiziku, Zemun

Andrija Jovanović, student Računarskog fakulteta u Beogradu i Matematičkog fakulteta u Beogradu

realnih sukoba. U iteriranoj zatvorenikovoj dilemi igrač odlučuje šta će odigrati u tekućem potezu na osnovu svojih i protivnikovih prethodnih poteza. Igrač tada može razviti strategiju koja se može definisati kao funkcija koja vraća potez C ili D u zavisnosti od istorije poteza.

Istorijom poteza nazivamo prethodne poteze oba igrača. Istoriju prethodnih poteza možemo zapamtiti kao niz parova poteza C i D; primer: ...CD CD DC. Ova istorija kazuje nam da su igrači odigrali D i C u prethodnom potezu, odnosno C i D u potezu pre njega itd. U našem radu uzeli smo da je sasvim dovoljno pamtit istoriju tri prethodna poteza, zato što je i u realnosti bliska prošlost bitna za odnose u sadašnjosti. Mogućih istorija tri prethodna poteza (DD DD DD, DD DD DC...) ima $2^6 = 64$. Strategiju u obliku funkcije koja na osnovu ovakve istorije tri prethodna poteza vraća C ili D, možemo predstaviti u obliku niza od 64 C ili D poteza. Prvi element tog niza odgovara potezu koji strategija igra kada istorija prethodnih poteza glasi DD DD DD, drugi element niza odgovara istoriji DD DD DC, treći odgovara istoriji DD DD CC, itd. Uz to imamo specijalne slučajeve prva tri poteza: kada u istoriji postoji samo dva, jedan ili nula zapamćenih poteza. Pokazuje se, dakle, da strategije koje se baziraju na istoriji tri prethodna poteza, možemo zapamtiti kao niz od 71-nog poteza C-ova ili D-ova, odnosno u praktične svrhe, kao niz od 71 nule ili jedinice, niz od 71 bita. Takođe, razlikovali smo smišljene i slučajno generisane strategije. Slučajno generisane su strategije koje igraju C (odnosno 1) sa verovatnoćom od 50%. Smišljene strategije koje smo koristili nikada se ne oslanjaju na slučajan izbor sledećeg poteza, determinističke su. Navešćemo primer kako izgleda jedna od 14 smišljenih strategija koje smo koristili u simulacijama. Sve smišljene strategije su prvobitno kodirane na osnovu „recepta“, kao funkcije programskog jezika C, a zatim su pomoću nekoliko C programa prevedene u bitovski oblik. Strategija u obliku funkcije izgledaće poput sledeće:

```
char strategija5(char a, char b, char v, char g,
char e, char f) {
    if (e == 'x' && f == 'x') return 'C';
    else {
        if (e == f) return 'C';
        else return 'D';
    }
}
```

To je iskodirana strategija Pavlov: počni sa 'C', a onda igray 'C' samo ako ste u prošlom potezu obojica odigrali isto. Strategija u bitovskom obliku glasi (po dogovoru, nule predstavljaju potez D, a jedinice C): 10011001100110011001100110011001100110011001100110011001100110011001 1 01 1001.

Prvi čovek koji je organizovao turnir strategija za igranje IZD bio je Robert Akselrod i na njegovim radovima se bazira početni deo našeg rada. Turnir strategija sastoji se u sukobljavanju strategija (svake sa svakom) određen broj puta. Uspešnost strategije jeste njen ukupni broj osvojenih poena iz svih sukoba. Već na prvom Akselrodovom turniru, pokazalo se da je ubedljivo najuspešnija strategija bila najjednostavnija prijavljena, strategija pod nazivom Tit-for-tat (TFT) koja u prvom potezu igra C, a u svakom sledećem ono što je protivnik odigrao u prethodnom potezu.

Genetički algoritam

Broj mogućih strategija među kojima tražimo najbolje je 2. Potrebno je koristiti efikasnu heuristiku za određivanje optimalnih strategija u oblasti od 2 mogućnosti. Izabrali smo genetički algoritam.

Genetički algoritam (GA) radi po uzoru na molekul DNK u prirodi. Zadatak mu je da poveća funkciju prilagođenosti – $f(x)$ gde je parametar x bitovski zapis strategije, tj. string od 71 nule i jedinice. Funkcija prilagođenosti određuje koliko je data strategija prilagođena svom okruženju, tj. ostalim strategijama sa kojima interaguje igrajući IZD, a to je zapravo ukupan broj poena koji strategija osvoji na turniru. Znači da će GA iz generacije u generaciju povećavati prilagođenost strategija, tj. one će osvajati sve veći broj poena. Za kodiranje GA potrebno je prevesti parametre funkcije prilagođenosti u neki oblik koji liči na hromozom. U našem slučaju, prevedene su strategije iz svog izvornog oblika funkcije u bitovski oblik. Ovde svaki pojedinačni bit predstavlja gen hromozoma (strategije) i nosi informaciju o potezu za odgovarajuću istoriju. Ukoliko je 0, strategija će na datu istoriju odigrati D, a ako je 1 odigraće C. Prema tome, ponašanje naših strategija je determinisano i zapisano u genima. Strategija je analogna živoj jedinki koja se u interakciji sa okruženjem menja i „učić“ koje ponašanje je optimalno.

Random generator

Treba naglasiti da se svi algoritmi inspirisani prirodom zasnivaju na upotrebi slučajnih brojeva, i nekim metodama se od slučajno generisanih početnih parametara posle velikog broja iteracija i raznih postupaka dobijaju rešenja. U našim simulacijama je korišćen ran2.c random generator preuzet iz zbirke korisnih kodova *Numerical recipes in C* koji vraća slučajan broj iz intervala $[0, 1]$ po uniformnoj raspodeli.

Naš GA u koracima

1. Generisanje početne populacije. Strategija se generiše tako što se slučajno odaberu 71 nula i jedinica, tj. njeni geni. Na taj način napravi se zadati broj strategija koje čine jedinke početne populacije.

2. Sprovođenje turnira. Turnir je realizovan u okviru funkcije sukobiStrategije koja određen broj iteracija (koristili smo 1000) sprovođi igranje zatvorenikove dileme između date dve strategije i u zavisnosti od odigranih poteza (jedna od 4 mogućnosti – CC, DD, DC, CD) dodeljuje im poene po matrici poena predstavljenoj u tabeli 1. Sabira se broj poena iz tih 1000 poteza jednog sukoba, a na kraju se za svaku jedinku sumiraju poeni svih sukoba u kojima je učestvovala. Ta suma poena je njena funkcija prilagođenosti, tzv. *fitness function*.

3. Statistika. Nakon završenog turnira svaka jedinka tekuće populacije ima sumu poena osvojenih na turniru. Računa se srednji broj osvojenih poena za celu populaciju:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{BR.RAN} \text{suma}[i]}{BR.RAN}$$

U ovoj formuli BR. RAN je konstanta koja predstavlja broj jedinki. Potom se računa standardna devijacija:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{BR.RAN} (\text{suma}[i] - M)^2}{BR.RAN - 1}}$$

4. Odabir jedinki koje će se reprodukovati i odbacivanje onih slabijih. Jedinke čija je suma poena veća ili jednaka od $(M + S)$, tj. koje su jednu standardnu devijaciju i više iznad proseka imaju mogućnost za dve reprodukcije. One koje su između $(M + S)$ i $(M - S)$ imaju mogućnost za jednu reprodukciju, dok ispodprosečne, koje su jednu standardnu devijaciju $(M - S)$ i više ispod proseka, ne ulaze u dalji evolutivni tok.

5. Reprodukcijska jedinki rekombinacijama i mutacijama. Po uzoru na rekombinacije hromozoma u prirodi, dešavaju se i rekombinacije u računarskom svetu bitovskih nula i jedinica. To je razmena gena dva hromozoma:

$$\begin{aligned} \{110*0101\} &\sim \{101*1110\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{110*1110\} + \{101*0101\}. \end{aligned}$$

Hromozomi koji razmenjuju gene biraju se slučajno kao i gen na kome se „seku“ (mesto označeno znakom *). Na taj način dva roditeljska hromozoma daju dva deteta – nove jedinice koje zamenjuju odbacene i tako održavaju stalnost populacije.

Mutacije predstavljaju slučajnu promenu jednog gena datog hromozoma. Realizuju se random generatorom. Ako je generisani slučajni broj manji ili jednak od definisane konstante nivoa mutacija, gen prelazi u suprotni. Smisao mutacija je unošenje novog genetičkog materijala. Nivo mutacija je po uzoru na prirodu nizak.

6. Algoritam radi zadati broj puta, svaki put evoluirajući novu populaciju. Mi pratimo buduće generacije početnih jedinki. Zato kažemo i da posmatramo evoluciju sistema određeni broj generacija koji predstavlja konstantu definisanu na početku programa. Potrebno je zadati veliki broj generacija da bi sistem stigao da konvergira ka rešenju.

Simulacije

Simetrični turnir – slučajno generisane strategije protiv reprezentativnih

Evolutivni sistem predstavlja 20 slučajno generisanih strategija. Njihova prilagođenost određuje se prema stalnom okruženju od 14 reprezentativnih. Na turniru se svaka od slučajnih strategija sukobljava sa svakom reprezentativnom. Reprezentativne su smišljene strategije. Mi smo smislili po jednu strategiju i iskoristili neke već smišljene koje se redovno koriste u simuliranju zatvorenikove dileme, a čije opise smo pronašli na internetu.

Cilj ove simulacije je testiranje valjanosti GA. U jedan tekstualni fajl ispisivane su populacije. Posmatranjem bitova uočili smo da evoluirane strategije imaju osobine uspešnih strategija koje je istakao prof. Akselrod. One su fine, ne igraju D pre protivnika; oprašaju, pokušavaju da se pomire sa protivnikom i uspostave kooperaciju. Takođe, nisu pakosne. Cilj im

nije minimiziranje protivnikovih poena, već povećanje svojih. Međutim, potrebno je i kvantifikovati ponašanje jedinki. U tu svrhu uvedeni su koeficijenti kooperativnosti, agresivnosti i prevara.

Kooperativnost je kada oba igrača u jednoj iteraciji ZD igraju C, agresivnost kada oba igrača igraju D i prevara kada random strategija odigra D, a smišljena C. Koeficijenti su definisani tako da se kreću u intervalu [0, 1]; na primer koeficijent kooperativnosti predstavlja odnos broja poteza u kojima je postojala kooperativnost i ukupnog broja poteza odigranih na tom turniru. U skladu sa rezultatima iz literature, očekivali smo evoluciju kooperacije, a smanjenje agresivnosti i prevara.

Poznato je da se strategija TFT u većini okruženja pokazala kao jedna od najboljih. Poslužila nam je kao reper. Upoređivan je srednji broj poena poslednje generacije random strategija sa brojem poena koji je TFT sakupila igrajući IZD sa smišljenim strategijama – Q faktor. Očekivali smo da random strategije budu približno dobre kao TFT u datom okruženju.

$$Q = \frac{M}{\text{poeni (TFT)}} \times 100\%$$

Simetrični turnir – međusobno sukobljavanje slučajno generisanih strategija

Ova simulacija je analogna prvoj, sa tim da se 20 random jedinki sukobljava međusobno na turniru. Cilj prve simulacije je da pokaže visoku zavisnost evoluiranih strategija od okruženja, koje je zato držano konstantnim. Kada smo pokazali da je GA sposoban za evoluciju jedinki, prešli smo na ovu simulaciju. Praćena je zavisnost M i koeficijenta od broja generacija. Očekivali smo slične zavisnosti kao u prvom turniru, sa time što bi ovde trebalo da M i kooperativnost porastu znatno brže i to do većih vrednosti.

Asimetrični turnir – fazni prelaz kooperacija → agresivnost

Modeliranje realnih konflikata uključuje asimetrične matrice poena (tabela 2) pošto igrači nikada nisu isti, uvek je jedan jači u nečemu bitnom za ishod. Npr. u hladnom ratu SAD i SSSR nisu bili potpuno izjednačeni u tehnologiji, naoružanju i ekonomskoj snazi. U našim simulacijama „jači“ igrači

dobijali su više poena prilikom igranja IZD. Naš način uvođenja asimetričnosti ima opštiji karakter. Naime, određuje odnos snaga slabijih i jačih bez preciziranja o kakvim se snagama radi. Praktično se gleda sumarni odnos parametara bitnih za razrešenje konfliktne situacije. Recimo, SAD imaju snagu veću od SSSR X puta. Ali, za detaljniju primenu na realne konflikte potrebno je posmatrati pojedinačne parametre. Tako da je u konkretnom primeru potrebno pustiti tri puta našu simulaciju. U prvoj se uzima odnos u tehnologiji, drugoj odnos u naoružanju, a trećoj odnos u ekonomskoj snazi. I tada se govori o tome kako će se menjati nivo saradnje i tolerancije na nekom od datih polja (tehnologija, vojska, ekonomija) u zavisnosti od promene odnosa snaga, takozvane preraspodele moći. No, ovakve analize su specijalni slučajevi našeg rada koji mogu biti tema posebnog istraživanja o primeni IZD u realnom svetu. Napisane simulacije bile bi oruđe za dobijanje rezultata. Ovaj rad je uglavnom teorijskog karaktera.

Slučajno se generišu dve početne populacije – jačih i slabijih strategija. Jače strategije su one koje prilikom svoje prevare i agresivnosti zarađuju više poena od slabijih, a manje poena gube od slabijih kada budu prevarene.

Definisan je koeficijent asimetričnosti A :

$$A = \frac{\text{snaga slabijih}}{\text{snaga jacih}}$$

$$0 < A \leq 1.$$

Parametar A je variran od vrednosti 1 (kada su snage jedinki obe populacije jednake) do 0.1 (kada jače imaju 10 puta veću snagu od slabijih) u koracima od 0.01.

Na turniru su u svakoj generaciji sukobljavane sve jedinke prvog skupa sa svim jedinkama drugog skupa. Praćene su zavisnosti srednjeg broja poena kroz generacije od asimetričnosti za svaku populaciju posebno, kao i zavisnost kooperativnosti, agresivnosti, prevara jačih i prevara slabijih od asimetričnosti (tabela 2).

Tabela 2. Asimetrična matrica poena

		Igrač 2 – slabiji	
		C	D
Igrač 1 – jači	C	3, 3	3 – 3A, 3 + A
	D	4, 0	4 – 3A, A

Očekivano je da sa kretanjem koeficijenta asimetričnosti A od 1 ka 0 dođe do prelaza iz faze kooperacije u fazu agresivnosti. Jače postaju sve jače, a slabije sve slabije. Posmatrali smo na kakav način će sistem promeniti ponašanje. Da li će prelaz biti nagao ili postepen? Jednakosti koje određuju ZD važe za jedinke oba skupa sve dok A ne postane 0.33 i do tada je svima generalno isplativija saradnja. Međutim, pri vrednosti A od 0.33, za jače igrače prestaje da važi nejednakost $CC > DD$. Jačim igračima igranje poteza D postaje isplativije i oni stalno igraju taj potez. Da li će slabije strategije i dalje naivno pokušavati da sarađuju ili će krenuti u odbranu („napad je najbolja odbrana“) igrajući takođe D? Očekivano je da u tački $A = 0.33$ dođe do preloma – faznog prelaza, kada agresivnost preraste kooperativnost i prevare jačih i prevare slabijih. Ovu značajnu vrednost od 0.33 nazvali smo *prelomna vrednost asimetrije*.

Asimetrični turnir – fazni prelaz kooperacija → naizmenične prevare

Analogno prvom asimetričnom IZD modelirali smo još jedan sistem koji je potpuno jednak prvom, osim što je matrica poena malo izmenjena (tabela 3).

		Igrač 2 – slabiji	
		C	D
Igrač 1 – jači	C	3, 3	3 – 3A, 3 + A + 1
	D	4 + 1, 0	4 – 3A, A

Dodavanjem po jednog poena za DC i CD poteze u matricu poena nije narušena osnovna nejednakost koja definiše ZD ($DC > CC > DD > CD$). Stoga je ovo naizgled beznačajna promena. Međutim, ovom promenom se postiže da pri promeni A u jednom momentu ($A = 0.33$) prestaje da važi nejednakost $CC > (CD + DC)/2$. Drugim rečima, jedinkama obe populacije postaje najisplativije da naizmenično izvršavaju prevare jedne nad drugima, umesto da uzastopno sarađuju. Ovakvo ponašanje u IZD nazivamo „čudnom kooperacijom“, jer je za uspostavljanje naizmeničnih prevara potrebno da jedna strategija nakon što prevari drugu u idućem potezu

dopusti da bude prevarena. Moguće je da slabije prihvate ovakav vid saradnje, pa da budu izigrane od jačih koje vežu po nekoliko prevara. Da li će strategije postupiti inteligentno i maksimizirati svoje poene? Da bi se uspostavila ova „čudna kooperacija“ potrebno je **poverenje**. Ako je dogovor da se naizmenično varaju, prva prevarena strategija treba da veruje drugoj da će joj u sledećem potezu dopustiti da je prevari i da će odoleti iskušenju da opet prevari i veže dve prevare. Ovdje se pri prelomnoj vrednosti asimetrije od $A = 0.33$ očekuje fazni prelaz sistema iz kooperacije u čudnu kooperaciju. Cilj je ispitati hoće li strategije izgraditi poverenje i profitirati.

Rezultati i diskusija

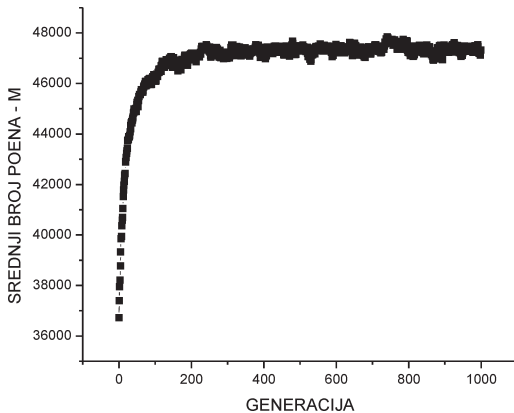
Slučajno generisane (random) strategije protiv reprezentativnih

Na slikama 1 i 3 prikazani su razvoj poena i koeficijenta kroz generacije. Na 1000 generacija uočava se stabilnost sistema. Asimptota srednjeg broja poena je na 47 000. Uočava se znatan porast broja poena po teorijski očekivanoj zavisnosti što nam govori da je napisani GA valjan. U evolutivnom sistemu razvila se kooperativnost kao stabilno i isplativo ponašanje. Agresivnost i prevare nad smišljenim strategijama su prilično manje zastupljeni. Vrednosti koeficijenata su stabilne, sa praktično zanemarivim oscilacijama. Izračunat je faktor Q : $Q = (110 \pm 3)\%$.

Dakle, poslednja generacija evoluiranih strategija je jako uspešna.

Međusobno sukobljavanje slučajno generisanih (random) strategija

Posmatrane su iste zavisnosti kao u 1). Razvoj poena je mnogo brži nego u 1) turniru i dostiže znatno veće vrednosti (slika 2). Stabilizuje se na približno 58 000, oscilujući između 56 000 i 60 000. Kada kooperativnost teži vrednosti 1, broj poena teži ka 60 hiljada. Znatno veća uspešnost strategija i potpuna evolucija kooperacije proističu iz činjenice da random strategije same sebi predstavljaju evolutivno okruženje, dok su se u 1) turniru razvijale u odnosu na konstantno okruženje smišljenih strategija. Iz istog razloga se javljaju i veće oscilacije u odnosu na 1). Razvoj vrednosti koeficijenata na ovom turniru prikazan je na slici 4.



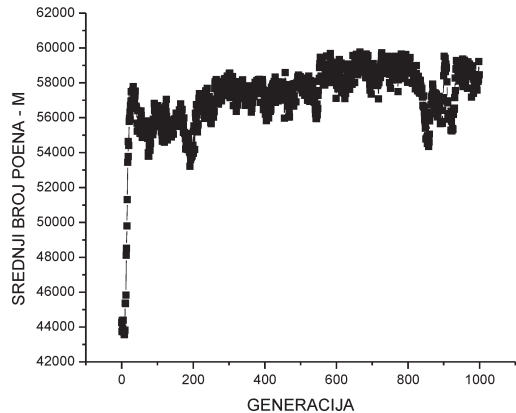
Slika 1. Zavisnost srednjeg broja poena (M) od broja generacija na turniru 1)

Figure 1. Average points (M) as a function of number of generations on tournament 1)

Asimetrični turnir – fazni prelaz kooperacija → agresivnost

Na slikama 5. i 6. data je zavisnost srednjeg broja poena jačih i slabijih jedinki od broja generacija za koeficijent asimetričnosti od 0.99 (praktično su iste snage) i 0.1, kada je snaga jačih 10 puta veća od snage slabijih. Uočava se na drugom grafiku jasno razdvajanje jačih i slabijih u odnosu na prvi gde imaju praktično iste poene, što je očekivano s obzirom da se pri $A = 0.1$ na ovom turniru najviše isplati agresija, a poeni koji se dodeljuju jačima su znatno veći od poena koje dobijaju slabiji. Inače, na prvom grafiku, karakterističan je pad poena između 400 i 600 generacije, kada je u porastu bila agresivnost. Kako objasniti ovakav pad sa skoro potpune saradnje (kada je $M = 60\ 000$ poena)? Pošto svaki od skupa strategija evoluiru u odnosu na drugi, neke strategije koje usled mutacija počnu da igraju D prolaze bolje, pa se njihov genetski materijal prenosi u sledeće generacije. Tada dolazi do zapadanja u agresivnost, koja se ponovo sličnom zavisnošću vraća u kooperativnost kada oba skupa strategija „shvate“ da je agresivnost prestala da donosi korist.

Na slikama 7. i 8. prikazane su zavisnosti koeficijenata od asimetričnosti A. Kako se A od prelomne tačke kreće ka najmanjoj vrednosti od 0.1 uočava se brz porast agresivnosti od 0.3 za $A = 0.33$ do 0.9 za $A = 0.11$, dok kooperativnost polako i sigurno

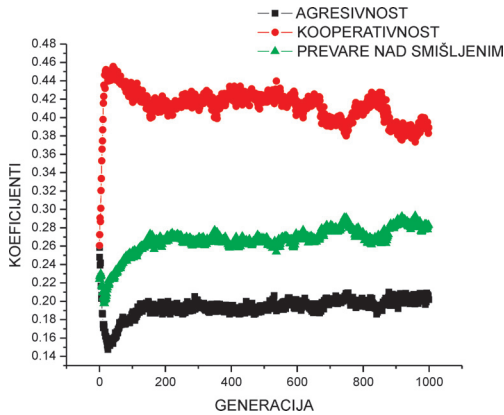


Slika 2. Zavisnost srednjeg broja poena (M) od broja generacija na turniru 2)

Figure 2. Average points (M) as a function of number of generations on tournament 2)

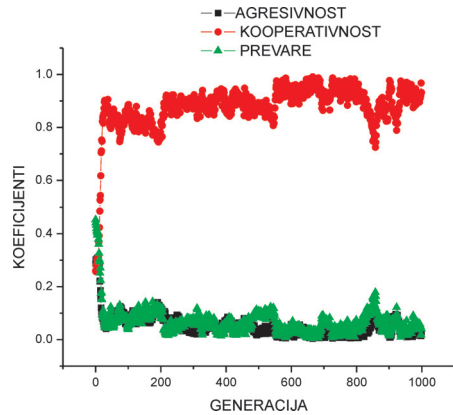
opada od 0.2 za $A = 0.33$ do 0 u $A = 0.11$. Prevare slabijih polako i postepeno padaju od 0.05 do 0, dakle praktično su zanemarljive, dok su prevare jačih mnogo veće. Prevare jačih drastično opadaju kako se smanjuje A. Primetno je i jako veliko oscilovanje prevara jačih koje se javlja usled neodlučnosti slabijih strategija koje ne znaju šta ih je snašlo. Prvo pokušavaju da uspostave saradnju (tada porastu prevare) a, pošto prođu loše, onda sledeći put igraju agresivno. Ovakvo igranje slabijih se u nepravilnim razmacima ponavlja. Mada, prevare jačih su u padu od prelomne tačke, pa konačno zaključujemo da agresivnost raste na račun sva ostala tri oblika ponašanja, a naročito kooperativnosti koja je neprikosnoveno vladala od $A = 1$ sve do prelomne vrednosti asimetrije – $A = 0.33$.

U prelomnoj tački faznog prelaza, $A = 0.33$, agresivnost je nadrasla kooperativnost, a prevare su prilično oscilovale, ali su se držale na manjim vrednostima od agresivnosti i kooperativnosti. Prelazak u agresivnost nam govori da je sistem adekvatno odgovorio postavljenoj matrici poena i ostvario prelaz u povoljniji oblik ponašanja. Jače strategije od ove tačke nastavljaju da igraju stalno D. Kooperativnost je u 1000-itoj generaciji postigla vrednost od 0.2 i nadalje će padati jer jače više skoro uopšte neće igrati C. Logičan je i viši nivo prevara jačih pošto se slabije u prelomnoj tački nisu konsolidovale i pokušavaju da se vrate na saradnju igrajući C.



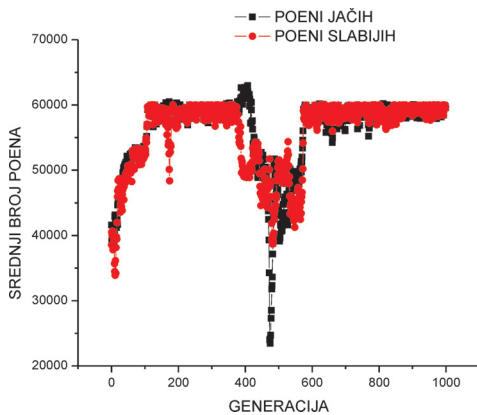
Slika 3. Zavisnost koeficijenata od broja generacija na turniru 1)

Figure 3. Coefficients as functions of number of generations on tournament 1)



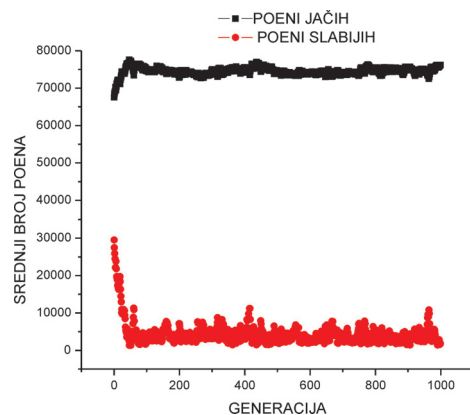
Slika 4. Zavisnost koeficijenata od broja generacija na turniru 2)

Figure 4. Coefficients as functions of number of generations on tournament 2)



Slika 5. Zavisnost srednjeg broja poena (M) za jače i slabije jedinke na $A = 0.99$

Figure 5. M for strong and weak strategies as a function of number of generations on $A = 0.99$



Slika 6. Zavisnost srednjeg broja poena (M) za jače i slabije jedinke na $A = 0.1$

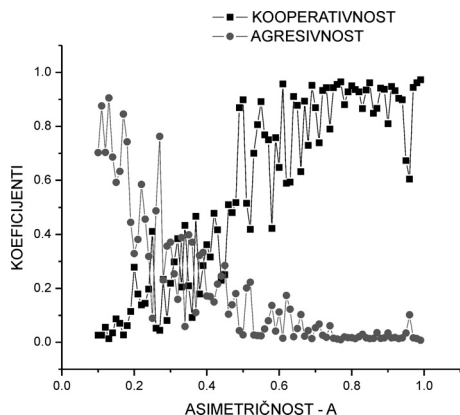
Figure 6. M for strong and weak strategies as a function of number of generations on $A = 0.1$

Asimetrični turnir – fazni prelaz kooperacija → naizmenične prevare

Grafici zavisnosti srednjeg broja poena (M) jačih i slabijih jedinki od generacija za asimetričnosti $A = 0.99$ (kada su praktično jednake) i 0.1 , kada jače imaju 10 puta veću snagu veoma su slični graficima

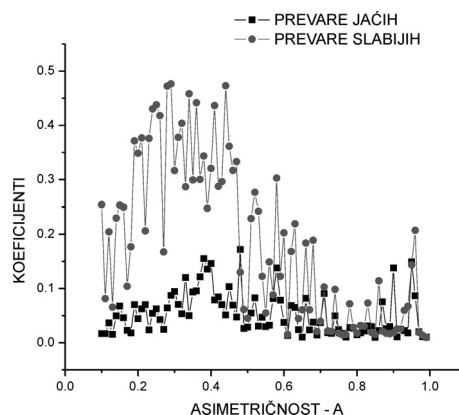
4 i 5, ali postoje dosta veće oscilacije. Očekivano, shodno promeni u asimetričnoj matrici poena, sistem je dosta nestabilniji.

Na slikama 9 i 10 prikazani su grafici zavisnosti koeficijenata od asimetričnosti A . Vidimo da je kooperativnost strmije opadala i bila nestabilnija u odnosu na prethodni asimetrični turnir. Prevare su još



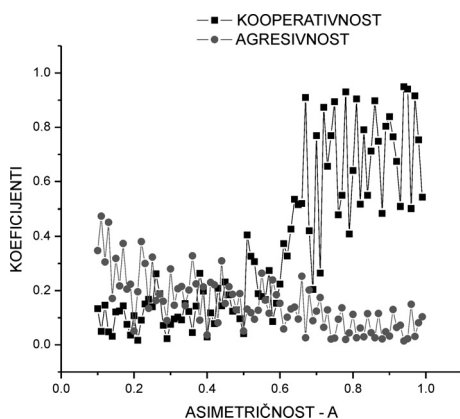
Slika 7. Zavisnost agresivnosti i kooperativnosti od asimetričnosti (A)

Figure 7. Aggression and cooperation as functions of asymmetry (A)



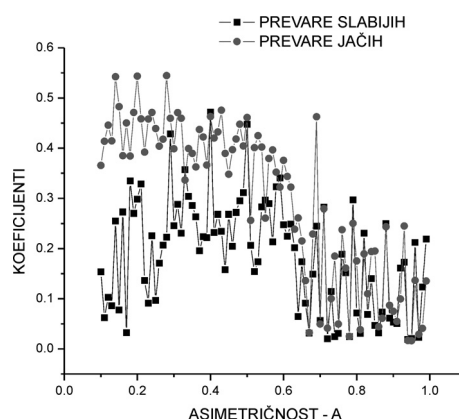
Slika 8. Zavisnost prevara jačih i slabijih jedinki od asimetričnosti (A)

Figure 8. Deceptions of strong and weak strategies as functions of asymmetry (A)



Slika 9. Zavisnost agresivnosti i kooperativnosti od asimetričnosti (A)

Figure 9. Aggression and cooperation as functions of asymmetry (A)



Slika 10. Zavisnost prevara jačih i slabijih jedinki od asimetričnosti (A)

Figure 10. Deceptions of strong and weak strategies as functions of asymmetry (A)

pre faznog prelaza (kada su konačno pretekle kooperativnost) imale strmi rast. Agresivnost se držala na niskom nivou i bila je prilično stalna, bez pikova krećući se između 0 i 0.2. Agresivnost takođe raste na račun kooperativnosti. Nakon ujednačavanja prevara jačih i slabijih u prelomnoj tački $A = 0.33$ dolazi nadalje do njihovog razdvajanja. Važno je uočiti da za datu vrednost A pikovi nagore za jače povlače pikove nadole za slabije i obrnuto. Tako se

javljaju naizmenični pikovi gore – dole koji znače naizmenične prevare. Međutim, događa se da slabije prihvate saradnju, pa da budu izigrane od jačih koje vežu po nekoliko prevara. Tada slabije krenu u odbranu i poraste agresivnost. Zbog nastojanja jačih da vežu po nekoliko prevara ne dozvoljavajući slabijima da prevare kada za to dođe red, slabije igraju \Rightarrow porast agresivnosti. Tako da slabije ne uspeju da

postignu isti nivo prevara kao i jače. Ne može se govoriti o naizmeničnim prevarama u apsolutnom smislu, već samo o porastu prevara čija se uzastopnost remeti sebičnošću jačih koji žele da iskoriste poverenje slabijih. Nije moguće izgraditi potpuno poverenje između igrača neujednačene snage (a posebno kada je jedan jači od 3 do 10 puta).

Zaključak

Napisane su simulacije u programskom jeziku C i nekoliko pomoćnih programa kojima su ispitivane simetrična i asimetrična iterirana zatvorenikova dilema. U pripreмноj fazi, napisan je simulator turnira smišljenih strategija gde je dobijena ranglista u skladu sa prethodnim istraživanjima na ovom polju. Od smišljenih podjednako su zastupljene kooperativne i agresivne strategije, kako bi u simetričnom turniru random protiv smišljenih bile iste šanse da se random razviju u jedan ili drugi tip. Dobijena je evolucija kooperacije, dakle evoluirane random strategije su postale kooperativne, što je u skladu sa literaturom.

Cilj simulacija simetričnih turnira bio je potvrda valjanosti razvijenog genetičkog algoritma. Konstatovano je da je GA valjan i upotrebljiv za simulacije IZD. Srž ovog rada predstavljaju asimetrični turniri sa faznim prelazima. Došlo je do odgovarajućih faznih prelaza. Međutim, treba istaći da fazni prelazi nisu toliko nagli koliko se teoretski očekuje. Rešenje je u puštanju programa da rade sa većim brojem generacija kako bi se fazni prelaz u većoj meri iskristalisao. A podjednako je moguća varijanta da naši evolucioni sistemi nisu u toj meri analogni pravim fizičkim faznim prelazima (npr. fazni prelaz iz tečnog u čvrsto agregatno stanje). U svakom slučaju, u planu nam je da pronademo ili napišemo algoritam koji proverava konvergenciju naših sistema sa zadatom tačnošću. Time ćemo razrešiti ovu dilemu.

Proučavane su zavisnosti srednjeg broja poena M i koeficijenta kooperativnosti, agresivnosti i prevara u zavisnosti od generacija (čime je praćena njihova evolucija) i u zavisnosti od dodatnog parametra – koeficijenta asimetričnosti A u asimetričnim turnirima.

Potrebno je istaći da su rezultati za grafike zavisnosti od A dobijeni usrednjavanjem poslednjih 100 generacija od ukupno 1000.

Postojala je ideja da se kao nezavisne promenljive uzmu ukupan broj generacija i A , a kao zavisne – M i koeficijenti, pa da dobijamo 3D grafike. Među-

tim, usled nepreglednosti takvih grafika, odlučeno je da se koristi usrednjavanje poslednjih 100 (od ukupno 1000) generacija, a da nezavisna promenljiva bude A .

Korisno je detaljnije ispitati pri kom broju generacija dolazi do konvergencije. Treba potražiti ili samostalno napisati algoritam koji to radi. Zanimljivo je raditi na dobijanju preglednih 3D grafika, jer usrednjavanje poslednjih 100 generacija daje ispravne informacije, ali se time i gubi deo podataka. Korisnije je izbeći usrednjavanje, što se postiže 3D grafikom.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se našem mentoru, dr Aleksandru Bogojeviću sa Instituta za fiziku u Zemunu, na idejama, sugestijama i ključnim radovima koje smo koristili kao literaturu. Takođe, velika zahvalnost ide našem petničkom mentoru, Andriji Jovanoviću, koji nam je uvek brzo i efikasno priskakao u pomoć oko programerskih problema i čiji su saveti i ideje znatno doprineli bogatstvu istraživanja.

Literatura

Axelrod R. 2001. *Evolving new strategies – The evolution of strategies in the Iterated prisoner's dilemma*. Adaptacija: Axelrod R. 1987. *The evolution of strategies in the Iterated prisoner's dilemma*. U *Genetic algorithms and simulated annealing* (ur. L. Davis). London: Pitman, str. 32-41.

Axelrod R. 1997. *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*. U *Simulating social phenomena* (ur. R. Conte *et al.*). Berlin: Springer, str. 21-40

Beaufils B., Delahave J. P. and Mathieu P. 1996. *Our meeting with Gradual: A Good Strategy For The Iterated Prisoner's Dilemma*. U *Proceedings of the Fifth international workshop on the synthesis and simulation of living systems* (ur. C. G. Langton i T. Shimohara). Dostupno na www2.lifl.fr/IPD/references/from_lifl/alife5/html/

Dawkins R. 1976. *The selfish gene*. Oxford University Press

Numerical recipes in C. Dostupno na: www.fizyka.umk.pl/nrbook/bookcpdf.html

Miljan Dašić and Marija Janković

Symmetrical and Asymmetrical Iterated Prisoner's Dilemma

The purpose of this project is to determine optimal strategies for playing Iterated Prisoner's Dilemma (IPD) in a given evolutionary environment by using a Genetic Algorithm. The properties of strategies and their appearing in contact with other strategies (cooperation, aggression and deceptions) have been studied in computer simulations written in the C programming language. The essence of this work

is studying properties and appearing of optimal strategies (which are determined by the Genetic Algorithm) in Asymmetrical IPD. This problem has not been sufficiently explored and it is very important in modern game theory.

In the beginning we simulated two Symmetrical IPD tournaments. The results have shown that our developed Genetic Algorithm is well programmed and that, with small corrections of some parameters, it can be used in a wide specter of IPD simulations.

We noted phase transitions: cooperation \rightarrow aggression and cooperation \rightarrow strange cooperation in the Asymmetrical tournaments. Strange cooperation represents reciprocal deceptions instead of sequential cooperation.

