

Robotický model systému zrkadliacich neurónov

Kristína Rebrová a Igor Farkaš

Centrum pre kognitívnu vedu, KAI FMFI UK, Univerzita Komenského v Bratislave

Mlynská dolina, 84248 Bratislava

Email: kristina.rebrova@fmph.uniba.sk, farkas@fmph.uniba.sk

Abstrakt

Fenomén zrkadliacich neurónov je v súčasnosti jednou z najdiskutovanejších tém na poli kognitívnych vied a kognitívneho modelovania. Ide o bunky vyššej motorickej kôry, objavené v oblasti F5 u makakov, ktoré reagujú nie len pri vykonávaní, ale aj pri pozorovaní akcií. Predpokladá sa, že úlohou zrkadliacich neurónov je párovanie pozorovaného deja a vlastnej motorickej skúsenosti za účelom porozumenia pozorovanej akcii a imitovania akcií. Väčšina z modelov systému zrkadliacich neurónov uvažuje, že do nich vstupujú predspracované informácie, ktoré obsahujú pozíčne invariantné informácie o pozorovanom pohybe. V príspevku predstavíme konceptuálny návrh nového modelu systému zrkadliacich neurónov, ktorý na rozdiel od väčšiny svojich predchodcov zohľadňuje problém perspektívy a reflektuje najnovšie poznatky z neurovedy o variantných a invariantných zrkadliacich a vizuálnych neurónoch.

1 Úvod

Fenomén zrkadliacich neurónov a motorickej rezonancie sa v súčasnosti nachádza na výslni tém v kognitívnej vede. Počnúc objavením zrkadliacich neurónov na začiatku deväťdesiatych rokov [24] otvára táto téma stále nové výskumné otázky a výzvy a súčasne podporuje aktuálny trend chápať kogníciu ako stelesnenú a ukotvenú (v kontraste s klasickou výpočtovou paradigmou a počítačovou metaforou mysle).

Zrkadliace neuróny boli pôvodne objavené vo vyššej motorickej oblasti F5 v prefrontálnej kôre mozgu opíc *Macaca Nemestrina*. Ide o neuróny, ktoré majú takzvané vizuálne (alebo iné perceptuálne, pozri nižšie) vlastnosti, teda pália nie len pri vykonávaní, ale aj pri pozorovaní akcií - cielených motorických úkonov. Predpokladá sa, že úlohou zrkadliacich neurónov je párovanie pozorovaného deja a vlastnej motorickej skúsenosti za účelom porozumenia pozorovanej akcii a jej cieľu [30, 31, 32]. V súvislosti s touto vlastnosťou bol formulovaný pojem *systém zrkadliacich neurónov*, ktorý zastrešuje fronto-parietálny neurálny okruh zodpovedný za párovanie pozorovaných akcií a vlastného motorického repertoára. Napriek prvej predstave o úlohe a umiestnení týchto neurónov sa časom ukázalo, že zrkadliace neuróny možno nájsť vo viacerých oblastiach mozgu primátov i ľudí. Potom modalita

zrkadliacich neurónov, napríklad známa motorická, ale napríklad aj emočná [9], atď., závisí práve funkcionalite oblasti mozgu, v ktorej sa tieto neuróny nachádzajú, čo platí aj pre modalitu stimulov, na ktoré reagujú. Napríklad, zrkadliace neuróny v oblasti F5, ktoré majú primárne na starosti kódovanie motorických akcií vykonávaných rukami a ústami, ako je uchopovanie, trhanie, a pod., reagujú na vizuálne ako aj auditívne stimuly [14].

Základom systému zrkadliacich neurónov u makakov sú tri mozgové oblasti: F5 v premotorickej kôre, PF v temennom laloku a AIP v temennom laloku [32]. Oblasť PF a AIP sú spojené s oblasťou F5, no súčasne prijímajú aj vizuálnu informáciu vyššej úrovne z oblastí STS a IT nachádzajúcich sa v spánkovom laloku. STS, podobne ako F5, kóduje rôzne biologické pohyby, no reaguje len na vizuálne stimuly (nie na pohyb bez pohľadu) a pôsobí ako "zdroj informácií" pre motorické časti systému.

V nedávnej analytickej práci skúmali Molenberghs a kolegovia [19] jadro zrkadliaceho systému u ľudí. Autori spracovali dáta zo 125 rôznych štúdií využívajúcich funkčnú magnetickú rezonanciu (fMRI) na ľudských subjektoch cielených na dokázanie prítomnosti zrkadliacich neurónov u ľudí. Výsledky klasterizačnej analýzy ukázali, že u väčšiny týchto štúdií boli okrem hlavných oblastí homologických s F5 u makakov, IPL, IFG a susednej ventrálnej premotorickej kôry, aktívne aj ďalšie oblasti a to hlavne primárna vizuálna kôra, mozoček a časti limbického systému. Z výsledkov tejto štúdie vyplýva, že na porozumení pozorovanému dejú sa podieľa systém zrkadliacich neurónov, ako aj oblasti, ktoré tomuto systému sprostredkujú vstupnú informáciu. Ako naznačujeme ďalej v článku, je pravdepodobné, že sú tieto oblasti prepojené a k samotnému aktu porozumenia dochádza práve pri ich interakcii.

2 Zrkadliace neuróny a STS

Vyššia vizuálna oblasť STS nemá motorické vlastnosti, teda nie je aktívna pri vykonávaní pohybu bez vizuálneho vstupu. Napriek tomu je považovaná za potrebnú súčasť parieto-frontálneho zrkadliaceho okruhu [31, 32]. Oponenti takzvanej hypotézy priameho párovania (direct-matching), ktorá predpokladá, že základom porozumenia akciám je ich namapovanie na vlastný motorický repertoár agenta, tvrdia, že rozpoznanie akcie prebieha práve v STS, a že zrkadliaca aktivácia motorických oblastí je vlastne iba

akýsi epifenomén [16, 11, 12]. STS má rôzne zaujímavé vlastnosti. Jej štruktúra je veľmi rôznorodá, rovnako ako rozsah informácií, ktoré spracúva a reprezentuje. Okrem širokej škály biologických pohybov (aj tých, ktoré sú úplne mimo vlastného motorického repertoára) v spodnej časti STS (TEa), kódujú neuróny v horných podoblastiach STS (TPO a PGa) identitu pozorovaného jedinca a jeho pohyby.

V spomínanej hornej oblasti STS sa nachádzajú aj bunky reagujúce na hlavu (a tvár). Väčšina týchto buniek reaguje na podnety variantným spôsobom, teda reaguje len na určitý uhol (alebo uhly) natočenia objektu, v tomto prípade hlavy a tváre vzhľadom na pozorovateľa [25, 26]. Experimenty s priamym zaznamenávaním elektrickej aktivity buniek mozgu makakov ukázali, že okrem väčšiny variantných buniek obsahuje STS aj bunky invariantné, teda reagujúce na všetky rôzne uhly pohľadu. Tieto bunky teda kódujú objekt z pohľadu objektu, nie pozorovateľa. Perret a kolegovia navrhujú, že takýto mechanizmus môže vzniknúť na základe laterálnych spojení medzi neurónmi v STS, pričom hierarchicky vyššie invariantné neuróny prijímajú aktiváciu z príslušných variantných neurónov reagujúcich na rôzne prezentácie rovnakého stimulu.

Nedávny výskum Caggiana a kolegov [2] ukázal, že podobné vizuálne vlastnosti ako neuróny v hornej časti STS vykazujú aj zrkadliace neuróny v oblasti F5. Výsledky experimentov s priamym zaznamenávaním elektrickej aktivity buniek mozgu makakov ukázali, že väčšina (tri štvrtiny) skúmaných zrkadliacich neurónov reaguje variantným spôsobom, teda pri pozorovaní konkrétnej akcie len z jedného z troch rôznych uhlov pohľadu, konkrétne pri pohľade spredu (otočenie subjektu o 180° voči agentovi), z boku (90°) a z vlastnej perspektívy. Autori štúdie predpokladajú, že rozdiely v aktivácii zrkadliacich neurónov vzhľadom na uhol pohľadu by mohli pomáhať vyšším vizuálnym oblastiam, ako je napríklad STS, pri rozpoznávaní pozorovaného deja a hlavne jeho cieľa. Prítomnosť vizuálne invariantných zrkadliacich neurónov v F5 naznačuje, že v F5, rovnako ako v STS, dochádza k hierarchickému laterálnemu prepojeniu neurónov ústiacemu do abstraktného spracovania pozorovanej akcie a porozumenia pozorovanému dejú.

Otvorenou otázkou v oblasti porozumenia pozorovanému motorickému dejú zostáva určenie dominantnej časti mozgu zodpovednej za samotné porozumenie. Z perspektívy teórie priameho párovania (direct-matching), ide o oblasť F5 a zrkadliace neuróny. Naopak z perspektívy oponentov systému zrkadliacich neurónov ide (pravdepodobne) hlavne o oblasť STS. Medzi týmito ostrými možnosťami existuje aj zlatá stredná cesta, ktorú možno nájsť v modeli Tessitoreho a kolegov [35]. Tí predpokladajú, že vizuálne a motorické oblasti pri rozpoznávaní a porozumení akciám spolupracujú, konkrétne, že motorická informácia z F5 obohacuje informáciu v STS a zjednodušuje výpočtovo náročné vizuálne rozpoznávanie (viac pozri v časti 3). Dôležitou otázkou je aj miera porozumenia u pozorujúceho agenta. V prípade, že ide len o hrubé rozpoznanie kategórie pozorovaného pohybu, je možné

uvažovať rozpoznávanie na piktografickej úrovni prítomné v STS [8]. Ak však hovoríme o porozumení akcii, môžeme vyžadovať od agenta aj schopnosť vyvodit' jej dôsledky a porozumieť jej do hĺbky.

Neuropsychologické experimenty skúmajúce motorickú rezonanciu (ktorá signalizuje zrkadliacu neurálnu aktivitu [28]) na základe rozdielu v schopnostiach pozorujúcich subjektov, napríklad profesionálnych športovcov a laikov, ukázali, že pri silnejšom vzťahu medzi subjektom a dejom - lepšom namapovaní pozorovaného na vlastný motorický repertoár, dochádza jednak k silnejšej rezonančnej odozve ako aj k lepšej predikcii výsledku pozorovanej akcie [1]. Zaujímavé tiež je, tento jav nastáva len v prípade, že stimulom je video, nie statický obraz [33]. Tieto poznatky zdôrazňujú, že pri skúmaní porozumenia akciám je potrebné chápať porozumenie ako kontinuum, nie ako binárny fenomén [7, 6].

3 Výpočtové modelovanie systému zrkadliacich neurónov

Spolu s objavom zrkadliacich neurónov a ich vlastností, konkrétne funkcie mapovania pozorovaného pohybu na vlastný, vzniklo viacero výpočtových modelov systému zrkadliacich neurónov, z ktorých mnohé spadajú aj do kategórie kognitívnej robotiky. Napríklad známy model Oztopa a Arbiba [21] predstavuje mechanizmus, ktorým agent rozpoznáva rôzne typy uchopení na základe vlastností, ktoré má ruka pri uchopení a jej vzťahu k uchopovanému objektu, slúžiacich ako n-rozmerný vstup pre viacvrstvový perceptrón. Tento model a mnohé ďalšie (napríklad [13, 23], pozri prehľad v [22]) predpokladajú, že informácia, ktorá sa dostáva do systému zrkadliacich neurónov je invariantná, čím sa priamo vyhýbajú problému transformácie perspektívy.

Tento problém si stanovili za cieľ prekonať Tessitore a kolegovia [35], ktorých model priamo rieši problém interpretácie variantných vstupov, pozorovaní z inej ako vlastnej perspektívy. Tento model taktiež využíva poznatok, že motorické akcie možno popísať na základe malého množstva parametrov popisujúcich natočenia kĺbov ruky pri vykonávaní konkrétneho typu uchopenia predmetu. Na rozdiel od tradičných modelov však predpokladá, že tok informácie medzi oblasťou F5, resp. jej ekvivalentom, v ktorom sa nachádzajú zrkadliace neuróny, a oblasťou STS nie je jednosmerný, teda od vizuálneho k motorickému, ale obojsmerný. Tento model predpokladá, že nielen vizuálna informácia vyvoláva aktivitu u zrkadliacich neurónov, ale aj motorická informácia o akcii, kódovaná zrkadliacimi neurónmi, napomáha vizuálnym oblastiam, konkrétne STS, pri spracúvaní vizuálnej informácie. Zrkadliace neuróny, prispievajúce do rozpoznávania akcií novými aspektami zjednodušujú výpočtovo náročné vizuálne spracovanie - obmedzujú priestor možných interpretácií pri rozpoznávaní akcií. Autori tiež predpokladajú, že týmto okruhom možno vysvetliť aj fenomén afordancií [10]. Afordancie

si môžeme predstaviť ako sady scenárov, ktoré je možné urobiť alebo očakávať v súvislosti s práve pozorovaným objektom alebo dejom.

Tessitore a kolegovia modelovali tento fenomén na základe predošlého výskumu o konfigurácií rúk pri natáhaní sa a uchopovaní [17]. Základným predpokladom modelu je, že „uchopovacie“ akcie rúk možno rozdeliť do samostatných tried, reprezentovaných pomocou podmnožín vektorov z celkového priestoru možných konfigurácií kĺbov rúk, pričom každú akciu z konkrétnej triedy X možno charakterizovať pomocou lineárnej kombinácie vektorov triedy X. Autori nazývajú tieto množiny podpriestormi akcií (action subspaces). Implementovaný výpočtový model predstavuje funkciu mapovania medzi vizuálnou reprezentáciou akcie (z fotografií rúk pri akcií) a motorickou reprezentáciou získanou pomocou špeciálnej záznamovej rukavice. Jadrom modelu je takzvaná Mixture Density Network (sieť so zmiešanou hustotou, MDN) učená štandardnou metódou spätného šírenia chyby. Výsledky experimentov potvrdili, že navrhovaná architektúra je vhodná pre danú problematiku a tiež, že interakcia medzi STS a zrkadliacimi neurónmi z F5 je dôležitým prvkom vnímania a rozpoznávania akcií.

Výpočtový model, ktorý navrhujeme v tejto kapitole sa odráža od poznatkov Tessitoreho a kolegov, avšak zasadzuje problematiku do oblasti kognitívnej robotiky. Hlavným cieľom tejto pomerne mladej oblasti kognitívnej vedy je „skúmanie tvorením“ [27]. Trendom v tejto oblasti ale aj východiskom z neúnosnej komplexnosti je samostatné modelovanie rôznych kognitívnych funkcií a procesov. Kognitívne mechanizmy sú v rámci kognitívnej robotiky skúmané v duchu ukotvenej kognície modelované v stelesnených agentoch, konajúcich len na základe ich vlastných telesných vnemov získavaných z prostredia a sociálnej interakcie (viac pozri napríklad v [4, 29]). Tradičným, no určite nie exkluzívnym, nástrojom pri vytváraní riadiacich architektúr pre stelesnených agentov sú umelé neurónové siete, ktoré sú všeobecne populárne v oblasti modelovania fenoménov spojených s percepciou a akciou.

4 Robotický model systému zrkadliacich neurónov

Vychádzajúc z predpokladu, ktorý sme stanovili na konci predošlej časti článku, náš model systému zrkadliacich neurónov, určený pre robotického agenta, nebude nikdy dosť komplexný aby zachytil celú fyziológiu častí mozgu, ktoré modelujeme a tiež škálu pohybov a s nimi súvisiace mechanizmy, ktoré vedia vykonávať ľudia či primáty. Cieľom nášho modelu je skúmanie fenoménu interakcie motorickej a vizuálnej informácie v kontexte systému zrkadliacich neurónov prostriedkami kognitívnej robotiky a pomocou umelých neurónových sietí.

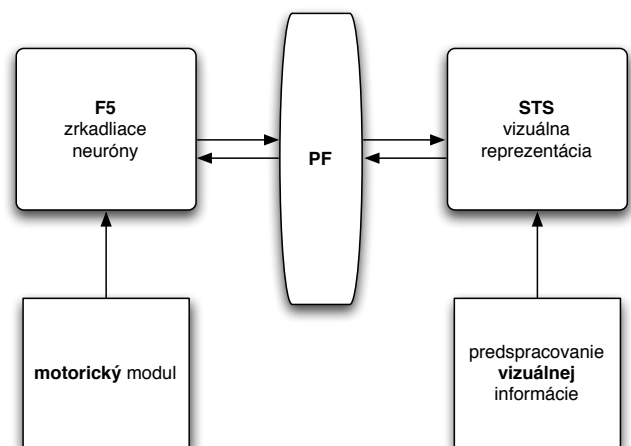
Hlavným predpokladom modelu je, že bude vytvorený pre konkrétneho robotického agenta - ro-

bota iCub [18], respektíve jeho simulátor [36], jedno z najvernejších robotických stvárnení dieťaťa. Tento robot má 53 stupňov voľnosti, čoho až 9 pripadá na každú ruku (prsty a dlaň) a svojím vzhľadom pripomína dva a pol ročné dieťa. Cieľom nášho výskumu je vytvoriť riadiacu architektúru, ktorá agentovi v priebehu jeho života umožní naučiť sa manipulovať s objektami, tiež pozorovať iného agenta pri takejto manipulácii a na základe vlastných skúseností rozpoznať práve pozorovanú akciu. V rozšírení tohto projektu by sa do scenára zapojil aj jazyk, agent by mal byť schopný pozorovaný dej nie len rozpoznať ale aj pomenovať a taktiež vykonať akciu na základe verbálneho pokynu.

Základom pre rozpoznávanie akcie je v našom modeli reprezentácia neurálneho okruhu STS-PF-F5, v ktorom prúdi informácia obojsmerne. Tento vyšší riadiaci okruh je napojený na nižšie moduly, zabezpečujúce či už samotné vykonávanie akcií alebo prísun predspracovanej vizuálnej informácie pre náš STS modul (podobne ako reálna oblasť STS dostáva predspracovanú informáciu z primárnych a sekundárnych vizuálnych oblastí). Nosné moduly F5 a STS reprezentujú vizuálne aspekty akcií variantným ako aj invariantným spôsobom, pričom invariantné reprezentácie vznikajú v priebehu agentovho života na základe lokálnych interakcií medzi neurónmi týchto oblastí.

4.1 Modulárny návrh modelu

Na obrázku 1 je zobrazený schematický návrh nášho modelu. Skladá sa z dvoch úrovní a troch funkčných oblastí, pričom na najvyššej úrovni operuje na úrovni komunikácie medzi oblasťami F5 a STS. Oblasť F5 prijíma informáciu o stave agentových efektorov a senzorov z motorického modulu.



Obr. 1: Schéma robotického modelu zrkadliacich neurónov.

Motorický modul je priamo prepojený so senzormi a efektormi robota a je modelovaný pomocou štandardnej

doprednej neurónovej siete. Tá na vstupe prijíma informácie o súčasnom stave natočených použitých kĺbov robota a informáciu z dotykového senzora ruky. V rámci nami navrhovanej paradigmy sa takýto modul učí pomocou biologicky prijateľného spojitého učenia posilňovaním [3]. V jednom z projektov, kde je takýto modul zapojený, sa simulovaný robot iCub učí vykonávať tri akcie jednou rukou, respektíve prstom, „ukazovanie na“, „dotknutie sa“ a „zhodenie“ predmetu [5]. Ako ďalší krok pripravujeme modul, ktorý iCubovi umožní naučiť sa natiahnuť sa za predmetom a uchopiť ho.

Modul F5 predstavuje zjednodušenú funkčnú aproximáciu motorickej oblasti F5 a k nej homologickým oblastiam ľudského mozgu. Tvoria ho samoorganizujúca sa mapa s rekurentným kontextom, konkrétne MSOM [34]. MSOM alebo Merge SOM, čiže zlučovacia samoorganizujúca sa mapa, je klasická Kohonenova sieť [15], ktorá má navyše kontextovú vrstvu ako rekurentná sieť. Na rozdiel od svojich predchodcov (napr. RecSOM či SOMSD, pozri porovnanie v [37]) má MSOM kontextovú vrstvu veľkosti vstupu, nie celej mapy. Do tejto vrstvy sa teda vkladá menšie množstvo informácie, konkrétne ide o lineárnu kombináciu váhy a kontextu aktuálneho (teda posledného) víťazného neurónu. MSOM je tvorená množinou neurónov M , z ktorých každému patrí vektor váh w_i a kontext c_i . Víťazný neurón I_{t-1} pre vstupný vektor x_t vyberieme spomedzi všetkých neurónov na základe najmenej rekurzívnej vzdialenosti od vstupu, rovnica 1, kde c_t je kontextový deskriptor (rovnica 2)

$$d_i(t) = (1 - \alpha) \cdot \|x_t - w_i\|^2 + \alpha \cdot \|c_t - c_i\|^2 \quad (1)$$

$$c_t = (1 - \beta) \cdot w_{I_{t-1}} + \beta \cdot c_{I_{t-1}}, \quad (2)$$

kde I_{t-1} predstavuje víťaza z minulého kroku.

Spôsob učenia popisujú rovnice 3 a 4.

$$\Delta w_j = \gamma_1 h(d_M(i, I_t)) \cdot (x_t - w_j) \quad (3)$$

$$\Delta c_j = \gamma_2 h(d_M(i, I_t)) \cdot (c_t - c_j), \quad (4)$$

kde γ_1 a γ_2 sú rýchlosti učenia a h je Gaussovská funkcia.

Modul F5 je pomocou jednej skrytej vrstvy prepojený s obdobným modulom predstavujúcim relevantnú časť STS, ktorej neuróny kódujú vizuálne aspekty pozorovanej akcie. Modul STS tvorí taktiež MSOM. Vzhľadom na to, že oba nosné moduly tvoria samoorganizujúce sa siete predpokladáme, že budeme pri ďalšom bádání schopní dosiahnuť emergenciu invariantných reprezentácií na základe topologických vlastností a laterálnych interakcií bez preddefinovaného správania alebo veľkého zásahu zvonku.

Prepojenie medzi modulmi STS a F5 cez skrytú vrstvu, naša analógia oblasti PF, ktorá tieto oblasti prepája v mozgu makaka, vzniká na základe učenia spätným šírením chyby. Vzhľadom na to, že je potrebné, aby boli

tieto oblasti prepojené obojsmerne zvolili sme pre učenie biologicky prijateľnú zovšeobecnenú recirkuláciu (generalized recirculation alebo GeneRec) [20]. Už ako napovedá samotný názov, táto metóda učenia funguje obojsmerným spôsobom, pričom používa úplne symetrické váhy, čiže rovnakú maticu váh pre oba smery. Jeden cyklus možno chápať ako dve fázy – dopredný a spätný beh. V prvej fáze, ktorej sa hovorí mínusová, je sieť prezentovaný vstup a aktivácia na výstupe predstavuje odhad siete o výsledku. V druhej fáze, ktorej sa hovorí plusová „pripneme“ na výstupné neuróny želaný výsledok a prešírime aktiváciu naspäť k pôvodným vstupom. Rozdiel v aktivácií v plusovej a mínusovej fáze je použitý ako tréningový signál pre váhy siete, ako zobrazuje rovnica 5.

$$\Delta w_{ij} = \epsilon (y_j^+ - y_j^-) x_i \quad (5)$$

Aby sme zabezpečili agentovi jasnú súvislosť medzi pozorovanou a vykonávanou akciou, rozhodli sme sa do scenára učenia sa agenta zakomponovať konkrétny scenár učenia. Najprv agent vykoná akciu, ktorú už má vo svojom motorickom repertoári. Zaznamenáme aktivitu, ktorá vznikne v F5. Tento postup môžeme vysvetliť ako bezprostredne navodenú skúsenosť, ktorá ešte pretrváva v pamäti a pozornosti agenta. V ďalšom kroku pozoruje agent demonštrátora ako vykonáva ten istý postup. V mínusovej fáze prešírime vizuálnu informáciu z STS modulu sieťou až do F5, kde v plusovej fáze vložíme aktiváciu z predošlého kroku a vykonáme učenie. Očakávame, že na vrstve PF vzniknú distribuované reprezentácie prepojení medzi motorickými a vizuálnymi aspektami akcií. Obojsmerné prepojenie medzi oblasťami zabezpečí, že pri pozorovaní akcie dôjde k motorickej rezonancii, ktorá ovplyvní (posilní) aktiváciu príslušných invariantných vizuálnych neurónov a zabezpečí jednoznačné rozpoznanie pozorovanej akcie.

Modul STS prijíma vstupy z abstraktného vizuálneho modulu. Tieto vizuálne vstupy generujeme na základe vopred natrénovaného motorického modulu robota, z ktorého abstrahujeme podstatné informácie o polohe kĺbov robota a objektu, s ktorým interaguje. Takto predspracovaná informácia predstavuje demonštrátora pre náš robotický model.

5 Záver

V príspevku sme predstavili návrh robotického modelu zrkadliacich neurónov. Medzi hlavné konceptuálne východiská nášho modelu patrí okrem základného princípu zrkadlenia a motorickej rezonancie, na základe ktorého dochádza k párovaniu pozorovaného pohybu s akciami vo vlastnom motorickom repertoári, taktiež predpoklad, že aktivita zrkadliacich neurónov napomáha spracovaniu vizuálnej informácie v STS. Tento predpoklad sme do nášho modelu zakomponovali využitím obojsmerného prepojenia vyšších oblastí - modulov F5 a STS a biologicky prijateľným recirkulačným algoritmom učenia GeneRec. Simulovaný robot iCub vybavený našim mode-

lom s adekvátnym a funkčným motorickým modulom bude po natrénovaní schopný rozpoznávať pozorované akcie. Ako potenciálne rozšírenie projektu bude možné model implementovať aj s jazykovou funkciou a umožniť robotovi pomenovávať pozorované akcie ako aj vykonávať akcie na základe verbálneho pokynu (viac informácií v [29]).

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v Centre pre kognitívnu vedu na Katedre aplikovanej informatiky, FMFI UK v Bratislave, za podpory grantov VEGA 2/0439/11 a UK/547/2012.

Literatúra

- [1] S.M. Aglioti, P. Cesari, M. Romani, and C. Urgesi. Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, 11(9):1109–1116, 2008.
- [2] V. Caggiano, L. Fogassi, G. Rizzolatti, P. Thier, and A. Casile. Mirror neurons differentially encode the peripersonal and extrapersonal space of monkeys. *Science*, 324(5925):403–406, 2009.
- [3] K. Doya. Reinforcement learning in continuous time and space. *Neural Computation*, 12(1):219–245, 2000.
- [4] I. Farkaš. Neurálne modely v kognitívnej robotike: vizuálno-motorická interakcia. *Kognice a umělý život X*, pages 93–99, 2010.
- [5] I. Farkaš, T. Malík, and K. Rebrová. Grounding the meanings in sensorimotor behavior using reinforcement learning. *Frontiers in Neurorobotics*, 6(1), 2012.
- [6] I. Farkaš, M. Malý, and K. Rebrová. Mirror neurons – theoretical and computational issues. *Technical Report TR-2011-28. Comenius University, Bratislava, Slovakia*, 2011.
- [7] I. Farkaš, M. Malý, and K. Rebrová. Porozumenie motorickým akciám – hypotéza kontinua. *Kognice a umělý život XI*, pages 61–68, 2011.
- [8] V. Gallese and A. Goldman. Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in cognitive sciences*, 2(12):493–501, 1998.
- [9] V. Gallese, C. Keysers, and G Rizzolatti. A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(9):396–403, 2004.
- [10] J.J. Gibson. The Theory of Affordances. *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*, pages 67–82, 1977.
- [11] C. Heyes. Where do mirror neurons come from? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(4):575–83, 2010.
- [12] G. Hickok and M. Hauser. (Mis)understanding mirror neurons. *Current Biology*, 20(14):593–594, 2010.
- [13] C. Keysers and D.I. Perrett. Demystifying social cognition: a hebbian perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(11):501–507, 2004.
- [14] E. Kohler, C. Keysers, M.A. Umiltà, L. Fogassi, V. Gallese, and G. Rizzolatti. Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297(5582):846–848, 2002.
- [15] T. Kohonen. *Self-organizing Maps*. Springer, 1997.
- [16] B. Mahon and A. Caramazza. The orchestration of the sensory-motor systems: Clues from neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3/4):480–494, 2005.
- [17] CR Mason, JE Gomez, and TJ Ebner. Hand synergies during reach-to-grasp. *Journal of Neurophysiology*, 86(6):2896–2910, 2001.
- [18] G. Metta, G. Sandini, D. Vernon, L. Natale, and F. Nori. The iCub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition. In *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, pages 50–56. ACM, 2008.
- [19] P. Molenberghs, R. Cunnington, and J.B. Mattingley. Brain regions with mirror properties: A meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2011.
- [20] R.C. O'Reilly. Biologically plausible error-driven learning using local activation differences: The generalized recirculation algorithm. *Neural computation*, 8(5):895–938, 1996.
- [21] E. Oztop and M. Arbib. Schema design and implementation of the grasp-related mirror neuron system. *Biological Cybernetics*, 87:116–140, 2002.
- [22] E. Oztop, M. Kawato, and M. Arbib. Mirror neurons and imitation: A computationally guided review. *Neural Networks*, 19(3):254–271, 2006.
- [23] E. Oztop, D. Wolpert, and M. Kawato. Mental state inference using visual control parameters. *Cognitive Brain Research*, 22:129–151, 2005.
- [24] G. Pellegrino, L. Fadiga, L. Fogassi, V. Gallese, and G. Rizzolatti. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental brain research*, 91(1):176–180, 1992.
- [25] D. Perrett, MH Harries, R. Bevan, S. Thomas, PJ Benson, AJ Mistlin, AJ Chitty, JK Hietanen, and JE Ortega. Frameworks of analysis for the neural representation of animate objects and actions. *Journal of Experimental Biology*, 146(1):87–113, 1989.

- [26] D. Perrett, M. Oram, M. Harries, R. Bevan, J. Hietanen, P. Benson, and S. Thomas. Viewer-centred and object-centred coding of heads in the macaque temporal cortex. *Experimental Brain Research*, 86(1):159–173, 1991.
- [27] R. Pfeifer and C. Scheier. *Understanding Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [28] J.A. Pineda. The functional significance of mu rhythms: translating “seeing” and “hearing” into “doing”. *Brain Research Reviews*, 50(1):57–68, 2005.
- [29] K. Rebrová and I. Farkaš. Neurálne modely v kognitívnej robotike: porozumenie a pomenovávanie akcií. *Kognice a umělý život XI*, pages 231–238, 2011.
- [30] G. Rizzolatti, L. Fadiga, V. Gallese, and L. Fogassi. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3(2):131–141, 1996.
- [31] G. Rizzolatti, L. Fogassi, and V. Gallese. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Rev. Neuroscience*, 2:661–670, 2001.
- [32] G. Rizzolatti and C. Sinigaglia. The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(4):264–74, 2010.
- [33] N. Sebanz and M. Shiffrar. Detecting deception in a bluffing body: The role of expertise. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(1):170–175, 2009.
- [34] M. Strickert and B. Hammer. Merge SOM for temporal data. *Neurocomputing*, 64:39–71, 2005.
- [35] G. Tessitore, R. Prevede, E. Catanzariti, and G. Tamburrini. From motor to sensory processing in mirror neuron computational modelling. *Biological cybernetics*, 103(6):471–485, 2010.
- [36] V. Tikhonoff, A. Cangelosi, P. Fitzpatrick, G. Metta, L. Natale, and F. Nori. An open-source simulator for cognitive robotics research: The prototype of the iCub humanoid robot simulator. In *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, pages 57–61. ACM, 2008.
- [37] P. Vančo and I. Farkaš. Experimental comparison of recursive self-organizing maps for processing tree-structured data. *Neurocomputing*, 73(7-9):1362–1375, 2010.