

Tréning kapacity vizuálnej pracovnej pamäti v prostredí virtuálnej reality

Barbora Cimrová (a, b), Martin Marko (a, b), Igor Farkaš (a),
Branislav Sobota (c), Štefan Korečko (c)
Zuzana Rošťáková (d), Roman Rosipal (d)

- (a) Fakulta matematiky fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave
- (b) Centrum experimentálnej medicíny, Slovenská akadémia vied, Bratislava
- (c) Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach
- (d) Ústav merania Slovenskej akadémie vied, Bratislava
barbora.cimrova@fmph.uniba.sk

Abstrakt

V naše štúdiu sme skúmali možnosť kognitívneho tréningu v prostredí virtuálnej reality (VR). Zamerali sme sa na pracovnú pamäť, ktorá patrí medzi kľúčové kognitívne funkcie, dôležité napríklad pre riešenie problémov, rozhodovanie, učenie sa novým zručnostiam a podobne. Je známe, že jej kapacita sa môže vplyvom rôznych tréningových stratégií meniť. Podarilo sa nám navrhnúť a implementovať protokol s narastajúcou kognitívnu záťažou prostredníctvom komplexnej aplikácie v prostredí VR. Cieľom bolo zlepšenie schopnosti filtrácie irelevantných distrakčných podnetov vo vizuálno-priestorovej pracovnej pamäti. Úspešnosť sme preverovali na behaviorálnej úrovni pomocou štandardného testu detekcie zmeny a na fyziologickej úrovni prostredníctvom snímania mozgovej aktivity participantov a vyhodnotenia neurálnych korelátov kapacity vizuálnej pracovnej pamäti. Naše výsledky potvrdili, že tréning indukoval monotónne zvyšujúcu sa kognitívnu záťaž, no napriek desaťdňovému tréningu sme v skúmaných behaviorálnych mierach nenašli očakávaný efekt. Výsledky analýzy elektroencefalografických mier však naznačujú, že k zlepšeniu schopnosti filtrácie mohlo u experimentálnej skupiny dôjsť už po prvej fáze kognitívneho tréningu.

1 Tréning kognitívnych funkcií vo VR

Virtuálna realita (VR), ktorú môžeme definovať ako typ rozhrania užívateľa a počítača poskytujúca virtuálnu simuláciu prostredia alebo aktivity v reálnom čase, predstavuje pokrokovú technológiu, ktoré umožňuje dizajnérom vytvoriť bohaté a imerzívne virtuálne prostredie so širokým rozšírením možností, ktoré sú v bežnom živote obmedzené (Adamovich a spol., 2009). V ostatných rokoch zaznamenáva jej využitie exponenciálny rast jednak v počte užívateľov, ale rovnako

aj v šírke spektra eventuálnych aplikácií (Xiong a spol., 2021). Jednou zo zaujímavých otázok je prenositeľnosť tréningu vo VR do schopností v reálnom živote. V našej štúdiu sme sa preto zamerali na preskúmanie tréningu kognitívnych schopností vo VR.

Pracovná pamäť tvorí zložku tzv. fluidnej inteligencie (Li a spol., 2021) a je známe, že tréningom je možné dosiahnuť zvýšenie jej kapacity (Jones a spol., 2021). Nedostatočnou schopnosťou filtrácie irelevantných podnetov môže dôjsť k zníženiu kapacity pracovnej pamäti jej zahľtením. Vizuálna priestorová pracovná pamäť je tiež jednou z mála kognitívnych funkcií, ktoré majú známy elektrofyziologický neurálny korelát. Konkrétne ide o kontralaterálnu oneskorenú negatívnu snímanú prostredníctvom elektroencefalografu (EEG) z mozgovej hemisféry opačnej oproti polovici zorného poľa, v ktorom je prezentovaný podnet, ktorý si má meraný subjekt po určitú dobu udržať vo vizuálnej priestorovej pracovnej pamäti. Veľkosť takejto negatívnej výchylky EEG koreluje s počtom položiek, ktoré si subjekt dokázal v pamäti udržať (Vogel, 2005). Existencia takýchto známych korelátov umožňuje posúdiť aj oveľa jemnejšie zmeny, ako by boli postrehnutelné behaviorálnymi mierami.

2 Metódy

2.1 Participanti

Na štúdiu sa zúčastnilo 30 zdravých dobrovoľníkov, študentov vysokej školy. Medzi vylučovanie kritériá patrili neurologické a psychiatrické diagnózy, užívanie návykových látok, poruchy zraku, ľavorukosť či ambidextria (obojručnosť). Do experimentálnej skupiny sme zaradili 14 participantov, z toho 10 mužov (priemerný vek \pm SD bol 21,2 rokov \pm 1,2 roky). V kontrolnej

skupine bolo 16 účastníkov, z čoho 13 boli muži (priemerný vek \pm SD bol 22 rokov \pm 1,8 rokov).

2.1 Tréning v prostredí VR

Pre naše účely sme použili na mieru vytvorenú hru implementovanú do prostredia virtuálnej reality v systéme CAVE, ktorý pozostáva z 20-ich LCD obrazoviek usporiadaných do plochy okolo hráča a špeciálnych okuliarov, vďaka ktorým sa okolo participanta vytvorí imerzívne virtuálne 3D prostredie (Korečko, Hudák, Sobota, 2019). Hra nazvaná Tower defence pozostávala z blokov s adaptívne sa stupňujúcou náročnosťou, čo umožnilo postupné zlepšovanie sa v hre a teda personalizovaný tréning kognitívnych schopností (Korečko a spol., 2018). Každý blok sa skladal z desiatich opakovaní.

Úlohou participanta bolo pomocou ovládača v ruke (joystick) zamerať a zostreliť (označiť) približujúce sa cieľové objekty („nepriateľské drony“), ktoré nalietavali z rôznych strán. To bolo možné až keď boli vo vzdialenosti „na dosah“, pričom krátko predtým na určitý čas zmizli a ich polohu si bolo nutné pamätať. Náročnosť odpovedala rýchlosti a počtu cieľových objektov, objektov, ktoré nemali byť zostrelené (tzv. distrakčné objekty, „priateľské drony“) a participanta mal ich prítomnosť. Samotný protokol tréningu bol zostavený z desiatich tréningových sedení v priebehu dvoch týždňov.

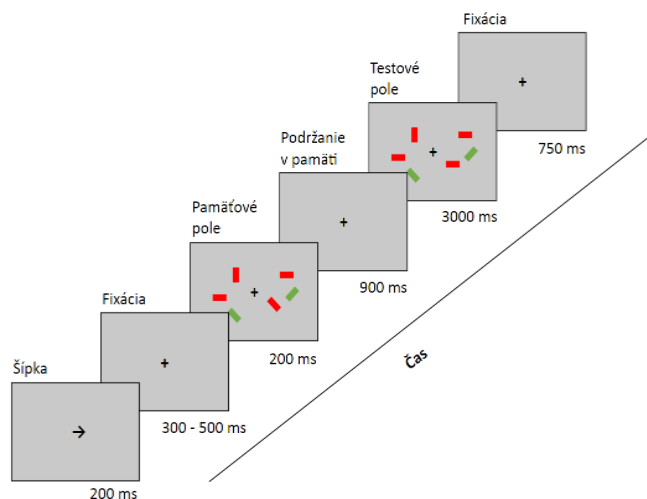
2.3 Kognitívne testovanie

Efekt tréningu sme posudzovali podľa výkonu v úlohe meranej mimo prostredia CAVE, ktorá bola administrovaná trikrát: v prvý deň pred začatím tréningu, po piatom dni tréningu a po desiatom dni, teda po ukončení tréningu. Použili sme úlohu detekcie zmeny (UDZ), ktorá je považovaná za štandardný marker kapacity priestorovej pracovnej pamäti (Repovš & Baddeley, 2006).

UDZ pozostávala zo 640 opakovaní. Každé opakovanie sa začínalo zobrazením šípky, ktorá naznačovala, na ktorú stranu má subjekt zamerať pozornosť, a to bez presunutia zraku z fixačného bodu uprostred obrazovky – čím bola zabezpečená lateralizovaná prezentácia vždy do jednej hemisféry nevyhnutná pre výpočet CDA. Nasledovalo pamäťové pole s dvoma až štyrmi cieľovými a žiadnym alebo dvoma distrakčnými podnetmi v každej polovici zorného poľa. Po intervale 900 ms, kedy bolo nutné držať v pamäti orientáciu cieľových podnetov (z cieľovej polovice zorného poľa), nasledovalo testové pole. Úlohou participanta bolo stlačením tlačidla odpovedať, či došlo k zmene orientácie cieľového podnetu.

2.4 Snímanie aktivity mozgu

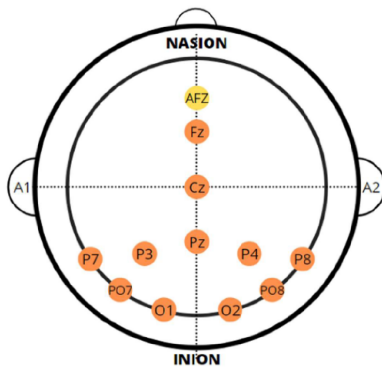
Na posúdenie jemnejších zmien, ktoré by zatiaľ nemuseli byť merateľné behaviorálnymi mierami, sme počas UDZ zaznamenávali aj elektroencefalografickú aktivitu (EEG) z posteriorných oblastí mozgu. Snímacie elektródy boli umiestnené podľa medzinárodného systému 10-20 na oblastiach zobrazených na obr. 2.



Obr. 1. Schéma úlohy na detekciu zmeny. Cieľové (červené) a distrakčné (zelené) podnety sa zobrazia náhodne v jednej zo 4 možných orientácií. Šípka určuje cieľovú polovicu zorného poľa. V tomto prípade šikmý červený obdĺžnik v pravom zornom poli zmenil orientáciu na horizontálnu, takže došlo k zmene.

2.5 Analýza mozgovej aktivity

Záznamy korelát kapacity vizuálnej pracovnej pamäti, teda počtu položiek držaných v mysli po dobu nevyhnutnú na splnenie úlohy, CDA, sme vypočítali pre každého participanta, ako rozdiel priemernej aktivity z hemisféry kontralaterálnej (na opačnej strane) k zornému poľu, v ktorom boli prezentované cieľové podnety a priemernej aktivity z hemisféry ipsilaterálnej (na rovnakej strane), ako cieľové podnety.



Obr. 2. Schematické znázornenie umiestnenia elektród na hlave participanta. Snímacie elektródy (znázornené oranžovou) boli umiestnené nad záhlavnou (okcipitálnou) a temennou (parietálnou) oblasťou a v stredovej (mediálnej) línii. Zemniaca elektróda bola v prefrontálnej stredovej oblasti (AFz) a referenčné elektródy boli umiestnené na ušných lalôčkoch (A1 a A2).

3 Výsledky

3.1 Behaviorálne dáta z tréningu

Zo samotnej tréningovej hry sme získavali parametre odrážajúce výkon účastníkov, medzi ktoré patrilo skóre definované ako súčet správnych zásahov a (správne) nezasiadnutých distraktorov, ďalej presnosť definovaná ako rozdiel medzi relatívnou mierou zásahov a relatívnou mierou zasiadnutých distraktorov (falošné alarmy), potom schopnosť detegovať signál, vyjadrená rozdielom z-transformovaných hodnôt pre relatívnu mieru zásahu a falošné alarmy a nakoniec parameter výkonu, ktorý zohľadňuje stupňujúcu sa náročnosť a je vypočítaný ako súčin náročnosti úlohy a presnosti participantov.

Priemerná presnosť v úlohe bola relatívne vysoká (90.3%), avšak v priebehu tréningu sa mierne znižovala. Podobný trend ukázali aj výsledky pre schopnosť detegovať signál, čo je možné odôvodniť zvyšujúcou sa náročnosťou úlohy počas tréningu, ktorá bola definovaná ako celkový počet zobrazených cieľov a distraktorov (T+D) v jednotlivých úrovniach úlohy. Čo je dôležité, absolútne skóre v úlohe sa u participantov počas desiatich tréningových sedení postupne zvyšovalo, čo odzrkadľuje (očakávaný) efekt tréningu. Pre zohľadnenie náročnosti sme analyzovali aj parameter výkonu, ktorý bol vypočítaný ako súčin náročnosti úlohy a presnosti participantov. Výkon v úlohe naprieč tréningovými sedeniami rástol.

Na základe analýzy behaviorálnych mier sledovaných počas tréningu v Tower Defence môžeme skonštatovať, že sa nám podarilo vytvoriť tréningový protokol s adaptívne sa zvyšujúcou kognitívnou záťažou pre participantov. Z povahy indukovanej záťaže je možné predpokladať, že

tréning predstavoval čoraz väčšiu kognitívnu výzvu, resp. tréningový potenciál, pre relevantné funkcie pozornosti a pracovnej pamäti, na ktoré sa tréning zameriaval (detekcia signálu, filtrovanie distraktorov, aktualizácia a udržiavanie vizuálno-priestorovej reprezentácie objektov v pamäti). Napriek rastúcej kognitívnej záťaži v tréningu boli participanti schopní reagovať na čoraz väčšie množstvo podnetov, za čoraz kratší čas, pričom sa im darilo udržať relatívne vysokú mieru presnosti a dobrý výkon. Tieto výsledky naznačujú, že kognitívny tréning mal potenciál stimulovať neurokognitívne okruhy podporujúce pracovnú pamäť a kontrolu pozornosti.

3.1 Kapacita pracovnej pamäti v UDZ

Analýza kapacity vizuálnej pracovnej pamäti pre kontrolnú aj experimentálnu skupinu dobrovoľníkov bola vykonaná pomocou modelu so zmiešanými efektami (LMEM). Presnosť v UDZ sa znížila pri vyššom počte cieľov (2 verus 4 cieľe, $F(1,308) = 1157,766$; $p < .001$) a v prítomnosti distraktorov (0 verus 2 distraktory, $F(1,308) = 14,518$; $p < .001$). Tieto hlavné efekty sú v predpokladanom smere a poukazujú na skutočnosť, že pri vyššom počte relevantných a irelevantných podnetov bola úloha náročnejšia, teda validujú dizajn úlohy.

V súvislosti s hlavnou hypotézou, t.j. či tréning bude viesť k zvýšeniu kapacity vizuálnej pracovnej pamäti, štvorfaktorová analýza ANOVA nepreukázala žiadny štatisticky významný vzťah: faktor opakovaného merania nebol významný ani ako hlavný faktor ($F(1,308) = 0,731$; $p = 0,482$), ani v interakcii s ostatnými faktormi, ktoré boli zahrnuté v modeli. Predpokladaná interakcia faktorov skupina \times meranie nebola štatisticky významná ($F(2,308) = 0,435$; $p = 0,648$) a významnosť sa nepreukázala ani pri zohľadnení počtu cieľov a distraktorov ($F(2,308) = 0,738$; $p > 0,479$) pre interakcie vyššieho rádu.

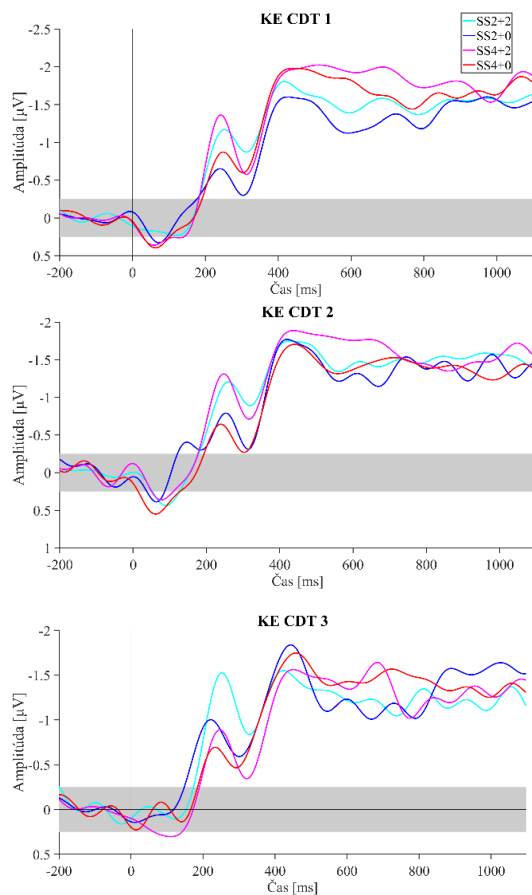
Tieto výsledky ukázali, že presnosť participanta v CDT úlohe závisí od počtu podnetov a distraktorov, čo potvrdzuje validitu tejto experimentálnej úlohy. Očakávané zlepšenie v presnosti vizuálnej pracovnej pamäti v tréningovej skupine naprieč tromi meraniami sa však nepreukázalo. Podobne ako v kontrolnej skupine, skupina s tréningom nevykazovala zlepšenie vizuálnej pracovnej pamäti v čase. Možnými vysvetleniami absencie účinku tréningu môže byť krátkosť (resp. nedostatočná intenzita) tréningového programu, rozdiely medzi tréningovou úlohou a CDT, menší rozsah výskumnej vzorky, alebo možnosť, že behaviorálna úroveň posudzovania účinkov tréningu nebola dostatočne senzitivná, aby sa prejavili.

3.1 Elektrofyziologické dáta

Namerané EEG záznamy z oboch skupín sme spracovali v prostredí programu Brain Vision Analyzer (BVA2.0) a

MATLAB (R2019b). Ukážky výsledných CDA kriviek pre obe skupiny sú na obr. 3 a 4, kde vidieť charakteristickú oneskorenú negativitu s latenciou v rozsahu 400 až 900 ms od zobrazenia podnetov, ktoré si mal participant podržať v pracovnej pamäti.

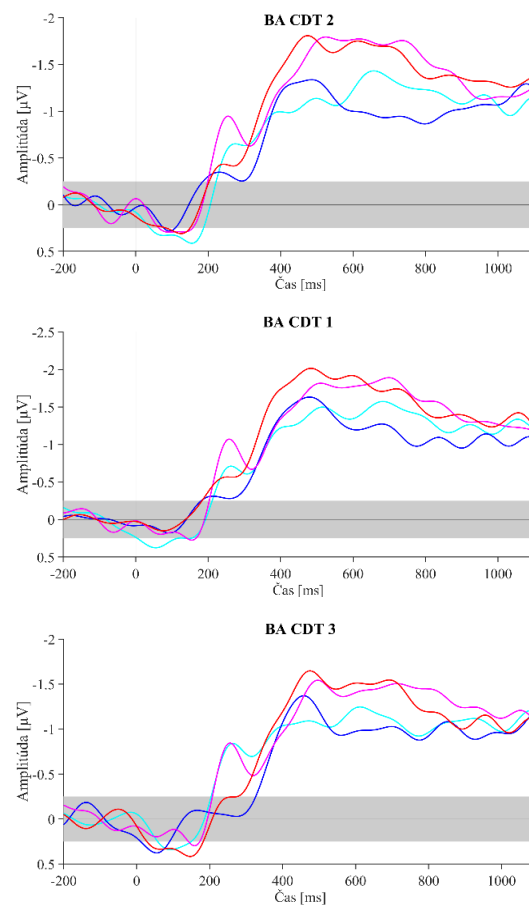
Amplitúda tejto vlny odráža počet položiek držaných v pracovnej pamäti z kontralaterálneho zorného poľa. Farbou sú kódované situácie podľa počtu pamäťových a distrakčných položiek. V kontrolnej (BA) skupine (obr.4) vidíme, že vzájomné priebehy kriviek (rozdielne farby - rôzny počet podnetov a distraktorov) sa naprieč meraniami (prvý, druhý a tretí graf = deň merania) takmer nemenia. Naopak, v experimentálnej (KE) skupine (obr. 3) vidíme trend naznačujúci, že uprostred (CDT2 - druhý graf) a na konci experimentu (CDT3 - posledný graf) sa vlny SS4/2 a SS4/0 (štyri podnety s a bez distraktorov), ako aj SS2/2 a SS2/0 (dva podnety s a bez distraktorov) viac k sebe približujú v porovnaní s meraním na začiatku experimentu (CDT1 - prvý graf). Vidíme, že zníženie rozdielu možno pozorovať už po prvej fáze tréningu.



Obr. 3. Výsledné krivky kontralaterálnej oneskorenej aktivity (CDA) v experimentálnej skupine meranej v Košiciach.

4 Záver

Podarilo sa nám nadizajnovať a implementovať tréningový protokol vo virtuálnej realite prostredia CAVE pre tréningovanie schopnosti filtrácie dôležitej pre funkciu priestorovej pracovnej pamäti. Napriek 10-dňovému tréningu sme však nepozorovali očakávané zlepšenie presnosti detegovania zmien v kognitívnom teste UDZ: presnosť detekcie signálov sa medzi meraniami významne nezmenila. Výsledky analýzy elektroencefalografických mier CDA však poukazujú v experimentálnej skupine na trend naznačujúci zlepšenie schopnosti filtrácie už po prvej fáze kognitívneho tréningu v prostredí CAVE.



Obr. 4. Výsledné krivky kontralaterálnej oneskorenej aktivity (CDA) v kontrolnej skupine meranej v Bratislave.

Literatúra

Jones, J. S., Adlam, A. L. R., Benattayallah, A., & Milton, F. N. (2021). The neural correlates of working memory training in typically developing children. *Child Development*, <https://doi.org/10.1111/cdev.13721>

Korečko Š., Hudák M., Sobota B. (2019). LIRKIS CAVE: Architecture, Performance and Applications. *Acta Polytechnica Hungarica*, 16(2), 199-218.

Korečko Š., Hudák M., Sobota S., Marko M., Cimrová B., Farkaš I., Rosipal R. (2018). Assessment and training of visuospatial cognitive functions in virtual reality: proposal and perspective. In: *Proceedings of 9th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, Budapest, str. 39-43, Danvers: IEEE.

Li, G., Chen, Y., Le, T. M., Wang, W., Tang, X., & Li, C. S. R. (2021). Neural correlates of individual variation in two-back working memory and the relationship with fluid intelligence. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13.

Repovš, G., & Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: Explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience*, 139(1), 5–21.

Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, 438(7067), 500–503.

Xiong, J., Hsiang, E. L., He, Z., Zhan, T., & Wu, S. T. (2021). Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Light: Science & Applications*, 10(1), 1-30.