

# Platforme za orkestraciju hibridne umjetne inteligencije u računalnim igrama – konceptualni model

Markus Schatten, Bogdan Okreša Đurić, Igor Tomičić

Laboratorij za umjetnu inteligenciju

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet organizacije i informatike

Pavlinska 2, 42000 Varaždin, Hrvatska

{markus.schatten,dokresa,igor.tomicic}@foi.unizg.hr

**Sažetak.** *Predmetom je rasprave pružaju li metode umjetne hibridne inteligencije skup alata potreban za razvoj složenih računalnih igara. Štoviše, za uvođenje takvih složenih igara u velikom razmjeru (primjerice u obliku mrežnih igara namijenjenih većem broju igrača), platforma za orkestraciju temeljena na mikro-servisima i višeagentnim sustavima izgleda kao prikladan izbor arhitekture takvog sustava. U ovom radu predstavljamo pregled najnovije literature o metodama umjetne hibridne inteligencije, mogućnosti njihove primjene na složene računalne igre te inicijalni pregled konceptualnog modela visoke razine takvog sustava.*

**Ključne riječi.** hibridna umjetna inteligencija, umjetna inteligencija, računalne igre, višeagentni sustav, orkestracija

## 1 Uvod

Primjena umjetne hibridne inteligencije (UHI), koju je moguće definirati kao orkestraciju heterogenih metoda umjetne inteligencije (UI), a koja uključuje i statističke i simboličke pristupe u različitim domenama, sveprisutna je u suvremenoj znanstvenoj literaturi. Uvelike se preklapa s pojmom hibridne inteligencije (HI) koja je definirana kao "*kombinacija komplementarnih heterogenih inteligencija (...) kako bi se stvorio društveno-tehnološki ansambl koji je u mogućnosti savladati sadašnja ograničenja (umjetne) inteligencije.*" (Dellermann i dr., 2019). HI je smještena u presjeku ljudske, kolektivne i umjetne inteligencije, s ciljem korištenja najboljeg od svake od njih.

Brojne su suvremene studije koje se bave problemima vezanim za metode UHI-ja i HI-ja u mnogobrojnim aplikacijskim domenama, uključujući, ali ne ograničavajući se na, predviđanje klizišta (Li i dr., 2018), testiranje lijekova (Chen i dr., 2018), predviđanje cijena nafte (M. Wang i dr., 2018), predviđanje prirodnih požara (Jaafari i dr., 2019), procjenu stabilnosti nagiba (Koopialipoor i dr., 2018), modeliranje brane hidroelektrane (Bui i dr., 2018), analizu vjetra kao energenta

(Fu i C. Wang, 2018), automatizaciju proizvodnje i industriju 4.0 (Azizi, 2019) i predviđanje zračnog udara (Armaghani i dr., 2018), što su samo neke od referenci od 2018. godine do vremena pisanja ovog članka. Većina ovih i sličnih studija izvještava o izgradnji sustava UHI-ja kombinacijom raznih metoda UI-ja kako bi se postigli bolji i precizniji rezultati. Unatoč tome, uobičajen pristup metodologiji orkestracije metoda UHI-ja je *ad-hoc* i razlikuje se od projekta do projekta. Nedostatak metodologije u orkestraciji UHI-ja jedna je od tema ovog članka.

Računalne igre oduvijek su povezane s razvojem UI-ja. Od najranijih minmax algoritama Clauda Shannona za šah 1949. godine, do suvremenijeg AlphaGo™ 2015. godine, računalne igre pružaju idealno okruženje za testiranje metoda UI-ja. Slično, UI je oduvijek važan dio računalnih igara. Računalne igre često su prosuđivane temeljem kvalitete njihovog UI-ja i hvaljene u slučaju korištenja inovativnih pristupa poput primjera duhova u Pacmanu™ koji su imali individualizirane osobine (1980.), Creatures™ koja je koristila umjetne neuronske mreže za razvoj likova (1996.), Black & White™ koji je koristio model vjerovanja-želja-namjera (engl. *belief-desire-intention* (BDI)) (2000.), F.E.A.R.™ koji je koristio algoritme za automatizirano planiranje (2005.) te mnoge druge (vidi (Yannakakis i Togelius, 2018, str. 8–15) za vrlo detaljan pregled). Umjetna inteligencija u igrama nije korištena samo za implementaciju neigrajućih likova (engl. non-player characters (NPCs)) ili protivnika, već i za razne druge dijelove igara (Yannakakis i Togelius, 2018, str. 151–203), uključujući, ali ne ograničavajući se na, **generiranje sadržaja** (grafike koje uključuju razine i mape, zvukove, narativ, pravila i mehanike ili čak i cijele igre poput Angelina sustava za generiranje igara (Cook, Colton i Raad, 2018)), **modeliranje ponašanja i iskustva igrača** (Yannakakis i Togelius, 2018, str. 203–259), kao i **razvoj umjetnih igrača i automatiziranog testiranja igara** (Yannakakis i Togelius, 2018, str. 91–151). Uslijed svoje složene prirode te beskrajnih mogućnosti kreativnog dizajna, računalne igre pružaju izvrsnu priliku za proučavanje orkestracije UHI-ja

u različitim scenarijima – ne samo za zabavu i opuštanje, već i za druge domene u obliku ozbiljnih igara ili igrifikacije.

U prethodnom projektu koji je financirala Hrvatska zaklada za znanost (strukturni projekt HRZZ-UIP-2013-11-8537 pod naslovom Large-Scale Multi-Agent Modelling of Massively Multi-Player On-Line Playing Games - ModelMMORPG - vidi (Schatten, Okreša Đurić i dr., 2017) za detalje) razvijena je obuhvatna metodologija za modeliranje inteligentnih distribuiranih sustava velikih razmjera, koja uključuje i grafički alat za modeliranje te generator programskog koda (opisan u (Schatten, Okreša Đurić, Tomičić i Ivković, 2017) i detaljnije u (Okreša Đurić, 2018)). Implementiran skup alata omogućava modeliranje složenih višeagentnih organizacija i može biti primijenjen u brojnim aplikacijskim domenama (Schatten, Tomičić i Okreša Đurić, 2017; Schatten, Ševa i Tomičić, 2016). U ovom članku predstavljena je primjena i implementacija ove metodologije na razvoj orkestracijske platforme za UHI za računalne igre.

U prethodno spomenutom ModelMMORPG projektu već je korištena mrežna igra s ulogama namijenjena većem broju igrača (engl. *massively multi-player on-line role-playing game* (MMORPG)) naziva The Mana World (TMW), za koju smo razvili sučelje visoke razine za testiranje inteligentnih agenata koji je igraju. Uz to, razvijen je niz povezanih zadataka za različite scenarije, što nam je omogućilo izgradnju sustava za automatizirano testiranje igre (Schatten, Okreša Đurić, Tomičić i Ivković, 2017). U ovom istraživanju bit će korišteno to sučelje za testiranje orkestriranih metoda UI-ja, a biti će razvijeni i novi testni scenariji za navedenu platformu.

Stoga će osnovni doprinos aktualnog projekta (O\_HAI (4) Games - Orchestration of Hybrid Artificial Intelligence Methods for Computer Games - HRZZ-IP-2019-04-5824) biti: (1) obuhvatan okvir za orkestraciju metoda umjetne hibridne inteligencije za računalne igre koji omogućava definiranje modela UHI-ja za razne potrebe, (2) distribuiranu oblačnu platformu otvorenog koda koja će omogućiti implementaciju takvih modela temeljem postojećih metoda UHI-ja i njihovo povezivanje izravno s platformama za razvoj videoigara, (3) skup primjera dobre prakse u razvoju ansambala modela UHI-ja testiranih temeljem najmanje četiri specifična testna scenarija koja su opisana u nastavku.

Ostatak članka strukturiran je kako slijedi: prvo je u sekciji 2 pružen pregled domene UHI-ja u računalnim igrama. Zatim je, u sekciji 3, okvirno opisan konceptualni model visoke razine planirane oblačne platforme za orkestraciju, zajedno s opisom njenih detalja. Za kraj su, u sekciji 5, izneseni zaključci i upute za daljnje istraživanje.

## 2 Pregled domene

Iako su metode UHI-ja nedavno primjenjivane u brojnim aplikacijskim domenama s različitim razinama uspješnosti, njihovo korištenje u računalnim igrama izgleda da je iznimka. Računalne igre uobičajeno koriste razne heterogene metode UI-ja, uključujući konačne automate, stanja ponašanja ili sustave za planiranje temeljene na pravilima za implementaciju različitih dijelova sustava UI-ja igre, no vidljiv je nedostatak metodologije u kontekstu orkestracije tih metoda u koherentnu igrivu igru. Većina literature za implementaciju UI-ja u igrama (vidi primjere u (Funge, 2004; Yannakakis i Togelius, 2018; Nareyek, 2004)) ne uzima u obzir problem orkestracije. Neki stariji radovi (npr. (Nareyek, 2004) iz 2004. godine) navode da su standardizirana sučelja među sustavima UI-ja nužna za njihovu olakšanu integraciju u igre te pružanje mogućnosti ponovnog korištenja, ali još uvijek takva sučelja nisu razvijena, ili ako i jesu, nisu potpuno primjenjiva na moderne tehnike UI-ja. Igre su specifične svojim zahtjevima prema UI-ju i posljedično metodama UHI-ja, npr. moraju raditi u stvarnom vremenu kako ne bi ometale iskustvo igranja, ansambli metoda moraju biti pravovremeno koordinirani kako bi osigurali konzistentno ponašanje igre ili njenih likova, a moraju biti i uvjerljive, kako ne bi postale površne i neozbiljne.

Pojam orkestracije aspekata kreativnosti u (Liapis, 2015) definiran je kao koncept koji "*cilja na kombiniranje generiranja kroz više domena kreativnosti koje su sastavni dio dizajna igara.*" Šest je osnovnih aspekata u računalnim igrama: (1) oblikovanje razina, (2) dizajn igara, (3) audio, (4) vizuali, (5) narativ i (6) iskustvo igranja, od kojih svi mogu imati koristi od metoda UHI-ja, kako je spomenuto ranije (vidi (Yannakakis i Togelius, 2018)). Kao što je već navedeno, glavni cilj aktualnog projekta je uspostavljanje valjane metodologije za orkestraciju metoda UHI-ja koja je iskoristiva u svim navedenim aspektima računalnih igara (uključujući ozbiljne igre i sustave igrifikacije). Uz to, pružit će i oblačnu platformu za izgradnju orkestriranih sustava UHI-ja za igre koja će se baviti i potrebama za uvjerljivim ansamblima koji su pravovremeno koordinirani. Novorazvijena platforma i metodologija bit će tijekom projekta testirane u najmanje četiri okruženja koja su povezana s računalnim igrama: (1) MMORPG igra, (2) igrificirana platforma potencijalno s virtualnim asistentima, (3) ozbiljna igra vezana za autonomna vozila te (4) holografsko-volumetrična (Ho/Vo) igrača platforma koja će biti razvijena.

Kako bi okvir za orkestriranje metoda UHI-ja bio razvijen, potrebno je obratiti pozornost na heterogenost metoda koje treba orkestrirati: takve metode mogu uključivati sve, od jednostavnih ekspertnih sustava do modela dubokih učećih neuronskih mreža, od optimizacije inteligencije roja do sustava za automatsko planiranje, od baza znanja temeljenih na pravilima do kompleksnih agenata za obradu prirodnog jezika. Plat-

forma koja omogućava organizaciju takvih metoda i njihovu suradnju mora biti distribuirana, robusna i skalabilna, poput platformi za obradu velikih količina podataka, s obzirom na to koliko podatkovno i procesorski zahtjevne neke od tih metoda mogu postati. Takva platforma mora pružiti standardizirano sučelje kojim se omogućava koordinacija između različitih korisnih metoda i omogućava kontinuiran tok podataka i poruka. Višeagentni sustavi pružaju prirodnu apstraktnu osnovu za izgradnju takvih sustava (Wooldridge, 2009), i već su se pokazali korisnima u razvoju sustava velikih razmjera (vidi (Schatten, Ševa i Tomičić, 2016) za detaljni pregled).

Tijekom spomenutog ModelMMORPG projekta razvijena je metodologija za modeliranje višeagentnih sustava velikih razmjera (VASVR) temeljenih na ontologiji (npr. (Schatten, 2014)) koja je korištena kao ulaz za stvaranje metamodela (Okreša Đurić, 2016) za jezik za grafičko modeliranje (Okreša Đurić, 2017a; Okreša Đurić, 2017b). Prikazano je da ontologija može biti integrirana s ostalim domenskim ontologijama kako bi se dodala semantika, npr. mrežne igre namijenjene većem broju igrača (engl. *massively multi-player online* (MMO)) (Okreša Đurić i Schatten, 2016; Okreša Đurić i Konecki, 2015), virtualna inteligentna okruženja (Okreša Đurić, Rincon i dr., 2018) ili čak i pametni gradovi (Tomičić, Okreša Đurić i Schatten, 2018). Stoga će, tijekom aktualnog projekta, biti razvijena dodatna ontologija za metode UHI-ja kao temelj za model VASVR-a distribuirane platforme za orkestraciju UHI-ja.

### 3 Konceptualni model

Ovdje je predstavljen okvir osnovne arhitekture planirane platforme za orkestraciju UHI-ja u obliku konceptualnog modela. Platforma za orkestraciju UHI-ja može konceptualno biti modelirana kao što prikazuje slika 1.

Konceptualni model prikazan na slici 1 vizualno je podijeljen na nekoliko elemenata. Distribuirana platforma za orkestraciju pruža skup sučelja, uključujući aplikacijsko programsko sučelje (engl. *application programming interface* (API)) za različite jezgre igara i administracijsko korisničko sučelje. Platforma, koja će biti implementirana kao višeagentni sustav, pruža balansiranje opterećenosti, alokaciju servisa i orkestraciju kroz podsustave za orkestraciju poput Docker Swarma ili Kubernetesa u smjeru skupa poslužitelja koji igraju ulogu holona (vidi (Horling i Lesser, 2005) za detalje o konceptu holarhije i holonskih organizacija gdje se svaki element može sastojati od većeg broja elemenata, tj. svaki holon može biti ili elementarni element (holon) ili organizirana grupa elemenata), što, s druge strane, omogućava dinamičko dodavanje novih holona tijekom izvođenja sustava. Elementarni holon, tj. elementarna instanca servisa, može se sastojati od brojnih drugih instanci servisa na, nižoj razini, iako i ti

servisi mogu biti samostalni elementarni holoni.

Svaki servis bi trebao biti implementiran kao jedan agent u višeagentnom sustavu. Isti će biti smješten u okruženju u kojem su i drugi agenti koji pružaju ostale neposredno vezane usluge. Ovo dijeljeno okruženje ne negira koncept distribuiranog sustava, s obzirom na to da agenti mogu biti fizički distribuirani čak i ako su dio istog inteligentnog virtualnog okruženja istog sustava. Svaki agent sadržan je na način da mora biti pokrenuti u sigurnom okruženju koje ne dopušta utjecaj vanjskih efekata, osim uobičajeno potrebne komunikacije s ostalim agentima sustava.

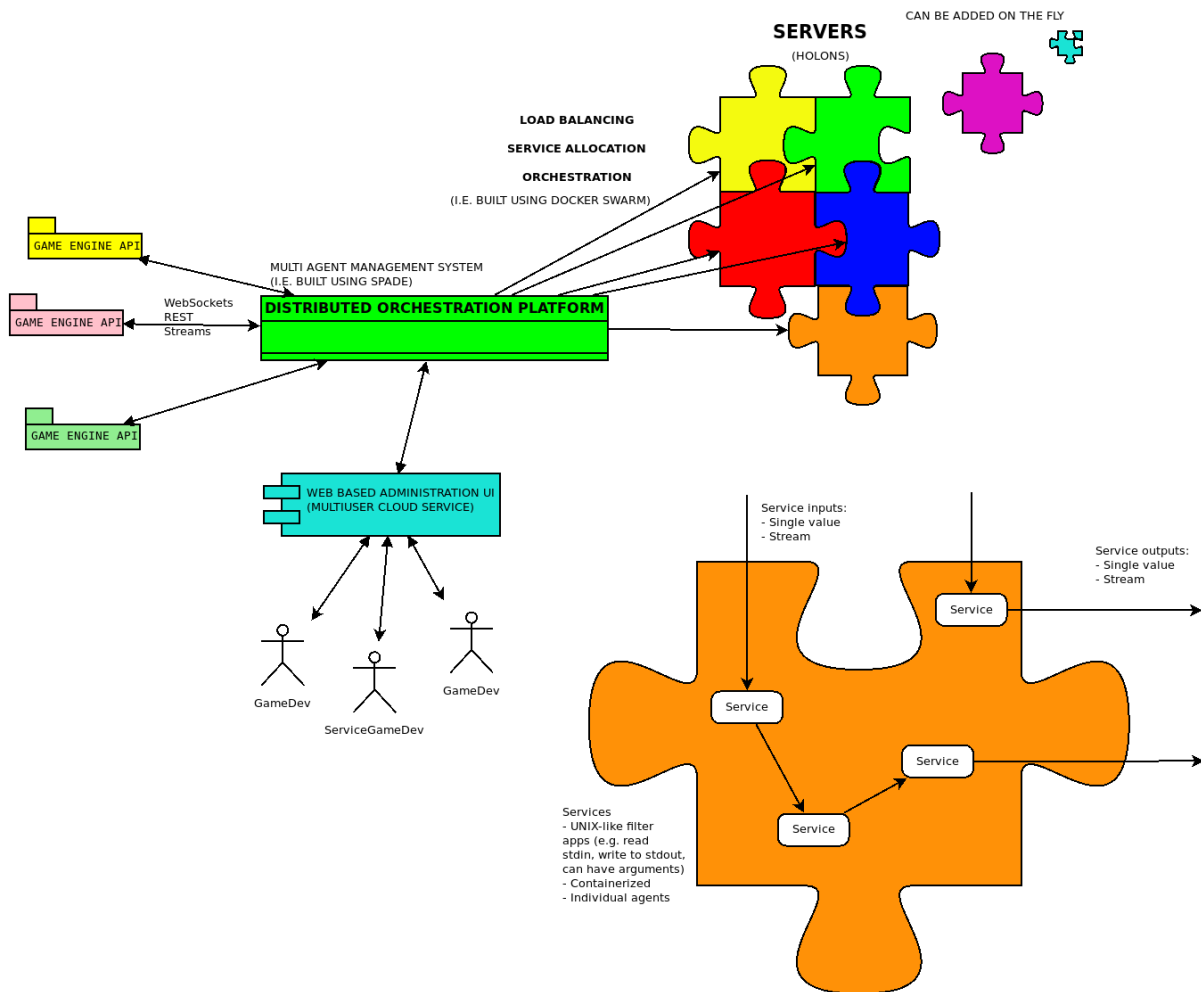
Primjenjivi servisi trebaju biti modelirani kao filter-aplikacije koje mogu koristiti standardne ulazne i izlazne kanale, zajedno s neobaveznim argumentima za detaljnije podešavanje procesa pojedinih servisa. Naravno, servisi moraju raditi sa standardiziranim ulazima i izlazima koji su standardizirani diljem sustava, a koji se sastoje od pojedinačnih vrijednosti u obliku skupa podataka koje holon treba obraditi ili struje podataka, čime se postavljaju temelji za implementaciju dinamičkog sustava koji radi u stvarnom vremenu, poput onih koje zahtijeva domena računalnih igara, kao što je opisano ranije u članku.

S obzirom na to da su pojedinačni servisi sadržani u kontejneru, prikladan implementacijski koncept je platforma za orkestraciju kontejnera, poput Docker Swarma ili Kubernetes. Takva je ideja motivirana učinkovitim značajkama balansiranja opterećenosti koja pruža mogućnosti pravovremenog alociranja servisa u stvarnom vremenu te orkestraciju gdje je ona potrebna. Uzimajući u obzir da distribuirana platforma za orkestraciju pruža više servisa temeljenih na holonima nego ih je potrebno u bilo kojem trenutku u vremenu, roj kontejnera (konkretno Docker Swarm) procijenjen je kao dobro rješenje za općenitu aplikacijsku domenu u dijelu istraživanja prikazanog u ovom radu.

Nadalje, sama distribuirana platforma za orkestraciju trebala bi biti implementirana kao višeagentni sustav, s obzirom na to da agenti mogu djelovati individualno, surađivati kad je suradnja potrebna, komunicirati i postizati dogovore korištenjem bilo kojih metoda komunikacije, uključujući pregovaranje i cjenkanje te mogu biti dinamički instancirani, tj. agenti mogu biti pokretani ovisno o postojećem opterećenju sustava ili nekog njegovog dijela i količine primljenih zahtjeva prema platformi.

### 4 Aplikacijske domene

Kao što je već spomenuto ranije, UI te posljedično metode UHI-ja, mogu biti korišteni u računalnim igrama za niz različitih zadataka poput (1) implementacije neigrajućih likova (engl. *non-player character* (NPC)) i suparnika, (2) automatiziranog igranja i testiranja igara, (3) generiranja sadržaja, kao i (4) analitike igara. U nastavu su okvirno prikazana četiri konkretna slučaja korištenja za svaku od upravo navedenih domena.



Slika 1: Konceptualni model na visokoj razini

#### 4.1 nteligentni suparnici u MMO igrama

MMO igre same po sebi predstavljaju složen zadatak za implementaciju, posebice iz perspektive performansi prilikom paralelne interakcije tisuća ili stotina tisuća igrača. Uobičajen pristup generiranju suparnika je korištenje jednostavnih metoda UI-ja poput konačnih automata ili stabala ponašanja kako bi se zadržala niska složenost pokretanja sustava i omogućilo fluidnije iskustvo igranja. Korištenjem hibridne platforme za orkestraciju zajedno s brojnim redundantnim servisima mogle bi se koristiti naprednije metode UHI-ja za implementaciju većeg broja inteligentnijih, a samim time i interesantnijih, suparnika. Novi suparnici mogli bi biti generirani dok je igra pokrenuta jednostavnim instanciranjem novih servisa (agenata) na platformi za orkestraciju. To bi dovelo do individualnih suparnika koji ne koriste ponašanja koja je lako predvidjeti, što bi rezultiralo mnogo realističnijim igrama.

#### 4.2 Automatsko testiranje velikih razmjera

Iako je testiranje performansi MMO igara dobro implementirano na brojnim platformama, testiranje iskustva

igranja (posebno u primjerice MMORPG igrama) velikog razmjera postaje iznimno složen zadatak, kao što je okvirno predstavljeno u (Schatten, Okreša Đurić, Tomičić i Ivković, 2017). Ne samo da je potrebno testirati razne logičke zagonetke i zadatke koje igrač mora riješiti kako bi napredovao u igri, već i pojavljujuću interakciju među igračima koja bi mogla u potpunosti promijeniti rezultat igre. Korištenjem distribuirane platforme za orkestraciju bilo bi moguće dodavanje automatiziranih igrača po volji instanciranjem novih agenata. Štoviše, rezultati testiranja mogli bi biti dodatno analizirani dodavanjem agenata za analizu ili izvješćavanje.

#### 4.3 Predviđanje heterogenog sadržaja u prijenosu igre

Platforme za prijenos igara uvaživo, poput Google Stadije ili NVidia GeForce Nowa dobivaju na značajnosti tek od nedavno. U kontekstu mrežnih igara za više igrača ili čak i MMO igara, takve platforme (ali i takve igre općenito) pate od sporosti izazvane mrežnom latencijom - npr. vrijeme od pritiska gumba na igračem upravljaču do rezultirajuće akcije unutar igre te njenog

prikaza na ekranima svih igrača nije nula, što je uzrokovano prijenosom podataka i vremenom potrebnim za obradu grafika i zvuka. Neke od jezgara igara stoga su od nedavno počele eksperimentirati s metodama UHI za predviđanje igrača na način da pokušavaju predvidjeti moguće sljedeće poteze igrača i generirati sve vjerojatne (vizualne, audio i slično) ishode. U trenutku kad pristigne stvarni paket s akcijom, generirani ishod automatski se šalje klijentima svih igrača. Korištenjem hibridne platforme za orkestraciju takav bi sustav za predviđanje bilo lakše implementirati, zato što bi novi ishodi za svakog igrača mogli biti generirani tijekom izvođenja igre jednostavnim dodjeljivanjem novog generirajućeg agenta svaki put kad se novi igrač pridruži igri.

#### 4.4 Analitika igrača i prilagodba igre

Analiziranje ponašanja igrača tijekom igranja i njihove interakcije s određenom igrom je od velikog interesa razvijateljima igara. Osim što takvi zapisi pružaju uvid u greške ili rupe koje je potrebno popraviti, oni pružaju i interesantan uvid u stvarnu interakciju igrača s igrom, kao i povratnu informaciju: što se igračima sviđa, što im se ne sviđa, gdje igrači provode najviše vremena i slično. Takvi podaci mogu biti iskorišteni za unapređenje igre, dok suvremeni razvoj UI-ja i podatkovnih znanosti omogućava automatiziranje dijela takvih poboljšanja, tj. neki dijelovi igre (poput, primjerice, onih koje igrači više vole) bi mogli biti obogaćeni dodatnim sadržajem i time učinjeni duljima. Korištenjem distribuirane platforme za orkestraciju za svakog bi igrača mogli biti uspostavljeni agenti za analizu i unapređenje, što bi omogućilo individualizaciju iskustva igranja igre.

### 5 Zaključak

Iako postoje brojna istraživanja koja se bave primjenjivošću umjetne hibridne inteligencije, ovdje ističemo da postoji nedostatak metodologije u orkestraciji metoda UHI-ja, što je tema ovog rada.

Uz predstavljanje pregleda suvremene literature na temu metoda umjetne hibridne inteligencije i njihovih aplikacijskih domena, s naglaskom na složene računalne igre, uveli smo konceptualni model visoke razine okvira za orkestriranje metoda UHI-ja koji bi trebao biti sposoban nositi se sa zahtjevima značajne razine heterogenosti metoda, zahtjeva u stvarnom vremenu, koji su distribuirani po prirodi, robusni i skalabilni. Odabrali smo višeagentne sustave kao prirodnu apstrakciju za izgradnju takvih sustava velikih razmjera, što je dokazano dobar i izvediv izbor.

Grafički smo predstavili promjenama podložan prikaz sustava koji će biti razvijen, a koji se općenito sastoji od distribuirane platforme za orkestraciju, API-ja, korisničkog sučelja, mehanizama za balansiranje opterećenja, alokaciju resursa, servisa za orkestraciju te

predloženu strukturu jedne instance usluge kao elementarnog holona ili višerazinske organizacije, koja treba biti implementirana kao jedan agent u višeagentnom sustavu.

Također smo predstavili brojne aplikacijske domene za takvu distribuiranu platformu za orkestraciju pružanjem četiri specifična slučaja korištenja u kojima bi takva platforma mogla poslužiti kao rješenje za značajne probleme implementacije igara i pružiti igrama nove i do sad neviđene mogućnosti.

Naše daljnje istraživanje fokusirat će se na implementaciju osnovne arhitekture ovakvog sustava kako bismo testirali razne tipove metoda UHI-ja u raznolikim tipovima igara, uključujući, ali ne ograničavajući se na, ozbiljne igre i igrifikaciju.

### Zahvala

Ovaj rad u potpunosti je podržan od strane projekta Hrvatske zaklade za znanost pod brojem IP-2019-04-5824.

### Literatura

- Armaghani, D. J. i dr. (2018). „Airblast prediction through a hybrid genetic algorithm-ANN model”. *Neural Computing and Applications* 29.9, str. 619–629.
- Azizi, A. (2019). „Hybrid artificial intelligence optimization technique”. *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Industry 4.0*. Springer, str. 27–47.
- Bui, K.-T. T. i dr. (2018). „A novel hybrid artificial intelligent approach based on neural fuzzy inference model and particle swarm optimization for horizontal displacement modeling of hydropower dam”. *Neural Computing and Applications* 29.12, str. 1495–1506.
- Chen, W. i dr. (2018). „Novel hybrid artificial intelligence approach of bivariate statistical-methods-based kernel logistic regression classifier for landslide susceptibility modeling”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, str. 1–23.
- Cook, M., S. Colton i A. Raad (2018). „Inferring Design Constraints From Game Ruleset Analysis”. *2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*. IEEE, str. 1–8.
- Dellermann, D. i dr. (2019). „Hybrid intelligence”. *Business & Information Systems Engineering*, str. 1–7.
- Fu, T. i C. Wang (2018). „A hybrid wind speed forecasting method and wind energy resource analysis based on a swarm intelligence optimization algorithm and an artificial intelligence model”. *Sustainability* 10.11, str. 3913.
- Funge, J. D. (2004). *Artificial intelligence for computer games: an introduction*. AK Peters/CRC Press.

- Horling, B. i V. Lesser (studeni 2005). „A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms”. *The Knowledge Engineering Review* 19.04, str. 281. ISSN: 0269-8889. DOI: 10 . 1017 / S0269888905000317.
- Jaafari, A. i dr. (2019). „Hybrid artificial intelligence models based on a neuro-fuzzy system and metaheuristic optimization algorithms for spatial prediction of wildfire probability”. *Agricultural and Forest Meteorology* 266, str. 198–207.
- Koopalipoor, M. i dr. (2018). „Applying various hybrid intelligent systems to evaluate and predict slope stability under static and dynamic conditions”. *Soft Computing*, str. 1–17.
- Li, M. i dr. (2018). „Prediction of pKa values for neutral and basic drugs based on hybrid artificial intelligence methods”. *Scientific reports* 8.1, str. 3991.
- Liapis, A. (2015). „3.5 Creativity Facet Orchestration: the Whys and the Hows”. *Artificial and Computational Intelligence in Games: Integration*, str. 217.
- Nareyek, A. (2004). „AI in computer games”. *Queue* 1.10, str. 58.
- Okreša Đurić, B. (2016). „Organizational metamodel for large-scale multi-agent systems”. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*. Springer, str. 387–390.
- (2017a). „A novel approach to modelling distributed systems: Using large-scale multi-agent systems”. *Software project management for distributed computing*. Springer, str. 229–254.
- (2017b). „Towards Modelling Organisational Dynamics for Large-Scale Multiagent Systems”. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*. Springer, str. 245–248.
- (2018). „Organizational Modeling of Large-Scale Multi-Agent Systems with Application to Computer Games”. Disertacija. Faculty of Organization i Informatics, University of Zagreb.
- Okreša Đurić, B. i M. Konecki (2015). „Specific owl-based rpg ontology”. *Central European Conference on Information and Intelligent Systems 26th International Conference*.
- Okreša Đurić, B., J. Rincon i dr. (2018). „MAMbO5: A new Ontology Approach for Modelling and Managing Intelligent Virtual Environments Based on Multi-Agent Systems”. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- Okreša Đurić, B. i M. Schatten (2016). „Defining ontology combining concepts of massive multi-player online role playing games and organization of large-scale multi-agent systems”. *2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE, str. 1330–1335.
- Schatten, M. (2014). „Organizational architectures for large-scale multi-agent systems’ development: an initial ontology”. *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 11th International Conference*. Springer, str. 261–268.
- Schatten, M., B. Okreša Đurić i dr. (2017). „Large-Scale Multi-Agent Modelling of Massively Multi-Player On-Line Role-Playing Games—A Summary”. *Central European Conference on Information and Intelligent Systems*.
- Schatten, M., B. Okreša Đurić, I. Tomičić i N. Ivković (2017). „Automated MMORPG Testing—An Agent-Based Approach”. *International conference on practical applications of agents and multi-agent systems*. Springer, str. 359–363.
- Schatten, M., B. Okreša Đurić, I. Tomičić i N. Ivković (2017). „Agents as bots—an initial attempt towards model-driven mmorpg gameplay”. *International conference on practical applications of agents and multi-agent systems*. Springer, str. 246–258.
- Schatten, M., J. Ševa i I. Tomičić (2016). „A roadmap for scalable agent organizations in the internet of everything”. *Journal of Systems and Software* 115, str. 31–41.
- Schatten, M., I. Tomičić i B. Okreša Đurić (2017). „A review on application domains of large-scale multi-agent systems”. *Central european conference on information and intelligent systems*.
- Tomičić, I., B. Okreša Đurić i M. Schatten (2018). „Modeling Smart Self-sustainable Cities as Large-Scale Agent Organizations in the IoT Environment”. *Smart Cities*. Springer, str. 3–23.
- Wang, M. i dr. (2018). „A novel hybrid method of forecasting crude oil prices using complex network science and artificial intelligence algorithms”. *Applied energy* 220, str. 480–495.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons.
- Yannakakis, G. N. i J. Togelius (2018). *Artificial intelligence and games*. Sv. 2. Springer.