

TRANSFORMACIJA 'INTELLIGENCE ROJA' {SWARM INTELLIGENCE} NA UMETNO INTELEGENCO

URŠKA MARTINC,¹ BORIS ABERŠEK,¹ BOJAN BORSTNER²

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija
urska.martinc1@um.si, boris.abersek@um.si

² Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija
bojan.borstner@um.si

Sinopsis V članku želimo raziskati povezavo med 'naravno' inteligenco roja (angl. swarm intelligence) in umetno inteligenco roja, izhajajoč iz premise, da se obstoječa umetna inteligenca vse bolj uči ena od druge, naravne inteligence, in s tem ustvarja nekakšno notranjo 'nevidno' integracijo, ki bi v končni fazi lahko bila zelo podobna inteligenci roja v naravi. Inteligenco roja v osnovi opisujemo kot kolektivno obnašanje nekega samoorganiziranega sistema. Tak sistem je lahko naraven ali umeten. Same raziskave se na področju inteligence roja delijo na: naravno proti umetnemu in znanstveno proti inženirskemu (Dorigo in Birattari 2007). V analizi se bomo osredotočili predvsem na naravno inteligenco roja in transformacijo pogojev, ki veljajo v naravni inteligenci roja na umetno inteligenco. Na podlagi različnih primerov in iz njih izpeljanih teorij ter posplošitev bomo tako v članku analizirali povezavo med socialnimi žuželkami kot primerom naravne inteligence roja in poskušali ustvariti ter razumeti kriterije za ustvarjanje umetne inteligence roja. Preverili bomo, kaj sploh je inteligenca roja ter kakšne so zahteve takšnih sistemov.

Ključne besede:

inteligence roja,
umetna inteligenca,
samo-organizacija,
stigmergija,
etične dileme

TRANSFORMATION OF 'SWARM INTELLIGENCE' ONTO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

URŠKA MARTINC,¹ BORIS ABERŠEK,¹ BOJAN BORSTNER²

¹ University of Maribor, Faculty of Natural Science and Mathematics, Maribor, Slovenia,
urska.martinc1@um.si, boris.abersek@um.si

² University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia
bojan.borstner@um.si

Abstract In this article, we examine the relationship between “natural” swarm intelligence and artificial swarm intelligence, starting from the premise that existing artificial intelligences are learning from each other to an increasing extent, thus creating a sort of internal ‘invisible’ integration, which might ultimately resemble swarm intelligence in nature. In principle, we characterize swarm intelligence as collective behaviour of some self-organised system. Such a system can be either natural or artificial. In the field of swarm intelligence, research is split into natural vs artificial and scientific vs engineering (Dorigo and Birattari 2007). In this analysis, we will focus predominately on natural swarm intelligence and the transformation of conditions that hold for natural swarm intelligence to artificial intelligence. Based on various examples and theories and generalisations derived from them, we will, in this paper, endeavour to analyse the connection between social insects as an example of natural swarm intelligence and try to understand the criteria for the creation of artificial swarm intelligence. We will examine what exactly is swarm intelligence and what the requirements of such systems are.

Keywords:

swarm intelligence,
artificial
intelligence,
self-organisation,
stigmergy,
ethical dilemmas

1 Inteligenca roja v naravnih/bioloških sistemih

Morda je najtežje vprašanje, kako posameznikovo vedenje povezati s kolektivno uspešnostjo? Z drugimi besedami, kako nastane sodelovanje? (angl. Perhaps the most difficult question is how to connect individual behaviour with collective performance? In other words, how does cooperation arise?)

Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: 6

V naravi poznamo inteligenco roja kot različne primere inteligentnega kolektivnega vedenja, npr.: skupinsko krmljenje pri socialnih žuželkah¹ (npr. pri čebelah mravljah), delitev dela, gradnja gnezda socialnih žuželk itd. (Krink b. d.; Dorigo in Birattari 2007; Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999). Ko govorimo o socialnih žuželkah, lahko govorimo kot: (i) o socialnih žuželkah, kot so npr. mravlje ali čebele in (ii) o socialnih žuželkah kot sistemu super-organizma, ki ga ustvarjajo te žuželke. Oba primera bomo v nadaljevanju pojasnili. Iz tega torej sledi, da je inteligenca roja »disciplina, ki se ukvarja z naravnimi in umetnimi sistemi, sestavljenimi iz številnih posameznikov, ki se usklajujejo z uporabo decentraliziranega nadzora in samoorganizacije« (Dorigo in Birattari 2007). V naravi najdemo veliko primerov inteligence roja: »Primeri sistemov, ki jih preučuje inteligenca roja, so kolonije mravelj in termitov, jate rib, jate ptic, črede kopenskih živali« (Dorigo in Birattari 2007). Zanimivo je, da poleg naštetih naravnih sistemov lahko uvrstimo v te sisteme tudi produkte človeka: »nekateri človeški predmeti prav tako spadajo v domeno inteligence roja, zlasti nekateri sistemi z več roboti in nekateri računalniški programi, ki so napisani za reševanje težav z optimizacijo in analizo podatkov« (Dorigo in Birattari 2007). Ti sistemi imajo naslednje lastnosti:

Sestavljajo ga številni posamezniki; posamezniki so sorazmerno homogeni (lahko so identični ali ustrezajo določeni tipologiji); interakcije med posamezniki temeljijo na preprostih vedenjskih pravilih, ki izkoriščajo le lokalne informacije, ki si jih posamezniki izmenjujejo neposredno ali preko okolja (stigmergija); celotno vedenje sistema je posledica interakcij

¹ Socialne žuželke so »/.../ katerekoli od številnih vrst žuželk, ki živijo v kolonijah in kažejo tri značilnosti: skupinsko povezovanje, delitev dela in prekrivanje generacij« (Britannica 2018).

posameznikov med seboj in z njihovim okoljem, torej samoorganiziranega skupinskega vedenja. (Dorigo in Birattari 2007)

Za razumevanje vseh nadaljnjih izpeljav pa moramo na začetku opredeliti nekatere izhodiščne pojme, ki bodo v nadaljevanju predstavljali ustrezno pojmovno ozadje za razlago inteligence roja. Pri tem je najprej treba pojasniti, kaj je inteligenca roja.

Če povzamemo splošno priznane definicije, potem lahko trdimo, da je inteligenca roja poseben sistem, ki uspešno deluje v naravi in ga uporabljajo nekatere živalske vrste, kot so: čebele, mravlje, ptice ter nekatere druge živalske skupine. Zato raziščimo, kako deluje inteligenca roja na primeru čebel kot skupnosti s kolektivnim vedenjem. Zelo hitro lahko ugotovimo, da so za uspešnost v delovanju skupine odgovorni vsi akterji. Če to drži, potem je torej vedenje posameznika tisti dejavnik, ki vodi k uspehu celotnega kolektiva čebel. Ta posebna značilnost se lahko zelo nazorno pokaže v kontekstu delitve dela, kjer so vse dosedanje raziskave pokazale, da imajo v čebelji družini čebele dejansko točno določeno razdelitev dela, ki v končni fazi koristi kolektivu (ČZS b. d.). Samo dejstvo, da socialne žuželke uprimerjajo kot eno svojih najpomembnejših lastnosti, zmožnost, da lahko nekatere svoje najelementarnejše dejavnosti – kot sta iskanje hrane in gradnja gnezd – učinkovito udejanjijo na podlagi razdelitve nalog med posameznimi člani kolektiva, kaže na to, da je njihov pristop k reševanju problemov dovolj prilagodljiv (kot bomo spoznali v nadaljevanju), da ga lahko prenesemo tudi na področje umetne inteligence. Če pomislimo na socialne žuželke (kot so npr. čebele ali mravlje), lahko vidimo, da je tak sistem pri njih prisoten in tudi zelo uspešen. Gre za sistem, pri katerem takšne enote ne potrebujejo t. i. koordinatorja. Za čebele je npr. značilno, da živijo v skupinah, kjer eno čebeljo družino sestavlja matica (mati čebel), lahko tudi več deset tisoč čebel s troti (samci), značilnost za njihovo delo pa je skupinsko ter samoorganizirano delovanje (ČZS b. d.):

Čebela kot sama je nesposobna živeti samostojno, zato živi v čebelji družini. Ta je organizirana in deluje kot *super organizem*². Družbeni način življenja je zahteval specializacijo vlog v družini, kar je pripeljalo do razlik v zunanji in notranji zgradbi in funkciji posameznih organov in organizma čebele. Tako

² Superorganizem je »organizirana družba (kot socialna žuželka, ki deluje kot organska celota« (Merriam-Webster b. d.).

čebeljo družino sestavljajo ena matica, 60.000 čebel (na višku sezone) in nekaj tisoč trotov. (ČZS b. d.)

V naravi obstajajo torej sistemi, kot je sistem pri socialnih žuželkah, kjer ima vsak posameznik svojo nalogo in z izpolnjevanjem te naloge koristi celotnemu kolektivu. Kot smo lahko videli na zgornjem primeru čebel, so opravila razdeljena učinkovito, tako da se lahko vsakdanje obveznosti (kot je recimo naloga iskanja hrane pri čebelah) rešijo na uspešen način.

Podobno tudi mehanizme pri mravljah lepo opišejo avtorji Garnier, Gautrais in Theraulaz:

Mravlje komunicirajo med seboj z uporabo feromonov. Ti feromoni so kemične snovi, ki privabljajo druge mravlje. Ko na primer mravlja najde vir hrane, se hitro vrne v gnezdo in položi feromonsko pot, ki bo nato druge delavce vodila od gnezda do vira hrane. Ko se rekrutirane mravlje vrnejo v gnezdo, odložijo svoj feromon na sled in okrepijo pot. Oblikovanje poti je torej rezultat pozitivne povratne informacije: več kot mravlje uporabljajo pot, privlačnejša postaja pot. (Garnier, Gautrais in Theraulaz 2007: 8-9)

Nič nenavadnega torej ni, da človek poskuša posnemati naravno vedenje določenih skupin socialnih žuželk, kajti njihov uspeh (torej uspeh celotne skupine oz. kolektiva), lahko pomeni tudi uspeh za naša področja, če prenesemo naravne mehanizme, ki vodijo k uspehu, tudi na človeška področja.

Dorigo in Birattari opredeljujeta lastnost umetne inteligence roja takole:

Značilna lastnost sistema inteligence roja je njegova sposobnost, da deluje usklajeno brez prisotnosti koordinatorja ali zunanjega krmilnika. V naravi je pri rojih mogoče opaziti veliko primerov, ko izvajajo neko kolektivno vedenje, ne da bi kdo nadziral skupino ali se zavedal splošnega vedenja skupine. Ne glede na pomanjkanje posameznikov, ki so odgovorni za skupino, lahko roj kot celota kaže inteligentno vedenje. To je rezultat interakcije prostorsko sosednjih osebkov, ki delujejo na podlagi preprostih pravil. (Dorigo in Birattari 2007)

Zato želimo dokazati, da te pogoje samoorganiziranega vedenja lahko prenesemo tudi na umetno inteligenco. Vse te skupine imajo torej samoorganizirano, kolektivno vedenje, ki vodi k uspešnosti skupine. Skupine morajo tako med seboj sodelovati in pomembno vprašanje, ki ga izpostavijo Bonabeau, Dorigo in Theraulaz, je naslednje: »morda je najtežje vprašanje, kako posameznikovo vedenje povezati s kolektivno uspešnostjo? Z drugimi besedami, kako nastane sodelovanje« (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: 6). Avtorji Bonabeau, Dorigo in Theraulaz ponujajo odgovor na to vprašanje, in sicer pravijo, da je lahko gensko pogojeno, vendar so:

/.../ mnogi vidiki kolektivnih dejavnosti socialnih žuželk so samoorganizirani. Torej po teoriji samoorganizacije (SO) (Haken 1983, Nicolis in Prigogine 1977), prvotno razvite v okviru fizike in kemije, da bi opisale pojav makroskopskih vzorcev iz procesov in interakcij, zaznamovanih na mikroskopski ravni, lahko razširimo na socialne žuželke. Tako lahko pokažemo, da se kompleksno kolektivno vedenje lahko pojavi iz interakcij med posamezniki, ki kažejo preprosto vedenje: v teh primerih se za razlago kompleksnega kolektivnega vedenja ni treba sklicevati na posamezno kompleksnost. (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: 6)

Preverili smo, kateri mehanizmi so del naravne inteligence roja in ugotovili, da sta glavna mehanizma naravne organizacije *samoorganizacija* ter *stigmergija* (ta je definirana kot stimulacija z delom) (Krink b. d.). Zastaviti pa si moramo temeljno vprašanje: ali želimo, da se umetna inteligenca razvije do stopnje popolne avtonomnosti in samoorganiziranosti, do stopnje inteligence roja, katerega osnovno izhodišče je, da posamezna entiteta izpolnjuje naloge, ki so v korist celotnemu kolektivu? In jasno je treba že na začetku definirati, kaj je za UI 'celoten kolektiv':

- a. Ali je to kolektiv UI entitet?
- b. Ali je to celotna družba, ki vključuje tudi ljudi?

2 Inteligenca roja in umetna inteligenca

Naraven sistem inteligence roja je tako uspešen, da ga ljudje želimo posnemati na različnih področjih (robotika, algoritmi, umetna inteligenca itd.). Ukvarjanje s tem področjem je trenutno aktualno, kar kažejo tudi različne raziskave (npr. Bonabeau in Meyer 2001, Dorigo in Stützle 2004, Di Caro, Ducatelle in Gambardella 2005,

Dorigo in Birattari 2007, Innocente in Grasso 2019) in nekatere od njih bomo tudi ovrednotili. Najprej bomo preverili, kako bi izraz IR (inteligence roja) lahko prenesli iz bioloških na *nebiološke umetne sisteme*.³

Prvič so izraz IR uporabili v okviru nebioloških umetnih sistemov avtorji Beni, Hackwood in Wang (Beni 1988, Beni in Wang 1989, Beni in Hackwood 1992), in sicer:

/.../ v kontekstu celičnih robotskih sistemov, kjer veliko enostavnih agentov zaseda eno ali dvodimenzionalen prostor, da bi ustvarjali vzorce in se samoorganizirali z interakcijami z najbližjimi sosedi. Uporaba izraza IR za opis samo tega dela se zdi po nepotrebnem omejujoča: zato njegovo definicijo razširimo tako, da vključuje vse poskuse kreiranja algoritmov ali distribuiranih naprav za reševanje problemov, inspiriranih s kolektivnim vedenjem kolonij socialnih žuželk in drugih živalskih kolektivov. (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: 7)

Zanimivo razlago ponujata tudi Dorigo in Birattari (2007), ki trdita, da je inteligence roja:

/.../ disciplina, ki se ukvarja z naravnimi in umetnimi sistemi, sestavljenimi iz številnih posameznikov, ki se usklajujejo z uporabo decentraliziranega nadzora in samoorganizacije. Disciplina se osredotoča zlasti na kolektivno vedenje, ki je posledica lokalnih interakcij posameznikov med seboj in z okoljem. (Dorigo in Birattari 2007)

Glede na to, da je vedno bolj popularno področje umetne inteligence roja, je treba razjasniti tudi prednosti in potencialne slabosti teh sistemov. Bonabeau in Meyer sta opredelila prednosti inteligence roja kot:

- »prilagodljivost (kolonija se lahko prilagodi spreminjajočemu se okolju);
- robustnost (tudi če eden ali več posameznikov ne uspe, lahko skupina še vedno opravlja svoje naloge); in

³ *Nebiološki umetni sistemi* bodo v našem primeru označeni kot vsi umetni sistemi, ki jih je ustvaril človek, kar tudi ustreza neki splošni definiciji umetnega (Bird in Tobin 2018).

- samoorganizacija (dejavnosti niso niti centralno niti lokalno nadzorovane).«
(Bonabeau in Meyer 2001: 111).

Več o težavah, dilemah in slabostih pa v nadaljevanju.

Skladno s temi spoznanji je potem smiselno ugotavljati, v kakšnem odnosu sta biološka inteligenca roja in to, kar je v ospredju našega zanimanja, torej umetna inteligenca. Če pogledamo različne raziskave, ki se ukvarjajo s tem področjem, potem hitro ugotovimo, da obstajajo pomembne povezave med nekaterimi tipičnimi vzorci kolektivnega delovanja v živalskih skupnostih in tem, kar se dogaja na področju umetne inteligence. V devetdesetih letih so prve raziskave pokazale, da ima razumevanje določenih vzorcev kolektivnega delovanja pri živalih lahko pomemben vpliv na razlage kolektivnega delovanja na različnih drugih področjih. To lahko zelo nazorno pokažemo z ugotovitvami, do katerih so prišli Bonabeau, Dorigo in Theraulaz:

Odkritje, da samoorganizacija lahko deluje pri socialnih žuželkah, ne vpliva le na preučevanje socialnih žuželk, temveč nam ponuja tudi močna orodja za prenos znanja o socialnih žuželkah na področje oblikovanja inteligentnih sistemov. (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: 6)

Sklepamo torej lahko tudi, da se vzorci, ki jih raziskujemo pri živalih in so del njihovega obnašanja, lahko prenesejo tudi na druga področja, kot je npr. področje umetne inteligence. Takšne vrste kolektivnega vedenja, ki ga uporabljajo socialne žuželke, je torej lahko uporabno tudi v primeru nebioloških umetnih inteligentnih sistemov. Kot bomo videli v nadaljevanju, je uporaba takšnega naravnega sistema postala priljubljena za reševanje nekaterih problemov v umetnih inteligentnih sistemih. Seveda je to razumljivo, saj kolektivno zavedanje v naravnih sistemih vodi v uspešnost celotnega kolektiva, prav tako takšni sistemi ne potrebujejo nekega zunanje upravljalca in hkrati skrbijo za dobrobit celotnega kolektiva (spomnimo se na primer kolektivnega vedenja pri čebelah, kjer ima vsaka čebela svojo nalogo, naloge pa prispevajo k uspehu celotnega kolektiva). Popularnost inteligence roja kot ene od paradigem za strategijo razvoja umetne inteligence izhaja iz spoznanj, da je interakcija, ki se pojavlja med relativno preprostimi dejavniki, dovolj fleksibilna in robustna ter hkrati izjemno učinkovita. Zato ne preseneča, da Bonabeau, Dorigo, Theraulaz (1999: xi) ugotavljajo: »Število njenih uspešnih aplikacij eksponentno

narašča na področju kombinacijske optimizacije, komunikacijskih omrežij in robotike» (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: xi).

3 Simuliranje in IR

Prvi poskusi simuliranja inteligence roja se pojavijo že zgodaj in stremijo k posnemanju naravnih sistemov, ki so uspešni, kar je temelj človekovega razvoja - poskus posnemanja v naravi dobro delujočih sistemov. Tako že obstajajo tudi različni umetni modeli inteligence roja, kot je na primer program Boids,⁴ ki ga je zasnoval Craig Reynolds leta 1986 in simulira vedenje jat ptic (Reynolds 1987). Kot lahko vidimo iz tega primera, se je poskus prenosa znanj inteligence roja iz naravnih sistemov na umetne sisteme zgodil že nekaj časa nazaj, od takrat so tehnologije napredovale, tako da je povsem razumljiva težnja, da se dejanski pozitivni dosežki pri umetnih sistemih inteligence roja prenesejo na čim več različnih področij. Avtorji Bonabeau, Dorigo in Theraulaz pravijo takole:

Raziskovalci imajo dobre razloge, da se jim zdi inteligenca roja privlačna: v času, ko svet postaja tako zapleten, da ga nobeno človeško bitje ne more razumeti, ko nam informacije (in ne njihovo pomanjkanje) ogrožajo življenje, ko postanejo programski sistemi tako kompleksni, da jih ni več mogoče nadzorovati, ponuja inteligenca roja alternativni način oblikovanja 'inteligentnih' sistemov, v katerih avtonomija, pojavnost in porazdeljeno delovanje nadomeščajo nadzor, predprogramiranje in centralizacijo. (Bonabeau, Dorigo in Theraulaz 1999: xi)

Vendar pri tem pozabljamo na temeljno izhodišče te premise kompleksnosti, namreč da programski sistemi postajajo tako inteligentni in kompleksni, da jih ne moremo več nadzorovati, zato poskušamo to nesposobnost obvladovanja sistema nadomestiti še z bolj kompleksnim sistemom, to je inteligenco roja. Potreba po neke vrste avtonomni notranji samoorganizaciji se tako kaže za koristno tudi v nebioloških umetnih sistemih.

⁴ Glej Wong 2008.

4 Umetni inteligentni nebiološki sistemi – transformacija inteligence roja

Naravne sisteme inteligence roja smo torej predstavili, v nadaljevanju bomo naredili analizo umetnih sistemov in možnosti inteligence roja v umetnih sistemih. V analizi nas predvsem zanima, kako poteka oz. ali je možna transformacija inteligence roja na umetno inteligenco? Ob tem se takoj zastavi vprašanje, kako lahko nastane takšno kolektivno vedenje? Poglejmo si, kaj je sploh značilnost takšnih sistemov inteligence roja. Za takšne sisteme je značilna multidisciplinarnost, kot trdita Dorigo in Birattari: »Inteligence roja ima izrazit multidisciplinaren značaj, saj je sisteme /.../ mogoče opaziti na različnih področjih. Raziskave v inteligenci roja lahko razvrstimo po različnih kriterijih« (Dorigo in Birattari 2007). Kot smo že omenili v uvodu, raziskave na področju IR Dorigo in Birattari problematizirata na dveh področjih:

- področje naravno (biološko) proti umetnemu (nebiološkemu) in
- področje znanstveno proti inženirskemu (Dorigo in Birattari 2007).

Če pogledamo prvo razdelitev, lahko ugotovimo, da je naravno nekaj, kar izhaja iz narave, umetno pa je produkt človeka. Takole razliko med naravnim in umetnim opredelita Bird in Tobin: »če rečemo, da je neka vrsta naravna, to pomeni, da ustreza skupini, ki odraža strukturo naravnega sveta in ne interese in dejanja ljudi« (Bird in Tobin 2018). Avtorja Dorigo in Birattari razložita zgoraj omenjene kategorije naravnega in umetnega:

Običajno je, da se raziskovanje inteligence roja razdeli na dve področji glede na naravo analiziranih sistemov. Zato govorimo o raziskavah naravne inteligence roja, kjer se preučujejo biološki sistemi; in umetne inteligence roja, kjer se preučujejo človeški artefakti. (Dorigo in Birattari 2007)

V primerih umetne inteligence roja tako poskušamo imitirati naravno vedenje (ki ga je ustvarila narava) in ga prenesti na določeno področje človekovega ustvarjanja (npr. področje umetne inteligence). Ko govorimo o drugem področju, o znanstvenem in inženirskem, pa avtorja Dorigo in Birattari takole definirata področji:

Na podlagi zastavljenih ciljev lahko podamo alternativno in nekako bolj informativno klasifikacijo raziskav inteligence roja: prepoznamo lahko znanstveni in inženirski tok. Cilj znanstvenega toka je modelirati inteligentne sisteme rojev ter izločiti in razumeti mehanizme, ki sistemu v celoti omogočajo usklajeno vedenje kot rezultat lokalnih interakcij med posamezniki ter med posameznikom in okoljem. Po drugi strani pa je cilj inženirskega toka izkoristiti razumevanje, ki ga je razvil znanstveni tok, da bi oblikovali sisteme, ki lahko rešujejo probleme, ki so praktično pomembni. (Dorigo in Birattari 2007)

Preverili smo torej razlike med različnimi kategorijami in na tem mestu si pogledjmo nekaj znanih primerov raziskav inteligence roja, ki jih navajata Dorigo in Birattari (2007):

- določena (prehranjevalna) vedenja mravelj: pri čemer gre za primer naravno-znanstvenega sistema;
- gnezdilno vedenje os in mravelj; pri čemer gre prav tako za primer naravno-znanstvenega sistema;
- grozdenje roja robotov: pri čemer gre za umetno/znanstveni sistem;
- uporaba/izkoriščanje kolektivnega vedenja živalskih skupnosti: pri čemer gre za naravno/inženirski sistem;
- analiza podatkov s pomočjo roja: pri čemer gre za umetni/inženirski sistem;
- učenje in tvorjenje jat pri pticah in ribah: tukaj gre za primere naravno-znanstvenih in umetno-inženirskih sistemov, ko govorimo o simulacijskih programih, kot je npr. Boidova simulacija. Dorigo in Birattari (2007).

Dorigo in Birattari sta v nadaljevanju izpostavila, da je vsak posameznik odgovoren pri odločitvah za svoje delovanje, ki temeljijo na spodnjih podatkih:

»Znanstveniki so pokazali, da je to elegantno vedenje na ravni roja mogoče razumeti kot rezultat samoorganiziranega procesa, kjer noben vodja ni odgovoren in vsak posameznik svoje odločitve o gibanju temelji izključno na lokalno razpoložljivih informacijah: razdalji, zaznani hitrosti in smeri gibanje sosedov.« (Dorigo in Birattari 2007).

Dorigo in Birattari sta dosedanja spoznanja lepo ponazorila s pomočjo različnih kombinacij, kot je prikazano v spodnji tabeli:

Tabela 1

	Naravno (primeri)	Umetno (primeri)
Znanstveno	– vedenje čebel pri sporazumevanju (t. i. čebelji ples)	– grozdenja rojev robotov
Inženirsko	– nadzorovana uporaba kolektivnega vedenja živalskih družb – posnemanje samoorganiziranja pri socialnih žuželkah	– analiza podatkov s pomočjo roja

(vir: Dorigo in Birattari 2007)

Če povzamemo te ugotovitve, potem lahko na podlagi njihovih analiz izluščimo naslednje pomembne značilnosti sistemov inteligence roja:

- (i) Sestavljajo ga številni posamezniki.
- (ii) Posamezniki so sorazmerno homogeni.
- (iii) Interakcije med posamezniki temeljijo na preprostih vedenjskih pravilih.
- (iv) Vedenjska pravila temeljijo na lokalnih informacijah.
- (v) Lokalne informacije si posamezniki izmenjujejo:
 - (a) neposredno
 - (b) preko okolja
- (vi) Skupinsko vedenje sistema je posledica interakcij posameznikov:
 - (a) med seboj
 - (b) z njihovim okoljem
- (vii) Ne obstajajo nikakršni zunanji nadzorni/usklajevalni mehanizmi.
- (viii) Skupinsko vedenje sistema je torej na podlagi interakcij, lokalnih informacij in enostavnih vedenjskih pravil samoorganizirano od znotraj.
- (ix) Stigmergija.
- (x) Tako samoorganizirano skupinsko vedenje, ki je predstavljeno kot dovolj robusten in gibek kompleksni sistem, omogoča uspešno razreševanje vsakdanjih problemov.

Tako smo, po predlogih analiziranih avtorjev, podali glavne značilnosti naravnih samoorganiziranih kompleksnih sistemov, ki uporabljajo inteligenco roja in so uspešni v reševanju vsakdanjih problemov. V naslednjem koraku pa nas zanima možnost izgrajevanja uspešnega kompleksnega umetnega sistema, ki bo grajen na značilnostih, ki smo jih ugotovili pri naravnih sistemih.

5 Umetni sistemi – inženirsko – aplikacije in uporaba

Vprašanje, na katerega bomo poskušali v nadaljevanju odgovoriti, in ga postavlja tudi Krink, je: Ali je inteligence roja uporabna v umetnih sistemih? Ali je uporabna tudi na področju umetne inteligence? (Krink b. d.). Na eni strani gre za vprašanje o upravičenosti vzpostavljanja analogij med biologijo rojev in informacijskimi sistemi na podlagi razumevanja teh podobnosti (in hkratnemu prepoznavanju možnih razlik, ki se lahko pojavljajo kot ovire za to), kar naj potem omogoča računalniško modeliranje naravnih rojev, na drugi strani pa za vprašanje, kako bi lahko te strukturne značilnosti prenesli v modele, ki bi bili tako uporabni in učinkoviti, kot so na ravni naravnih rojev (Krink b. d.).

Izhodišče za vzpostavljanje analogij predstavljajo določene značilnosti vedenja posameznih živalskih organizmov, ki živijo v posebnih organiziranih skupnostih, kolonijah. Če vzamemo kot primer mravlje, potem vidimo, da je njihovo skupinsko vedenje, ki omogoča uspešno razreševanje osnovnih problemov kolektiva, utemeljeno na sodelovanju in primerni delitvi dela, kjer je dodeljevanje nalog zelo prilagodljivo. Vedenje mravelj je v nekaterih pogledih podobno vedenju čebel: pri obeh skupinah vidimo pomembnost deljenja dela (čebele imajo delitev dela, kot je npr. razdelitev na čebele krmilke, ki so zadolžene za krmljenje matice; pri mravljah lahko prav tako opazimo strukturirano delo).

Dejstvo je, da sta obe skupini žuželk na podlagi samoorganiziranega delovanja zelo uspešni pri razreševanju svojih problemov, zato ne preseneča, da so snovalci umetnih sistemov želeli spoznanja o njihovem vedenju in samoorganizaciji prenesti tudi na umetne sisteme.

Izraz inteligenca roja, ki se torej uporablja predvsem na področju računalništva, je dejansko izraz za superorganizem v biologiji. Na kratko preverimo bistvene značilnosti superorganizma, s pomočjo katerih lahko prepoznamo podobnosti obeh izrazov.

Kot pravi Tautz, je izraz superorganizem predstavil Wheeler:

Ta pogled, ki celotno čebeljo družino enači z eno živaljo, je pripeljal do pojma 'bien', ki pomeni 'organsko pojmovanje individuuma'. Čebeljo družino obravnava kot nedeljivo celoto, kot en sam živ organizem. Za takšno življenjsko obliko je ameriški biolog William Morton Wheeler (1865-1937) leta 1911 na osnovi raziskovanja mravelj skoval izraz superorganizem. (izvor besede: lat. *super* = nad,; gr. *organon* = orodje) (Tautz 2010: 3)

Se je pa z izrazom superorganizem ukvarjal tudi James Lovelock, avtor, ki je razvil Gaia hipotezo (več o tem v Lovelock 1972). Naslednji pomemben korak v iskanju odgovora na izvorno vprašanje o statusu ekoloških superorganizmov predstavlja pristop »/.../ biologa Williama Hamiltona v sedemdesetih letih 20. stoletja, ki je na računalnikih začel modelirati ekosisteme. Ugotovil je, da se je v teh modelih (pa tudi v resničnem življenju) zelo malo sistemov lahko samoorganiziralo v kakršenkoli trajno skladnost sistem« (Kelly 1994: 89).

V predhodnih analizah smo ugotovili, kako se povezujeta oba temeljna pojma, sedaj pa nadaljujemo z analizo transformacije naravne inteligence roja na umetno inteligenco roja. Najprej nas zanima, če se pogoji, ki veljajo v naravni inteligenci roja, lahko prenesejo na umetno inteligenco. Pri tem je zanimivo, da so inženirji osnovne ideje inteligence roja najprej implementirali na robote. Pri posnemanju takšnega naravnega sistema strokovnjaki poskušajo oblikovati umetno kolektivno vedenje (Bouffanais 2016). Radhika razlaga, da so ustvarili umetne sisteme inteligence roja, pri čemer so naredili robota imenovanega 'Kilobot', ki je bil podlaga za »proizvodnjo roja 1024 robotov, s katerimi testirajo kolektivno vedenje« (Radhika 2016).

Ob tem pa obstajajo tudi različni umetni modeli inteligence roja, kot je na primer program Boids, ki ga je zasnoval Craig Reynolds leta 1986 in simulira vedenje jat ptic (Reynolds 1987). To je bil prvi računalniški simulirani model inteligence roja:

Cilj simulacije je bil ponoviti vedenje jat ptic. Namesto da bi nadzirali interakcije celotne jate, simulacija Boids določa le vedenje vsake posamezne ptice. Z le nekaj preprostimi pravili uspe programu ustvariti rezultat, ki je dovolj zapleten in realističen, da ga lahko uporabimo kot ogrodje za računalniške grafične aplikacije, kot je računalniško ustvarjena vedenjska animacija v filmih. (Wong 2008)

Zelo hitro pa se je izkazalo, da bi se dalo te ideje uporabiti tudi v analizah skupinskega vedenja ljudi (npr. Bonabeau in Meyer 2001; Krause, Ruxton in Krause 2010; Radhika 2016), kar vodi do vzpostavljanja paradigme o superorganizmih na različnih področjih človekovega družbenega delovanja.

Glede na to, da je naravni sistem inteligence roja tako uspešen, je logična posledica, da želimo prenesti te mehanizme inteligence roja tudi na skupinsko vedenje ljudi. To naj bi pripomoglo k večji uspešnosti skupine, pa najsi gre za primere, kot so npr. podjetja, delovne skupine ali pa športne ekipe. V principu je prenos mehanizmov isti, kot je to pri prenosu iz naravnega sistema na umetni sistem umetne inteligence. Pa vendar je treba izpostaviti, da verjetno ne moremo neposredno prenašati vseh mehanizmov naravnega sistema na področju človeškega vedenja in drugih področij. Avtorja Bonabeau in Meyer sta se lotila preiskovanja možnega prenosa naravne inteligence roja na področje ekonomije in pravita takole: »V zadnjih 20 letih smo mi in drugi raziskovalci razvili stroge matematične modele za opis vedenja socialnih živali, in zdaj prenašamo te tehnike na področje poslovnih problemov (Bonabeau in Meyer 2001: 108).

Na tem primeru lahko vidimo, da potekajo intenzivni prenosi mehanizmov naravne inteligence roja na različna področja človekovega delovanja (npr. na področje umetne inteligence, na področje ekonomije in na druge interakcije v družbi itd.), pri čemer bi ta področja postala uspešnejša z upoštevanjem mehanizmov naravne inteligence roja. Avtorji Garnier, Gautrais in Theraulaz pa zaključijo takole:

Nadaljevanje eksperimentalnih raziskav v bioloških sistemih in razvoj novih teoretičnih okvirov o prilagoditveni vlogi teh modulacij bi moral spodbuditi nastanek novih uporabnih študij. To nam daje verjeti, da potencial inteligence rojev še zdaleč ni izčrpan (Garnier, Gautrais in Theraulaz 2007: 21).

Kot smo že omenili, avtorja Bonabeau in Meyer trdita, da so prednosti inteligence roja: prilagodljivost, robustnost in samoorganizacija (Bonabeau in Meyer 2001). Vprašanje, ki se poraja, je, do katere mere lahko ta sistem prenesemo na človekovo skupinsko vedenje: na prvi pogled bi lahko rekli, da se problem odpre že pri robustnosti, za katero Bonabeau in Meyer pravita takole: »/.../ tudi če eden ali več posameznikov ne uspe, lahko kolektiv še vedno opravlja svojo nalogo« (Bonabeau in Meyer 2001: 111).

Ta prenos naravnega mehanizma robustnosti na področje človekovega delovanja in vedenja je problematičen, in sicer iz vidika upoštevanja ter prepoznavanja vsakega posameznika kot pomembnega za uspeh skupine, pri čemer je posameznik nepogrešljiv del tega kolektivnega delovanja. Za natančen vpogled v to področje pa potrebujemo še dodatne obširnejše raziskave in analize delovanja teh mehanizmov. Mehanizmi, ki so prisotni v naravi, so torej lahko (ali pa tudi ne) rešitev tudi za nekatera človeška področja ter probleme, saj se zadnje čase vse bolj zavedamo tudi potrebe o etični presoji, npr. pri uporabi avtonomnih sistemov (npr. Bench-Capon 2020, Burton, Habli, Lawton, McDermid, Morgan in Porter 2019).

Ko govorimo o umetni inteligenci, govorimo o nečem, kar ni ustvarila narava skladno z njenimi zakoni, in kar ustreza definiciji naravnega (ki smo jo spoznali v prejšnjih poglavjih), ampak o tem, kar je ustvaril človek v nekaj desetletjih. Običajno pa so osnovne trditve o tem razvoju hitre in tudi premalo domišljene (Aberšek, Borstner in Bregant 2014).

V prihodnosti bomo morali odgovoriti na kar nekaj vprašanj, kajti problemi in dileme, ki smo jih predstavili v pričujočem prispevku, so vedno bolj aktualna, tehnologija pa se razvija z vedno večjo hitrostjo. To pa pomeni, da moramo posvetiti še več časa takšnim razpravam in poskusiti poiskati čim boljše rešitve ter odgovore na ta vprašanja.

7 Zaključek

Naravni sistem inteligence roja je tako uspešen, da ga ljudje želijo posnemati na različnih področjih (robotika, algoritmi, umetna inteligenca itd.). V tem prispevku smo želeli pokazati, kako delujejo mehanizmi naravne inteligence roja. To smo preverili s pomočjo različnih avtorjev. Ko smo postavili okvirje za te mehanizme, smo poskušali pokazati, ali se lahko ti mehanizmi naravne inteligence roja prenesejo

na umetno inteligenco roja. Prikazali smo nekaj primerov, s katerimi smo podkrepili možnost prenosa naravnih mehanizmov na umetne.

Zavedamo se, da se z napredkom tehnologije možnosti prenosa teh naravnih mehanizmov izboljšujejo in povečujejo, zato bodo za področje prenosa naravnih mehanizmov na umetno inteligenco potrebne še obširne dodatne raziskave tako na čisto tehnološkem kot tudi na temeljnem filozofskem, etičnem in moralnem področju.

Viri in literatura

- Aberšek, B., Borstner, B. in Bregant, J. (2014). *Virtual teacher: cognitive approach to e-learning material*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing.
- Bench-Capon, T. J. M. (2020). »Ethical approaches and autonomous systems«. *Artif. Intell.*, 103239. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2020.103239>.
- Beni, G. (1988). »The Concept of Cellular Robotic System«. V *Proceedings 1988IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, str. 57–62.
- Beni, G. in Wang, J. (1989). »Swarm Intelligence«. V *Proceedings Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan*. Tokyo: RSJ Press, str. 425–428.
- Beni, G. in Hackwood, S. (1992). »Stationary Waves in Cyclic Swarms«. V *Proceedings 1992 IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, str. 234–242.
- Bird, A. in Tobin, E. (2018). »Natural Kinds«. V E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (izdaja pomlad 2018). URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/natural-kinds/>>.
- Bonabeau, E. in Meyer, C. (2001). »Swarm intelligence. A whole new way to think about business«. *Harv Bus Rev*, 79(5), str. 106–14.
- Bonabeau, E., Dorigo, M. in Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Bouffanais, R. (2016). *Design and control of swarm dynamics*. Singapore: Springer.
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (2018). »Social insect«. *Encyclopedia Britannica* (20. april 2021). URL = <https://www.britannica.com/animal/social-insect>. Burton, S., Habli, I., Lawton, T., McDermid, J., Morgan, P. in Porter, Z. (2019). »Mind the Gaps: Assuring the Safety of Autonomous Systems from an Engineering, Ethical, and Legal Perspective«. *Artificial Intelligence*, 279, [103201]. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2019.103201>.
- Čebelarstva zveza Slovenije (b. d.). »Čebelja družina«. *Čebelarstva zveza Slovenije* (20. april 2021). URL = <https://www.czs.si/content/C12>.
- Di Caro, G., Ducatelle, F. in Gambardella, L. M. (2005). »AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks«. *European Transactions on Telecommunications*, 16(5), str. 443–455.
- Dorigo, M. in Birattari, M. (2007). »Swarm intelligence«. *Scholarpedia*, 2(9), 1462 (2. marec 2021). URL = http://www.scholarpedia.org/article/Swarm_intelligence.
- Dorigo, M. in Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Haken, H. (1983). *Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag.
- Garnier, S., Gautrais, J. in Theraulaz, G. (2007). The biological principles of swarm intelligence«. *Swarm Intell*, 1, str. 3–31.

- Innocente, M. in Grasso, P. (2019). »Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence indecentralised multi-robot systems«. *Journal of Computational Science*, 34, str. 80–101.
- Kelly, K. (1994). *Out of control: the new biology of machines, social systems and the economic world*. Boston: Addison-Wesley.
- Krause, J., Ruxton, G. D. in Krause, S. (2010). »Swarm intelligence in animals and humans«. *Trends Ecol Evol*, 25(1), str. 28–34. 10.1016/j.tree.2009.06.016.
- Krink, T. (b. d.). »Swarm Intelligence – Introduction«. *University of Washington Faculty Web Server* (3. februar 2021). URL = http://faculty.washington.edu/paymana/swarm/krink_01.pdf.
- Lovelock, J. E. (1972). »Gaia as seen through the atmosphere«. *Atmospheric Environment*, 6(8), str. 579–580.
- Merriam-Webster (b. d.). »Superorganism«. *Merriam-Webster, Incorporated* (30. februar 2021). URL = <https://www.merriam-webster.com/dictionary/superorganism>.
- Nicolis, G. in Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley & Sons.
- Radhika, N. (2016). »Taming the swarm - Collective Artificial Intelligence«. *Youtube, TEDxBermuda*. (20. marec 2021). URL = <https://www.youtube.com/watch?v=LHgVR0lzFjc&t=638s>.
- Reynolds, C. W. (1987). »Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model«. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4), str. 25–34. <https://doi.org/10.1145/37402.3740634>.
- Tautz, J. (2010). *Čudežni svet čebel*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, d. d.
- Wong, T. 2008. »Boids«. *Stanford University* (20. marec 2021). URL = <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/2008-09/modeling-natural-systems/boids.html>.