

Modelovanie kultúrneho prenosu a jeho úloha v evolúcii jazyka

1. Úvod

Jazyk je komplexný komunikačný systém, ktorý sa vyvinul v priebehu evolúcie ľudského druhu. Otázka pôvodu a vývoja jazyka je v centre pozornosti vedcov z oblastí lingvistiky, antropológie, psychológie, neurobiológie a najnovšie aj umelej inteligencie, avšak napriek ich spoločnému úsiliu je stále zahalená tajomstvom.

Objasnenie mechanizmov, pomocou ktorých môže vzniknúť komunikačný systém komplexnosťou podobný prirodzenému jazyku, je zaujímavé nielen z vedeckého hľadiska, keďže vrhá svetlo na historický pôvod a vývoj ľudských jazykov, ale aj z hľadiska možných technických aplikácií. Moderné technológie využívajúce vzájomne koordinovanú činnosť autonómnych agentov v otvorených prostrediach môžu profitovať z ich schopnosti vyvinúť si a kontinuálne adaptovať spoločný komunikačný systém.

Dôležitým zdrojom poznatkov o vzniku a vývoji jazyka sa v poslednom období stávajú výpočtové modely a počítačové simulácie. Tieto majú viaceré pozitívne vlastnosti:

- nutnosť detailnej a rigoróznejšej špecifikácie; výpočtový model nevystačí so “zahmlievajúcimi” slovnými opismi,
- priama verifikovateľnosť predikcií,
- možnosť zreprodukovať „in silico“ veľmi historicky vzdialené procesy, možnosť kontroly faktorov neprístupných empirickému skúmaniu (napr. podoba vnútorných mentálnych reprezentácií). Rovnako možnosť realizácie výskumov, ktoré by so živými ľuďmi boli neetické (napr. deprivácia od lingvistického vstupu).

Na vývoji jazyka a schopnosti umožňujúcich jeho osvojenie a používanie sa v rôznej miere zúčastňujú tieto mechanizmy:

- *Genetická evolúcia:* Schopnosť osvojiť si a používať jazyk je determinovaná mnohými fyzickými a kognitívnymi predpokladmi,¹ ktoré sú geneticky kódované a vyvinuli sa v priebehu fylogenézy ľudského druhu.
- *Osvojovanie jazyka:* Dieťa je počas ontogenézy vystavené lingvistickému vstupu – množine externalizovaných výpovedí členov jazykovej komunity, v ktorej sa dieťa nachádza, tzv. *E-jazyku* (Chomsky, 1986). Osvojovanie (akvizícia) jazyka je proces, v ktorom si jedinec na základe lingvistického vstupu vytvára vlastnú internú mentálnu reprezentáciu jazyka, tzv. *I-jazyk* (Chomsky, 1986), ktorá mu umožní správne produkovať a interpretovať vety osvojovaného jazyka.
- *Kultúrny prenos jazyka:* Jazykové štruktúry sa v populácii prenášajú vertikálne (z rodičov na deti) a horizontálne (komunikačnými interakciami rovnocenných členov populácie). Jazyk sa neprenáša ako nemenný konštantný systém, ale sám podlieha vývoju, pribúdajú novotvary, archaizmy miznú, regularizujú sa niektoré gramatické výnimky, atď.

¹ Napr. výška hlasiviek, tvar spodiny lebečnej a stupeň kontroly dýchania zaisťovaný svalmi bránice a hrudníka napovedajú, že až človek dnešného typu bol schopný vokalizovať v rovnakom rozsahu ako my (Blackmore, 1999).

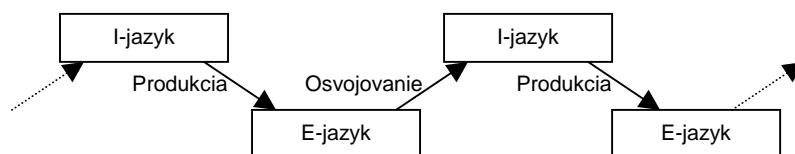
Kultúrny prenos jazyka budeme v ďalšom texte chápať ako evolučný proces s nasledujúcimi vlastnosťami:

- Prenášané štruktúry sú uchovávané v pamäti jednotlivcov a nie v génoch.
- Prenos je zabezpečený behaviorálnou imitáciou (učením) a nie dedením.
- Zdrojom variability sú nepresnosti a chyby v imitačno-akvizícnom procese (napr. prílišná generalizácia alebo špecializácia) ako aj šum pri produkcii alebo vedomé inovácie hovorcov.
- Konkrétna podoba jazyka je výsledkom rôznych selekčných tlakov – maximalizácie komunikačného úspechu, minimalizovania kognitívneho spracovania a zaťaženia pamäte, časovej efektívnosti a obmedzení daných senzomotorickým aparátom.

V tejto kapitole predstavíme niektoré existujúce výpočtové modely kultúrneho prenosu a ich aplikovateľnosť v štúdiu vývoja jazyka.

2. Iterované učenie

Osvojovanie jazyka je veľmi špecifický typ problému učenia: cieľ učiaceho procesu (v tomto prípade jazyk, ktorý si má dieťa osvojiť) je sám výsledkom učiaceho procesu – dieťa si osvojuje jazyk na základe lingvistického vstupu, produkovaného hovorcami, ktorí si jazyk osvojili tým istým procesom. Keďže interná mentálna reprezentácia jazyka (*I-jazyk*) nemôže byť prenášaná medzi jedincami priamo, ale len pomocou externalizovaných výpovedí (*E-jazyk*), medzigeneračný prenos jazyka môžeme chápať ako mnohokrát iterovaný cyklus produkcia/osvojovanie (obr. 1). Vďaka variabilite prítomnej v tomto procese nie je prenos jazyka verným kopírovaním, ale má konštruktívny charakter.



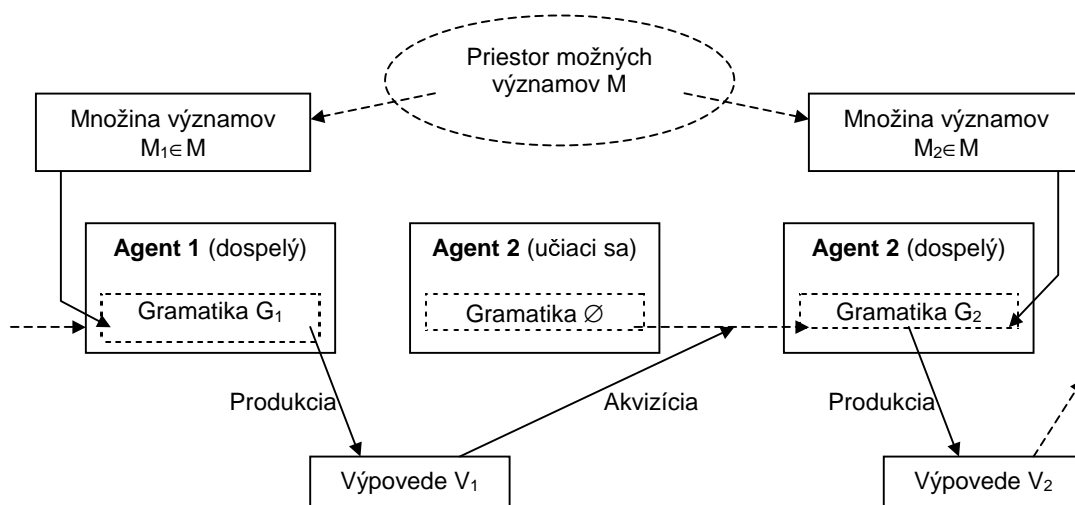
Obrázok 1. Prenos I-jazyka pomocou E-jazyka (Kirby, 2002).

Na skúmanie vlastností takto definovaného procesu bol vyvinutý tzv. zovšeobecnený *model iterovaného učenia* (ILM) (Kirby a Hurford, 2001). ILM pozostáva zo štyroch komponentov:

- priestor významov,
- priestor signálov,
- jeden alebo viac učiacich sa agentov,
- jeden alebo viac dospelých agentov.

V každej iterácii dostane dospelý agent množinu náhodne vybraných významov, pre ktoré má vyprodukovať signály. Vyprodukované páry ⟨signál, význam⟩ tvoria tréningové dáta (lingvistický vstup, E-jazyk) pre jeden alebo viaceré učiace sa agenty, ktoré si na ich základe formujú vlastnú internú reprezentáciu jazyka (I-jazyk). Po istom čase (obvykle po predložení istého počtu párov ⟨signál, význam⟩), ktorý možno chápať ako uplynutie kritického obdobia, sa učiace sa agenty stanú dospelými. Do

populácie sa vložia nové učiace sa agenty (bez I-jazyka) a rovnaký počet náhodne vybraných dospelých sa z populácie odstráni (obr. 2). Tento cyklus typicky iteruje niekoľko tisíc krát, kým dynamický systém nedosiahne stabilný atraktor.



Obrázok 2. Cyklus iterovaného učenia

2.1 Emergencia kompozičného a rekurzívneho jazyka

Z množstva experimentov vykonaných v rámci paradigmy ILM vyberáme experiment (Kirby, 2002) zameraný na skúmanie emergencie syntaktických črt jazyka ako sú *kompozičnosť* a *rekurzivita*.²

Model pozostáva iba z dvoch agentov – jedného dospelého a jedného učiaceho sa. Priestor významov M obsahuje preddefinované atomické koncepty, napr. *john*, *tiger*, *eats*, *fears*, *knows*, ktoré možno kombinovať do jednoduchých predikát-argumentových prepozícií, napr. *fears(john, tiger)*, *knows(john, eats(tiger, john))*. Signálmi sú reťazce symbolov. Lingvistický vstup učiaceho sa agenta pozostáva z párov ⟨signál, význam⟩,³ napr. ⟨*tigereatsjohn, eats(tiger, john)*⟩.⁴

Na vnútornú reprezentáciu zobrazenia medzi signálmi a význammi (agentov I-jazyk) sa používa jednoduchá verzia DCG gramatiky⁵ – bezkontextovej gramatiky, kde terminálmi sú reťazce symbolov a neterminály sú obohatené o sémantický komponent reprezentujúci význam neterminálu.⁶ Je dôležité poznamenať, že takáto

² Jazyk je kompozičný, ak sa význam lexikálneho celku odvodzuje z významov jeho častí a spôsobu, ako sú skombinované. (Formálne mu zodpovedá gramatika s neterminálnymi symbolmi aj na pravej strane pravidiel.) Rekurzivita umožňuje vnáranie fráz, teda v pravidlách syntaxe jazyka niektorý konštituent obsahuje konštituent tej istej kategórie.

³ Priame posielanie významu spolu so správou je oproti reálnemu jazyku značným zjednodušením. K dôsledkom resp. alternatívam tohto predpokladu sa vrátíme neskôr.

⁴ Významy a signály budeme rozlišovať typom písma, kurzíva pre významy, courier pre signály.

⁵ Ako alternatíva symbolovej reprezentácie I-jazyka boli v podobných experimentoch použité dopredné neurónové siete (Smith, 2002) a asociačné siete (Smith, 2003a).

⁶ Sématický komponent môže obsahovať premenné, pričom tieto sa nezdediajú medzi pravidlami, ale slúžia iba na ustanovenie vzťahu medzi sématickými komponentmi na ľavej a pravej strane jedného pravidla (napr. prvé pravidlo v pravom stĺpci na obr. 3).

reprezentácia nemá vbudovanú kompozičnosť *a-priori*. DCG gramatika umožňuje reprezentovať aj holistický jazyk bez vnútornej štruktúrovanosti signálov (obr. 3 vľavo).

Holistická gramatika:	Kompozičná gramatika:
$S/eats(tiger, john) \rightarrow tigereatsjohn$	$S/p(x,y) \rightarrow N/x V/p N/y$
	$V/eats \rightarrow eats$
	$N/tiger \rightarrow tiger$
	$N/john \rightarrow john$

Obrázok 3. Dve gramatiky konzistentné s pozorovaním výpovede $\langle tigereatsjohn, eats(tiger, john) \rangle$.

Priebeh experimentu je takýto: dospelý dostane náhodnú množinu tém $M' \subset M$ a pomocou svojho I-jazyka vyprodukuje množinu výpovedí

$$L = \{ \langle e, m \rangle \mid m \in M', e \text{ je reťazec symbolov kódujúci význam } m \},$$

ktorá je lingvistickým vstupom pre učiaceho sa agenta. Keď si ten na základe L vytvorí svoj vlastný I-jazyk, stáva sa dospelým, pôvodný dospelý je nahradený novým učiacim sa agentom a celý proces sa opakuje.

Produkcia. Dospelý agent, ktorý má vyprodukovať výpoveď pre nejaký význam m , hľadá vo svojej gramatike pravidlo s počiatočným neterminálom S na ľavej strane, ktorého sémantický komponent možno unifikovať s m . Ak sa mu to podarí, prepisuje pomocou gramatiky neterminály, až kým nedosiahne reťazec zložený iba z terminálov. Samozrejme toto je ideálny prípad.

Môže sa stať (najmä v počiatočnej fáze experimentu), že agent nevie z gramatiky odvodiť formu pre daný význam. Algoritmus produkcie musí obsahovať invenciu – spôsob ako neznáme časti významov nahradiť novými (náhodne generovanými) reťazcami, avšak bez spontánneho vbudovávania/generovania nových syntaktických štruktúr, ktoré sa nevyskytovali v lingvistickom vstupe.

Ak agent nevie vyjadriť nejaký význam, hľadá najbližší podobný význam, ktorý vie vyjadriť. Pre tento význam odvodí príslušný terminálny reťazec. V jeho strome odvodenia možno nájsť podstromy pre časti významu, v ktorých sa líši od pôvodného. Terminály generované týmito podstromami sa vo výslednom reťazci vystrihnú a nahradia náhodne generovanými reťazcami.

Objasníme to na príklade: Agent vybavený gramatikou

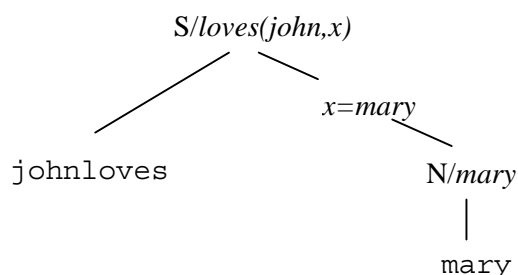
$$S/loves(john,x) \rightarrow johnloves N/x$$

$$N/mary \rightarrow mary$$

$$N/jane \rightarrow jane$$

má vyprodukovať signál pre význam $loves(john,anna)$. Najbližšie významy, pre ktoré vie vyprodukovať signál, sú $loves(john,mary)$ a $loves(john,jane)$. Vezmime odvodzovací strom pre prvý z nich.

loves(john,mary):



Pravý podstrom pod $x=mary$ je odlišný od pôvodného významu a preto jeho terminálny reťazec *mary* bude vo výsledku nahradený náhodne vygenerovaným reťazcom, napr. *pog*.

$loves(john,anna) \Rightarrow johnlovespog$

Iná situácia nastáva, ak chceme odvodiť formu pre význam *loves(fred,mary)*. Použitím odvodzovacieho stromu pre *loves(john,mary)* zistím, že nesedí už koreň stromu a preto nahradím celý terminálny reťazec *johnlovesmary* náhodne generovaným reťazcom, napr. *bling*.

$loves(fred,mary) \Rightarrow bling$

Po vygenerovaní – invencii je príslušný pár ⟨signál, význam⟩ predložený agentovmu vlastnému učiacemu algoritmu („počuje“ svoj vlastný výstup), aby sa zabezpečila konzistencia jeho výstupov.

Učenie. Pred začatím učenia gramatika agenta neobsahuje žiadne pravidlá. Učiaci sa agent je vystavený jazykovej vzorke pozostávajúcej z párov ⟨signál, význam⟩, napr. ⟨*tigereatsjohn*, *eats(tiger,john)*⟩. Takýto pár sa dá triviálne inkorporovať do gramatiky holistickým pravidlom

$S/eats(tiger, john) \rightarrow tigereatsjohn$

Triviálny učiaci algoritmus by mohol spočívať vo vytvorení takéhoto špeciálneho holistického pravidla pre každý pozorovaný pár ⟨signál, význam⟩ spolu s vymazaním duplicitných pravidiel. Takýto algoritmus by vyprodukoval gramatiku, ktorá generuje práve všetky formy obsiahnuté v lingvistickom vstupe a nič iné. Nemal by žiadnu schopnosť generalizácie, čo je chabý model učenia.

Základná stratégia generalizácie by mohla spočívať v prezeraní pravidiel po dvojiciach a hľadaní ich najmenej spoločnej generalizácie. Na obr. 4 je príklad takejto generalizácie: Vľavo máme dvojicu pravidiel, ktoré obsahujú spoločné podreťazce. Časť sémantického komponentu, v ktorej sa obe pravidlá líšia (*tiger* a *john*), nahradíme novou sémantickou premennou x a časť terminálneho reťazca, v ktorej sa líšia, nahradíme novým neterminálom N . Tým dostaneme nové pravidlo (na obrázku prvé v pravom stĺpci), ktorým nahradíme pôvodnú dvojicu pravidiel. Pre zachovanie pokrytia pôvodných reťazcov pridáme dve pravidlá s neterminálom N na ľavej strane (na obrázku posledné dve v pravom stĺpci).

Vidíme, že neterminál B označuje kategóriu, ktorú môžeme považovať za slovesá a neterminál A za podstatné mená. Pozícia neterminálu A určuje, či ide o podmet alebo predmet. Veta má pevné poradie vetných členov OSV,⁷ pričom terminálne reťazce v, g, n majú funkciu neplnovýznamových gramatických markerov.

Takýto priebeh experimentu je typický – z úplne holistického jazyka sa vyvinie plne kompozičný jazyk s nominálnou a slovesnou kategóriou (niekedy je možných niekoľko poradí vetných členov, pričom predmet a podmet môžu byť vyjadrené rôznymi kategóriami/neterminálmi). Niekedy sa stáva, že pre niektorý význam prežije holistické pravidlo dlhý čas. Jednotlivé behy sa väčšinou líšia iba rýchlosťou konvergenzie k plne kompozičnému jazyku.

Rekurzívny jazyk. Ďalším krokom je upraviť priestor významov, aby bolo možné vyjadriť nekonečne veľa významov. Pridáme predikáty, ktoré môžu ako argumenty obsahovať iné predikáty (napr. *knows, says, believes*). Hovorca sa v experimente pokúša vygenerovať najprv 50 významov bez vnorenia predikátov, napr. *admires(heather, pete)*, 50 z predikátov s vnorením 1. úrovne, napr. *knows(gavin, loves(pete, heather))* a 50 z predikátov s vnorením 2. úrovne, napr. *believes(pete, thinks(john, hates(heather, pete)))*.

Priebeh experimentu vyzerá podobne ako v predchádzajúcom prípade – gramatiky sú na začiatku tvorené iba holistickými pravidlami. Vzhľadom na trojnásobnú veľkosť lingvistického vstupu počet pravidiel v gramatike rýchlo narastá. význam. Po istom čase – po zachytení regularít kompozičnými pravidlami – veľkosť gramatiky začne klesať a môže dokonvergovať ku gramatike podobnej tejto:

Generácia 115:

$S/p(x, q) \rightarrow S/q C/p \text{ gp } B/x \text{ d}$	$B/pete \rightarrow \text{f}$	$C/believes \rightarrow \text{o}$
$S/p(x, y) \rightarrow \text{stlw } A/p B/y B/x$	$B/heather \rightarrow \text{v}$	$C/knows \rightarrow \text{z}$
$A/loves \rightarrow \text{r}$	$B/gavin \rightarrow \text{eks}$	$C/thinks \rightarrow \text{t}$
$A/admires \rightarrow \text{i}$	$B/mary \rightarrow \text{k}$	
$A/hates \rightarrow \text{wja}$	$B/john \rightarrow \text{a}$	
$A/detestes \rightarrow \text{w}$	$C/says \rightarrow \text{fdbtl}$	
$A/likes \rightarrow \text{btl}$	$C/decides \rightarrow \text{b}$	

Vidíme, že máme dve vetné pravidlá s počiatočným neterminálom S. Prvé umožňuje vyjadriť predikáty s vnorením – C označuje kategóriu sloves s podradujúcou funkciou a vidíme, že pravidlo je rekurzívne (obsahuje neterminál S na pravej strane). Druhé pravidlo je analogické vetnému pravidlu z predchádzajúceho experimentu (poradie vetných členov je v tomto prípade VOS).

2.2 Zúžený profil a replikátory

V oboch opísaných príkladoch sa z holistického jazyka vyvinul kompaktný kompozičný jazyk s nominálnymi a slovesnými kategóriami a pevným poradím vetných členov. Otázka je prečo.

Jednotlivé pravidlá, resp. sady pravidiel, generujúce formy vyjadrujúce ten istý význam, môžeme považovať za *replikátory*, ktoré budú medzi sebou súperiť. Ak sú

⁷ object – subject – verb (predmet – podmet – prísudok)

napr. dve formy vyjadrenia *loves(john,mary)*, učiaci sa agent môže vo výpovedi počuť naraz len jednu. Úspech replikátora je priamo úmerný pravdepodobnosti, že sa forma objaví vo vstupnom E-jazyku pre učiaceho sa. Keďže dospelý produkuje lingvistickú vzorku len pre obmedzený počet významov ($M' \subset M$), pravidlo má tým väčšiu šancu, čím viac významov kóduje, čo zvyhodňuje kompozičné pravidlá pred holistickými.

Zo začiatku sú pravidlá holistické, každé zobrazujúce jeden význam na jeden reťazec. Náhodná regularita v istom okamihu spôsobí, že učiaci sa urobí generalizáciu, ktorú predchádzajúca generácia nepoznala. Táto generalizácia (sada kompozičných pravidiel) začne súperiť s holistickým pravidlom vyjadrujúcim ten istý význam. Keďže všeobecnejšie pravidlá sú lepšími replikátormi, postupne sa v populácii presadia a vytlačia holistické pravidlá.

Dôležitú úlohu v celom procese zohráva už spomínaný sémantický zúžený profil. V procese opakovaných transformácií medzi I-jazykom a E-jazykom nemôže plne holistický jazyk prežiť, pretože v každej generácii sa prenášajú výpovede iba pre časť všetkých možných významov. Kompozičný jazyk cez zúžený profil „prejde“ – ak učiaci sa agent na základe lingvistickej vzorky správne zachytí vo svojej gramatike vnútornú štruktúru jazyka, môže potom na základe svojich pravidiel správne produkovať aj výpovede pre významy, s ktorými sa vo svojej lingvistickej vzorke nestretol.

Jazyk sa teda správa ako adaptívny systém, ktorý sa vyvíja, aby mohol „prežiť“ opakovaný prenos cez sémantický zúžený profil a kompozičnosť jazyka je výsledkom tejto adaptácie.

2.3 Frekvenčné efekty

Hoci kompozičná štruktúra je v prirodzených jazykoch veľmi rozšírená, predsa neplatí univerzálne. Vieme, že napr. v angličtine sa minulý čas väčšiny slovies tvorí pravidelne (pridaním koncovky *-ed* k neurčitku), a niektoré slovesá majú nepravidelný minulý čas (napr. *have, go, take*). Podľa (Pinker, 1999) je 10 najfrekventovanejších anglických slovies nepravidelných.

V experimentoch, ktoré sme opísali doteraz, mali všetky významy rovnakú pravdepodobnosť, že budú vybrané do lingvistickej vzorky. Pripomeňme si, že úspech replikátora je priamo úmerný pravdepodobnosti, že sa objaví vo vstupnom E-jazyku pre učiaceho sa. Ak by teda hovorcovia produkovali výpoveď pre nejaký význam veľmi často, všetky pravidlá zúčastňujúce sa na produkcii výpovede pre tento význam by boli dobrými replikátormi.

(Kirby, 1998) opisuje pokus, ktorý je variáciou vyššie uvedeného experimentu: Veľkosť množiny možných významov sa zväčšila na 200, pričom približne polovicu významov tvorilo *loves(john,mary)*. Takto bola pri každej produkcii výpovede 50% pravdepodobnosť, že to bude výpoveď pre význam *loves(john,mary)*. Výsledky takto modifikovaného experimentu sa od pôvodných líšili v tom, že sa vo väčšine simulácií, hoci vznikla kompozičná gramatika, zachovalo pre význam *loves(john,mary)* holistické pravidlo a teda nepravidelný tvar.

2.4 Argument nedostatočnosti lingvistického vstupu

Uvedené experimenty skúmajú možnú úlohu kultúrneho prenosu v evolúcii jazyka. „Vrodená“ výbava agentov vstupujúcich do experimentu je rovnaká, každý nový jedinec má na začiatku prázdnu gramatiku, len učiaci algoritmus, ktorý je u všetkých

agentov rovnaký a v priebehu simulácie sa nevyvíja. V modeli nie je žiadna selekcia agentov na základe komunikačnej úspešnosti.

Naskytá sa otázka, čo je vlastne nutným vybavením agenta pre úspešné osvojenie si jazyka. Zhrňme si dôležité poznatky z výskumov osvojovania jazyka u detí:

1. Všetky zdravo vyvinuté deti si osvojujú jazyk, ktorému sú vystavené, rýchlo, spontánne a dobre.⁸
2. Dieťa dostáva len konečne veľkú vzorku jazyka a to takmer výhradne pozitívne príklady.⁹
3. Dieťa je schopné správne produkovať a interpretovať aj vety, ktoré nikdy predtým nepočulo.

Noam Chomsky (1980) tieto fakty nazval *nedostatočnosťou lingvistického vstupu* (poverty of stimulus) a na ich základe dospel k názoru, že mnoho z aspektov formálnej štruktúry jazyka musí byť kódovaných v genóme a teda vrodenej. Chomsky postuloval vrodene ohraničenia priestoru možných jazykov (gramatík) kódujúce ich spoločné univerzálne črty (*princípy*) a nazval ich *univerzálnou gramatikou* (UG). Ďalej postuloval vrodenej jazykovo-špecifický modul osvojovania jazyka (LAD) riadiaci v priebehu ontogenézy nastavovanie hodnôt konečnej množiny *parametrov* špecifických pre gramatiku jazyka, ktorému je dieťa vystavené.

Teória univerzálnej gramatiky je konzistentná s matematickými výsledkami teórie učenia: Ak priestor hypotéz o cieľovom jazyku tvoria všetky bezkontextové gramatiky a jedinec dostáva iba pozitívne príklady, nemôže si osvojiť¹⁰ cieľový jazyk na základe konečnej vzorky (Gold, 1967). Ukazuje sa, že ľudské jazyky potrebujú prinajmenšom bezkontextovú gramatiku a keďže sa zdá, že dieťa si osvojí správnu gramatiku z konečnej vzorky, riešením je obmedzenie priestoru hypotéz na konečnú nie veľmi veľkú množinu gramatík, čo zodpovedá Chomského vrodenej UG.

Ako sa s paradoxom lingvistického vstupu a Goldovou vetou vyrovnávajú opísané experimenty? V súlade s Goldovou vetou je naučiteľnosť aj tu dosiahnutá obmedzením množiny hypotéz, avšak nie striktnie na konečnú podmnožinu – stačí, ak má učiaci algoritmus vbudované isté predpoklady o podobe výsledku učenia (*learning bias*), čo spôsobí, že niektoré hypotézy budú ľahšie osvojiteľné ako iné.¹¹ Keďže cieľový jazyk sa iterovaným učením mení a prispôbuje vlastnostiam učiaceho algoritmu, stáva sa ľahšie osvojiteľným (Zuidema, 2003).

Iné vysvetlenie podáva (Elman, 1996). Goldova veta predpokladá, že všetky hypotézy sú rovnako pravdepodobné. Podľa Elmana sa však nedá priamo aplikovať na osvojovanie ľudského jazyka, keďže dieťa je citlivé na štatistickú štruktúru jazyka a využíva ju pri jeho osvojení. V článku pomocou rekurentných neurónových sietí

⁸ Dieťa si prakticky okamžite ako začne kombinovať slová do 2-3 slovných viet (priemerne vo veku cca 18 mesiacov) začína osvojovať aj gramatické nuansy jazyka – kanonické poradie fráz, sémantické role atď., pričom vo veku 3-4 rokov prakticky zvláda gramatiku (Langmeier a Krejčířová, 1998, Wilson a Keil, 1999).

⁹ Dieťa dostáva korekčnú spätnú väzbu pri osvojení lexikónu („To nie je havo, ale koník.“), ale len zriedkakedy ho opravujú pri chybách v gramatickej stavbe vety (Markman, 1992). Štúdia (Brown a Hanlon, 1970) ukázala, že medzi gramatickosťou detských viet a korekčnými reakciami rodičov na tieto vety nie je spoľahlivá korelácia.

¹⁰ Kritériom osvojenia je tzv. *konvergencia v limite*, čo znamená, že ak je vzorka ľubovoľne dlhá, jedinec si v istom kroku osvojí hypotézu, ktorú už nebude musieť meniť.

¹¹ Túto „náchylnosť“ k istým typom hypotéz vykazujú pri osvojení jazyka aj deti (Markman, 1992).

(RNN) ukazuje, ako stochastická informácia umožňuje osvojenie jazyka z pozitívnych príkladov.

2.5 Modelovanie vývoja kognitívnych predispozícií

Obmedzenia syntaktickej podoby výsledného jazyka nemusia byť vrodenu kognitívnu výbavu, ale emergujú ako dôsledok predpokladov učiaceho algoritmu a dynamiky iterovaného učenia. Ak sa dieťa rodí vybavené učiacim algoritmom s istými predpokladmi o podobe jazyka, je namieste otázka, prečo práve s týmito a nie inými a ako sa v priebehu fylogénzy ľudského druhu vyvinuli.

Adekvátny koevolučný model vývoja jazyka by teda mal predstavovať komplexnú interakciu troch mechanizmov v odlišných časových škálach: biologickej evolúcie vroděných kognitívnych štruktúr v priebehu fylogénzy, adaptácie kultúrne prenášaných jazykových štruktúr na rýchlejšej – historickej časovej škále a individuálneho osvojovania jazyka v priebehu ontogenézy (Takáč, 2003).

(Oliphant, 1999) opisuje experimenty s populáciou komunikujúcich agentov vybavených jednoduchými asociačnými sieťami. V závislosti od učiaceho pravidla siete (rovnakého pre celú populáciu) rozdeľuje populácie na *osvojovateľov* (schopných naučiť sa optimálny komunikačný systém), *udržovateľov* (schopných udržať optimálny komunikačný systém pri rozumnej hladine šumu) a *konštruktérov* (schopných vybudovať optimálny komunikačný systém z iniciálne náhodného).

Podľa (Smith, 2001) je jedinečnosť ľudského jazyka v živočíšnej ríši dôsledkom obtiažnosti presadenia sa konštruktérskych učiacich pravidiel. Reimplementuje Oliphantove pokusy pridaním genetickej dimenzie (učiace pravidlo siete je kódované v genóme) a hľadá, aké učiace pravidlá sa v evolúcii pod selekčným tlakom optimálnej komunikácie presadia. Jeho výsledkom je, že konštruktéri sa presadia veľmi zriedkavo. Zdôvodňuje to tým, že priaznivý efekt genotypu kódujúceho konštruktérske učiace pravidlo umožňujúce vybudovanie komunikačne optimálneho systému sa prejaví až po konvergencii populácie k takémuto systému. Kým takýto systém v populácii neprevláda, jedinec s priaznivým genotypom nemá žiadnu evolučnú výhodu a prejavuje sa genetický drift.

Ak je kultúrna adaptácia pomalá, vplyv genetického driftu ju môže úplne zastaviť a optimálne osvojovacie algoritmy sa v evolúcii nepresadia. Na jej urýchlenie Smith zavádza do modelu priestorové rozloženie populácie a predlžuje fázu učenia. Napriek tomu však prichádza k záveru, že vhodné predpoklady osvojovacieho algoritmu sú pravdepodobne exaptáciou¹² (Smith, 2003b).

2.6 Podloženosť významov a telepatia

Vo všetkých vyššie opísaných experimentoch agenty komunikovali o významoch, ktoré boli umelo vytvorené, vopred fixne dané a rovnaké pre všetky agenty. Použité modely teda abstrahujú od problému podloženosti/ukotvenia významov – *symbol grounding problem* (Harnad, 1990): Ako symboly používané agentami nadobúdajú význam? Sú významy pre všetky agenty rovnaké? Ak áno, odkiaľ sa berú? Ak nie, ako je možné, že agenty sa napriek rôznosti významov dohodnú?

¹² Teda že sa pôvodne vyvinuli náhodne alebo pod selekčným tlakom pre nejakú inú (kognitívnu) funkciu a až neskôr boli adaptované na použitie v osvojovaní jazyka.

Prezentované experimenty obsahujú aj ďalšie nereálne zjednodušenie – pri komunikácii sa význam posielajú spolu so správou. V reálnych situáciách explicitná mentálna reprezentácia významu správy hovoriaceho nie je poslucháčovi k dispozícii (to by bola telepatia), ale poslucháč dedukuje význam neznámeho výrazu z kontextu, či už lingvistického, alebo pragmatického. V situáciách, kde spoločný lingvistický kontext chýba, napr. u malých detí alebo cudzincov, nastáva tzv. Gavagai problém.¹³ Pri jeho prekonávaní môže pomôcť neverbálna signalizácia, zdieľanie pozornosti a sledovanie pohľadu (Tomasello a Farrar, 1986), princíp kontrastu (Clark, 1987), taxonomické očakávania a preferencia objektu (Markman, 1992) a používanie zjednodušenej reči – „materinčiny“ (Snow a Ferguson, 1977). Ľudia s narušenou schopnosťou dedukovať intenciu hovoriaceho (ľudia bez „teórie mysle“) napr. autisti, sú ťažko handicapovaní v sociálnych interakciách a majú problémy s porozumením jazyka (Baron-Cohen, 1995).

V nasledujúcej časti predstavíme modely, v ktorých sa významy explicitne neprenášajú a každý agent si ich buduje individuálne počas života na základe interakcie s prostredím.

3. Samoorganizácia

Kedykoľvek je spolu dlhšie skupina ľudí, medzi ktorými je komunikácia možná a vzájomne výhodná, zákonite si vytvoria spoločný jazyk – príkladom sú pidgin¹⁴ jazyky (Bickerton, 1990) alebo spontánna emergencia znakovkej reči v komunitách nepočujúcich (Kegl et al., 1999). V týchto komunitách vzniká zdieľaný komunikačný systém v priebehu jedinej generácie bez akéhokoľvek vertikálneho prenosu. Vzhľadom na tento fakt je nutné hľadať pre vznik koordinovaného komunikačného systému iný vysvetľujúci mechanizmus ako biologickú evolúciu – tá sa jednoducho počas jednej generácie nemá ako presadiť.

Podľa (Steels, 2000a) globálna koherencia horizontálne prenášaného komunikačného systému vzniká z lokálnych interakcií jeho používateľov samoorganizáciou. Jedinci sa správajú adaptívne – na základe výsledku predchádzajúcich komunikačných interakcií modifikujú svoje lingvistické správanie tak, že preferujú používanie takých jazykových konštruktov, ktorých použitie v minulosti viedlo k úspešnému dorozumeniu. Tak väčšia úspešnosť v dorozumení vedie k častejšiemu použitiu a častejšie používanie zvyšuje šancu na úspešné dorozumenie, čo vytvára pozitívnu (samoposilňujúcu) spätnú väzbu umožňujúcu úspešným jazykovým konštruktom rozšíriť sa a presadiť v celej populácii.

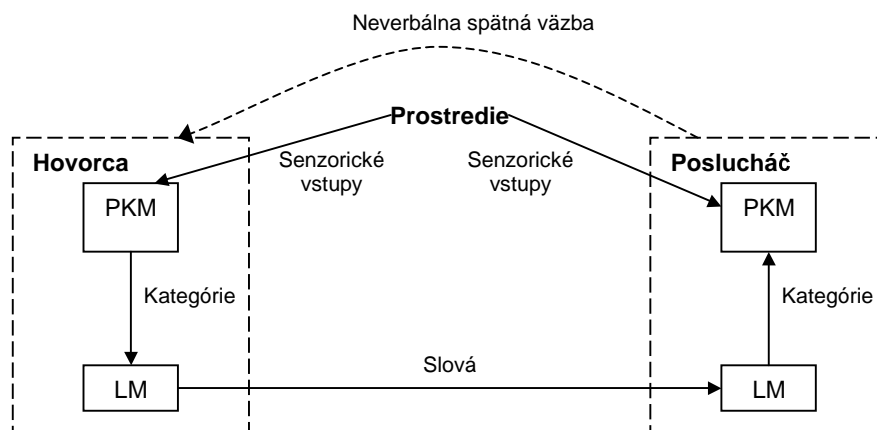
3.1 Vlastnosti modelov

Modely emergencie zdieľaného komunikačného systému pomocou samoorganizácie majú niekoľko spoločných charakteristík:

¹³ Návštevník cudzej krajiny vidí ako okolo prebehol zajac a práve vtedy povedal s ním stojaci obyvateľ krajiny slovo „gavagai“. Na základe tejto skúsenosti môže slovo „gavagai“ znamenať všeličo: „zajac“, „chlpatý“, „Dnes je pekný deň, však?“, a iné (Quine, 1960).

¹⁴ V skupinách dospelých ľudí žijúcich spolu pôvodne bez spoločného jazyka, napr. u otrokov na plantážach alebo pri občasných obchodných kontaktoch námorníkov, bol pozorovaný vznik rudimentárneho jazyka s výrazmi pochádzajúcimi z pôvodných jazykov a značne zjednodušenou gramatikou, tzv. pidgin jazyk.

1. **Agenty a prostredie.** Model tvorí populácia entít – *agentov*, ktoré sú zasadené do prostredia. To môže byť softvérovo simulované, napr. (Steels, 1997a) alebo reálne, ak sú agenty stelesnené v autonómnych robotoch (Vogt, 2000). Agenty majú predpísané vstupovať do komunikačných interakcií. Témy komunikácie poskytujú prostredie.
2. **Kognitívny aparát.** Aby agenty boli schopné komunikovať, musia mať isté kognitívne vybavenie – percepčno-konceptualizačný modul (PKM) a lexikalizačný modul (LM) (obr. 5). Úlohou PKM je zabezpečiť mapovanie medzi vnímaným externým aktuálnym stavom prostredia a jeho vnútornou mentálnou reprezentáciou. Typicky má podobu diskriminačných stromov (Steels, 1997b) alebo konceptuálnych priestorov s prototypmi (Vogt, 2000). LM zabezpečuje mapovanie medzi prvkami mentálnej reprezentácie a lingvistickými signálmi. Typicky máva podobu asociačnej tabuľky, kde každý prvok mentálnej reprezentácie (význam) je spojený asociačnou hranou s nejakým lingvistickým signálom (slovom), pričom hrana je ohodnotená silou asociácie. Jeden význam môže byť spojený s viacerými slovami (synonymia) a jedno slovo s viacerými význammi (homonymia).



Obrázok 5. Percepčno-konceptualizačný a lexikalizačný modul agentov.

3. **Komunikačná interakcia.** Komunikácia typicky prebieha v kolách a môže vyzeráť napr. takto: V každom kole sa náhodne vyberie agent hovorca a agent poslucháč. Agent hovorca na základe vnímaného aktuálneho stavu prostredia vyberie tému komunikácie (napr. niektorý objekt nachádzajúci sa v prostredí), pomocou PKM nájde jej vnútornú reprezentáciu (význam) a pomocou LM nájde a vyšle poslucháčovi vhodný signál (napr. najsilnejšie asociovaný s daným významom). Poslucháč sa snaží signál dekodovať a určiť vybranú tému. Ak sa mu to podarí,¹⁵ jazyková hra je úspešná.
4. **Učenie.** Kognitívny aparát agentov je adaptívny, to znamená, že v priebehu experimentu ho môže agent „zbieraním skúseností“ na základe priebehu a výsledku komunikačných interakcií modifikovať, napr. zjemniť vnútornú reprezentáciu prostredia (rozvetvením diskriminačného stromu, pridaním prototypu do konceptuálneho priestoru) alebo upraviť svoj lexikón (zmenou sily

¹⁵ Agent sa dozvie o úspešnosti komunikácie pomocou mimoverbálnych prostriedkov, napr. poslucháč ukáže na dekodovaný objekt.

asociácií v LM, resp. pridaním asociácie s novým slovom alebo významom). Populácia je homogénna v tom, že na začiatku experimentu sú reprezentácia prostredia aj lexikón všetkých agentov prázdne a každý agent používa rovnaký algoritmus na úpravu PKM a LM. Ďalej sa už ale vyvíja PKM a LM každého agenta samostatne, čiže v priebehu experimentu sa môže stať, že tomu istému aktuálne vnímanému stavu prostredia pripisujú agenti rôzny význam (rôzne reprezentácie v PKM) a takisto to isté slovo môžu mať vo svojich LM asociované s rôznymi význammi.

5. **Otvorenosť systému.** V niektorých experimentoch sa skúma robustnosť komunikačného systému voči populačným zmenám – prísunu a odsunu agentov (Kaplan, 1998). Nové agenty vstupujú do populácie s prázdnyim PKM a LM.¹⁶

3.2 Emergencia zdieľaného lexikónu – Talking Heads

V experimente Talking Heads (Steels, 1999) sú softvérové agenty inštalované do reálnych autonómnych robotov¹⁷ vybavených videokamerami snímajúcimi bielu magnetickú tabuľu s dvojrozmernými geometrickými objektmi rôznych farieb, veľkostí a tvarov (obr. 6). Objekty umiestnené na tabuli tvoria *kontext* komunikácie. Inštalované agenty vstupujú do lingvistických interakcií, tzv. *hádacích hier*, pričom vždy je jeden hovorcom a druhý poslucháčom.



Obrázok 6. Kamery a monitory zobrazujúce snímanú scénu použité v experimente Talking Heads, obrázok zo (Steels a Kaplan, 1999).

Hádacia hra. Hovorca si z kontextu náhodne vyberie jeden objekt – *tému* komunikácie, ostatné objekty tvoria *pozadie*. Pomocou svojho PKM hľadá takú konceptuálnu reprezentáciu témy, ktorá by ju jednoznačne odlišovala od pozadia. Ak ju nájde, pokúsi sa ju lexikalizovať a výslednú formu (signál) vyšle poslucháčovi. Ten

¹⁶ To umožňuje na nových agentoch modelovať a skúmať aj akvizíciu jazyka.

¹⁷ Roboty boli po dvoch situované na niekoľkých miestach sveta a prepojené internetom. Softvérové agenty, ktorých bolo mnohonásobne viac ako robotov, mohli „cestovať“ medzi jednotlivými robotmi, pričom komunikačná interakcia prebiehala iba medzi agentmi inštalovanými do dvojice robotov situovaných na jednom mieste.

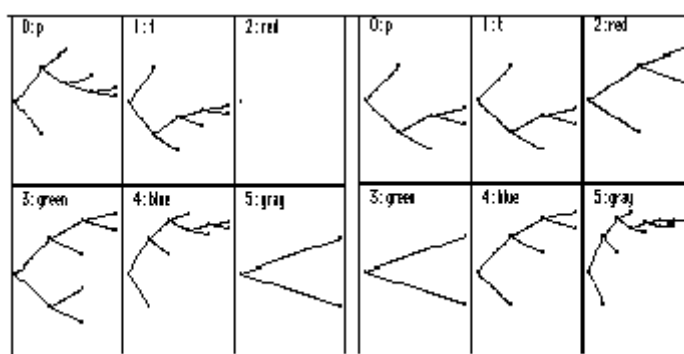
sa snaží formu dekodovať, uhádnuť, ktorý objekt mal hovorca na mysli a ukázať na neho.¹⁸

Hra sa končí úspechom, ak objekt označený poslucháčom je zhodný s tým, ktorý vybral hovorca ako tému. Hra končí neúspechom, ak sa objekty nezhodujú, alebo ak zlyhal niektorý z predošlých krokov (napr. ak hovorca nebol schopný nájsť jednoznačnú konceptuálnu reprezentáciu témy alebo jej lexikalizáciu, ak poslucháč nevedel dekodovať prijatý signál, atď.). V prípade neúspechu hovorca ukáže na objekt, ktorý si vybral ako tému a oba agenti sa pokúsia upraviť svoje vnútorné štruktúry (PKM a LM), aby boli v ďalších interakciách úspešnejšie.

Percepčno-konceptualizačný modul agenta. Agenty dokážu pomocou nízkoúrovňových rutín segmentovať obraz snímaný kamerami a extrahovať z neho rôzne numerické údaje o každom objekte, napr. farbu (jej RGB zložky, jas, saturáciu), horizontálnu a vertikálnu pozíciu, veľkosť, tvar, atď. Tieto rutiny zodpovedajú senzoričným kanálom a hodnoty vnemom v jednotlivých senzoričných kanáloch. Všetky kanály sú škálované tak, že dávajú hodnoty z intervalu $\langle 0,0; 1,0 \rangle$.

Konceptami – význammi, ktoré bude treba lexikalizovať, sú kategórie odlišujúce tému od ostatných objektov kontextu. Kategórie sú definované pomocou *diskriminačných stromov* (pre každý senzoričný kanál jeden strom, obr. 7). Diskriminačným stromom je každý strom, ktorý má nasledujúce vlastnosti:

1. Strom je označený názvom senzoričného kanála, ktorému zodpovedá (napr. R, G, B, HPOS, VPOS).
2. Každý vrchol, ktorý nie je listovým, má dvoch potomkov.¹⁹
3. Každému vrcholu prislúcha nejaký interval, pričom koreňu stromu prislúcha interval $\langle 0,0; 1,0 \rangle$.
4. Ak vrcholu prislúcha interval $\langle a, b \rangle$ a má potomkov, tak jeho potomkom prislúchajú intervaly $\langle a, (a+b)/2 \rangle$ a $\langle (a+b)/2, b \rangle$.



Obrázok 7. Diskriminačné stromy pre rôzne senzoričné kanály dvoch agentov (vľavo prvý, vpravo druhý agent).

Kategóriou je každý pár $[s, h]$, kde s (atribút) je názov niektorého stromu (kanála) a h (hodnota) je interval prislúchajúci niektorému vrcholu tohto stromu

¹⁸ Ukázanie sa realizuje vyslaním údajov o smere, ktorým je natočená kamera robota.

¹⁹ Strom nemusí byť rovnomerne „košatý“, distribúcia vetiev závisí od rozloženia listov. Uvedenú definíciu spĺňa aj strom s jediným vrcholom, ktorý je zároveň koreňom aj listom.

(interval h prislúchajúci vrcholu v budeme niekedy označovať h_v). Hovoríme, že nejaký objekt *má vlastnosť* $[s, h]$, ak jeho numerická hodnota vrátená sensorickým kanálom s leží v intervale h .

Katégorie používame na bližšie určenie (výber) objektov z nejakej množiny pomocou operátora *Select* definovaného takto:

Nech O je množina objektov a K je množina kategórií, pričom ak $[s_1, h_1], [s_2, h_2] \in K$, tak $s_1 \neq s_2$ (teda každá kategória v K prislúcha inému sensorickému kanálu). Operátor *Select*(O, K) vráti množinu $S \subseteq O$ takú, že pre každý objekt $o \in S$ a každú kategóriu $[s, h] \in K$ platí, že objekt o má vlastnosť $[s, h]$.

Cieľom agenta – hovorcu je jednoznačne odlíšiť tému od pozadia, teda pre kontext C a tému t nájsť takú množinu kategórií K , aby $Select(C, K) = \{t\}$ (množinu kategórií K s touto vlastnosťou nazveme *diskriminujúcou*). Pritom sa snaží minimalizovať počet prvkov K .

V prvom kroku hľadá diskriminujúcu kategóriu v každom kanále jednotlivo: Diskriminačným stromom s prechádza od koreňa k listom tak, že pri každom vetvení si vyberie vrchol v , v ktorom $t \in Select(C, [s, h_v])$ a skončí, ak $Select(C, [s, h_v]) = \{t\}$ alebo ak v je list. V prvom prípade našiel diskriminujúcu kategóriu, v druhom jeho súčasné rozlišovacie schopnosti pre tento sensorický kanál nepostačujú a treba hľadať v inom kanále.²⁰

Ak žiadna z kategórií $[s, h_v]$ nájdených v prvom kroku nie je diskriminujúca jednotlivo, skúša ich kombinovať po dvoch, po troch, atď.²¹ Ak ani to nevedie k úspechu, hra sa končí zlyhaním. Agent – hovorca si upraví PKM rozdelením intervalu h_v náhodne vybratého listu v niektorého stromu.²²

Ak agent našiel viac množín kategórií K takých, že $Select(C, K) = \{t\}$, zoradí ich podľa nasledujúcich pravidiel:

1. Preferuje sa množina K s najmenším počtom prvkov (kategórií).
2. Ak majú dve množiny K_i, K_j rovnaký počet kategórií, preferujú sa abstraktnejšie kategórie, čiže kategórie $[s, h_v]$ s vrcholom v v menšej hĺbke.
3. V prípade rovnakej hĺbky vrcholov sa preferuje kategória vrcholu s vyššou zaznamenanou úspešnosťou v minulých diskrimináciách.

Usporiadaná množina diskriminujúcich množín kategórií $\{K_1, \dots, K_n\}$ je vstupom pre lexikalizačný modul agenta.

Lexikalizačný modul agenta. Lexikón každého agenta pozostáva z obojsmerných asociácií medzi formami (slovami) a význammi (množinami kategórií).²³ Slová sú náhodné kombinácie slabík. Každá asociácia má skóre. Keď hovorca lexikalizuje

²⁰ Napr. ak možno objekt odlíšiť od ostatných na základe farby, treba mať dostatok kategórií pre farbu. Ak sa v kontexte nachádza viac objektov rovnakej farby, ale majú rôznu veľkosť, treba mať kategórie pre veľkosť, atď.

²¹ Ak napr. kontext obsahuje červený trojuholník, červený štvorec, modrý trojuholník, zelený kruh a témou je prvý objekt, na jej jednoznačné určenie treba použiť kombináciu farba-tvar („červený trojuholník“).

²² Úspešnosť použitia intervalov na diskrimináciu sa vo vrchole zaznamenáva a vrcholy s malou úspešnosťou (t.j. s rozdelením intervalov irelevantným prostrediu agenta) sa počas hier orezávajú.

²³ Ak by slovo označovalo namiesto celej množiny kategórií iba jednotlivé kategórie a agenty by používali viacslovné vety, bolo by možné skúmať syntaktické vlastnosti jazyka (kompozičnosť). Experiment Talking Heads sa však vývojom syntaxe nezaobrá.

nejaký význam, hľadá všetky slová asociované s týmto významom a vyberie to, ktorého asociácia má najlepšie skóre.

Ak výsledkom PKM hovorcu bolo viac množín kategórií $\{K_1, \dots, K_n\}$, agent skúša lexikalizovať K_1 . Ak pre ňu nemá vo svojom slovníku žiadne slovo, skúša lexikalizovať K_2 , atď. Ak sa mu nepodarí lexikalizovať žiadnu z množín kategórií, hra končí zlyhaním a agent môže s malou pravdepodobnosťou ($p=0,05$) vygenerovať náhodné slovo a asociovať ho s K_1 .

Keď poslucháč interpretuje nejaké slovo, nájde všetky asociované významy, vyberie z nich tie, ktoré v danom kontexte určujú jednu tému a z nich použije ten, ktorého asociácia má najvyššie skóre. Tému určenú týmto významom ukáže hovorcovi. Ak poslucháč nepozná slovo, ktoré použil hovorca (nemá s ním asociovaný žiaden význam), hra končí zlyhaním. Vtedy hovorca ukáže na objekt, ktorý bol jeho témou, a poslucháč hľadá pre túto tému najlepšiu diskriminujúcu množinu kategórií, akoby bol sám hovorcom. S touto množinou kategórií si asocjuje neznáme slovo, ktoré počul od hovorcu.

Na základe výsledku hry si hovorca aj poslucháč upraví skóre asociácií. V prípade úspechu (ak téma, na ktorú ukázal poslucháč je totožná s témou, ktorú lexikalizoval hovorca) zvýšia skóre víťaznej asociácie a znížia skóre konkurenčných²⁴ asociácií (laterálna inhibícia). V prípade neúspechu hry oba agenty znížia skóre asociácií, ktoré použili.

3.3 Špecifiká komunikácie bez explicitného prenosu významov

Pre úspešnú komunikáciu je nutné, aby hovorca a poslucháč zdieľali slová a aby kategórie, ktoré sú významom týchto slov, určovali v danom kontexte ten istý referent (objekt). Keďže sa pri komunikácii neprenášajú priamo významy, agenty koordinujú svoj jazyk iba na základe viditeľného správania. Toto obmedzenie je zdrojom rôznych typov inkoherecie:

1. *Synonymia*: Rôzne agenty preferujú pre ten istý význam rôzne slová. Táto situácia vzniká, keď agent vygeneruje pre nejaký význam nové slovo, nevediac, že v populácii už nejaké slovo pre tento význam existuje. Toto sa deje najmä ako prechodná fáza pre nové významy, kým sa ich lexikalizácia v populácii ustáli. *Synonymia* celkom nebráni agentom úspešne komunikovať (agent môže okrem slova, ktoré pre daný význam preferuje, „rozumieť“ aj slovám, ktoré preferujú ostatné agenty), avšak zvyšuje pravdepodobnosť nedorozumenia a nároky na pamäť (veľkosť lexikónu) a sťažuje akvizíciu jazyka novým agentom. Laterálna inhibícia skóre konkurenčných asociácií v lexikónoch agentov má tendenciu výskyt synonymie v jazyku eliminovať.
2. *Polysémia*: To isté slovo má rôzne preferované významy. Táto situácia vzniká, keď agent počuje neznáme slovo, s jeho pozorovaniami je konzistentných viac významov a on si tipne nesprávne.²⁵ Polysémia v jazyku môže prežiť a nebrániť úspešnej komunikácii, pokiaľ sú kontexty komunikácie dostatočne odlišné.²⁶

²⁴ Asociácii *Slovo-Význam* konkurujú asociácie spájajúce *Slovo* s inými význammi alebo *Význam* s inými slovami.

²⁵ Gavagai problém, pozri časť 2.6.

²⁶ Slovo „čelo“ označujúce časť hlavy aj druh klavíra nespôsobuje nedorozumenia, pokiaľ sa v kontexte nevyskytujú oba referenty naraz.

3. *Kategoriálna neurčitost'*: Často sa stáva, že v danom kontexte existuje viac diskriminujúcich kategorizácií nejakej témy, napr. nejaký objekt môže byť najviac vľavo od ostatných a zároveň aj najvyššie. Keďže úspešnosť komunikácie sa hodnotí iba podľa toho, či objekt vybraný za tému hovorcom je ten istý, ako určil poslucháč, agenty môžu používať rôzne významy a pritom úspešne komunikovať. Napr. hovorca môže povedať „bavubo“ a myslieť tým „vľavo“ a poslucháč môže odvodiť, že „bavubo“ znamená „hore“.
4. *Multireferencialita*: Ten istý význam môže u rôznych agentov určovať rôzne referenty (napr. ak objekty, ktoré sú pre jedného agenta vľavo, sú pre iného vpravo). V experimente Talking Heads sa jej dá vyhnúť umiestnením kamier veľmi blízko seba a ich natočením rovnakým smerom, príp. inštalovať softvérové agenty do jedinej kamery. Iný spôsob je predefinovať agentom „teóriu mysle“ v tom, že agent poslucháč pri komunikácii kategorizuje svet z pohľadu hovorcu (aj keď jeho vlastné vnímanie môže byť iné).²⁷

3.4 Priebeh a výsledky experimentu

Prvý Talking Heads experiment bežal 4 mesiace počas leta 1999. Zdieľaný lexikón podložený konceptuálnym repertoárom umožňujúci agentom úspešne komunikovať o snímaných scénach emergoval v priebehu niekoľkých dní. Agenty odohrali spolu 400000 situovaných hádacích hier. Počas experimentu boli do populácie pridávané nové agenty a ich celkový počet dosiahol cca 2000. Napriek mnohým perturbáciám spôsobeným situovanosťou, šumom, technickými zlyhaniami a sústavným prísunom nových agentov sa podarilo udržať koherentný lexikón. Celkovo sa vytvorilo cca 8000 slov a 500 kategórií. Jadro slovníka tvorilo cca 100 veľmi často používaných slov pre kategórie typu hore, dole, vľavo, vpravo, zelený, červený, veľký, malý, atď.

Druhý experiment bežal od januára do augusta 2000. Po počiatočných ťažkostiach spôsobených priveľkým prísunom nových agentov nakoniec emergoval lexikón umožňujúci úspešnú komunikáciu.

Faktory podmieňajúce úspešný priebeh experimentu. Experimentátori varírovali niektoré parametre experimentu, s cieľom zistiť ich vplyv na úspešnosť výsledku (Steels et al., 2002).

Interné faktory:

1. *Agenty musia byť schopné zapájať sa do koordinovaných interakcií.* Agenty musia mať vôľu komunikovať a musia sa riadiť spoločným protokolom priebehu komunikačnej interakcie. Emergencia zdieľaného protokolu interakcie nebola témou opísaného experimentu, agenty ho mali vopred naprogramovaný.
2. *Agenty musia mať paralelné neverbálne spôsoby dosahovania cieľov verbálnych interakcií.* Keďže agenty nemajú žiadne predefinované kategórie ani telepatickú schopnosť priameho prenosu významov, možnosť upriamiť pozornosť na tému komunikácie (dostatočne spoľahlivým) neverbálnym spôsobom je veľmi dôležitá najmä v počiatočnej situácii bez akéhokoľvek zdieľaného lexikónu. Neskôr, keď

²⁷ Teória mysle tohto typu je použitá napr. v (Bodík a Takáč, 2003), Talking Heads ju nepoužíva.

už populácia má zdieľaný lexikón, neverbálna spätná väzba nie je až taká dôležitá.²⁸

3. *Agenty musia byť schopné konceptualizovať realitu. Konceptualizačný proces agentov musí byť založený na rovnakých senzorických kanáloch a viesť k podobným aj keď nie nutne rovnakým konceptuálnym repertoárom. Ak má byť komunikácia robustná aj v meniacom sa prostredí, konceptualizácia reality nemôže byť fixne daná vopred. Kategoriálna neurčitosť však výrazne komplikuje dorozumenie, preto je rozumné ju tmiť. V experimente bolo použité zjednodušenie: na senzorických kanáloch bolo definované usporiadanie určujúce, ktorý kanál sa má použiť, ak viaceré dávajú rovnako dobrú diskrimináciu (napr. preferovanie farby pred veľkosťou a pozíciou). Významným prostriedkom koordinácie vnútorných reprezentácií je preferencia kategórií, ktoré sú lexikalizované a zaznamenávanie úspešnosti používania kategórii (s orezávaním neúspešných kategórií).*
4. *Agenty musia byť schopné rozpoznať verbálne formy a reprodukovať ich s dostatočnou presnosťou. Zašumenie slov na začiatku experimentu znemožňovalo vznik zdieľaného lexikónu, ak však agenty už mali vytvorený zdieľaný lexikón, úspešnosť komunikácie bola voči rozumnej hladine šumu robustná.*
5. *Agenty musia byť schopné objaviť a používať najsilnejšie asociácie medzi formami a význammi. Agent musí byť schopný udržiavať a používať asociácie viacerých slov s jedným významom a jedného významu s viacerými slovami. Schopnosť zaznamenávať úspešnosť svojich interakcií a na jej základe modifikovať svoje lingvistické správanie je nutná pre samoorganizáciu koherentného zdieľaného lexikónu.*

Externé faktory:

1. *Skupina musí mať dostatočnú stabilitu. Ak je prísun/odsun agentov príliš rýchly, nastáva dezintegrácia jazyka, pretože nové agenty nemajú čas osvojiť si asociácie prítomné v populácii a generujú priveľa novotvarov a staré agenty odchádzajú prirýchlo, takže nie je zabezpečené uchovanie existujúcich asociácií.*
2. *Počiatočná veľkosť skupiny nesmie byť priveľká, aby sa zabezpečilo dost' interakcií medzi tými istými jedincami. Pri priveľkej počiatočnej veľkosti populácie a malom počte opakovaných interakcií medzi tými istými agentmi sa paralelne generuje veľa slov pre rovnaké významy a samoorganizácia je neúčinná. Ak však už v populácii existuje stabilný zdieľaný lexikón a agenty budú pribúdať pomaly, veľkosť populácie je prakticky neohraničená.*
3. *Prostredie musí byť dostatočne stabilné a musí mať rôzne stupne zložitosti. To neznamená, že prostredie má byť nemenné. Musí však mať isté štrukturálne charakteristiky invariantné dostatočne dlhý čas, aby bolo možné inkrementálne vybudovať ich konceptuálnu reprezentáciu. To je analogické podmienkam, v ktorých si osvojujú jazyk malé deti.*

²⁸ Zašumenosť signálu o polohe kamery (ukázanie na objekt) v počiatočných fázach experimentu znemožnila vznik jazyka, ak sa však pridala do experimentu až po ustálení zdieľaného jazyka, nemala výrazný vplyv na úspešnosť komunikácie a koherenciu lexikónu.

3.5 Diskusia

Prezentovaný experiment demonštruje samoorganizáciu koherentného zdieľaného lexikónu pri zachovaní nasledujúcich podmienok:

1. *Distribučnosť*: Žiaden agent nemá globálny pohľad na jazyk ani moc centrálne riadiť ostatných. Všetky interakcie sú lokálne.
2. *Žiadna telepatia*: Žiaden agent nemá priamy prístup k vnútorným stavom iných agentov. Spätnú väzbu dostáva iba pomocou „pozorovateľných“ prostriedkov.
3. *Žiadne preddefinované jednotné reprezentácie*: Agenty nemajú vnútorné reprezentácie prostredia (významy) dané vopred, ale si ich budujú súčasne s komunikáciou. Vnútorné reprezentácie ani lexikóny jednotlivých agentov nie sú identické.

Hlavný prínos prezentovaného experimentu vidíme v objasnení mechanizmu budovania základného spoločného lexikónu v komunite bez akéhokoľvek spoločného jazyka. Experimentálne situácie sú však veľmi jednoduché a on-line (jediné, o čom agenty komunikujú, sú objekty práve prítomné v situácii snímanej ich kamerami), významy preto zodpovedajú sémantike podstatných mien a adjektív. Pre vybudovanie základného lexikónu je toto obmedzenie dôležité (viď externý faktor č. 3 v predchádzajúcej časti), budúci výskum by však nemal opomenúť problematiku budovania sémantiky slovies.

Modifikácie prezentovaného experimentu možno využiť na skúmanie permanentnej zmeny jazyka (Steels a Kaplan, 1998), diverzifikácie jazyka – vzniku dialektov a bilingualizmu (Steels, 1997a), atď. Emergencia gramatiky pomocou samoorganizácie sa študuje v (Steels, 2000b, 2002). Zaujímavý je experiment (Vogt, 2003), ktorý kombinuje mechanizmus vytvárania významov pomocou diskriminačných stromov s iterovaným učením.

V ďalšej časti predstavíme model aplikujúci mechanizmus samoorganizácie na formovanie zdieľaného samohláskového systému populácie.

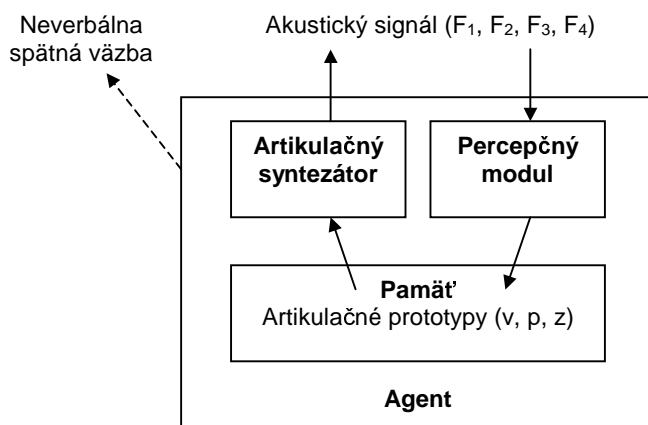
3.6 Emergencia samohláskového systému

Fonologické systémy ľudských jazykov vykazujú pozoruhodné regularity. Napriek schopnosti produkovať a percipovať mnoho rôznych zvukov ľudské jazyky používajú len malé podmnožiny dostupných zvukov. Tieto podmnožiny nie sú náhodné. Niektoré zvuky sa vyskytujú takmer univerzálne – 87 % jazykov obsahuje samohlásky [i] a [a], 82 % [u], 69 % [o] a 65 % [e]. Iné zvuky, napr. [œ] (1 %) sú veľmi zriedkavé (de Boer, 2000).

Častejší výskyt istých zvukov a zriedkavosť iných spolu s ďalšími vlastnosťami (napr. symetriou hláskového systému) vyzerá ako výsledok optimalizácie akustickej rozlíšiteľnosti (Liljencrants a Lindblom, 1972). Nie je však jasné, kto vykonáva túto optimalizáciu – žiaden človek, ktorý sa učí jazyk, aktívne neoptimalizuje hláskový systém, skôr sa snaží čo najvernejšie imitovať počuté zvuky. Experimenty, ktoré opíšeme v tejto časti, sa snažia verifikovať hypotézu, že optimalizácia je emergentným dôsledkom samoorganizácie v populácii.

V experimente (de Boer, 2000) je použitá populácia agentov schopných produkovať, vnímať a učiť sa realistické zvuky zodpovedajúce samohláskam. Každý agent je vybavený syntezátorom samohlások, asociatívnou pamäťou na ukladanie prototypov samohlások a perцепčným modulom, ktorý dokáže počítat vzdialenosti medzi akustickými signálmi a k počutému zvuku nájsť v pamäti najbližší prototyp

(obr. 8). Produkčný a percepčný modul sú konštruované tak, aby čo najvernejšie zodpovedali poznatkom o ľudskej artikulácii a percepcii lingvistických signálov.



Obrázok 8. Architektúra agenta.

Produkcia. Artikulačný syntežátor agenta dostáva na vstupe artikulačnú reprezentáciu samohlásky pozostávajúcu z troch parametrov – výšky jazyka, polohy jazyka a zaokrúhlenia pier, všetky ako reálne čísla z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Trojica $(0,0,0)$ kóduje jazyk najnižšie, najviac vpredu a najmenej zaokrúhlené pery, $(1,1,1)$ jazyk najvyššie a najviac vzadu, pery úplne zaokrúhlené. $(0,0,0)$ zodpovedá hláske [a], $(0,1,0)$ hláske [i] a $(1,1,1)$ generuje [u]. Syntežátor na výstupe produkuje akustickú reprezentáciu príslušnej samohlásky – jej prvé štyri formantové frekvencie, napr. $(708, 1517, 2427, 3678)$ Hz pre hlásku [a].²⁹ Kvôli zvýšeniu reálnosti experimentu môžu byť následne všetky štyri frekvencie zašumené.

Percepcia. Keď agent percipuje akustický signál (v podobe prvých štyroch formantových frekvencií), porovná ho so signálmi zodpovedajúcimi jeho prototypom samohlások a vyberie najbližší. Vzdialenosť akustických signálov sa určuje ako vážená euklidovská vzdialenosť dvojrozmerných vektorov (F_1, F_2') , kde F_1 je prvá formantová frekvencia a F_2' je tzv. efektívna druhá formantová frekvencia (počítaná ako nelineárna vážená suma druhej až štvrtej formantovej frekvencie).

Pamäť. Agent si udržuje v pamäti artikulačnú reprezentáciu samohlások v podobe *prototypov*. Prototyp je centrálny bod kategórie v artikulačnom priestore. Prototypy nie sú statické, ale môžu vznikať, zanikať alebo sa v artikulačnom priestore posúvať. (Na začiatku simulácie agent začína ako *tabula rasa* s prázdny repertoárom prototypov).

Imitačná hra. Interakcie agentov sa nazývajú *imitačné hry*. V každom kole sa náhodne vyberie jeden agent ako iniciátor a druhý ako imitátor. Iniciátor si náhodne zvolí samohlásku zo svojho repertoáru. Ak je jeho repertoár prázdny (napr. na začiatku simulácie), pridá doň náhodnú samohlásku. Potom vyprodukuje príslušný akustický signál (prvé štyri formantové frekvencie) a vyšle ho imitátorovi. Imitátor

²⁹ Formantové frekvencie zodpovedajú vrcholom vo frekvenčnom spektre akustického signálu.

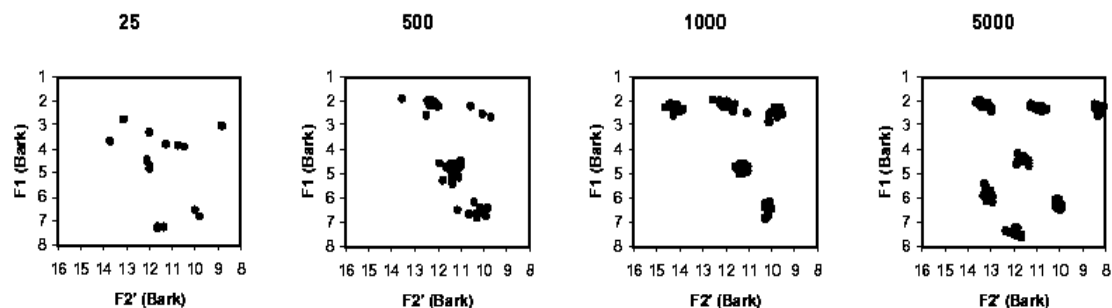
nájde vo svojom repertoári prototypov tú samohlásku, ktorej signál je k percipovanému najbližšie. (Ak je jeho zoznam prototypov prázdny, nájde dobrú aproximáciu percipovaného signálu "rozprávaním" a počúvaním samého seba, pričom pri vylepšovaní signálu používa hill-climbing³⁰ heuristiku.) Potom vyprodukuje signál zodpovedajúci nájdenému prototypu. Iniciátor počuje tento signál a nájde k nemu svoj najbližší prototyp. Ak je to ten istý, ktorým inicioval kolo, hra je úspešná. Úspech alebo neúspech signalizuje imitátorovi neverbálne.

Učenie. Imitátor aj iniciátor si s každým prototypom pamätajú koľkokrát bol použitý (*use*) a koľkokrát bol úspešne použitý (*success*). Imitátor modifikuje svoj repertoár podľa výsledku hry. V prípade úspechu posunie svoj prototyp bližšie k percipovanému signálu.

Ak hra skončila neúspechom, sú dve možnosti. Ak je pomer *success/use* použitého prototypu nízky, zrejme má imitátor nekvalitný prototyp a vtedy ho posunie smerom k percipovanému signálu. Ak je pomer *success/use* vysoký, prototyp bol úspešne používaný v predošlých kolách, čo znamená, že je dobrou imitáciou samohlások aspoň niektorého z iných agentov. Pravdepodobným dôvodom zlyhania hry je pomýlenie s inou samohláskou (imitátor má v tejto oblasti artikuláčného priestoru menej prototypov ako iniciátor). Vtedy si imitátor pridá nový prototyp, ktorý je blízko percipovaného signálu, použitím analogickej hill-climbing procedúry ako keď si pridával prvý prototyp.

Okrem týchto modifikácií oba agenti každých desať hier zahodia prototypy, ktoré boli použité aspoň 5 krát a majú pomer *success/use* menší ako 0,7. Takisto zľúčia prototypy, ktoré sú k sebe tak blízko, že ich po pridaní šumu nemožno od seba odlíšiť. A nakoniec, tlak na zväčšovanie repertoáru samohlások agentov je implementovaný tým, že si s malou pravdepodobnosťou ($p=0,01$) spontánne pridávajú náhodný prototyp.

Výsledky. Iterovaním imitačnej hry v dostatočne veľkej populácii bola dosiahnutá emergencia realistických hláskových systémov. Na obrázku 9 je priebeh jednej simulácie 20 agentov s 10 % úrovňou šumu po 25, 500, 1000 a 5000 kolách. V grafe sú zachytené všetky prototypy všetkých agentov, osi zodpovedajú prvej a efektívnej druhej formantovej frekvencii. Výsledný samohláskový systém pozostáva z [i], [ɛ], [a], [o], [u], [ɨ] a [ɔ] a vyskytuje sa napr. v Sa'banskom jazyku na Borneu.

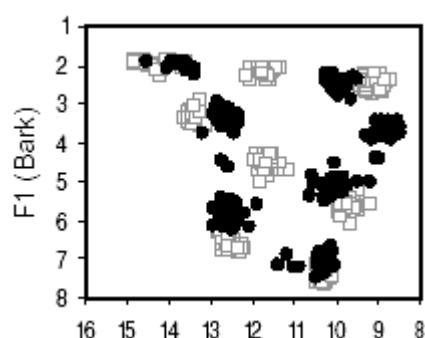


Obrázok 9. Emergencia samohláskového systému v populácii 20 agentov s 10 % šumom.

³⁰ V malom okolí signálu vyberá z viacerých alternatív vždy len takú, ktorá je zlepšením oproti predchádzajúcemu kroku.

Samohláskové systémy, ktoré vznikli pri rôznych behoch simulácie, sa navzájom líšili nielen v počte prototypov, ale aj v ich distribúcii, symetrii, atď. De Boer uvádza, že pri porovnávaní 100 hier sa v 49 vyvinul 5-samohláskový systém, symetrická distribúcia bola v 88 % prípadov, v 8 % bola jedna centrálna samohláska a viac predných a v 4 % centrálna a viac zadných samohlások, čo veľmi dobre zodpovedá zisteniam o prirodzených jazykoch.

De Boer (1999) ďalej skúmal, či je systém robustný voči zmenám v populácii. Po emergencii samohláskového systému v populácii 50 agentov (obr. 10, biele štvorce) simulácia bežala ďalších 15000 kôl, pričom v každom kole bol s pravdepodobnosťou 0,01 náhodne odobratý jeden agent a namiesto neho pridaný nový s prázdny repertoárom. Čierne štvorce na obrázku reprezentujú samohláskový systém na konci simulácie (dovtedy sa celá populácia vymenila). Vidíme, že samohláskový systém sa trochu zjednodušil, ale ostal veľmi podobný pôvodnému.



Obrázok 10. Zachovanie samohláskového systému v meniacej sa populácii.

3.7 Diskusia

Výsledky simulácie ukázali, že hláskové systémy možno predikovať ako výsledok samoorganizácie v populácii agentov. Hoci agenti začínali s prázdny repertoarmi hlások a bez obmedzení na vlastnosti hláskového systému, v populácii emergovali koherentné symetrické samohláskové systémy s veľkou a rovnomernou disperziou hlások, podobne ako je to v reálnych ľudských jazykoch.

Podobnosť výsledkov experimentu s prirodzenými jazykmi je dôsledkom vlastností artikulačného a percepčného aparátu agentov, ktoré boli skonštruované tak, aby odrážali súčasné poznatky o ľudskej percepcii a produkcii hlások. Artikulačno-percepčný aparát bol vopred daný, rovnaký pre všetkých agentov a v priebehu experimentu sa nemenil. Bolo by zaujímavé (a realistické) rozšíriť model o genetickú evolúciu percepčno-artikulačného aparátu a skúmať jej vplyv na výsledky experimentu.

Limitáciou experimentu je, že modeluje len vývoj samohlások a to vyslovovaných izolovane. Komplexnejšie výpovede pozostávajúce zo sekvencií samohlások a spoluhlások by umožnili realistickejšie skúmanie vývoja fonologických systémov. Počítačová implementácia realistickejšieho modelu by však bola v súčasnosti veľmi náročná a je témou, ktorá čaká na ďalší výskum.

4. Zhrnutie

Ľudský jazyk sa vyvíja komplexnou interakciou biologickej evolúcie, individuálneho osvojovania a kultúrneho prenosu. Cieľom tejto kapitoly bolo predstaviť modely mechanizmov kultúrneho prenosu a možnosti ich aplikácie pri vysvetľovaní:

1. emergencie gramatických črt v jazyku iterovaným učením,
2. formovania zdieľaného lexikónu v jednogeneračnej populácii samoorganizáciou,
3. formácii zdieľaného hláskového systému samoorganizáciou.

Uvedené jazykové fenomény emergovali ako globálny výsledok dynamiky lokálnych interakcií v populácii. Pravidlá interakcií, „náchylnosť“ (learning bias) učiaceho algoritmu a produkčno-percepčný aparát boli v prezentovaných experimentoch vopred dané ako vstupné predpoklady. Za adekvátny nástroj modelovania vzniku a vývoja týchto predpokladov považujeme evolučné algoritmy.

V tejto kapitole sme tiež poukázali na problémy formovania a koordinácie významov dané obmedzením na „neteľepatickú“ komunikáciu s pragmatickou spätnou väzbou a bez explicitného prenosu vnútorných reprezentácií.

Literatúra

- [1] Baron-Cohen, S.: *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*. Cambridge: MIT Press 1995.
- [2] Bickerton, D.: *Language and Species*. Chicago: University of Chicago Press 1990.
- [3] Blackmore, S.: *The meme machine*. New York: Oxford University Press 1999.
- [4] Bodík, P., Takáč, M.: Formation of a Common Spatial Lexicon and its Change in a Community of Moving Agents. In Tessem, B., Ala-Siuru, P., Doherty, P., Mayoh, B. (eds.): *Proceedings of the Eighth Scandinavian Conference on Artificial Intelligence (SCAI'03)*. Amsterdam: IOS Press 2003.
- [5] Brown, R., Hanlon, C.: Derivational complexity and order of acquisition in child speech. In Hayes, J. R. (ed.): *Cognition and the Development of Language*. New York: Wiley 1970.
- [6] Chomsky, N.: *Rules and Representations*. New York: Columbia University Press 1980.
- [7] Chomsky, N.: *Knowledge of Language: its Nature, Origin and Use*. New York: Praeger 1986.
- [8] Clark, E.: The principle of contrast: A constraint on language acquisition. In MacWhinney, B. (ed.): *Mechanisms of language acquisition*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum 1987.
- [9] de Boer, B. Investigating the Emergence of Speech Sounds. In Dean, T. (ed.): *Proceedings of IJCAI-99*. San Francisco: Morgan Kaufman 1999.
- [10] de Boer, B.: Self-organization in vowel systems. *Journal of Phonetics* **28** (2000) 441-465.
- [11] Elman, J., Bates, E. et al.: *Rethinking innateness*. Cambridge: MIT Press 1996.

- [12] Gold, E. M.: Language identification in the limit. *Information and Control* **10** (1967) 447-474.
- [13] Harnad, S.: The Symbol Grounding Problem. *Physica D* **42** (1990) 335-346.
- [14] Kaplan, F.: A new approach to class formation in multi-agent simulations of language evolution. In Demazeau, Y. (ed.): *Proceedings of the Third International Conference on Multi Agent Systems ICMAS'98*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press 1998.
- [15] Kegl, J., Senghas, A., Coppola, M.: Creation through contact: Sign language emergence and sign language change in Nicaragua. In DeGraff, M. (ed.): *Language Creation and Language Change: Creolization, Diachrony, and Development*. Cambridge: MIT Press 1999.
- [16] Kirby, S.: Language evolution without natural selection: From vocabulary to syntax in a population of learners. Technical Report, University of Edinburgh 1998.
- [17] Kirby, S.: Learning, Bottlenecks and the Evolution of Recursive Syntax. In Briscoe, T. (ed.): *Linguistic Evolution through Language Acquisition: Formal and Computational Models*. Cambridge: Cambridge University Press 2002.
- [18] Kirby, S., Hurford, J.: The Emergence of Linguistic Structure: an Overview of the Iterated Learning Model. In Parisi, D., Cangelosi, A. (eds.): *Computational Approaches to the Evolution of Language and Communication*. Berlin: Springer-Verlag 2001.
- [19] Langmeier, J., Krejčířová, D.: *Vývojová psychologie*. Praha: GRADA 1998.
- [20] Liljencrants, L., Lindblom, B.: Numerical simulations of vowel quality systems: The role of perceptual contrast. *Language* **48** (1972) 839–862.
- [21] Markman, E.: Constraints on word learning: Speculations about their origins and domain specificity. In Gunnar, M. R., Maratsos, M. (eds.): *Modularity and constraints in language and cognition*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum 1992.
- [22] Oliphant, M.: The learning barrier: Moving from innate to learned systems of communication. *Adaptive Behavior* **7** (1999) 371–384.
- [23] Pinker, S.: *Words and Rules*. London: Weidenfeld & Nicolson 1999.
- [24] Quine, W. V. O.: *Word and Object*. Cambridge: MIT Press 1960.
- [25] Smith, K.: The Importance of Rapid Cultural Convergence in the Evolution of Learned Symbolic Communication. In Kelemen, J., Sosík, P. (eds.): *Advances in Artificial Life: Sixth European Conference on Artificial Life (ECAL01)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2001.
- [26] Smith, K.: Natural selection and cultural selection in the evolution of communication. *Adaptive Behavior* **10** (2002) 25-44.
- [27] Smith, K.: Learning biases for the evolution of linguistic structure: an associative network model. In Banzhaf, W., Christaller, T., Dittrich, P., Kim, J. T., Ziegler, J. (eds.): *Advances in Artificial Life – Proceedings of the 7th European Conference on Artificial Life (ECAL)*. Dortmund: Springer-Verlag 2003a.

- [28] Smith, K.: *The Transmission of Language: models of biological and cultural evolution*. PhD thesis, Theoretical and Applied Linguistics, The University of Edinburgh 2003b.
- [29] Snow, C. E., Ferguson, C. A. (eds.): *Talking to children*. Cambridge: Cambridge University Press 1977.
- [30] Steels, L.: Language Learning and Language Contact. In Daelemans, W. (ed.): *Empirical approaches to Language Learning*. Praha: ECML 1997a.
- [31] Steels, L.: Constructing and Sharing Perceptual Distinctions. In van Someren, M., Widmer, G. (eds.): *Proceedings of the European Conference on Machine Learning*. Berlin: Springer-Verlag 1997b.
- [32] Steels, L.: *The Talking Heads Experiment. Volume 1. Words and Meanings*. Antwerpen: Laboratorium 1999.
- [33] Steels, L.: Language as a complex adaptive system. In Schoenauer, M. (ed.): *Proceedings of PPSN-VI*. Berlin: Springer-Verlag 2000a.
- [34] Steels, L.: The Emergence of Grammar in Communicating Autonomous Robotic Agents. In Horn, W. (ed.): *Proceedings of ECAI 2000*. Amsterdam: IOS Press 2000b.
- [35] Steels, L.: Computer simulations of the origins of case grammar. *Fourth Evolution of Language Conference*. Cambridge: Harvard 2002.
- [36] Steels, L., Kaplan, F.: Spontaneous Lexicon Change. In *Proceedings of COLING-ACL*. Montreal: ACL 1998.
- [37] Steels, L., Kaplan, F.: Situated grounded word semantics. In Dean, T. (ed.): *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Francisco: Morgan Kauffmann 1999.
- [38] Steels, L., Kaplan, F., McIntyre, A., Van Looveren, J.: Crucial factors in the origins of word-meaning. In Wray, A. (ed): *The Transition to Language*. Oxford: Oxford University Press 2002.
- [39] Takáč, M.: Koevolučné modelovanie vzniku jazyka. In Kelemen, J. (ed.): *Kognice a umělý život III.*, Opava: Slezská univerzita 2003.
- [40] Tomasello, M., Farrar, J.: Joint attention and early language. *Child Development* **57** (1986) 1454-1463.
- [41] Vogt, P.: *Lexicon grounding on mobile robots*. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel 2000.
- [42] Vogt, P.: Iterated learning and grounding: from holistic to compositional languages. In *Language evolution and computation – Workshop proceedings of ESSLLI-03*. Wien: Technical University 2003.
- [43] Wilson, R., Keil, F. (eds): *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge: MIT Press 1999.
- [44] Zuidema, W.: How the poverty of the stimulus solves the poverty of the stimulus. In Becker, S., Thrun, S., Obermayer, K. (eds.): *Advances in Neural Information Processing Systems* **15**. Cambridge: MIT Press 2003.

Martin Takáč

Ústav informatiky FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

e-mail: takac@fmph.uniba.sk