

# Epizodická paměť inteligentních virtuálních agentů

Rudolf Kadlec, Cyril Brom  
Matematicko-Fyzikální fakulta  
Univerzita Karlov v Praze

Univerzita Karlova, Malostranské nám. 25, 118 00 Praha 1, Česká Republika  
rudolf.kadlec@gmail.com, brom@ksvi.mff.cuni.cz

**Abstract.** *Epizodickou pamětí nazýváme souhrn procesů zodpovědných za zapamatování, uchování a vybavování událostí, jichž byl člověk osobně účasten. Současní inteligentní virtuální agenti, jakými jsou například postavy z počítačových her, většinou epizodickou pamětí vybaveni nejsou. Pro agenta může ale epizodická paměť představovat důležitý zdroj informací a pomáhat mu například učit se ze svých chyb nebo interpretovat pozorovaný stav světa. Účelem tohoto článku je seznámit čtenáře s naším přístupem k zkoumání epizodické paměti agentů. Nejprve se budeme zabývat samotnou definicí epizodické paměti, poté prozkoumáme její možné aplikace v agentních systémech a nakonec budeme prezentovat plán našeho budoucího výzkumu, především odhalování motivací agentů.*

## 1 Úvod

Považujeme za samozřejmé, že lidé jsou schopni si zapamatovat svoji předešlou zkušenost, tuto zkušenost mohou zprostředkovávat ostatním skrze jazyk, umí navázat v činnostech přerušovaných naléhavějšími úkoly, dovedou odhadovat motivace ostatních lidí a na základě toho předpovídat jejich budoucí akce. Jakkoliv jsou tyto schopnosti přirozené u lidí, v oblasti umělé inteligence nebyly tyto analogické problémy stále uspokojivě vyřešeny.

Epizodická paměť (EP) [23] může být společným jmenovatelem řešení všech výše zmíněných problémů. Epizodická paměť je z psychologického hlediska pamětí na události (epizody) z vlastního života. Ústřední je vlastní prožitek a tudíž i možné subjektivní hodnocení pozorované situace. Příkladem krátké epizody uložené v epizodické paměti může být: „minulý víkend mě na chatě poškrábala sousedova kočka“. Epizodická paměť v sobě sdružuje mnoho modalit, např.: místo, čas, motivaci, emoce a další.

Psychologie odděluje epizodickou paměť od sémantické paměti, obsahující obecné znalosti o světě. Zdá se, že tyto systémy jsou částečně disociovány i neurobiologicky, zároveň jsou ale na této úrovni i částečně provázané; konkrétní detaily interakce mechanismů obou systémů jsou zatím neznámé (např. [2]). Hlavní rozdíl mezi oběma systémy je v tom, že v případě episodické paměti jsou informace vždy vázány k vlastní osobě a jejím prožitkům, zato v případě sémantické paměti považujeme zpracovávané údaje za neosobní – objektivní fakta o světě (např. „auto má 4 kola“) [9]. Jednodušší obdobou episodické paměti jsou pravděpodobně vybaveny i některé zvířecí druhy [6].

Stejným účelům, kterým slouží u lidí, by EP mohla sloužit i u virtuálních společníků nebo postav z virtuálního vyprávěčství [19] či u počítačem řízených postav z videoher. Tyto entity jsou souhrnně nazývány inteligentní virtuální agenti (IVA). Schopnost zapamatovat si minulé události a plausibilně zapomínat jejich detaily by mohla

příspět ke zlepšení interakce IVA s člověkem tím, že zvýší věrohodnost chování IVA. Zároveň tyto mechanismy mohou být i inženýrskou nutností pro IVA běžící po dlouhé časové úseky v komplexních virtuálních světech.

Cílem tohoto článku je seznámit čtenáře s naším programem výzkumu EP. Ohniskem našeho zájmu je klastrování sekvencí akcí do smysluplných epizod a zároveň předvídaní akcí IVA i lidí. Jak se ukáže, oba problémy jsou provázané. Hledání koherentních podposloupností akcí tvořících samostatné epizody umožní IVA lépe interpretovat chování agentů v jeho okolí. Anticipace jejich akcí mu pak může poskytnout kompetiční výhodu. Ve zbytku článku budeme podrobněji diskutovat oba problémy, námi navrhovanou metodiku evaluace modelů řešících tyto problémy a v neposlední řadě softwarové prostředí virtuálního světa v kterém budou IVA vtěleni.

V následující sekci rozebíráme současný stav poznání EP z perspektivy psychologie a neurověd. Sekce 3 představuje současné výpočetní modely EP. Sekce 4 diskutuje navrhované řešení problémů anticipace a klastrování epizod. Sekce 5 navrhuje metodologii validace modelů ze sekce 4. Sekce 6 popisuje virtuální prostředí, které hodláme použít pro naše experimenty.

## 2 Základní poznatky z neurovědy a psychologie

Faktické poznatky o episodické paměti přináší neurověda a psychologie. Neurobiologie například ukazuje na zásadní roli hippocampu v zapamatování si nových epizod i deklarativních faktů [20, 21, 7] a v navigaci a orientaci v prostoru obecně [15]. Neurobiologie i psychologie přináší poznatky o částečné disociaci (mimo jiné) episodické a sémantické paměti (např. [22, 2]), což má i klinický význam.

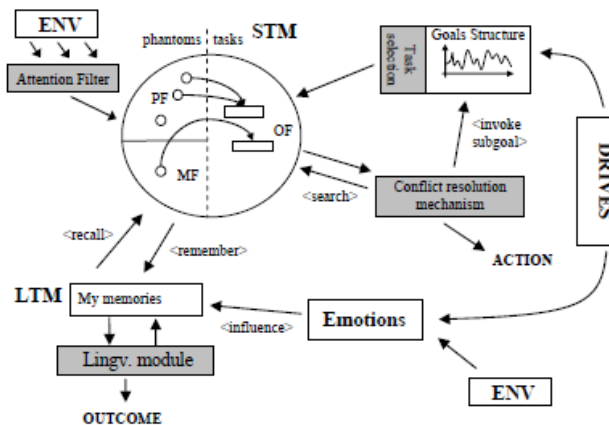
Zajímavé poznatky pro naši práci přináší ve své rešerši vnímání struktury událostí Zacks a Tversky [24]. Ti chápou EP jako aparát pro predikci budoucího stavu agenta a jeho okolí, zároveň definují jako místa předělu mezi dvěma epizodami ty chvíle, kdy predikce selháva. Kromě toho poukazují na analogii ve vnímání epizod a objektů. Epizody i objekty se mohou skládat z menších podcelků, které umíme samostatně identifikovat. Mají tedy hierarchickou strukturu. Objekty jsou vymezeny prostorem, který zabírají, zatímco epizody jsou vymezeny časem, ve kterém trvají. Tato analogie vede k myšlence inspirovat se při identifikaci epizod algoritmy pro klasifikaci objektů v obrazových datech. Předěly mezi epizodami jsou chápány jako místa, ve kterých selháva predikce dalšího stavu, tedy místa nesoucí informaci důležitou pro další vývoj světa.

### 3 Existující výpočetní modely EP

Implementace modelu EP může být základem pro tvorbu mnoha dalších funkčních celků IVA. Namátkou jmenujme vysvětlování chování ostatních agentů, zodpovídání dotazů týkajících se minulých událostí, navazování v přerušovaných činnostech, offline učení a další (podrobnější přehled přináší [14]).

Nejjednodušším výpočetním modelem EP je prostý log obsahující všechny události, které se ve světě staly, spolu s dodatečnými informacemi jako je například vnitřní stav agenta (jeho motivace, emoce atd.). Nevýhodou tohoto přístupu je paměťová náročnost rostoucí lineárně s časem simulace a z toho vyplývající vysoká náročnost vyhledávacích algoritmů. Tento přístup je pro oblast IVA nedostačující. IVA jsou často nasazováni v aplikacích, kde interagují s lidmi. Jejich řídicí program proto běží v reálném čase. Z toho plynou vysoké nároky na rychlost odpovědi. Jedním z požadavků na EP je tedy tvorba vhodných indexů umožňujících toto vyhledávání. Oblastí, jejíž důležitost pravděpodobně ještě stoupne s příchodem komplexních virtuálních prostředí, ve kterých budou IVA simulovány nepřetržitě po delší časové intervaly (dny, týdny), je plausibilní zapominání, které můžeme interpretovat jako ztrátovou formu komprese dat specifické povahy.

Ideálním stavem by bylo vytvoření generického modelu EP, který by měl předpoklady v sobě postihnout všechny výše zmíněné funkce EP. Někteří autoři dokonce pracují přímo na tomto cíli [22]. Ponecháme-li stranou otázku, zda může být takový celistvý model vůbec vytvořen (polemiku na toto téma vede např. [3]), najdeme mnoho modelů zabývajících se dílčími podproblémy jeho tvorby.



Obr. 1: Architektura modelu Peškové: STM – krátkodobá paměť, LTM – dlouhodobé paměť, ENV – okolní prostředí, PF – percepční pole, MF – záznamy z dlouhodobé paměti, OF – motivace agenta. Obrázek převzat z [4].

Tyto modely jsou často vytvářené na míru určité aplikaci, bez ambicí na přenositelnost do jiných prostředí. Příkladem budiž EP pro výukového agenta Steva [18] nebo pro agenty z aplikace určené k prevenci šikany na školách FearNot! [1]. EP zde slouží pro potřeby zhodnocení jednotlivých fází tréninku.

Náš současný přístup se zaměřuje na vytváření modelů řešících jednotlivé podproblémy univerzální EP a jejich následnou vzájemnou integraci. Ústředním modelem pro tyto snahy je model Peškové [4], jehož architektura je na obr. 1. Ústřední komponentou tohoto modelu je krátkodobá paměť (STM), která sjednocuje tři rozdílné zdroje informací. Vstupují do ní aktuálně pozorované předměty, které prošly filtrem vnímání (oblast paměti pro ně vyhrazená se nazývá percepční pole (PF)), dále pak současné motivace agenta (OF) a informace o předmětech z dlouhodobé paměti projikující se do paměťového pole (MF). Pokud obsah krátkodobé paměti umožní splnění nějaké motivace, bude její otisk uložen do dlouhodobé paměti (LTM). Rychlost zapominání obsahu LTM ovlivňuje emoční modul. Vzpomínky asociované se silnou emoci jsou zapominány pomaleji, než ty emočně neutrální. Obsahem LTM jsou informace o předešlé aktivitě agenta. Záznam agentových činností v sobě navíc zohledňuje jejich hierarchickou strukturu. Model Peškové používá AND/OR stromy pro popis rozhodovacího systému agenta a zároveň jejich upravenou formu využívá i pro záznam vzpomínek o agentově činnosti. Vnitřní uzly stromu odpovídají kompozitním činnostem, listy pak atomickým akcím, které mohou být ještě parametrizovány svými zdroji (např. *zali(KVĚTINA\_24, KONEV\_1)*). Omezením tohoto modelu je například strojově přesná, neplauzibilní reprezentace času nebo nehierarchická reprezentace míst. Tyto problémy se snaží řešit například Burkert [5], přidávající plausibilní reprezentaci času, nebo Korenko zavádějící hierarchické vnímání prostoru [12]. Dalším problémem modelu je, že uvažuje pouze historii samotného agenta a nevytváří vzpomínky o dalších IVA potažmo o lidmi ovládaných avatarech přítomných v prostředí. Přidání této funkcionality je hlavním cílem naší práce. Cestu k jeho dosažení ukazuje následující kapitola.

### 4 Sledování ostatních IVA – cíl výzkumu

V prostředích simulujících skutečný svět agent vidí pouze atomické akce prováděné dalšími IVA, nezná stav jejich vnitřní, nepozorovatelných proměnných a proto neví, jaká je motivace sledovaného chování a které akce patří kterým cílům. Cílem naší práce je z této omezené informace – sekvence atomických akcí – odvodit smysluplnou posloupnost akcí a zjistit jejich motivaci.

Ve výzkumu EP se chceme zaměřit především na:

1. odhalování předělů mezi epizodami
2. zjišťování motivací agentů

Experimenty, kde lidé měli za úkol určovat dějové předěly ve videosekvencích, ukázaly, že se na označení míst předělů víceméně shodnou [13]. Má tedy smysl hledat algoritmy, které by nám umožnily epizody jako celky identifikovat. Již zmiňovaná analogie mezi strukturou epizod a objektů nás vede k myšlence použití upravených algoritmů pro identifikaci objektů v obrazových datech. Samozřejmě v příznakovém prostoru rozšířeném o čas.

Otázky, které si klademe, jsou: a) zda bude pro úspěšnou klasifikaci epizod nutno použít metodu předpokládající určitý model světa, nebo b) jestli půjde použít obecnější přístup pracující pouze na základě statistických

charakteristik dat, např. samoorganizaci. Znalost předělů mezi epizodami přímo přispěje k řešení druhého cíle.

Druhou oblastí je zjišťování motivace jednání IVA i lidí ovládajících avatary na základě pozorování jejich akcí. To nám umožní:

1. automaticky anotovat sekvence akcí jejich odhadovanou motivací a tím lépe vysvětlit chování ostatních IVA
2. odhadovat budoucí akce na základě předpokládané motivace a již pozorovaných akcí, tato znalost může být pro IVA kompetiční výhodou

Všimněme si, že předpovídání budoucích akcí je klíčové pro určování předělů mezi epizodami a naopak. Předěly můžeme definovat jako místa, která neodpovídala našemu očekávání [24], kde selhala predikce. Naopak pokud budeme mít sekvence akcí rozdělené na funkčně koherentní celky, bude snazší odvodit jejich účel, protože úsudek nebudou ovlivňovat akce z minulých epizod, které už aktuální chování agenta pravděpodobně tak silně neovlivňují. Jak je vidět, obě úlohy jsou navzájem provázané, vyřešení jedné napomůže řešení druhé.

Při určování motivací už model světa zcela jistě zapotřebí bude. My navrhneme za model vzít AND/OR stromy dostupné agentovu rozhodovacímu systému. To znamená, že agent bude interpretovat chování ostatních IVA skrze svou vlastní znalost prostředí. Úlohu můžeme obecně formulovat jako zjišťování podmíněné pravděpodobnosti, že pozorovaná sekvence akcí je výsledkem exekuce určitého AND/OR stromu. Hlavním úkolem je nalézt kódování sekvence akcí maximálně usnadňující hledání této pravděpodobnosti. Otázek, kterými se chceme zabývat, je několik. Zaprvé nás zajímá, zda je nutné uvažovat tempo – časové rozestupy v provádění jednotlivých akcí. Druhou otázkou je, zda lze pro potřeby rozpoznávání motivací sekvenci akcí v nějakém smyslu normalizovat, například uvažovat pouze relativní časové uspořádání. Nebo, zda lze dokonce přijmout zjednodušení až sekvence na úroveň množiny akcí.

Pokud už IVA bude znát nejpravděpodobnější strom určující právě agentovo chování, může jej použít pro mentální simulaci – přehrání všech akcí určených tímto stromem až do pozorovaného stavu a následně předpovědět další nejpravděpodobnější akci. Alternativní přístup je použít znalost aktuálního stromu jako abstrakci shrnující minulý stav systému a zjišťovat další nejpravděpodobnější akci jako výsledek stochastického systému daného dvěma stavy – identifikátorem nejpravděpodobnějšího AND/OR stromu a poslední provedenou akcí. Představme si to na následujícím příkladu. Jakou akci chce asi provést pozorovaný agent, který se právě blíží k zařízení rychlého občerstvení a jeho pravděpodobná motivace je *HLAD*? Nejspíše to bude jiná akce než když bude agentovou motivací *POULIČNÍ\_PROTEST*.

## 5 Validace modelu

Výsledný model je třeba validovat. Validace našeho modelu může probíhat ve dvou krocích. V první fázi navrhneme testovat model na posuzování akcí dalších

IVA. Důvodem je zejména technická přístupnosti tohoto řešení. Ve druhé fázi by pak bylo dobré použít data získaná z interakce lidí ve virtuálních prostředích. Očekáváme, že se nám alespoň v některých případech podaří odhadovat cíle sledované IVA resp. lidmi.

Primárním účelem IVA je imitovat lidské chování. Kritériem „správnosti“ této imitace je, že se chování bude blížit tomu, jak by se v daných situacích chovali skuteční lidé. Proto mohou experimenty s IVA sloužit jako předstupeň experimentů na datech pocházejících od lidí. Výhodou IVA je, že nám přímo poskytují motivace svého chování. Tím máme všechna data nutná pro validaci našeho modelu. Podobnou metodologii použil při testování modelu tvorby časových konceptů Burkert [5]. Slabinou tohoto přístupu je umělá povaha testovaných dat - data závisí na programu pozorovaných IVA a není zaručeno, že člověk by se choval obdobně. Výhodou je možnost spouštění experimentů v rozdílných parametrizacích prostředí a tím systematicky zkoumat vlastnosti našeho modelu. Domníváme se proto, že v první fázi vývoje modelu EP má tato metodologie i přes zmíněnou nevýhodu své opodstatnění.

Druhým krokem je otestovat vlastnosti našeho modelu na datech zachycujících chování skutečných lidí. Sběr takovýchto dat v reálném světě je netriviální záležitostí vyžadující mnoho času a prostředků. Naopak ve virtuálním prostředí je řada problémů s ním spojených vyřešena. S minimálními náklady lze zaznamenávat akce vykonané avatary, které ovládají lidé. První takový zatím neveřejný korpus vzniká pro doménu restauračního stravování [16]. Nevýhodou takovýchto dat je samozřejmě nepřítomnost motivací v logu akcí, tato informace musí být dodána zdlouhavou ruční anotací.

## 6 Virtuální prostředí

Pro validaci modelu je zapotřebí použít dostatečně komplexní simulátor imitující reálný svět. Vhodným kandidátem může být upravené prostředí komerční hry Unreal Tournament 2004 [8] (UT2004), které se nám již osvědčilo v minulosti například při evoluci chování IVA [11].

Pro vytváření řídicí logiky IVA vtělených v prostředí UT2004 lze použít softwarového prostředí Pogamut [10]. Rozšíření Pogamut GRID [17] pak umožňuje paralelní spouštění experimentů na clusteru počítačů a tím výrazně urychluje statistickou validaci modelů. Komplexnost prostředí ukazuje obr. 2 zobrazující pohled na civilní městečko simulované v UT2004 z ptačí perspektivy. Vnitřní prstenec budov má vymodelované i interiéry, vnější budovy mají pouze fasádu.

Symbolická reprezentace vjemů zprostředkovávaná platformou Pogamut poskytuje vzhledem k východiskům našeho modelu vhodnou úroveň abstrakce pro další zpracování. IVA pracuje přímo s vjemy typu „agent A snědl jablko J“ a nemusí tudíž tyto koncepty odvozovat z jejich subsymbolických reprezentací, jak je tomu například při zpracování videa.

Naším cílem je vytvořit za pomoci platformy Pogamut inteligentního virtuálního agenta řízeného AND/OR stromy a vybaveného diskutovaným modelem EP. V tomto

navazujeme na Burkerta [5], který již v platformě Pogamut IVA řízeného AND/OR stromy implementoval.



Obr. 2: Ukázka virtuálního prostředí ve hře Unreal Tournament 2004, upravená verze mapy DM-UnrealVille.

## 7 Závěr

Cílem tohoto článku bylo přiblížit čtenáři problematiku EP a představit náš konkrétní výzkumný program, který hodláme v dalších letech realizovat. Cílem našeho snažení je vytvořit model schopný na základě pozorování akcí odhadovat motivace dalších aktérů v prostředí, předpovídat jejich budoucí akce a klastrovat jejich počínání do smysluplných celků. V článku jsme diskutovali, jak by bylo možné těchto cílů dosáhnout, navrhli metodiku validace zkoumaných modelů a představili konkrétní softwarové prostředí, ve kterém budou modely implementovány.

## Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem GAČR 201/09/H057, grantem GAUK č. 21809 a částečně také projektem „Information Society“ 1ET100300517 a výzkumným záměrem MŠMT MSM0021620838.

## Reference

- [1] Aylett R.S., Louchart S., Dias J., Paiva A., Vala M.: FearNot! – An Experiment in Emergent Narrative. In: Proceedings of Intelligent Virtual Agents, LNAI 3661, Springer (2005) 305–316
- [2] Baddley, A. (eds.): Episodic Memory: New Directions in Research, Oxford University Press (2001)
- [3] Brom, C., Lukavsky, J.: Towards Virtual Characters with a Full Episodic Memory II: The Episodic Memory Strikes Back. In: Proc. Empathic Agents, AAMAS workshop (2009) 1--9
- [4] Brom, C., Pešková K., Lukavský J.: What does your actor remember? Towards characters with a full episodic memory. Proc. ICVS, LNCS 4871, Springer (2007) 89-101
- [5] Burkert, O.: Connectionist Model of Episodic Memory for Virtual Humans, Msc thesis, Charles University in Prague (2009)

- [6] Clayton, N.S., Dickinson, A.: Episodic-like memory during cache recovery by scrub jaws. Nature 395 (1998) 272-274
- [7] Eichenbaum, H.: Hippocampus: Cognitive Processes and Neural Representations that Underlie Declarative Memory. In: Neuron, Vol. 44 (2004) 109-120
- [8] Epic Games: Unreal Tournament 2004: <http://www.unrealtournament.com>, [26. 5. 2009]
- [9] Eysenck, M. W.: Cognitive Psychology: a student's handbook. Psychology Press, New York, 2005.
- [10] Gemrot, J., Kadlec, R., Bida, M., Burkert, O., Pibil, R., Havlicek, J., Zemcak, L., Simlovic, J., Vansa, R., Stolba, M., Brom C.: Pogamut 3 Can Assist Developers in Building AI for Their Videogame Agents. In: Proc. Agents for Games and Simulations, AAMAS workshop (2009) 144—148
- [11] Gemrot, J., Kadlec, R., Vidnerová, P., Brom, C.: Evoluce chování virtuálních postav v 3D hrách. In: Proceedings of ITAT (2008) Slovak Republic
- [12] Korenko, T., Brom, C., Lukavský, J.: Tech rep. 5/2008, KSVI, MFF UK
- [13] Newtonson, D. (1973). Attribution and the unit of perception of ongoing behavior. Journal of Personality and Social Psychology, 28, 28-38.
- [14] Nuxoll, A. : Enhancing Intelligent Agents with Episodic Memory. Ph.D. diss. The University of Michigan (2007)
- [15] O'Keefe, J., Nadel, L.: Hippocampus as a cognitive map. Oxford, UK: Clarendon Press (1978)
- [16] Orkin & Roy (2009), Automatic Learning and Generation of Social Behavior from Collective Human Gameplay. Proceedings of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS).
- [17] Pogamut GRID: <http://artemis.ms.mff.cuni.cz/pogamut/>, Sub-projects. [26. 5. 2009]
- [18] Rickel, J., Johnson, W. L.: Animated Agents for Procedural Training in Virtual Reality: Perception, Cognition, and Motor Control. In: App. Artificial Intelligence, Vol. 13 (1999)
- [19] Ryokai, K., Vaucelle, C., Cassell, J.: Virtual peers as partners in storytelling and literacy learning. In: Journal of Computer Assisted Learning, Vol. 19, No. 2. (2003) 195 - 208
- [20] Scoville, W.B., Milner, B.: Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry, 20 (1957) 11-21
- [21] Squire, L.R.: Memory and the hippocampus: a synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. In: Psychol Review 99 (1992) 195-231
- [22] Tecuci, G., D.: A Generic Memory Module for Events, Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin (2007)
- [23] Tulving, E.: Elements of Episodic Memory. Oxford: Clarendon Press (1983)
- [24] Zacks, J. M. and Tversky, B. (2001) Event structure in perception and conception.. Psychological Bulletin, 127, pp. 3-21.