

Pohľad umelej inteligencie a kognitívnej vedy na kolektívnu pamäť

Vladimír Kvasnička

Ústav aplikovanej informatiky, Fakulta informatiky a informačných technológií, Slovenská technická univerzita, 842 16 Bratislava, email: kvasnicka@fiit.stuba.sk.

Abstrakt

Práca sa zaoberá pohľadom umelej inteligencie a kognitívnej vedy na Halbwachsovu koncepciu „kolektívnej pamäti“ v sociálnych vedách, ktorá v súčasnosti patrí medzi často používaný prístup k interpretácii sociálnych javov a procesov. Ako určitý odraz tejto skutočnosti je, že koncepcia „kolektívnej pamäti“ sa stala v priebehu ostatných 10-15 rokov centrom pozornosti aj v umelej inteligencii ako efektívny prostriedok pre akceleráciu adaptívnych a evolučných procesov v multiagentových systémoch, ktorý umožňuje využitie histórie adaptívneho procesu k návrhu aktuálneho riešenia. Použitím pojmového aparátu teórie multiagentových systémov sme schopní pristúpiť k štúdiu koncepcie „kolektívnej pamäti“ v sociálnych vedách ako k fenoménu, ktorý emerguje v danom sociálnom systéme ako nová vlastnosť, ktorá je tvorená vznikom špeciálnej kultúrnej informácie, ktorá umožňuje prekonať medzigeneračné poznatkové bariéry a ktorá je vhodným prostriedkom k predikcii budúcich stavov systému na základe jeho histórie.

1 Úvodné poznámky o umelej inteligencii a kognitívnej vede a ich vzájomnému vzťahu

Hlavným cieľom tohto článku je oboznámiť čitateľov pôsobiacich v humanitných a sociálnych vedách s novým nekonvenčným informatickým prístupom, ktorý bude použitý na netradičnú interpretáciu koncepcie „kolektívnej pamäti“, ktorá sa v súčasnosti často využíva v sociálnych a humanitných vedách ako efektívna metafora k vysvetleniu kohézivitu sociálnych skupín.

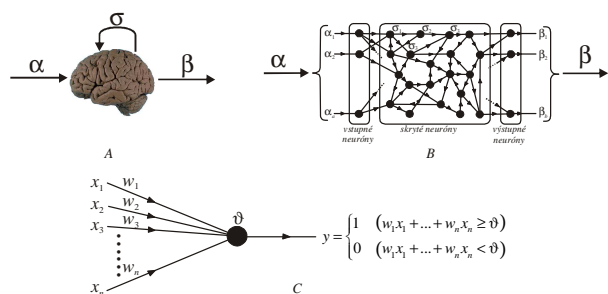
Tento informatický pohľad je založený na dvoch moderných vedných disciplínach: umelej inteligencii, ktorá patrí do informatiky, a multidisciplinárnej kognitívnej vedy, ktorá študuje všeobecné zákonitosti ľudskej kognície. K špecifikácii obsahu týchto moderných vedných oblastí a ich vzájomnému vzťahu musím urobiť krátku exkurziu do ich histórie.

Umelá inteligencia patrí do oblasti informatických vied (môžeme povedať, že je integrálnou súčasťou informatiky), vznikla v r. 1956, keď na pôde Darmouthskeho kolégia (Darmouth College v USA) informatik John McCarthy (tvorca programovacieho jazyku LISP, ktorý práve nedávno zomrel v októbri 2011, ako 84 ročný) organizoval letnú

školu, na ktorú pozval M. Minskeho, C. Shannona, A. Samuela, známu dvojicu vtedy ešte neinformatikov A. Newella a H. Simona, a ďalších odborníkov, ktorí sa zaoberali riešením komplikovaných problémov vyžadujúcich ľudskú inteligenciu. Pri návrhu grantu na podporu tejto akcie McCarthy použil termín „umelá inteligencia“ a špecifikoval ju ako tú oblasť informatiky, ktorá sa zaoberá riešením zložitých problémov (hra šachu alebo dámy, riešenie zložitých problémov, porozumeniu ľudskej reči, a pod.). Minsky prednášal o svojom výskume v neuronových sieťach, Shannon prezentoval svoje výsledky o teórii logických obvodov založenej na Booleovej algebre, Samuel prednášal o programe, ktorý napísal na jednom z prvých komerčne predávaných počítačov IBM 701 a ktorý bol schopný hrať dámu na veľmajstrovskej úrovni. Newel a Simon prednášali o počítačovom programe „Logic Theorist“, ktorý bol schopný dokázať všetky tautológie (zákony) výrokovej logiky z Whiteheadovej a Russellovej monumentálnej Principia Mathematica. V súčasnosti je umelá inteligencia už dobre etablovanou informatickou disciplínou, u nás na Slovensku sa dokonca dá študovať umelá inteligencia ako samostatný odbor inžinierskeho a doktorandského štúdia na košickej technike.

História kognitívnej vedy nie je taká priamočiara ako história umelej inteligencie (Friedenberg, Silverman, 2006). Jej vznik sa datuje približne do rovnakého obdobia, ako vznik umelej inteligencie, keď sa stalo evidentným (30. a 40. roky minulého storočia), že kognitívne procesy môžu byť študované nielen psychologickými metódami, ale ich plné a vyčerpávajúce pochopenie vyžaduje využitie aj iných vedných oblastí. Jedná sa o interdisciplinárnu vednú oblasť (kde sa obvykle uvádzajú tieto participujúce disciplíny: umelá inteligencia, neuroveda, psychológia, lingvistika, a filozofia), ktorá študuje myseľ a jej procesy. Zahŕňa výskum informačných procesov akými sú vnímanie, jazyk, pamäť, usudzovanie, riešenie problémov, a pod. Skúmanie týchto procesov v kognitívnej vede vychádza z neurovedného základu, pre ktorý je ľudský mozog obrovská neuronová sieť obsahujúca niekoľko miliárd nervových buniek – neuronov, ktoré sú medzi sebou poprepájané synapsiami (nervovými spojmi, ktoré sú schopné jednosmerne prenášať binárne signály pomocou elektrochemických procesov). Mozog môžeme interpretovať ako mohutný paralelný počítač realizovaný neuronovou sieťou, ktorý transformuje vstupnú informáciu □ na výstupnú informáciu □ ,

pričom táto transformácia je ovplyvňovaná vnútorným stavom σ (pozri obr. 1).

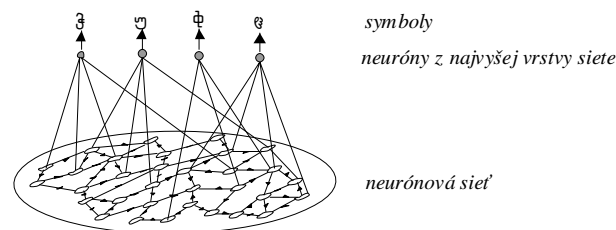


Obrázok 1. Diagram A znázorňuje kybernetickú interpretáciu mozgu zavedenú N. Wienerom v polovici 40 rokov minulého storočia. Mozog je interpretovaný ako systém - čierna skrinka ktorá transformuje vstup α (signály perceptívnych neurónov) na výstup β (signály motorických neurónov), pričom transformácia závisí na vnútornom stave σ systému - mozgu; formálne môžeme túto skutočnosť vyjadriť formulou α , kde funkcia F je určená vnútornou štruktúrou systému. To znamená, že pre dva rôzne vnútorné stavy, $\sigma_1 \neq \sigma_2$

odozva na rovnaký vstup α môže byť rôzna, $\alpha_1 \neq \alpha_2$. Diagram B je reprezentáciou predchádzajúcej schémy pomocou neurónovej siete, ktorá je zložená z jednoduchých výpočtových zariadení nazývaných neuróny, vnútorný stav neurónovej siete je určený aktivitami vnútorných neurónov. Štruktúra (tiež sa používa termín topológia) tejto neurónovej siete jednoznačne špecifikuje funkciu F , ktorá u Wienera bola formulovaná pomocou fenomenologického modelu systému. Diagram C špecifikuje elementárne výpočtové zariadenie - neurón, ktorý obsahuje n vstupných spojov - dendritických synapsí, ktoré majú binárne (t. j. 0 alebo 1) aktivity x_1, x_2, \dots, x_n , pričom každý spoj je ohodnotený váhovým koeficientom w_i , ak je tento koeficient $w_i = 1$ (tzv. excitačný spoj) alebo $w_i = -1$ (tzv. inhibičný spoj), neurón je špecifikovaný prahovým koeficientom ϑ . Aktivita y výstupného spoja - axóna sa rovná 1, ak vážená suma vstupných aktivít je väčšia alebo rovná prahovému koeficientu ϑ , v opačnom prípade je nulová.

Tento „informatický“ model mozgu bol prvý krát teoreticky študovaný v r. 1943 W. McCullochom a W. Pittsom (1943) pri návrhu konštrukcie neurónovej siete s jednoduchými prahovými neurónmi (pozri diagram C, obr. 1). Takto zosťrožená neurónová sieť mala zaujímavú a objavnú vlastnosť, je univerzálnym výpočtovým zariadením v doméne boolových funkcií. Poznamenajme, že popis práce neurónu na princípe „všetko alebo nič“ pochádza s prelomu 20-30 rokov minulého storočia keď anglický elektrofyziológ a lekár Sir Adrian sledoval výstupnú aktivitu neurónu pomocou, na tú dobu, veľmi moderného elektronického vybavenia, svoje experimentálne výsledky formuloval pomocou pravidla „všetko alebo nič“ (angl. „all or nothing“), ktoré je znázornené aj na diagrame C, obr. 1.

Zmienaná publikácia McCullocha a Pittsa (1943) je považovaná historikmi vedy za jeden z počiatkov nielen umelej inteligencie ale aj kognitívnej vedy, v tejto práci bola vytvorená koncepcia neurónovej siete, ktorá sa neskoršie ukázala ako mimoriadne vhodný prostriedok na štúdium centrálneho problému kognitívnej vedy - štúdium vlastností mysle v celej jej šírke a hĺbke.



Obrázok 2. Smolenského (1987) idea hierarchicky usporiadanej neurónovej siete, kde neuróny z najvyššej vrstvy reprezentujú symboly.

Podľa jednej zo základných paradigiem modernej kognitívnej vedy (Friedenberg, Silverman, 2006) je predstava, že ľudský mozog je počítač, ktorý pracuje podľa týchto princípov (ktoré tvoria základ tzv. symbolickej paradigmy kognitívnej vedy, Smolensky, 1987), pozri obr. 2: transformuje symboly pomocou syntaktických pravidiel na iné symboly, pričom myšlienky sú symbolické reprezentácie implementované pomocou jazyka myslenia, a mentálne procesy sú kauzálne sekvencie symbolov generované syntaktickými pravidlami.

Použitie termínu „počítač“ obvykle evokuje predstavu sekvenčného počítača von neumannovskej architektúry (napr. personálne počítače majú túto architektúru), kde je možné striktno oddeliť hardware od software; kde na tom istom počítači - hardware môže byť vykonávaných nepreberné množstvo rozdielnych programov - softwarov. Pre tieto počítače existuje striktná dichotómia medzi počítačom a programom - t. j. medzi hardwarom a softwarom. Žiaľ, paradigma mysle ako počítača implikuje u mnohých ľudí predstavu, že je možné oddeliť mozog od mysle, ako dva „nezávislé“ fenomény, kde mozog hrá úlohu hardwaru, zatiaľ čo myseľ je software (vykonávaný na hardwaru - mozgu).

Obráťme našu pozornosť na moderný neurovedný prístup k chápaniu vzťahu medzi mozgom a myslou (Friedenberg a spol., 2006; Gáliková, 2009a, 2009b), ktorý je založený na neurovednom (hovoríme tiež o konekcionistickom) poňatí tak mozgu, ako aj mysle. Základná predstava o mozgu (založená na experimentálnych neurovedných poznatkoch) je, že je tvorený z neurónov navzájom poprepájaných pomocou jednosmerných synaptických spojov. Ľudský mozog vykazuje neobvyčajnú plasticitu (pozri diagram B, obr. 1) (Kvasnička a spol., 1997; Rojas, 1996), v priebehu učenia neustále vznikajú (ale taktiež aj zanikajú) synaptické spoje. Architektúra mozgu je určená spojmi

- konexiami medzi neurónmi, ich inhibičným alebo excitačným charakterom. Možno konštatovať, že schopnosť mozgu vykonávať nielen kognitívne aktivity, ale byť aj pamäťou, je plne zakódovaná do jeho architektúry. Na základe týchto neurovedných poznatkov bazálneho charakteru môžeme konštatovať, že počítačová paradigma ľudského mozgu sa musí formulovať tak, že mozog je paralelne distribuovaný počítač (obsahujúci mnoho miliárd neurónov, elementárnych procesorov, ktoré sú medzi sebou poprepájané do zložitej neurónovej siete). Program v tomto paralelnom počítači je priamo zabudovaný do architektúry neurónovej siete, t. j. ľudský mozog je jednúčelový paralelný počítač reprezentovaný neurónovou sieťou, ktorý nie je možné preprogramovať bez zmeny jeho architektúry. Z týchto všeobecných úvah vyplýva, že myseľ s mozgom tvoria jeden integrálny celok; myseľ je v tomto prístupe možné chápať ako program vykonávaný mozgom, avšak tento program je špecifikovaný architektúrou distribuovanej neurónovej siete reprezentujúcej mozog. Mozog a myseľ tvoria dva rôzne pohľady na ten istý objekt: Keď hovoríme o mozgu, myslíme tým „hardwarovú“ štruktúru, biologicky realizovanú neurónmi a ich synaptickými spojmi (formálne reprezentovanú neurónovou sieťou), v opačnom prípade, keď hovoríme o mysli, myslíme tým kognitívne a iné aktivity mozgu, realizované výpočtami neurónovej siete reprezentujúcej mozog.

Na záver tejto úvodnej kapitoly uvedieme niekoľko poznámok o vzťahu medzi umelou inteligenciou a kognitívnou vedou. Už priamo z definície kognitívnej vedy ako interdisciplinárneho pohľadu na myseľ vyplýva, že umelá inteligencia spolu s neurovedou tvoria dôležité súčasti tohto pohľadu. Umelá inteligencia už viac ako polstoročie sa intenzívne zaoberá rôznymi problémami ľudskej mysle, pričom intenzívne využíva inšpirácie z neurovedy a kognitívnej vedy. Tak napríklad, technika neurónových sietí je v súčasnosti integrálnou časťou umelej inteligencie, kde spolu s evolučnými algoritmi a fuzzy logikou tvorí teoretický základ tzv. výpočtovej inteligencie, ktorá v súčasnosti slávi veľké úspechy pri riešení inžinierskych problémov riadenia zložitých systémov. Môžeme konštatovať, že v súčasnosti je vzťah medzi umelou inteligenciou a kognitívnou vedou veľmi úzky, skutočnosť, že sa medzi nimi rozlišuje ma väčšinou buď historické a/alebo personálne dôvody. Tento úzky vzťah medzi umelou inteligenciou a kognitívnou vedou je markantne „viditeľný“ napr. v humanoidnej robotike, kde dochádza k veľkému prekryvu medzi umelou inteligenciou a kognitívnou vedou a kde sa diskutujú filozoficko-etické problémy robotov podobných človeku nielen svojim výzorom ale hlavne ich kognitívnymi schopnosťami. Tieto problémy boli donedávna hlavne doménou humanitne orientovaných odborníkov, ale v súčasnosti sa stali súčasťou každodennej výskumne práci inžinierskych

pracovníkov. Katedra aplikovanej informatiky na FMFI UK v Bratislave zabezpečuje magisterskú výučbu kognitívnej vedy, a taktiež, na FIIT STU v Bratislave a FEI TU v Košiciach sa existujú prednášky a semináre z kognitívnej vedy v rámci inžinierskeho a doktorandského štúdia.

2 Kolektívna pamäť

Kolektívna pamäť, tak ako bola prvý krát zavedená M. Halbwachsom (1992) a taktiež ako je aj interpretovaná v sociálnych vedách (menovite v sociológii) (Assmann, 2008; Manier et al., 2008;), sa chápe ako špeciálny a unikátny typ pamäti, ktorý sa líši od obvyklých kognitívno-neurovedných typov pamätí (Roediger III et al., 2007; Rojas, 1996). Pod kolektívnou pamäťou rozumieme takú pamäť, ktorá tvorí distribuovaný systém jednotlivých mozgov – myslí – pamätí patriacich do relevantnej sociálnej skupiny a ktorá je (pamäť) súčasťou jej aktuálnej kultúry (Assmann, 2008). Aj napriek tomu, že podstatné časti kolektívnej pamäti sú „umiestnené“ v jednotlivých mozgoch, jej vznik a pretrvávanie sa považuje za emergentnú kolektívnu vlastnosť danej sociálnej skupiny, ktorá zvyšuje jej kohezivitu. Patrí medzi základné atribúty sociálnej skupiny, ktoré ju špecifikujú a ktoré sú prenášané negenetickými (kultúrnymi) metódami v priebehu života jednotlivých ľudí skupiny. Z toho pohľadu má koncepcia kolektívnej pamäti mnoho spoločného s memetickým prístupom evolučného biológa R. Dawkinsa (Dawkins, 1976; Blackmore, 1999) tak, ako je v súčasnosti chápaný (Kvasnička a spol., 2003).

Pomocou webovských prehliadačov ľahko zistíme, že na Internete má výskyt pojmu "kolektívna pamäť" dve maxima, jedno maximum je v sociálnych vedách a druhé maximum je v umelej inteligencii. Môže nás toto zistenie prekvapiť, že v tak disjunktných vedných oblastiach existuje spoločný odborný termín s veľmi vysokou frekvenciou používania? Reflexívnym vysvetlením tejto skutočnosti môže byť názor, že sa jedná o dve úplne odlišné veci, ktoré spolu nesúvisia (až na ich verbálnu podobnosť). Avšak je potrebné na tomto mieste zdôrazniť, že moderná umelá inteligencia, hlavne zásluhou jej časti tvorenou teóriou multiagentových systémov, sa stala schopnou vykonávať teoretické štúdie a počítačové simulácie rôznych javov a procesov prebiehajúcich v sociálnych systémoch a ktoré súvisia s koncepciou kolektívnej pamäti. Z tohto pohľadu sa teda nejedná o náhodu, že sa rovnaký pojem vyskytuje dvoch diametrálne odlišných vedných oblastiach, v informatike a v sociálnych vedách.

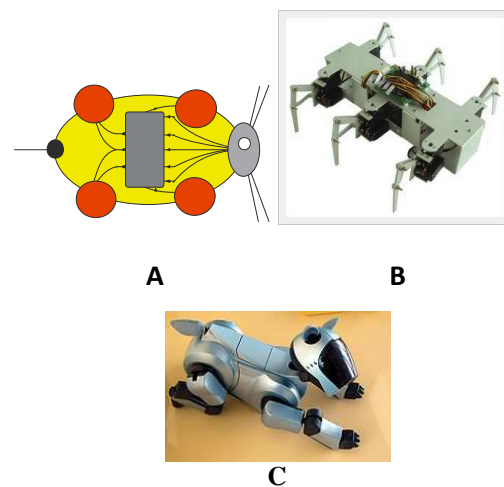
Súčasne možnosti prieniku prístupov umelej inteligencie do sociálnych vied sú však nepomerne väčšie než tie, aké boli pred 20-30 rokmi, keď prebiehal známy (žiaľ, nie moc úspešný) „experiment“ s použitím synergetickej fyzikálnej terminológie v sociálnych vedách (Krempaský, 1988; Schenk, 1993).

Moderný informatický odbor umelá inteligencia vypracoval teoretický aparát, ktorý je mimoriadne vhodný (a k tomu bol vlastne zostrojený) k štúdiu vzniku (hovoríme emergencie) sociálnych štruktúr v systémoch, ktoré obsahujú veľké množstvo podobných elementov – indivíduí - agentov, ktoré sa správajú "racionálne" na základe určitých pravidiel, ktoré sú im imanentne vlastné - môžeme povedať, že predpísané. Tento prístup, ktorý sa nazýva "multiagentový systém" (Wooldridge, 2000; Wooldridge, 2002), v súčasnosti patrí medzi búrlivo sa rozvíjajúce oblasti umelej inteligencie, s množstvom efektívnych aplikácií v rôznych oblastiach nielen informatiky ale aj mimo nej. Možno konštatovať, že multiagentový prístup zmenil paradigmu výskumu systémov, ktoré obsahujú množstvo podobných elementov – agentov a ktoré medzi sebou interagujú na základe jednoduchých pravidiel typu "ak..., potom...". Tieto štúdie multiagentových systémov patria do triedy počítačových simulácií, kde priebeh "adaptívneho" procesu sa dá dobre sledovať pomocou rôznych parametrov a počítačovej grafiky. Na Slovensku sa zaoberá aplikáciami multiagentových systémov v sociálnych vedách sociológ prof. Juraj Schenk (Schenk, 2011).

Koncom minulého storočia bolo publikovaných mnoho prác z multiagentových systémov, ktoré sa zaoberali štúdiom emergencie kooperácie, komunikácie, sociálnych štruktúr a pod. v týchto systémoch. Menovite zásluhou amerického politológa R. Axelroda (Axelrod, 1984) bolo ukázané, že sa jedná o neobyčajne plodný smer rozvíjania interdisciplinárnej spolupráce medzi politológiou a umelou inteligenciou, kde „kooperácia“ medzi antagonistickými - sebeckými agentmi vzniká ako výsledok racionálnych dôvodov jej výhodnosti. To znamená, že rôzne ideologické špekulatívne dôvody vzájomnej výhodnosti alebo nevýhodnosti spolupráce sú nahradené racionálnou argumentáciou založenej na multiagentovom prístupe.

V ďalšej etape histórie multiagentových systémov (90. roky minulého storočia) bola jednoduchá forma intencionálnych agentov, ktorí vykonávajú reflexívne úzko špecifikované aktivity zovšeobecnená na sofistikovanejších agentov majúcich už individuálnu myseľ reprezentovanú informačnou databázou zloženou z užitočných poznatkov, pomocou ktorej sa agenti samostatne nereflexívne rozhodujú či vykonajú alebo nevykonajú nejakú aktivitu. Toto významné zovšeobecnenie multiagentového prístupu môže byť chápané, ako určitá špecifická verzia použitia memetického princípu, ktorý do evolučnej biológie už pred viac ako 30 rokmi zaviedol R. Dawkins v jeho slávnej knihe *The Selfish Gene* (Dawkins, 1976) (pozri tiež Blackmore, 1999), kde prezentoval svoje predstavy o radikálnom neodarwinizme. Dawkins v tejto knihe (v 7. kapitole) rozšíril pojem génu (alebo genotypu) o ďalšiu zložku, ktorá obsahuje informáciu, ktorá mení fitness daného agenta (napr. informácie o prostredí, jeho

regularitách alebo irregularitách, a pod). V tomto prístupe je evolučný princíp nahradený koevolučným, kde prebieha koevolúcia genotypu a „memotypu“, dochádza k spoločnej adaptácii oboch zložiek tohto rozšíreného 2-zložkového genotypu. Táto evolučná zmena memotypu je považovaná v memetike za príklad evolučného vzniku kultúry. Poznamenajme, že prvé snahy rozšíriť vlastnosti multiagentových systémov o individuálnu pamäť reprezentovanú databázou poznatkov, ktoré pomáhajú prežiť agentom v populácii (čiže ovplyvňuje ich fitness), boli urobené (Kvasnička, 2003) autorom tejto state pred 10 rokmi pre aplikáciu multiagentového prístupu k formulácii memetiky.



Obrázok 3. Rôzne reprezentácie agentov. (A) Hypotetický agent, ktorý obsahuje percepčný orgán (vidí), výstupy z tohto orgánu vstupujú do kognitívneho orgánu – mozgu, motorické výstupy z tohto mozgu riadia pohybové orgány agenta. (B) Mechanicko-elektronický agent – šváb, ktorý sa dokáže v prostredí pohybovať pomocou 6 nôh a optickým zariadením (zrakom) vníma okolie. Pohyb agenta je riadený malou neurónovou sieťou. (C) Japonská robotická hračka pes Aibo, dokáže sa pohybovať, vníma svoje okolie, vníma hlasové povely, atď.

Cieľom tejto práce je diskutovať koncepciu kolektívnej pamäti v rámci multiagentového prístupu (Wooldridge, 2000, 2002), poukázať na skutočnosť, že tento prístup k existencii pamäti v multiagentových systémoch je veľmi blízky ku koncepcii kolektívnej pamäti tak, ako sa používa v sociálnych vedách, pričom jeho hlavný význam spočíva v tom, že akceleruje procesy adaptácie v multiagentovom systéme (Kvasnička, Pospíchal, 2014). Verím, že multiagentový prístup k štúdiu tak individuálnej ako aj kolektívnej pamäti poskytuje efektívny a jednoduchý interdisciplinárny formalizmus, ktorý sa pomerne ľahko dá aplikovať v sociálnych vedách.

3 Agenti s mysl'ou

V predchádzajúcej časti tejto práce boli špecifikovaní najjednoduchší agenti, ktorých inteligencia bola ohraničená len na vykonávanie predpísaných – reflexívnych aktivít spolupracovať alebo nespôlpracovať s nejakým iným agentom, vyhýbať sa prekážkam alebo zbierať potravu v blízkom okolí, a pod. V tejto kapitole popíšeme vlastnosti agentov, ktorý už majú „elementárnu myseľ“, ktorá je tvorená (1) pamäťou (reprezentovanou množinou poznatkov, nazývanou v matematickej logike teória) a (2) inferenčným aparátom, pomocou ktorého je schopný agent vykonávať nad teóriou rozšírenou pozorovaním o nové poznatky jednoduché usudzovanie.

3.1 Symbolická špecifikácia mysle agenta

K špecifikácii mysle použijeme jednoduchý symbolický prístup založený na elementárnej prvorádovej logike (Kvasnička, Pospíchal, 2006). Postulujeme, že v multiagentovom systéme $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ každý agent $A \in \mathcal{A}$ obsahuje teóriu - množinu poznatkov $T_A = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots\}$ (kde $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ sú formule prvorádovej logiky, ktoré reprezentujú poznatky agenta) a inferenčný aparát reprezentovaný reláciou logického vyplývania \vdash_A . Inferenčný aparát môže byť reprezentovaný elementárnymi zákonmi r_1, r_2, r_3, \dots prirodzenej dedukcie (Kvasnička, Pospíchal, 2006), tak napr. obsahuje pravidlá modus ponens a modus tollens, hypotetický sylogizmus, konkretizácia univerzálneho kvantifikátora a pod.

$$\vdash_A = \left\{ \underbrace{p \Rightarrow q}_{r_1}, \underbrace{p \Rightarrow q, \neg q}_{r_2}, \underbrace{p \Rightarrow q, q \Rightarrow r}_{r_3}, \underbrace{(\forall x)P(x), P(t)}_{r_4}, \dots \right\}$$

(1)

Použitím tohto inferenčného aparátu je agent schopný dedukovať na základe pozorovania $\Delta = \{\psi_1, \psi_2, \dots\}$, kde ψ_1, ψ_2, \dots sú poznatky tohto pozorovania, nový poznatok χ

$$T_A \cup \Delta \vdash_A \chi \quad (2)$$

Formálne, myseľ agenta A je špecifikovaná usporiadanou dvojicou $\mathcal{M}_A = (T_A, \vdash_A)$, t. j. myseľ je špecifikovaná pamäťou tvorenou množinou poznatkov T_A a inferenčnou reláciou \vdash_A . Môžeme povedať, že teória tvorená poznatkami reprezentuje individuálnu pamäť agenta a inferenčná relácia reprezentuje mozog, ktorý je schopný usudzovať.

3.2 Revízia poznatkov

Problém revízie poznatkov má vo filozofii a v logike dlhú tradíciu. Stal sa integrálnou súčasťou mnohých

traktátov a monografií z filozofie poznania (epistemológie) a logiky od staroveku až po súčasnosť, ktoré obsahovali rozsiahle kapitoly, kde väčšinou na fenomenologicko-špekulatívnej úrovni sa formulovali zásady nášho myslenia, argumentácie a zmeny poznatkov vyplývajúcich zo zmien východiskových predpokladov, ich rozšírenia alebo čiastočnej falzifikácie. Táto zaujímavá problematika sa stala súčasťou aplikovanej matematickej logiky až koncom minulého storočia, kedy jej formálny aparát bol použitý na formuláciu teórie revízie poznatkov. Taktiež, problém revízie poznatkov sa stal v súčasnosti integrálnou časťou informatiky a umelej inteligencie a tým musel prejsť z roviny všeobecno-špekulatívnej k rovine formálno-exaktnej, ktorá môže slúžiť ako základ algoritmizácie problematiky revízie poznatkov na počítačoch.

Tak napríklad, ak chceme špecifikovať základné epistemické princípy vývinu vedy, dynamiku jej vývoja v čase, tento cieľ môže byť realizovaný na abstraktnej úrovni tak, že študujeme danú konzistentnú databázu poznatkov. Táto databáza je v čase postupne modifikovaná elementárnymi operáciami, akými sú dodanie nového poznatku a odstránenie pôvodného poznatku. V oboch prípadoch tieto operácie zmeny môžu ovplyvňovať ostatné poznatky, preto sa vykonáva ich revízia, aby sa odstránili prípadné nekonzistentnosti. V počiatčnom období vzniku teórie revízie poznatkov (80. roky minulého storočia) základné idey boli formulované švédskym kognitívnym vedcom Petrom Gärdenforsom (1992) a dvojicou amerických logikov Carlosom Alchourrónom a Davidom Makinsonom, ktorí spoločne v r. 1985 publikovali v Journal of Symbolic Logic významnú prácu (Alchourrón, Gärdenfors, Makinson, 1985) (ktorá sa v odbornej literatúre označuje akronymom AGM počiatočných písmen ich priezvisk v abecednom poriadku jej autorov), v ktorej formulovali základné princípy, koncepcie a konštrukcie teórie revízie poznatkov.

Poznamenajme, že myseľ \mathcal{M}_A nie je konštantnou – nemennou v priebehu existencie agenta A , ale môže sa meniť prostredníctvom procesu revízie, kde sa buď pridáva alebo uberá nejaký poznatok tak, aby výsledná pamäť bola konzistentná. Budeme rozlišovať tieto štyri spôsoby revízie databázy poznatkov T :

(1) **Expanzia**, nové poznatky, reprezentované formulami z konzistentnej množiny \tilde{T}' sú dodané do pôvodnej konzistentnej teórie T , za vzniku novej konzistentnej teórie $T' = T \cup \tilde{T}'$, čo indukuje rozšírenie jej logických dôsledkov o nové poznatky, ktoré sú logickým dôsledkom rozšírenej teórie Φ' . Databáza poznatkov priradená rozšírenej teórii Φ' je označená

$$T_{\tilde{T}'}^{(+)} =_{def} T \cup \tilde{T}' \quad (3)$$

(2) **Kontrakcia**, minimálna podmnožina $\Delta \subseteq T$ je odstránená z nekonzistentnej teórie T za vzniku maximálnej konzistentnej podmnožiny – teórie $T' = T - \Delta$. Databáza poznatkov priradená zúženej teórii T' je označená

$$T_{\Delta}^{(-)} =_{def} T - \Delta \quad (4)$$

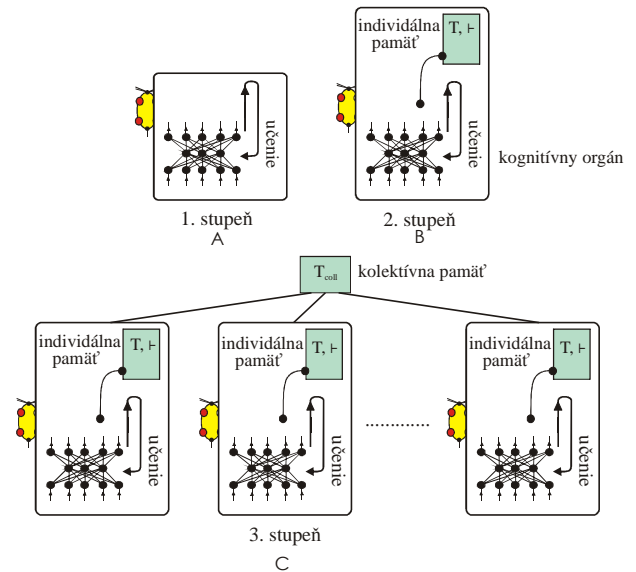
(3) **Revízia** je kombináciou predchádzajúcich dvoch operácií expanzie a kontrakcie, pôvodná konzistentná teória T je expanziou rozšírená o nové poznatky z \tilde{T} , čím sa stane nekonzistentnou, z takto rozšírenej teórie je pomocou kontrakcie odstránená podmnožina $\Delta \subseteq T \cup \tilde{T}$, výsledkom tohto procesu je konzistentná teória $T' = (T \cup \tilde{T}) - \Delta$. Pôvodná databáza T priradená modifikovanej rozšírené – zúženej teórii T' je označená

$$T_{T,\Delta}^{(+,-)} =_{def} (T \cup \tilde{T}) - \Delta \quad (5)$$

(4) **Spájanie** poznatkov T_1, T_2, \dots, T_n do jedného spoločného poznatku prebieha tak, že všetky prijaté poznatky spojíme do jednej množiny $T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_n$, v prípade jej nekonzistentnosti hľadáme takú minimálnu množinu poznatkov, ktorú keď odstránime zo zjednotenej množiny, potom výsledná množina (teória) je konzistentná.

$$merge(T_1, T_2, \dots, T_n) =_{def} (T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_n) - \Delta \quad (6)$$

Pre ilustráciu tohto prístupu, predstavme si multiagentový systém, kde úlohou každého agenta – prieskumníka je zbierať poznatky o danom prostredí (napr. ako sú rozložené prekážky, potrava a ostatní agenti). Po určitom čase agent sa vráti do „centrály“ a odovzdá svoje poznatky agentovi – integrátorovi, ktorý má na starosti spájanie poznatkov získaných od rôznych agentov – prieskumníkov do jednej databázy poznatkov o danom prostredí. Môže sa stať, že poznatky získané dvoma rôznymi agentmi sú navzájom kontroverzné, t. j. agent – integrátor stojí pred neľahkou úlohou rozhodnúť sa, ktoré poznatky budú/nebudú použité pri vytváraní spojenej databázy poznatkov. Problém spájania poznatkov do jednotného väčšieho celku – spojenej databázy poznatkov – patrí v umelej inteligencii medzi základné problémy distribuovanej inteligencie (napr. multiagentových systémov). Tento problém môžeme byť v rámci výrokovej (alebo aj predikátovej) logiky jednoducho formalizovaný, pričom na sémantickej úrovni môžeme špecifikovať „mimologické“ prostriedky ako riešiť nekonzistentnosti vyskytujúce sa pri spájaní nových poznatkov.



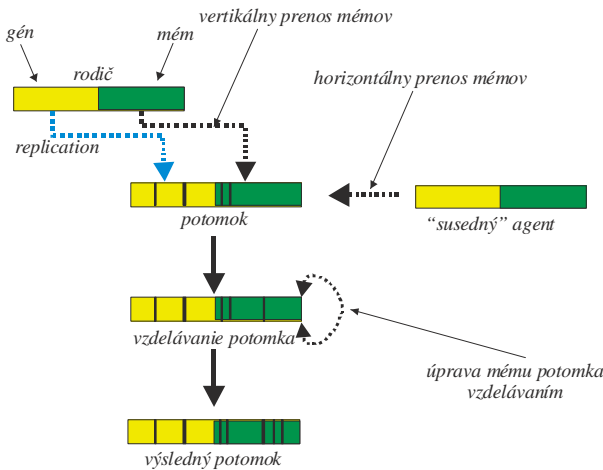
Obrázok 4. Diagramatická ilustrácia troch stupňov zložitosti agentov (mysleľ je na diagramoch reprezentovaná databázou poznatkov T a inferenčnou reláciou vyplývania \vdash). (A) Diagram znázorňuje prvý stupeň agenta, ktorý má jednoduchú neurónovú sieť, ktorá nie je pamäťou. Aktivity v multiagentovom systéme sú plne špecifikované jeho neurónovou sieťou, ktorá je plne špecifikovaná jeho genotypom, t. j. inštinkty sú plne reflexívneho charakteru, fitness agenta je plne určené len zložením genotypu. Prebiehajúce učenie má charakter adaptácie štruktúry neurónovej siete tak, aby presnejšie predvídala vhodné aktivity. (B) Diagram znázorňuje druhý stupeň zložitosti agentov, ktoré už majú vlastnú individuálnu myseľ $\mathcal{M} = (T, \vdash)$. To znamená že sú schopní učenia, t. j. adaptívne reagujú na zmenené okolie tak, že sa modifikuje aj jej pamäť. (C) Najzložitejší tretí stupeň zložitosti mysle, ktorý dostaneme z 2. úrovne, keď z jednotlivých individuálnych pamätí vytvoríme „spájaním“ individuálnu poznatkov kolektívnu pamäť T_{coll} , ktorá je pre celý multiagentový systém rovnaká, obsahuje dôležité skúsenosti a faktu z predchádzajúcej histórie adaptačného procesu.

3.3 Tri stupne zložitosti agentov

Budeme rozlišovať tri stupne zložitosti (alebo „evolúcie“) agentov, táto klasifikácia vychádza z ich vlastností, či obsahujú alebo neobsahujú pamäť, ak obsahujú pamäť, potom aký jej typ, či individuálnu alebo jej rozšírenie aj o kolektívnu pamäť (pozri obr. 4).

1. stupeň. Aktivity agenta sú reflexívne, t. j. nie sú založené na inferenčnom procese mysle ale na jednoduchej neurónovej sieti (ktorá ešte nie je pamäťou, v ktorej by boli uložené dôležité skutočnosti predchádzajúceho adaptačného problému.). Táto pamäť zobrazuje prostredie agenta na „reflexívne“ aktivity agenta. Poznamenajme, že už na tejto „reflexívnej“

úrovni prebieha proces učenia, ktorý spočíva v hľadaní vhodnej štruktúry (Baldwin, 1896) jednoduchej neurónovej siete tak, aby sa zvýšila presnosť predpovedí. Agenti ešte nemajú pamäť, v ktorej by boli uložené dôležité skutočnosti predchádzajúceho adaptačného procesu. Tento typ zložitosti sa vyskytuje u sociálneho hmyzu, ktorých neurónová sieť obsahuje niekoľko desiatok neurónov, pričom jej štruktúra je plne určená genotypom agenta.



Obrázok 5. Schematické znázornenie kolektívnej pamäti tretieho stupňa (pozri obr. 4). Elementárna dvojica v tom prístupe je gén – mém, kde gén špecifikuje fenotyp agenta a mém špecifikuje „informáciu“, ktorú agent potrebuje na úspešné prežitie v danom prostredí. Idúc zhora-nadol v tomto schémate, prvý elementárny krok je reprodukcia, keď rodič zreprodukuje svoj gén a kultúrnym vertikálnym procesom výchovy mu vytvorí mém. Pripomeňme, že oba tieto elementy pri vytváraní potomka sú ľahko zmutované formy rodičovského génu a mému. V ďalšom kroku takto vytvorený komplex gén – mém je zmodifikovaný horizontálnym kultúrnym prenosom. V nasledujúcom treťom kroku komplex gén – mém sa modifikuje „životnými skúsenosťami“ – vzdelávaním agenta. V dolnej časti obrázku je uvedený komplex mém – gén, ktorý je výsledkom genetického reprodukčného procesu rodičovského génu a následných kultúrnych procesov vytvárania mému.

2. stupeň. Agenti populácie majú myseľ $\mathcal{M} = (T_i, \vdash)$, pomocou ktorej môžu riadiť jednoduché aktivity spočívajúce v efektívnejšej orientácii v prostredí, vyhodnocovaní blízkeho okolia, a pod. Obvykle, relácia logického vyplývania \vdash je rovnaká pre všetkých agentov, môžeme konštatovať, že inferenčný aparát agenta je špecifikovaný genotypom. Individuálna pamäť agenta T_i môže mať memetický mechanizmus (Kvasnička, 2003) svojho pôvodu:

- (a) horizontálnym prenosom (výchova potomkov) od rodiča,
- (b) vertikálnym prenosom (od iného agenta),

(c) vlastným pozorovaním, t. j. individuálna pamäť je postupne rozširovaná o skúsenosti agenta.

Na záver životného cyklu, keď agent vstupuje do reprodukčného procesu, svojmu potomkovi odovzdáva len svoj gén v ľahko zmutovanej forme, t. j. agent – potomok nededí priamo od rodičov pamäť (t. j. evolúcia je striktno darvinovská), ale dedí v ľahko zmutovanej forme jeho inferenčný aparát \vdash . Avšak, pomocou horizontálneho prenosu potomok získa od rodiča, určitý základný balík poznatkov – mémov, ktoré v priebehu jeho životného cyklu mu môžu podstatne zvýšiť fitness (pozri obr. 5).

3. stupeň. Agenti vybavení myseľou $\mathcal{M} = (T_i, \vdash)$ majú taktiež kolektívnu pamäť T_c , ktorá je spoločná pre celý multiagentový systém. Najjednoduchší prístup k existencii kolektívnej pamäti je postulovanie tzv. „vyhľadávacích“ agentov, ktorý majú privilégium vstupovať do individuálnych pamätí jednotlivých agentov a vyhľadávať vhodnú informáciu všeobecného charakteru, ktorá bude tvoriť kolektívnu pamäť. Títo špecializovaní agenti pri tvorbe kolektívnej pamäti majú tiež dôležitú úlohu, aby zabezpečili jej konzistentnosť, t. j. nesmie obsahovať súčasne nejakú informáciu χ a jej negáciu $\neg\chi$ (poznamenajme, že v logike je problém vytvárania, revízie a spájania databáz poznatkov veľmi intenzívne študovaný (Lin, Mendelzon, 1998)).

4 Tri rôzne scenáre kolektívnej pamäti v sociálnych systémoch

Cieľom tejto kapitoly je špecifikovať pojem kolektívnej pamäti v sociálnych systémoch pomocou klasifikácie agentov vykonanej v predchádzajúcej kapitole (pozri obr. 5).

Prvý typ kolektívnej pamäti je špecifikovaný najjednoduchšími agentmi - sociálnym hmyzom, ktorý interaguje s prostredím alebo medzi sebou len pomocou inštinktov. Ak nejakým spôsobom odstránime v tomto spoločenstve sociálneho hmyzu inštinkty (napr. pomocou falošných feromónov), hmyzie spoločenstvo sa okamžite zmení na chaotický súbor jedincov, ktorí prestali vykonávať koordinované akcie (napr. zber potravy). V tomto prípade neexistuje žiadny memetický-kultúrny prenos informácie, fitness jednotlivcov je určené len zložením genotypu. Avšak, ako bolo ukázané koncom 19. storočia americkým psychológom J. M. Baldwinom (1896) v práci „A New Factor in Evolution“, darvinovská evolúcia využíva tzv. fenotypovú plasticitu (schopnosť organizmu adaptovať svoje orgány v priebehu života tak, aby lepšie vykonávali svoju funkciu); táto skutočnosť môže významne ovplyvňovať fitness jednotlivcov v populácii. Baldwin menovite vyzdvihol do popredia schopnosť učiť sa, ktorá sa prenáša geneticky a podstatne môže ovplyvňovať fitness agentov. Táto

vlastnosť ak sa trvalo vyskytuje v populácii, ktorá je v nemennom prostredí môže až viesť ku „kanalizácii“ vlastnosti fenotypu, k jeho genetickej zafixovanosti v adaptovanej forme, t. j. vo forme inštinktu. Podľa Baldwina takto vznikli inštinkty u hmyzu, ktoré sú genericky zafixované a nemusia sa učiť, podstatne uľahčuje agentom riešenie niektorých organizačných a komunikačných problémov. Poznamenajme, že v tomto najjednoduchšom prípade, v populácii sa nešíri informácia (vertikálne alebo horizontálne), agenti nemajú nielen svoju pamäť ale taktiež neexistuje ani spoločná kolektívna pamäť. Domnievame sa, že už aj v tomto najjednoduchšom prípade, keď agenti sú vybavení len inštinktom, môžeme hovoriť (aspoň v náznačkách) o kolektívnej pamäti, ktorá uľahčuje agentom kolektívne správanie.

Druhý typ kolektívnej pamäti je špecifikovaný pre agentov s vnútornou – individuálnou pamäťou. Pre tento typ multiagentových systémov s agentmi, ktorí majú individuálnu pamäť, už môže prebiehať memetická komunikácia (horizontálny prenos z rodiča na potomkov, vertikálny prenos medzi dvojicou agentov, a taktiež v priebehu životného cyklu každého agenta sa zväčšuje informácia uložená v pamäti). Zrejme, v týchto multiagentových systémoch určitá časť memov môže fungovať (povesti, história, mýty, ...) tak, že zvyšuje kohéznosť sociálnej skupiny (multiagentového systému), čo je jedna z hlavných podmienok podľa Halbwachsa, požadovaných od kolektívnej pamäti. Vidíme, že tento typ kolektívnej pamäti je jednoducho realizovateľný pomocou memetického prístupu, ktorý sa týmto stáva veľmi blízkym prístupu kolektívnej pamäti.

Tretí typ kolektívnej pamäti je zavedený pre najzložitejších agentov, ktorý vytvárajú sociálne systémy s kolektívnou pamäťou. Pripomeňme, že pre tieto systémy každý agent má svoju „súkromnú“ kolektívnu pamäť, takže môžeme predpokladať medzi jednotlivými agentmi memetickú komunikáciu. Avšak existencia spoločnej kolektívnej pamäti, spoločnej pre celý multiagentový systém je významnou črtou multiagentových systémov, ktorá ich striktno oddeľuje od systémov s prvým a druhým typom kolektívnej pamäti. Obrazne povedané, tento typ kolektívnej pamäti môžeme inštitucionalizovať tak, že predpokladáme v danom multiagentovom systéme existenciu samostatnej „štruktúry“ v ktorej je táto pamäť uložená. Takže v tomto type kolektívnej pamäti vedľa seba koexistujú tak lokálna (osobná) kolektívna pamäť ako aj spoločná kolektívna pamäť pre celý multiagentový systém. Existencia tretieho typu kolektívnej pamäti už vyžaduje existenciu špecializovaných agentov, ktorí sa starajú o údržbu pamäti (vkladanie nových poznatkov, zabezpečenie konzistentnosti, a pod.).

5 Záverečné poznámky

V tejto práci sme ukázali, že Halbwachsova koncepcia (1992) kolektívnej pamäti má v modernej umelej inteligencii a kognitívnej vede pomerne jednoduchú interpretáciu pomocou techniky multiagentového systému. Vychádzajúc z moderných výsledkov umelej inteligencie, môžeme formulovať hypotézu, že aplikácia tejto informatickej disciplíny v sociálnych vedách poskytuje racionálne vysvetlenia mnohých sociálnych vlastností a procesov, pričom tieto vysvetlenia nie sú zaťažené zbytočnými ideologickým balastom. Klasickým príkladom sú Axelrodove výsledky (Axelrod, 1984) o vzniku kooperácia medzi sebeckými agentmi. Tieto simulačné výpočty sú implementované pomocou jednoduchých evolučných algoritmov (Holland, 1975, Kvasnicka a spol. 2000), ktoré optimalizujú dlhodobý benefit opakovanej interakcie medzi agentmi, pričom rezultuje relatívne jednoduchá stratégia – heuristika „tit – for – tat“ (voľne preložené „ako ty mne, tak ja tebe“). Tento výsledok môžeme chápať ako „racionálnu morálnu heuristiku“ pre štúdium interakcií v multiagentových systémoch. Tento prístup bol zovšeobecnený autorom (Kvasnicka a spol. 1999) aj pre štúdium etnických konfliktov medzi dvoma etnicky rôznymi populáciami. Získané výsledky racionalizujú koncepciu „kolektívnej viny“, okolo ktorej v literatúre existujú navzájom protirečivé názory o jej význame a akceptovateľnosti. Zo získaných simulácií vyplýva, že princíp kolektívnej viny má vždy fatálne dôsledky pre kooperáciu medzi rôznymi etnickými skupinami

V sociálnych a humanitných vedách koncepcia „kolektívnej pamäti“ sa prekrýva s memetikou (Dawkins, 1976; Blackmore, 1999; Kvasnicka, 2003). Podobne ako v kolektívnej pamäti, tak aj v memetike, obsiahnutá informácia napomáha agentom k prežitiu; tak napríklad obsahuje popis prostredia, jeho nepravidelnosti, skryté vlastnosti. Podľa mienky autora tejto stati, memeticky prístup môže byť preformulovaný do koncepcie kolektívnej pamäti, obsahuje napr. historické skúsenosti agentov z predchádzajúcich etáp adaptačného procesu.

Hlavným výsledkom tejto práce je zistenie, že moderný aparát umelej inteligencie (menovite multiagentových systémov) a kognitívnej vedy vedie pomerne priamočiara k zisteniu, že v multiagentových systémoch môže byť naformulovaná idea „kolektívnej pamäti“, v ktorej sú naakumulované zistenia a pozorovania priebehu adaptačného systému. Skutočnosti obsiahnuté v kolektívnej pamäti môžu byť efektívne využité pri konštrukcii aktuálneho adaptačného kroku, odrážajú skúsenosti z predchádzajúcich adaptačných krokov. To znamená, že aktuálny adaptačný krok už nie je zostrojený náhodne (napr. náhodne mutácie genotypu pri reprodukčnom procese), ale obsahujú už aj „historické skúsenosti“ agentov z predchádzajúcich adaptačných krokov. Tento dôležitý záver o akcelerácii adaptačného

procesu v multiagentovom systéme, môže byť priamo použitý aj v rámci sociálnych a humanitných vied. V tomto prípade prístup kolektívnej pamäti môže byť na základe tejto analógie priamo použitá aj v týchto, relatívne vzdialených vedných oblastiach. V tomto prípade koncepcia kolektívnej pamäti môže byť interpretovaná ako dôležitý akceleračný prvok adaptačných procesov (Kvasnicka, Pospíchal, 2014) daného sociálneho systému, kde počiatočná stochastičnosť adaptácie je nahradená „zákonitostiami“ z predchádzajúcej adaptačnej histórie sociálneho systému.

Pod'akovanie

Táto práca bola vypracovaná v rámci riešenia úlohy VEGA , grant 1/0141/10.

Literatúra

- Alchourrón, C. E., Gärdenfors, P., Makinson, D. (1985). On the logic of theory change: Partial meet contraction and revision functions. *Journal of Symbolic Logic*, 50, 510-530.
- Assmann, J. (2008). Communicative and Cultural Memory. In Erll, A., Nünning, A., Young, S. B. (eds.): *Cultural Memory Studies. An International and Interdisciplinary Handbook*. Berlin: Walter de Gruyter, pp. 109–118.
- Axelrod, R. (1984): *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books.
- Baldwin, J.M. (1896): *A New Factor In Evolution*, American Naturalist 30, 441-457, 536-554.
- Blackmore, S. (1999): *The meme machine*. Oxford, UK: Oxford University Press (český preklad: *Teorie memů: Kultura a její evoluce*. Praha: Portál, 2000).
- Dawkins, R. (1976). *The Selfish Gene*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dudai, Y. (2002). *Memory From A to Z, Keywords, Concepts, and Beyond*. Oxford University Press, Oxford, UK, , heslo “Collective memory”, pp. 51-52.
- Friedenberg, F., Silverman, G. (2006). *Cognitive Science. An Introduction to the Study of Mind*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Gabbay, D.M., Rodrigues, O.T., Russo, A. (2010). *Revision, Acceptability, and Context. Theoretical and Algorithmic Aspects*. Berlin: Springer.
- Gáliková, S. (2009a): *Úvod do filozofie vedomia*. Trnava: Filozofická fakulta Trnavskej university.
- Gáliková, S. (2009b). *Úvod do kognitívnej vedy*. Trnava: Filozofická fakulta Trnavskej university.
- Gärdenfors, P. (ed.) (1992). *Belief Revision*. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Halbwachs, M. (1992). *On collective memory*. Chicago: The University of Chicago Press, (existuje český preklad Halbwach M. (2010): *Kolektivní pamět*. Praha: Vydavatelství Slon).
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Konieczny, S., Perez, R. (2011). Logic Based Merging. *Journal of Philosophical Logic* 40, 239–270.
- Krempaský, J. a kol. (1988): *Synergetika*, Bratislava: Veda SAV.
- Kvasnicka, V., Pospíchal, J. (1999): Evolutionary study of interethnic cooperation. *Adv. Complex Systems* 2 395-421.
- Kvasnička, V., Pospíchal, J., Tiňo, P. (2000): *Evolučné algoritmy*. Bratislava: Vydavateľstvo STU.
- Kvasnička, V., Pospíchal, J. (2006). *Matematická logika*. Bratislava: Vydavateľstvo STU.
- Kvasnička, V. (2003). Replicator theory of coevolution of genes and memes. *Neural Network World* 13, 255-266.
- Kvasnička, V., Beňušková, Ľ., Pospíchal, J., Farkaš, I., Tiňo, P., Král, A. (1997). *Úvod do teórie neurónových sietí*. Iris, Bratislava.
- Kvasnička, V., Pospíchal, J. (2007). Artificial Chemistry and Replicator Theory of Coevolution of Genes and Memes. *Collect. Czech. Chem. Commun.* 72, 223–251.
- Kvasnička, V., Pospíchal, J. (2014). An extension of hill-climbing with learning applied to a concept of collective memory. *Evolutionary Computing* (to be published).
- Lin, J., Mendelzon, A.O. (1998). Merging databases under constraints. *International Journal of Cooperative Information Systems* 7, 55-76.
- Manier, D., Hirst, W. (2008). A Cognitive Taxonomy of Collective Memories. In Erll, A., Nünning, A., Young, S. B. (eds.): *Cultural Memory Studies. An International and Interdisciplinary Handbook*. Walter de Gruyter, Berlin, pp. 253–262.

- Roediger III, H. L., Dudai, Y., Fitzpatrick, S. (2007). *Science of Memory: Concepts*. Oxford University Press, New York.
- Rojas, R. (1996). *Neural Networks. A Systematic Introduction*. Berlin, Springer.
- Rott, S. (2001). *Change, Choice and Inference*. Oxford University Press, Oxford (UK).
- Schenk, J. (1993). *Samoorganizácia sociálnych systémov (Metodologické problémy synergetického prístupu v sociológii)*. Bratislava: IRIS.
- Schenk, J. (2011). *Metodologické problémy multiagentového modelovania v sociológii*. Bratislava: Stimul.
- Smolensky, P. (1987). *Connectionist AI, Symbolic AI, and the Brain*. *Artificial Intelligence Review* 1, 95-109.
- Wooldridge, M. (2000). *Reasoning about Rational Agents*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to Multiagent Systems*. New York: J.Wiley & Sons.