

Současná praxe a budoucí využití virtuální reality v neurovědě a neurologii

Petr Roudenský, MSc., Bc. Jan Horský

The University of Sheffield: Neuroscience – Neurodegeneration, Velká Británie

Virtuální realita a její aplikace pro medicínské účely byla zkoumána již od 90. let minulého století, především v oblasti neurověd a neurochirurgie. Výrazný technologický pokrok posledních let však učinil tuto technologii výkonnější a především dostupnější, přičemž s rostoucím povědomím o jejím potenciálu strmě narůstá i její využití v medicínském výzkumu i praxi. Kromě pre-operativního využití, simulací, výcviku a tele-proctoringu v neurochirurgii se virtuální realita stále více uplatňuje také v neurorehabilitaci a neuropsychiatrii, zejména v rámci inovativních terapeutických přístupů. Přestože potenciál této stále se zdokonalující technologie je v řadě oblastí medicíny považován za revoluční, většina provedených studií pracuje s malými vzorky. Mnohé ze slibných výsledků je tak třeba potvrdit rozsáhlejším výzkumem.

Klíčová slova: virtuální realita, neurověda, neurochirurgie, neurologie.

Current practice and future use of virtual reality in neuroscience and neurology

Virtual reality and its applications for medical purposes have been studied since the 1990s, especially in the field of neuroscience and neurosurgery. However, significant technological advances in recent years have made this technology more powerful and, most importantly, more accessible, and its use in medical research and practice is growing rapidly as awareness of its potential increases. In addition to pre-operative use, simulation, training and tele-proctoring in neurosurgery, virtual reality is increasingly being applied in neurorehabilitation and neuropsychiatry, particularly in the context of innovative therapeutic approaches. Although the potential of this ever-improving technology is considered revolutionary in many fields of medicine, most of the studies conducted have worked with small samples. Thus, many of the promising results need to be confirmed by more extensive research.

Key words: virtual reality, neuroscience, neurosurgery, neurology.

Využití virtuální reality (VR) pro účely výzkumu i klinické medicíny bylo předmětem značného zájmu a zkoumání již od počátku 90. let minulého století (Cipresso et al., 2018). Největšího úspěchu bylo dosaženo v oblasti neurověd a neurochirurgie, kdy VR začala být používána primárně pro zlepšování peri-operativního plánování, simulace zákroků pro účely výcviku a vzdělávání či poskytování prostředí pro rehabilitaci pacientů (Scott et al., 2022), přičemž tato i další potenciální užití byla omezena jak samotnou technologií, tak její vysokou cenou.

Důsledkem výrazného technologického rozvoje, růstu výpočetní síly a snižování výrobních nákladů došlo v posledních letech v oblasti VR ke značnému pokroku, jenž ve výsledku učinil tuto technologii mnohem výkonnější a zároveň dostupnou pro širší veřejnost i jednotlivce. To spolu s rostoucím povědomím o potenciálu VR vedlo ke strmému nárůstu jejího využití v zábavním průmyslu, vzdělávání, vojenskosti i medicíně, kde dochází k jejímu stále vyššímu zapojení do výzkumu a klinické praxe.

DECLARATIONS:

Declaration of originality:

The manuscript is original and has not been published or submitted elsewhere.

Ethical principles compliance:

The authors attest that their study was approved by the local Ethical Committee and is in compliance with human studies and animal welfare regulations of the authors' institutions as well as with the World Medical Association Declaration of Helsinki on Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects adopted by the 18th WMA General Assembly in Helsinki, Finland, in June 1964, with subsequent amendments, as well as with the ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing, and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, updated in December 2018, including patient consent where appropriate.

Conflict of interest:

Not applicable.

Consent for publication:

Not applicable.

Cit. zkr: *Neurol. praxi.* 2024;25(4):310-314

<https://doi.org/10.36290/neu.2024.036>

Článek přijat redakcí: 15. 4. 2024

Článek přijat k publikaci: 14. 5. 2024

Petr Roudenský MSc.

proudensky1@sheffield.ac.uk

V medicíně nachází VR uplatnění v širokém spektru oblastí jak pro lékaře, tak pro pacienty. Tento článek poskytuje přehled o rozvoji a trendech využití VR v neurologii, respektive v oblastech neurochirurgie, neurorehabilitace a neuropsychiatrie s cílem představit současný stav, perspektivy a některé ze slibných a inovativních oblastí aplikace, jež jsou zkoumány zejména v posledních několika letech.

Virtuální a augmentovaná realita

Technologii virtuální reality lze definovat jako souhrn hardwarových a softwarových systémů, které cílí na dosažení komplexní a imerzivní smyslové iluze přítomnosti jedince v jiném prostředí (Biocca et al., 1995), a to primárně za účelem poskytnutí ovladatelné a reprodukovatelné senzoricko-motorické a kognitivní aktivity (Fuchs et al., 2006). Důležitý aspekt VR spočívá v tom, že jedinec si uvědomuje pouze velmi omezeně až minimálně, že se nachází v uměle vytvořeném prostředí a vnímá v něm svoji přítomnost, což je v případě výzkumu zásadní pro jeho ekologickou validitu (Thurley, 2022). Pro svoji schopnost působit na jedince do té míry, že se cítí v simulovaném prostředí skutečně přítomen, je VR označována jako imerzivní.

Z pohledu uživatele tak VR umožňuje prožívat přítomnost ve virtuálních světech se všemi jejími aspekty, od volného pohybu, interakce s prostředím a jeho prvky až po interakci sociální, ať už s jinými uživateli, nebo charakteru řízenými umělou inteligencí. Právě sociální interakce je důležitým prvkem VR, jejíž význam a pozitivní vliv na redukci úzkosti a pocitů sociální izolace byl studován v době pandemie covidu-19 v letech 2020/21 (Kenyon et al., 2023).

Na tomto místě je vhodné představit také související technologii augmentované reality (AR), kdy nedochází k celkovému nahrazení reality jako u VR, ale k jejímu rozšíření, augmentaci prostřednictvím umělých senzorických vjemů. AR je tedy založena na superpozici virtuálních objektů (počítačem generovaných obrazů, textu, zvuků atd.) do reálného prostředí (Faust et al., 2012). AR technologie průběžně skenuje okolní prostor za účelem rozpoznání a rozložení fyzických prvků a následně na základě údajů o pohybu uživatele a směru jeho pohledu upravuje po-

zici a perspektivu virtuálních objektů, které tak zůstávají zakotveny v prostoru stejně, jako by byly skutečné.

Typickými zařízeními pro VR a AR jsou například brýle či helmy – poskytující stereoskopické zobrazování prostřednictvím samostatného displeje s dostatečně vysokým rozlišením pro každé oko, prostorový zvuk a případně zařízení pro haptickou odezvu.

Na rozdíl od prosté senzorické stimulace je VR interaktivní, neboť virtuální prostředí reaguje na chování uživatele v reálném čase a představuje tedy uzavřenou smyčku mezi stimulací, percepcí a akcí (Thurley, 2022). Z pohledu neurovědy je významná skutečnost, že fyziologické a psychologické reakce jedince v prostředí virtuální reality jsou velmi podobné těm skutečným (Sokołowska, 2024), což představuje účinnou a vysoce kontrolovatelnou techniku pro výzkum neuronálních korelátů percepce a chování (Thurley, 2022).

Neurochirurgie

Patrně nejvíce prostudovanou a v neurochirurgické praxi využívanou aplikací VR a AR je pre-operativní plánování a intra-operativní navigace (Paro et al., 2022), kdy je z dat získaných jednou nebo více zobrazovacími metodami rekonstruován trojrozměrný obraz požadované oblasti v kontextu skutečného prostoru, umožňující vnímání hloubky i manipulaci prostřednictvím přirozených pohybů rukou. Demonstrativní využití AR umožňující interaktivní studium anatomických poměrů konkrétního pacienta je zobrazeno na obrázcích 1 až 3 níže (obrazová dokumentace použita se souhlasem pacientky).

Další oblastí využití VR jsou simulace zákroků za účelem výuky, nácviku nebo zdokonalení určitých technik nebo postupů v krizových situacích, přičemž existující systémy nabízejí mnohé konkrétní procedury, jako je zavedení ventrikulostomického katétru nebo modely subpiální resekce (Mishra et al., 2022).

Značný potenciál nabízí aplikace VR v tele-proctoringu, kdy je možné školení chirurgů v komplexních zákrocích bez ohledu na jejich geografickou lokaci, což bylo v praxi demonstrováno v řadě případů, kdy chirur-

gům provádějícím operaci v nízkopříjmových zemích asistují skrze VR zahraniční mentoři (Higginbotham, 2021).

Poněkud kontroverzním tématem je využití VR za účelem seznámení pacienta se zákrokem, poučení a následného získání informovaného souhlasu. Ačkoli dle jedné z provedených studií (Perin et al., 2020) pacienti tuto možnost ocenili a jejich objektivní porozumění dané proceduře bylo vyšší než v kontrolní skupině, dodatečné informace a zejména pak informace o možných rizicích, komplikacích a jejich následcích mohou u pacientů zhoršit případné obavy a úzkost. Problematické však může být i vytvoření falešného pocitu bezpečí v případě, kdy se skutečná procedura od použité simulace odchýlí (Mishra et al., 2022).

Využití plného potenciálu VR jako diagnostického nástroje bylo blíže zkoumáno až v poslední dekádě, přičemž dosavadní poznatky naznačují, že diagnostická přesnost a účinnost neurozobrazovacích metod – o něž se do značné míry opírá rozhodování a tvorba diagnózy v cerebrovasikulární a neurointervenční chirurgii – mohou být prostřednictvím VR výrazně navýšeny (Mitha et al., 2013). Jedna z publikovaných prací například při srovnání VR a konvenčních zobrazovacích metod naznačuje, že v diagnostice intrakraniálních aneuryzmat, zejména pak malých a těch, která přiléhají ke spodině lebeční, dosahuje VR lepších výsledků (Liu et al., 2018). Právě v užití VR k diagnostickým účelům však v současnosti dochází k enormnímu pokroku v kombinaci s analýzou dat umělou inteligencí (AI), poskytující okamžitou a komplexní analýzu anatomických struktur a jejich lézí (Wu et al., 2024).

Specifickým případem je užití VR během awake kraniotomie, kde umožňuje mapování komplexních kognitivních funkcí (Mofatteh et al., 2022). Publikované práce naznačují účinnost v intra-operativním testování zorného pole (Mazerand et al., 2017), řeči (Delion et al., 2020) a sociální kognice (Bernard et al., 2018). U posledního zmíněného interagoval pacient ve VR s avatarem (vizuální reprezentací osoby ve virtuálním prostředí) neuropsychologa, jehož gesta měl popsat a reprodukovat. Výhodou tohoto přístupu je rychlá, jednoznačná reakce pacienta a sku-

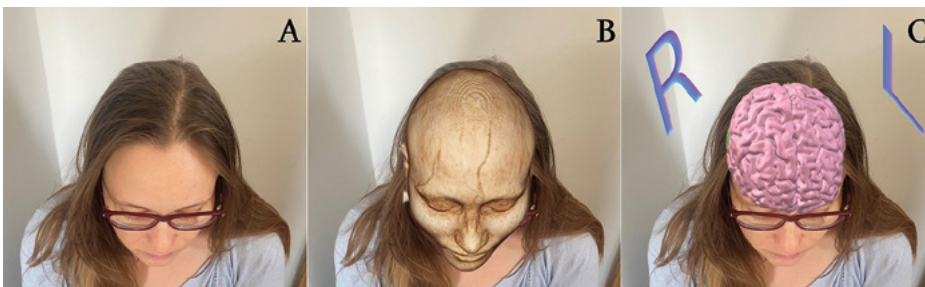
Obr. 1. Augmentovaná realita – model pacientky získaný zpracováním dat z MRI je promítán do reálného prostředí, ve kterém je jeho pozice zakotvena bez ohledu na pozici pozorovatele; s modelem lze pracovat gesty rukou



Obr. 2. Augmentovaná realita – spolu s modelem pacientky jsou zobrazeny (jako samostatné objekty, s nimiž lze manipulovat) příslušné snímky MRI; v praxi je však výhodnější jejich fixní zobrazení v zorném poli, které zamezuje zkreslení perspektivou



Obr. 3. Skrze VR brýle lze pozorovat nezměněný obraz (A), projekci trojrozměrného modelu pacientky vytvořeného z dat MRI (B) či jeho část, v tomto případě mozek (C), která se v reálném čase přizpůsobuje pohybu i směru pohledu; ukazatele R a L na obrázku 1C udávají orientaci modelu



tečnost, že tento není pouhým pasivním pozorovatelem, ale aktivním účastníkem (Mofatteh et al., 2022). Následně lze v takových případech využít VR také k odvedení pozornosti pacienta a zmírnění jeho nervozity (Bernard et al., 2023).

Neurorehabilitace

Zejména u pacientů po neurochirurgických zákrocích se VR začíná využívat několika různými způsoby (Mishra et al., 2022) – k vytvoření poutavého virtuálního tréninkového prostředí pro motorickou rehabilitaci, pro zavedení tele-rehabilitačních služeb umožňujících hodnocení pokroku terapeutem přítomným pouze virtuálně a k simulaci úloh nebo prostředí umožňujících rehabilitaci a hodnocení kognitivních funkcí. Jako slibné se jeví také využití v emoční rehabilitaci, kde byla sledována aktivace zotavujících mechanismů, a to včetně hipokampální neuroplasticity a neurogeneze, které se podílejí na reakci na stres a kontrole emocí (Georgiev et al., 2021).

V oblasti rehabilitace je zároveň výhodou poutavost, zábavnost a pozitivní zpětná vazba, kterou VR nabízí, což má zásadní význam pro prevenci frustrace pacientů a ztrátu motivace (Mishra et al., 2022).

Kromě výše uvedeného se za stejným účelem VR začíná využívat i u řady neurologických onemocnění – například několik prací publikovaných v roce 2023 prokázalo u pacientů s roztroušenou sklerózou (RS) po tréninku ve VR zlepšení zručnosti a motorických funkcí horních končetin, stejně jako zlepšení ve zvládání každodenních aktivit, vnímané kvalitě života, náladě a spokojenosti (Pau et al., 2023).

Neuropsychiatrie

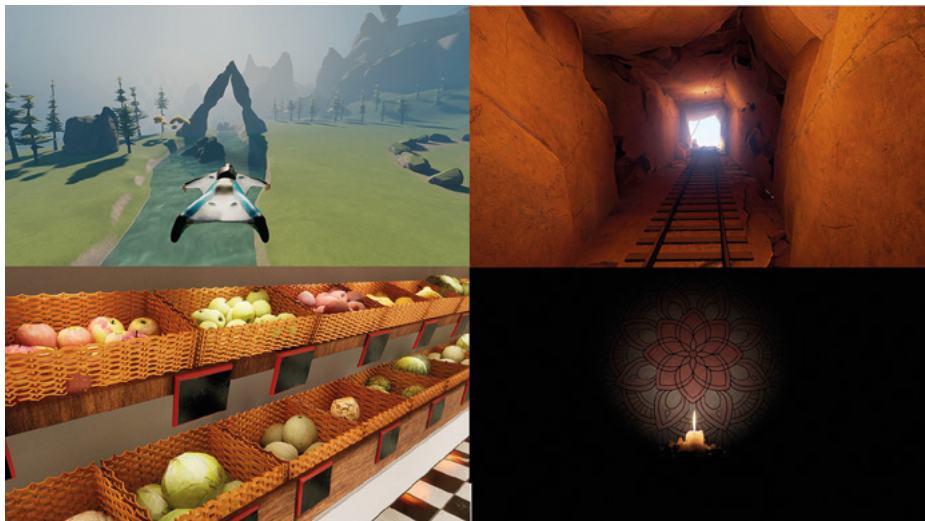
První oblastí neuropsychiatrie, v níž bylo úspěšně zkoumáno využití VR, je léčba pacientů stížených specifickými fobiemi, obsedantně-kompulzivními poruchami, schizofrenií, posttraumatickými stresovými poruchami a poruchami autistického spektra (Scott et al., 2022).

U osob se situační úzkostí, například z vystupování na veřejnosti, je VR používána k simulaci daného prostředí tak, aby pacientovi pomohly překonat stres, který mu působí.

Obr. 4. Logická hra pro virtuální realitu, kombinující kognitivní i motorickou stimulaci využívající pohyby vlastní rukou pro uchopení a práci s předměty (Machizzle, Infinite Production)



Obr. 5. Virtuální realitu lze využít při terapii akrofobie, klaustrofobie, obsedantně-kompulzivní poruchy i jako bezpečné prostředí pro relaxaci a meditaci; snímky pořízeny z VR aplikací společnosti Infinite Production



Obr. 6. Měření EEG během používání VR (archiv autorů)



V případě specifických fobií jsou prostřednictvím VR realizovány typicky techniky desenzibilizace a zaplavení (virtuální expoziční terapie – VRET, kdy je v simulovaném prostředí pacient vystaven konkrétním obávaným podnětům postupně anebo v pl-

né intenzitě, což je umocněno multisenzorickou povahou stimulace poskytované VR (Lindner et al., 2020). Tato myšlenka není nová, přičemž již v roce 1995 bylo úspěšně experimentováno s VR u pacientů trpících akrofobií (Rothbaum et al., 1995). V Česku se touto

problematikou intenzivně zabývá Centrum výzkumu virtuální reality v duševním zdraví a neurovědách působící v Národním ústavu duševního zdraví.

Podobným způsobem je VR aplikována v případě posttraumatických stresových poruch, kde studie provedené na různorodých skupinách pacientů prokázaly, že tato terapie ve většině případů zlepšuje tradiční kognitivně-behaviorální terapii a dosahuje úspěšnosti 66–90 % (Wiederhold et Bouchard, 2014).

U pediatrických pacientů s poruchami autistického spektra a přidruženými neurologickými chorobami řada provedených studií potvrdila, že zapojení VR pomáhá rozvíjet pozornost, exekutivní a jazykové funkce a v kombinaci se standardními technikami rehabilitace zlepšují jejich kognitivní a sociální vývoj (Zhao et al., 2022).

Jednou z hlavních výhod této aplikace VR je plná kontrola terapeuta nad situací, který může zcela eliminovat nepředvídatelné události, upravovat dané prostředí a podmínky nebo opakovat konkrétní scénáře (např. expozici) ve stejné podobě tolikrát, kolikrát je to nutné.

Druhou oblastí neuropsychiatrie, kde se VR začíná využívat, je diagnostika a péče o pacienty trpící mírnou kognitivní poruchou a demencí způsobenou neurodegenerativními chorobami, přičemž slibných výsledků bylo dosaženo zejména v pracích zabývajících se Alzheimerovou chorobou (Tian et al., 2023). Pilotní studie naznačují, že kognitivní trénink ve virtuálním prostředí je pro pacienty subjektivně zajímavější a příjemnější, díky čemuž vyjadřují větší míru spolupráce a ochotu k účasti (Manera et al., 2016).

Specifickým příkladem využití VR je simulace audiovizuálního vnímání světa pacientů trpících psychózou, přičemž dle provedených studií zaměřených na schizofrenii (Cachia et al., 2024) nebo psychiatrické projevy pozdního stadia Parkinsonovy choroby (Goldman et al., 2016) jde o účinný edukační nástroj pro zdravotníky i pečující osoby.

S touto oblastí nepřímo souvisí rostoucí využití VR v oblasti mindfulness a relaxačních technik, čímž se zabývají autoři v rámci vlastního nezávislého výzkumu.

Omezení a nedostatky

První skupina nedostatků a omezení využití VR vychází z jejího vlivu na uživatele, kdy častá je nejen kinetóza, ale v případě delšího nebo častějšího užívání také fyzický diskomfort, způsobený hmotností náhlavní soupravy. Vážnější potíže, například vizuální halucinace u pacientů s Parkinsonovou chorobou (Albani et al., 2015), jsou zatím hlášeny spíše výjimečně, nicméně jejich skutečný výskyt zatím nelze spolehlivě hodnotit.

Další nedostatky nebo omezení jsou specifické pro jednotlivá využití – v případě VR simulátorů využívaných v neurochirurgii je to neschopnost poskytnout zcela realistický zážitek (Hey et al., 2023), u kognitivní rehabilitace může být obtížné nalezení rovnováhy mezi kontrolovaným prostředím pro trénink a ekologicky validními scénáři, aby se zajistilo, že kognitivní přínosy dosažené ve VR budou

replikovány v reálném světě (Catania et al., 2023), a v případě použití AR během neurochirurgického zákroku může u chirurga dojít k chybnému vnímání hloubky nebo asynchronnosti mezi vizuálními a taktilními vjemy (Hey et al., 2023).

Poslední kategorie omezení souvisí s etickými a právními aspekty a technologií samotnou – její dostupností (v případě vysoce pokročilých systémů), nutností nácviku obsluhy a získání praxe v jejím používání (Mishra et al., 2022), problematikou ochrany soukromí, shromážděných VR dat a dalších informací o uživateli (Sokołowska, 2024) a dostupností vhodných softwarových aplikací pro jednotlivé oblasti použití a jejich specifik (například konkrétní prostředí či obávané podněty v expoziční terapii). V rámci výzkumných studií jsou dnes většinou využívány na míru vyvinuté anebo komerčně dostupné aplikace poskytující požadovaný obsah (příklady na obrázcích výše), které však

nejsou primárně určeny pro toto užití, což je pochopitelné vzhledem k tomu, že zavádění VR do klinické praxe je v mnoha oblastech teprve v počátcích.

Závěr

Navzdory omezením a nedostatkům uvedeným výše – z nichž podstatnou část vyřeší dynamický vývoj a pokrok – se VR/AR stávají široce používanými nástroji v neurovědě i neurologii. Přestože významné pokroky nastávají v neurochirurgii každých 20 let, rapidní rozvoj technologie může tento trend a následnou transformaci tohoto i souvisejících oborů významně urychlit (Scott et al., 2022). Ačkoli v některých oblastech má VR/AR potenciál skutečně revoluční (Hey et al., 2023), většina provedených studií pracuje jen s malými vzorky a jejich závěry je tak nutné potvrdit důkladnějším a rozsáhlejším výzkumem.

LITERATURA

- Albani G, Pedrolì E, Cipresso P, et al. Visual hallucinations as incidental negative effects of virtual reality on parkinson's disease patients: A link with neurodegeneration? *Parkinson's Disease*. 2015;1-6. doi:10.1155/2015/194629.
- Bernard F, Lemée JM, Aubin G, et al. Using a virtual reality social network during awake craniotomy to map social cognition: Prospective trial. *Journal of Medical Internet Research*. 2018;20(6). doi:10.2196/10332.
- Bernard F, Clavreul A, Casanova M, et al. Virtual reality-assisted awake craniotomy: a retrospective study. *Cancers*. 2023;15(3):949. doi:10.3390/cancers15030949.
- Biocca F, Levy MR (eds.). *Communication in the age of virtual reality*. New York, NY: Routledge Member of the Taylor and Francis Group. 1995.
- Cachia A. Simulating Schizophrenia through Virtual Reality and Artificial Intelligence. *Open Science Journal*. 2024;9(1). doi:10.23954/osj.v9i1.3373.
- Catania V, Rundo F, Panerai S, et al. Virtual reality for the rehabilitation of acquired Cognitive Disorders: A narrative review. *Bioengineering*. 2023;11(1):35. doi: 10.3390/bioengineering11010035.
- Cipresso P, Giglioli ACG, Ranya MA, et al. The past, present, and future of virtual and Augmented Reality Research: A network and cluster analysis of the literature. *Frontiers in Psychology*. 2018;9. doi:10.3389/fpsyg.2018.02086.
- Delion M, Klinger E, Bernard F, et al. Immersing patients in a virtual reality environment for brain mapping during awake surgery: Safety Study. *World Neurosurgery*. 2020;134. doi:10.1016/j.wneu.2019. 11. 047.
- Faust F, Roepke G, Catecati T, et al. Use of augmented reality in the usability evaluation of products. *Work*. 2012;41:1164-1167. doi:10.3233/wor-2012-0298-1164.
- Fuchs P, Moreau G, Auvray M. *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris: Presses de l'Ecole des mines. 2006.
- Georgiev D, Georgieva I, Gong Z, et al. Virtual reality for neurorehabilitation and Cognitive Enhancement. *Brain Sciences*. 2021;11(2):221. doi:10.3390/brainsci11020221.
- Goldman J, Stebbins G, Fredericks D, et al. Experiencing parkinson's disease psychosis via virtual reality simulation: A novel and effective educational tool (P1.011). *Neurology*. 2016;86(16_supplement). doi:10.1212/wnl.86.16_supplement.p1.011.
- Hey G, Guyot M, Carter A, et al. Augmented reality in neurosurgery: A new paradigm for training. *Medicina*. 2023;59(10):1721. doi:10.3390/medicina59101721.
- Higginbotham G. Virtual connections: Improving global neurosurgery through immersive technologies. *Frontiers in Surgery*. 2021;8. doi:10.3389/fsurg.2021.629963.
- Kenyon K, Kinakh V, Harrison J. Social virtual reality helps to reduce feelings of loneliness and social anxiety during the COVID-19 pandemic. *Scientific Reports*. 2023; 13(1). doi:10.1038/s41598-023-46494-1.
- Lindner P, Miloff A, Bergman A, et al. Gamified, automated virtual reality exposure therapy for fear of spiders: A single-subject trial under simulated real-world conditions. *Frontiers in Psychiatry*. 2020;11. doi:10.3389/fpsyg.2020.00116.
- Liu X, Tao H, Xiao X, et al. Use of the stereoscopic virtual reality display system for the detection and characterization of intracranial aneurysms: A ICOMPARISON with conventional computed tomography workstation and 3D rotational angiography. *Clinical Neurology and Neurosurgery*. 2018;170:93-98. doi:10.1016/j.clineuro.2018. 04. 034.
- Manera V, Chapoulie E, Bourgeois J, et al. A feasibility study with image-based rendered virtual reality in patients with mild cognitive impairment and dementia. *PLOS ONE*. 2016a;11(3). doi:10.1371/journal.pone.0151487.
- Mazerand E, LeRenard H, Hue S, et al. Intraoperative subcortical electrical mapping of the optic tract in awake surgery using a virtual reality headset. *World Neurosurgery*. 2017;97:424-430. doi:10.1016/j.wneu.2016. 10. 031.
- Mishra R, Narayanan K, Umana GE, et al. Virtual reality in neurosurgery: Beyond neurosurgical planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(3):1719. doi:10.3390/ijerph19031719.
- Mitha AP, Almekhlafi MA, Janjua MJJ, et al. Simulation and augmented reality in endovascular neurosurgery. *Neurosurgery*. 2013;72(Supplement 1). doi:10.1227/neu.0b013e31827981fd.
- Mofatteh M, Mashayekhi MS, Arfaie S, et al. Augmented and virtual reality usage in awake craniotomy: A systematic review. *Neurosurgical Review*. 2022;46(1). doi:10.1007/s10143-022-01929-7.
- Pau M, Porta M, Berton R, et al. Effect of immersive virtual reality training on hand-to-mouth task performance in people with multiple sclerosis: A quantitative kinematic study. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*. 2023;69:104455. doi:10.1016/j.msard.2022.104455.
- Paro MR, Hersh DS, Bulsara KR. History of virtual reality and augmented reality in neurosurgical training. *World Neurosurgery*. 2022;167:37-43. doi:10.1016/j.wneu.2022. 08. 042.
- Perin A, Galbiati TF, Ayadi R, et al. Informed consent through 3D Virtual reality: A randomized clinical trial. *Acta Neurochirurgica*. 2020;163(2):301-308. doi:10.1007/s00701-020-04303-y.
- Rothbaum B, Hodges LF, Kooper R, et al. Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia. *American Journal of Psychiatry*. 1995;152(4):626-8. doi: 10.1176/ajp.152. 4. 626. PMID: 7694917.
- Scott H, Griffin C, Coggins W, et al. Virtual reality in the neurosciences: Current practice and future directions. *Frontiers in Surgery*. 2022;8. doi:10.3389/fsurg.2021.807195.
- Sokołowska B. Being in virtual reality and its influence on Brain Health – an overview of benefits, limitations and prospects. *Brain Sciences*. 2024;14(1):72. doi:10.3390/brainsci14010072.
- Tian Y, Kuruvilla MV, Park M. The use of virtual reality in screening for Preclinical Alzheimer's Disease: A scoping review protocol. *PLOS ONE*. 2023;18(2). doi:10.1371/journal.pone.0282436.
- Thurley K. Naturalistic neuroscience and virtual reality. *Frontiers in Systems Neuroscience*. 2022;16. doi:10.3389/fn-sys.2022.896251.
- Wiederhold BK, Bouchard S. Virtual reality for posttraumatic stress disorder. *Advances in Virtual Reality and Anxiety Disorders*. 2014;211-233. doi:10.1007/978-1-4899-8023-6_10.
- Wu Y, Hu K, Chen DZ, Wu J. AI-Enhanced Virtual Reality in Medicine: A comprehensive survey. 2024;arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2402.03093>.
- Zhao J, Zhang X, Lu Y, et al. Virtual reality technology enhances the cognitive and Social Communication of children with autism spectrum disorder. *Frontiers in Public Health*. 2022;10. doi:10.3389/fpubh.2022.1029392.