

Matej Žnidarič, Dominik Škrinjar

Navidezna resničnost v fizikalni in rehabilitacijski medicini

Povzetek. Navidezna resničnost je računalniško ustvarjeno okolje, ki omogoča interakcijo med uporabnikom in navideznimi elementi preko posebnih naprav. Ta interaktivnost loči navidezno resničnost od običajnih medijev, kot sta video in televizija. Navidezna resničnost je uporabna na različnih področjih, vključno z informatiko, izobraževanjem, medicino, vojsko in vesoljsko znanostjo. Razvoj navidezne resničnosti je tesno povezan z napredkom informacijske tehnologije, predvsem pa z zmogljivostjo računalnikov, ki omogočajo trirazsežne vmesnike. Obstaja več vrst navidezne resničnosti, od neimerzivne, kjer uporabnik ni povsem vključen v navidezni svet, do popolne navidezne resničnosti, kjer je prisotnost v navideznem svetu izrazita. Razširjena resničnost povezuje navidezne in resnične elemente, mešana resničnost pa omogoča interakcijo med obema svetovoma. Navidezna resničnost se je izkazala kot učinkovita metoda rehabilitacije, zlasti pri bolnikih, ki se rehabilitirajo v domačem okolju. Omogoča nadzor nad zunanjimi dražljaji, prilagodljivost vaj ter beleženje napredka. Uporaba navidezne resničnosti za rehabilitacijo zgornjih okončin in hoje je obetavna, saj izboljšuje motorične sposobnosti in povečuje možganske aktivnosti. Pri bolnikih z nevrodegenerativnimi boleznimi se navidezna resničnost uporablja za ocenjevanje kognitivnih funkcij. Pri otrocih pa lahko navidezna resničnost izboljša kognitivne, motorične in socialne spretnosti ter kakovost življenja. Navidezna resničnost je torej vsestransko orodje, ki lahko nadgradi rehabilitacijo bolnikov in izboljša njihovo kakovost življenja.

Ključne besede: navidezna resničnost, rehabilitacija, kognitivne funkcije, nevrodegenerativne bolezni.

Virtual Reality in Physical and Rehabilitation Medicine

Abstract. Virtual reality is a computer-generated environment that allows the user to interact with virtual elements through special devices. This interactivity distinguishes virtual reality from conventional media such as video and television. It offers a wide range of applications, including IT, education, medicine, military, and space science. The development of virtual reality is closely linked to advances in information technology, in particular to powerful computers that enable three-dimensional interfaces. There are several types of virtual reality, ranging from non-immersive, where the user is not fully involved in the virtual world, to full virtual reality, where the presence in the virtual world is pronounced. Augmented reality integrates virtual and real elements, while mixed reality allows interaction between the two worlds. Virtual reality is proving to be an effective method of rehabilitation, especially for patients rehabilitating in a home environment. It allows control over external stimuli, flexibility of exercises and recording of progress. The use of virtual reality for upper limb and gait rehabilitation is promising as it improves motor skills and increases brain activity. For patients with neurodegenerative diseases, virtual reality is used to assess cognitive functions. In children, virtual reality can improve cognitive, motor and social skills, and quality of life. Virtual reality is therefore a versatile tool that can enhance patients' rehabilitation and improve their quality of life.

Key words: virtual reality, rehabilitation, cognitive function, neurodegenerative diseases.

■ Infor Med Slov 2023; 28(1-2): 24-30

Institucije avtorjev / Authors' institutions: Medicinska fakulteta, Univerza v Mariboru.

Kontaktna oseba / Contact person: Matej Žnidarič, dr. med., Medicinska fakulteta, Univerza v Mariboru, Taborska ulica 8, 2000 Maribor, Slovenija.

E-pošta / E-mail: matej.znidaric97@gmail.com.

Prispelo / Received: 2. 10. 2023. Sprejeto / Accepted: 28. 11. 2023.

Uvod

Pojem navidezne resničnosti (NR) je prvič predstavil Jaron Lanier konec osemdesetih let prejšnjega stoletja.¹ Kot strokovnjak za informacijsko tehnologijo je ustvaril računalniški model z uporabo grafičnega vmesnika oziroma navideznega okolja, v katerem uporabnik s pomočjo posebnih naprav sodeluje z grafičnimi elementi tega okolja.² Prav ta možnost interakcije je tista, ki NR razlikuje od videa in televizije. Zaradi tega je lahko NR koristno orodje v informatiki, izobraževanju, medicini, rehabilitaciji, vojski, vesoljski znanosti in drugod.^{3,4} Razvoj NR je tesno povezan s tehnološkim napredkom, predvsem pa z razvojem zmogljivih računalnikov, ki so zmožni podpirati potrebe naprednih trirazsežnih grafičnih vmesnikov. Naprave, ki omogočajo vidno, slušno, haptično in vonjalno interakcijo med osebo in NR, lahko poustvarijo navidezno resničnost, kot da bi ta bila del resničnega sveta. Na podlagi uporabnikovega dejanja (govor, gibanje ipd.) lahko računalnik spreminja navidezno grafično okolje, s čimer ustvari iluzijo uporabnikove interakcije in posredovanja v navideznem resničnem okolju.⁵ Sistem NR je sestavljen iz (a) zunanjih komponent (vidne, slušne in haptične), ki uporabnika povežejo z navideznim okoljem, (b) notranjih komponent (sledilniki, rokavice, krmilna palica, eksoskeleti, miška), ki sledijo položaju in gibanju uporabnika, (c) grafičnega sistema, ki ustvari navidezno okolje, ter (č) programske opreme in (d) podatkovne zbirke, ki se uporabljata za oblikovanje modelov oziroma objektov v navideznem okolju.⁶

Vrste NR

Računalniško ustvarjeni svetovi omogočajo digitalne izkušnje, ki jih imenujemo NR. Glede na intenzivnost in kakovost občutkov, ki jih sproži računalniško ustvarjeni svet, lahko razlikujemo več glavnih vrst navidezne resničnosti.⁷

Neimerzivna NR

To je najpogostejša vrsta NR, s katero se srečujemo pri delu z osebnimi računalniki, tabličnimi računalniki, pametnimi telefoni, televizorji ali drugimi elektronskimi napravami. Ker je navidezni svet prikazan na računalniških monitorjih ali velikih televizijskih zaslonih, interakcija pa poteka s pomočjo vhodnih naprav, kot so tipkovnice, miške ali krmilniki, oseba nima občutka, da je prisotna v navideznem svetu. Namesto tega lahko oseba hkrati doživlja tako resnični svet, npr. fizično okolico v sobi, kot tudi vsebino navideznega sveta, npr. položaj avatarja v računalniški igri.⁸

Popolna navidezna resničnost

V tej vrsti navidezne resničnosti ima oseba občutek prisotnosti v navideznem svetu. Oseba vstopi v navidezni svet s pomočjo specializirane strojne opreme, kot so naglavni zaslon, podatkovne rokavice oziroma navidezna soba. Namen te dodatne opreme je odpraviti čutni tok informacij iz resničnega sveta in ga nadomestiti z računalniško ustvarjenim svetom. S tem se ohranja iluzija, da je navidezni svet dejanski resnični svet. S senzorji, pritrjenimi na obleko, je mogoče spremljati gibanje osebe, z elektroencefalografijo (EEG) pa je mogoče spremljati možgansko aktivnost.⁹

Razširjena resničnost

Značilnost razširjene resničnosti je, da so nekatere sestavine navideznega sveta povezane z realnim svetom. Oseba doživlja računalniško ustvarjene zaznavne informacije, ki so prekrile s fizičnimi predmeti, ki se nahajajo v resničnem okolju. Elektronske naprave, opremljene s fotoaparati, kot so pametni telefoni in tablični računalniki, trenutno omogočajo zajemanje posnetkov resničnega sveta, ki jih je mogoče izboljšati z animacijami ali drugimi digitalnimi informacijami, izbranimi iz aplikacij NR.¹⁰ Praktičen način za razširitev resničnosti je preko vizualnega sistema z uporabo prostoročnih nosljivih naprav, kot so pametna očala. V razširjeni resničnosti lahko uporabnik vidi sestavine navideznega sveta, vendar z njimi ne more komunicirati.^{11,12}

Mešana resničnost

Mešana resničnost je oblika razširjene resničnosti, pri kateri lahko resnični in navidezni elementi medsebojno vplivajo drug na drugega, s čimer se uporabniku omogoči interakcija z resničnimi in navideznimi objekti.¹³ Nadaljnji razvoj digitalnih tehnologij bo lahko omogočil celo projekcijo tridimenzionalnih hologramov v realnem prostoru in po potrebi interakcijo uporabnika s projiciranimi digitalnimi krmilniki.¹⁴

Uporaba NR v rehabilitaciji

NR ima pomemben potencial v rehabilitaciji, še posebej kot dopolnilna metoda za hitrejšo rehabilitacijo bolnikov na domu.¹⁵ NR omogoča popoln nadzor nad dražljaji in njihovo doslednostjo, možnost spreminjanja dražljajev od preprostih do bolj zapletenih, zagotavlja enostavno ocenjevanje in beleženje bolnikovega napredka.^{16,17} Hkrati lahko NR bolnikom nudi individualizirano zdravljenje in rehabilitacijo glede na diagnozo in potrebe ter vpliva na bolnikovo motivacijo.^{18,19}

Vse več tehnologij NR dopolnjujejo igralni koncepti, pri katerih se uporabljajo različni elementi, dinamika in mehanika.²⁰ Tako je na primer mogoče navidezna okolja predstaviti na zaslonih ali prikazati skozi očala za NR, ki jih dopolnjujejo hkratne zvočne predstavitve, kar se močno približa kompleksnosti vsakdanjega sveta.²¹ V kombinaciji s trirazsežno analizo gibanja imajo tehnologije NR velik potencial za rehabilitacijo funkcionalnosti zgornjih okončin.²² Zasnova sistemov je pogosto podobna; ena ali več oblik senzorske tehnologije beleži uporabnikove gibe, ki so predstavljeni na interaktivni način. Hkrati je strokovnjakom omogočeno, da spremljajo uspešnost bolnikovega rehabilitacijskega programa.²³

Učinkovitost NR pri nevrorehabilitaciji je dobro raziskana pri osebah s cerebralno paralizo in po možganski kapi.²⁴ Kljub obetavnim učinkom pri rehabilitaciji pa se NR v praksi še vedno ne uporablja rutinsko. Poleg tega je njena učinkovitost pri rehabilitaciji zgornjih okončin izven nevroloških motenj še ne dovolj raziskana. Bolniki z nevrološkimi boleznimi lahko trpijo zaradi motenj v delovanju zgornjih okončin, vendar obstajajo razlike v ciljih zdravljenja, ki jih je potrebno upoštevati.²⁵

Na področju gibalne rehabilitacije je NR razmeroma cenovno dostopna. S pomočjo NR lahko bolniki učinkovito izvajajo vaje, terapevti pa lahko lažje vrednotijo učinkovitost rehabilitacijskega programa.²⁶ Uspešnost rehabilitacije s pomočjo NR se je izkazala pri bolnikih po možganski kapi in poškodbah možganov, pri ortopedski rehabilitaciji bolnikov s Parkinsonovo boleznijo, pri vajah za ravnotežje in pri izvajanju vsakodnevnih aktivnosti.^{27,28}

Rehabilitacija nevroloških bolnikov z uporabo NR

Poškodba možganov je življenje ogrožajoče zdravstveno stanje, ki negativno vpliva na delovanje možganov.²⁹ Dva glavna vzroka poškodbe možganov sta mehanska poškodba, ki je najpogostejša vrsta poškodbe možganov pri mlajših odraslih (do 45 let), in žilni dogodki (možganska kap), ki so pogostejši pri starejših odraslih (nad 45 let).³⁰ Travmatska poškodba možganov in možganska kap povzročita kognitivne, nevrološke in psihološke okvare, ki jih je mogoče delno odpraviti z nevrorehabilitacijo.^{31,32} Najpogostejše vrste invalidnosti zaradi poškodbe možganov so: paraliza ali oslavljen motorični nadzor; senzorične motnje, vključno z bolečino; kognitivne motnje, vključno z motenim razumevanjem ali uporabo jezika (afazija) ter oslavljenim mišljenjem in spominom; in čustvene motnje, vključno z občutki

strahu, tesnobe, razočaranja ali žalosti. Vključitev NR v proces rehabilitacije obeta boljše funkcionalne rezultate, vključno z obnovo poškodovanega živčnega tkiva in nadomestitvijo vseh funkcionalnih sprememb, ki so posledica poškodbe.³³

NR zagotavlja varno in nadzorovano okolje za izvajanje učinkovitih rehabilitacijskih dejavnosti, ki spodbujajo učenje motoričnih spretnosti. Terapevtski učinek NR je mogoče preprosto združiti z računalniško podprto filmsko analizo motoričnih deficitov po možganskih poškodbah.³⁴ To omogoča zanesljivo dokumentiranje stopnje motorične prizadetosti pri bolnikih z možgansko poškodbo, ki se udeležujejo rehabilitacijske terapije.³⁵ Ker so navidezna okolja zelo interaktivna, lahko učinkovito aktivirajo vidne, vestibularne in propioceptivne sisteme.³⁶

Glavni terapevtski učinek NR na motorično aktivnost zgornjih okončin je povečanje aktivnega obsega gibanja (angl. active range of motion – AROM) rame, komolca in zapestja.^{37,38} Z magnetno resonanco z morfometrijo na osnovi vokslov so ugotovili znatno povečanje sive snovi v petih možganskih območjih: repu hipokampusa, levem kaudalnem jedru, rostralnem cingulatnem območju, globini osrednjega sulkusa in vidni skorji. Poleg tega so bili volumni sive snovi motoričnega, premotoričnega in dodatnega motoričnega korteksa pozitivno povezani z močjo in AROM, izmerjenimi pri motoričnih testih. Zanimivo je, da so posnetki pokazali znatno povečan EEG (na kar kažejo močni valovi beta) v frontopolarinem območju 2 in frontalnem območju 4 ter povečano možgansko aktivnost (na kar kažejo višje povprečne frekvence valov) v frontopolarinem območju 1 in frontalnem območju 3 v skupini za trening zgornjih okončin z uporabo NR.³⁹ Najpomembnejša značilnost rehabilitacije z NR je, da izboljša motorično funkcijo zgornjih okončin ter s tem vsakodnevne dejavnosti bolnikov z možgansko poškodbo.²²

Poškodbe možganov, ki prizadenejo področja motorične skorje, lahko povzročijo motnje pri hoji, vzdrževanju in prilagajanju ravnotežja ali nadzoru drže.^{40,41} Ker delovna obremenitev spodnjih okončin med hojo vključuje tudi podporo telesne teže osebe, so pri rehabilitaciji hoje v veliko pomoč robotske naprave, ki omogočajo manjšo delovno silo in daljšo vadbo z večjo intenzivnostjo v primerjavi s tradicionalnim zdravljenjem.⁴² Lokomat je ena od takih robotskih naprav, opremljenih z elektronskim krmiljenjem, ki omogoča povezavo z zaslonom NR, na katerem avatar zagotavlja vidne povratne informacije o bolnikovih gibih.⁴³

Ugotovili so, da je vključitev povratnih informacij NR bistveno izboljšala bolnikovo razpoloženje, zaznavanje telesnega počutja, globalne kognitivne funkcije, izvršilne funkcije (kot so vztrajnost, načrtovanje in razvrščanje), kognitivno prožnost in selektivno pozornost; vse to je pozitivno vplivalo na kakovost bolnikovega življenja.⁴⁴ Intervencije na področju hoje in ravnotežja lahko vključujejo tudi gibljivo platformo z vgrajeno tekalno stezo, ki jo udeleženci uporabljajo za interakcijo z navideznim okoljem. Projekcija sinhroniziranih okolij NR na 180-stopinjskem cilindričnem zaslonu omogoča udeležencem, da se sprehajajo in gibljejo v privlačnem in zanimivem okolju, kar je posebej koristno za rehabilitacijo otrok.⁴⁵

Rehabilitacija bolnikov z neurodegenerativnimi boleznimi s pomočjo NR

Pri bolnikih z neurodegenerativnimi boleznimi je bila NR uporabljena kot orodje za ocenjevanje kognitivnih in izvršilnih funkcij. Bolniki so pokazali sposobnost učenja novih vzorcev gibanja, vendar v počasnejšem tempu in z več težavami kot kontrolna skupina.⁴⁶

Le peščica študij je preučevala uporabo NR za preučevanje hoje pri bolnikih z neurodegenerativnimi boleznimi. Študije so preučevale trening hoje in zmogljivosti z uporabo NR. Preučevali so vpliv optičnih in egocentričnih koordinat na navigacijo med hojo pri bolnikih s Parkinsonovo boleznijo. V raziskavi je sodelovalo 31 bolnikov in 18 zdravih posameznikov. Raziskovalci so z zaslonom, nameščenim na bolnikovo glavo, projicirali navidezno okolje, sestavljeno iz navideznega hodnika, ki ga sestavljata dve stranski steni iz belih naključnih točk na črnem ozadju, črnih tal in stropa brez texture. Udeleženci so hodili po tleh s hitrostjo 0,8 m/s, medtem ko so opazovali navidezni prizor s spremenljivimi optičnimi flomastri hitrosti. Rezultati so pokazali, da je parietalno posredovano zaznavanje vizualnih komponent prostora, vključno z zaznavanjem hitrosti optičnih gibov, pri bolnikih s Parkinsonovo boleznijo prizadeto.⁴⁷ Te ugotovitve so v skladu s prejšnjimi študijami, ki so poročale o oslabljenih orientacijskih sposobnostih pri bolnikih s Parkinsonovo boleznijo.^{48,49}

Rehabilitacija otrok s pomočjo NR

Izsledki raziskav so pokazali prednosti NR pri rehabilitaciji otrok in mladostnikov v smislu učenja in

vadbe novih spretnosti, izboljšanja kognitivnih funkcij, krepitev socialne vključenosti in izboljšanja kakovosti življenja. Kot v primeru slepih otrok, lahko navidezno okolje predstavlja vir slušnih in/ali taktilnih dražljajev, preko katerih se otrok uči in pridobiva nove spretnosti. Pri otrocih z motnjami v avtističnem spektru lahko NR omeji število dražljajev in otroke spodbudi, da se osredotočijo na določeno nalogo. Poleg tega se lahko NR uporabi kot koristno in motivacijsko orodje, ki pomaga otrokom z učnimi težavami.⁵⁰

Pri otrocih s telesno prizadetostjo lahko NR izboljša zaznavno-motorične in kognitivno-prostorske spretnosti ter spodbuja otrokov občutek neodvisnosti, samozvesti in osebni nadzor. S pomočjo NR se lahko otroci s telesno prizadetostjo učijo samostojne uporabe motoriziranega invalidskega vozička v različnih okoliščinah (ovire, kot so stopnice, robniki, vrata, ki jih je težko odpreti, predmeti, ki jih je težko doseči, ter neustrezna pričakovanja in pripombe iz okolja). Pri hospitaliziranih otrocih lahko NR nadomesti komunikacijo z družino in jim pomaga pri lažjem spoprijemanju z boleznijo. Učinki NR pri otrocih se trenutno preučujejo v rehabilitacijskih programih, ki temeljijo na uporabi široko dostopnih igralnih konzol, npr. Nintendo in Wii.^{51,52}

Raziskave na področju NR v fizikalni in rehabilitacijski medicini v Sloveniji

Uporaba NR, zlasti v sklopu nevrorehabilitacije, predstavlja ključno področje znotraj fizikalne in rehabilitacijske medicine, ki se osredotoča na obnovo funkcij pri osebah z nevrološkimi motnjami s pomočjo NR. V Sloveniji je to področje v zadnjih letih deležno večje pozornosti, saj se raziskovalci in klinični strokovnjaki osredotočajo na razvoj in uvedbo inovativnih terapevtskih pristopov. V tem kontekstu je ena izmed nedavnih raziskav preučevala učinek računalniške igre »10 kock« pri bolnikih s Parkinsonovo boleznijo na njihovo spretnost in koordinacijo roke. Sodelovalo je 28 bolnikov, ki so v treh tednih izvajali deset obravnav v navideznem okolju. Rezultati raziskave so pokazali rahlo, a opazno izboljšanje funkcije roke, kar kaže na potencial vaje v navideznem okolju kot koristnega dopolnila rehabilitacijskih obravnav za bolnike s Parkinsonovo boleznijo.⁵³

V sistematičnem pregledu literature iz leta 2022, ki se je osredotočil na učinkovitost vadbe z navidezno resničnostjo pri pacientih po možganski kapi, so

analizirali 11 sistematičnih pregledov, ki so se osredotočali na vadbo za ravnotežje, vadbo za zgornji ud ter vadbo hoje z uporabo te tehnologije. Ugotovili so, da je vadba z navidezno resničnostjo izboljšala ravnotežje pri pacientih v kronični fazi po možganski kapi, prav tako pa je bila učinkovita pri izboljšanju premičnosti in/ali hitrosti hoje. Za zgornji ud so pokazali, da je vadba z navidezno resničnostjo presegla standardne terapevtske pristope, vendar le, če je bilo pri vadbi upoštevanih vsaj osem načel nevrorehabilitacije. Sklepajo, da lahko uporaba navidezne resničnosti predstavlja učinkovito orodje pri izboljšanju gibalnih sposobnosti po možganski kapi, če je pristop prilagojen pacientovim specifičnim terapevtskim ciljem in potrebam. Pomembno je tudi postopno stopnjevanje vadbe glede na napredek posameznika.⁵⁴

V Sloveniji so razvili tudi inovativen sistem za spremljanje pozornosti pacientov med rehabilitacijo hoje po možganski kapi s pomočjo videonadzora. Ta sistem zaznava obrazne poteze pacienta ter sledi njegovi pozornosti do vizualnih povratnih informacij. Rezultati raziskave poudarjajo izvedljivost takšnega spremljanja pozornosti in njegovo vrednost pri ocenjevanju pacientovega sodelovanja pri rehabilitacijski terapiji. Raziskava ponuja vpogled v uporabo nevsiljivega videonadzora za spremljanje pozornosti pacientov med rehabilitacijskim procesom ter odpira možnosti za dolgoročno opazovanje vpliva vidnih povratnih informacij na napredek rehabilitacije. Ta sistem lahko obogati druge merilnike uspešnosti nevro-računalniških vmesnikov pri terapevtskih vajah, kot so podobnost motoričnih vzorcev, kinetični in kinematični profili ter možganski vzorci.⁵⁵

Raziskava, izvedena na Univerzitetnem rehabilitacijskem inštitutu Republike Slovenije Soča (URI Soča), ki je trenutno vodilna inštitucija s področja uporabe NR pri nevrorehabilitaciji bolnikov v Sloveniji, se je osredotočala na uvedbo haptičnih tal, ki omogočajo interakcijo in diagnostiko s specifičnimi nalogami za vadbo ravnotežja. Sistem, ki združuje podporno stojko in navidezno okolje, je bil preizkušen na pacientih po možganski kapi, pri čemer so trki v haptična tla povzročili premike, na podlagi katerih so ocenjevali posturalne odzive. Rezultati študije so pokazali, da je sistem haptičnih tal stabilen in zmožen generirati posturalne perturbacije pri frekvenci do 1,1 Hz, kar omogoča oceno odzivov pacientov. Primerjava odzivov pacienta po možganski kapi med vadbo z normativom zdravih posameznikov je razkrila opazne odstopanja, zlasti pri premikih v določenih smereh. Ta sistem omogoča spremljanje in ocenjevanje specifičnih odzivov pacientov na vaje

ravnotežja v različnih smereh. Oblikovan je z namenom prepoznavanja motenj ravnotežja med terapevtsko vadbo in omogoča spremljanje napredka rehabilitacije izven specializiranih kliničnih okolij, npr. v domačem okolju pacienta.⁵⁶

Prihodnost uporabe NR v Sloveniji obeta nadaljnji razvoj. URI Soča in drugi raziskovalni centri napovedujejo širjenje uporabe NR v nevrorehabilitaciji, predvsem pri prilagajanju terapevtskih programov potrebam in ciljem pacientov. Pričakuje se, da bodo nadaljnje raziskave in razvoj tehnologije NR omogočili še naprednejše terapevtske pristope ter integracijo teh inovativnih rešitev v klinično prakso. S tem se bo omogočila personalizirana, bolj učinkovita ter dostopna rehabilitacija pacientov z nevrološkimi motnjami, kar bo pomembno vplivalo na izboljšanje njihove kakovosti življenja.

Zaključek

NR v rehabilitaciji postaja pomembno orodje, saj omogoča individualizirano in učinkovito terapijo za različne skupine bolnikov. Uporaba NR v nevrorehabilitaciji bolnikov po poškodbah možganov, zlasti možganski kapi, kaže obetavne rezultate. Bolniki lahko s pomočjo te tehnologije izvajajo vaje, ki izboljšujejo motorične funkcije zgornjih okončin, kar prispeva k boljši funkcionalnosti in kakovosti življenja. NR prav tako omogoča ocenjevanje kognitivnih funkcij in izvršilnih sposobnosti pri bolnikih z nevrodegenerativnimi boleznimi.

Poleg tega se je NR izkazala za koristno pri rehabilitaciji otrok in mladostnikov s posebnimi potrebami, vključno z otroki s telesno prizadetostjo, avtizmom in učnimi težavami. NR lahko spodbudi razvoj različnih spretnosti ter izboljša socialno vključenost in samozavest otrok. Tudi hospitaliziranim otrokom lahko NR pomaga pri soočanju s stresom in osamitvijo.

Kljub obetavnim rezultatom se uporaba NR v rehabilitaciji še vedno ne izvaja rutinsko in zahteva nadaljnje raziskave ter razvoj tehnologije. V prihodnosti bi lahko NR postala nepogrešljivo orodje v rehabilitaciji, ki bo prineslo izboljšanje kakovosti življenja in funkcionalnih rezultatov za številne bolnike.

Reference

1. Lanier J: Virtual reality: the promise of the future. *Interact Learn Int* 1992; 8(4): 275-279.

2. Blanchard C, Burgess S, Harvill Y, et al.: Reality built for two: a virtual reality tool. In: *Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics*. New York 1990: Association for Computing Machinery; 35-36.
3. Wexelblat A (ed.): *Virtual reality: applications and explorations*. Boston 2014: Academic Press.
4. Satava RM, Jones S: Medical applications of virtual reality. In: Hettinger LJ, Haas MW (eds.) *Virtual and adaptive environments: applications, implications, and human performance issues*. New York 2003: CRC Press; 325-343.
5. Anthes C, García-Hernández RJ, Wiedemann M, Kranzlmüller D : State of the art of virtual reality technology. 2016 *IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA 2016: IEEE; 1-19.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500674>
6. Halarnkar P, Shah S, Shah H, Hardik S, Anuj S: A review on virtual reality. *IJCSI* 2012; 9(6): 325-330.
7. Bamodu O, Ye XM: Virtual reality and virtual reality system components. *Adv Mat Res* 2013; 765-767: 1169-1172.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.765-767.1169>
8. Freina L, Ott M: A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. In: *The international scientific conference elearning and software for education*. Bucharest 2015, 133-141. <https://doi.org/10.12753/2066-026X-15-020>
9. Alqahtani AS, Daghestani LF, Ibrahim LF: Environments and system types of virtual reality technology in STEM: a survey. *Int J Adv Comput Sci App* 2017; 8(6).
<http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080610>
10. Berryman DR: Augmented reality: a review. *Med Ref Ser Q* 2012; 31(2): 212-218.
<https://doi.org/10.1080/02763869.2012.670604>
11. Carmigniani J, Furht B: Augmented reality: an overview. In: Furht B (ed.) *Handbook of augmented reality*. New York 2011: Springer; 3-46.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_1
12. Billinghamurst M, Clark A, Lee G: A survey of augmented reality. *Found Trends HumComput Interact* 2015; 8(2-3): 73-272. <https://doi.org/10.1561/11000000049>
13. Benford S, Giannachi G: *Performing mixed reality*. Cambridge 2011: MIT press.
14. Speicher M, Hall BD, Nebeling M: What is mixed reality? In: *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. New York 2019: Association for Computing Machinery; 1-15.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
15. Howard MC: A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs. *Comput Human Behav* 2017; 70: 317-327.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.01.013>
16. Sveistrup H: Motor rehabilitation using virtual reality. *J Neuroeng Rehabil* 2004; 1: 1-8.
<https://doi.org/10.1186/1743-0003-1-10>
17. Rizzo AS, Kim GJ: A SWOT analysis of the field of virtual reality rehabilitation and therapy. *Presence* 2005; 14(2): 119-146.
<https://doi.org/10.1162/1054746053967094>
18. Schultheis MT, Rizzo AA: The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabil Psychol* 2001; 46(3): 296-311.
<https://doi.org/10.1037/0090-5550.46.3.296>
19. Deutsch JE, Merians AS, Adamovich S, Poizner H, Burdea- GC : Development and application of virtual reality technology to improve hand use and gait of individuals post-stroke. *Restor Neurol Neurosci* 2004; 22(3-5): 371-386.
20. Tao G, Garrett B, Taverner T, Cordingley E, Sun C: Immersive virtual reality health games: a narrative review of game design. *J Neuroeng Rehabil* 2021; 18(31): 1-21. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00801-3>
21. Miller KJ, Adair BS, Pearce AJ, Said CM, Ozanne E, Morris MM.: Effectiveness and feasibility of virtual reality and gaming system use at home by older adults for enabling physical activity to improve health-related domains: a systematic review. *Age Ageing* 2014; 43(2): 188-195. <https://doi.org/10.1093/ageing/aft194>
22. Turolla A, Dam M, Ventura L, et al.: Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: a prospective controlled trial. *JNeuroeng Rehabil* 2013; 10: 85.
<https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-85>
23. Lucca LF: Virtual reality and motor rehabilitation of the upper limb after stroke: a generation of progress? *J Rehabil Med* 2009; 41(12): 1003-1006.
<https://doi.org/10.2340/16501977-0405>
24. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M: Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane database of systematic reviews* 2017; 11(11): CD008349.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub4>
25. Jack D, Boian R, Merians AS, et al.: Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2001; 9(3): 308-318.
<https://doi.org/10.1109/7333.948460>
26. Crosbie J, Lennon S, Basford J, McDonough SM.: Virtual reality in stroke rehabilitation: still more virtual than real. *Disabil Rehabil* 2007; 29(14): 1139-1146.
<https://doi.org/10.1080/09638280600960909>
27. Dockx K, Bekkers EM, Van den Bergh V, et al.: Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2016; 12(12): CD010760.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD010760.pub2>
28. Lei C, Sunzi K, Dai F, et al.: Effects of virtual reality rehabilitation training on gait and balance in patients with Parkinson's disease: a systematic review. *PLoS One* 2019; 14(11): e0224819.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224819>
29. Goldstein K: The effect of brain damage on the personality. *Psychiatry* 1952; 15(3): 245-260.
<https://doi.org/10.1080/00332747.1952.11022878>
30. Doyle KP, Simon RP, Stenzel-Poore MP: Mechanisms of ischemic brain damage. *Neuropharmacology* 2008; 55(3): 310-318.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2008.01.005>

31. Winstein C, Pohl P: Effects of unilateral brain damage on the control of goal-directed hand movements. *Exp Brain Res* 1995; 105(1): 163-174. <https://doi.org/10.1007/BF00242191>
32. Swinney D, Zurif E, Nicol J: The effects of focal brain damage on sentence processing: an examination of the neurological organization of a mental module. *J Cogn Neurosci* 1989; 1(1): 25-37. <https://doi.org/10.1162/jocn.1989.1.1.25>
33. Khoury S, Benavides R: Pain with traumatic brain injury and psychological disorders. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry* 2018; 87(B): 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2017.06.007>
34. Tieri G, Morone G, Paolucci S, Iosa M: Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert Rev Med Devices* 2018; 15(2): 107-117. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1425613>
35. Henderson A, Korner-Bitensky N, Levin M: Virtual reality in stroke rehabilitation: a systematic review of its effectiveness for upper limb motor recovery. *Top Stroke Rehabil* 2007; 14(2): 52-61. <https://doi.org/10.1310/tsr1402-52>
36. Levac DE, Huber ME, Sternad D: Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality: a perspective review. *J Neuroeng Rehabil* 2019; 16(1): 121. <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0587-8>
37. Powell MO, Elor A, Robbins A, Kurniawan S, Teodorescu M: Predictive shoulder kinematics of rehabilitation exercises through immersive virtual reality. *IEEE Access* 2022; 10: 25621-25632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3155179>
38. Gumaa M, Rehan Youssef A: Is virtual reality effective in orthopedic rehabilitation? A systematic review and meta-analysis. *Phys Ther* 2019; 99(10): 1304-1325. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzz093>
39. Keller J, Štětkářová I, Macri V, et al.: Virtual reality-based treatment for regaining upper extremity function induces cortex grey matter changes in persons with acquired brain injury. *J Neuroeng Rehabil* 2020; 17(1): 127. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00754-7>
40. Kleim JA, Jones TA: Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *J Speech Lang Hear Res* 2008; 51(1): S225-S239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008\)018](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008)018)
41. Lassen NA, Ingvar DH, Skinhøj E: Brain function and blood flow. *Sci Am* 1978; 239(4): 62-71. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1078-62>
42. Tefertiller C, Pharo B, Evans N, Winchester P: Efficacy of rehabilitation robotics for walking training in neurological disorders: a review. *J Rehabil Res Dev* 2011; 48(4): 387-416. <https://doi.org/10.1682/jrrd.2010.04.0055>
43. Lin J, Hu G, Ran J, Chen L, Zhang X, Zhang Y: Effects of bodyweight support and guidance force on muscle activation during Locomat walking in people with stroke: a cross-sectional study. *J Neuroeng Rehabil* 2020; 17(1): 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-0641-6>
44. Karácsony T, Hansen JP, Iversen HK, Puthusserypady S: Brain computer interface for neuro-rehabilitation with deep learning classification and virtual reality feedback. In: Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019. New York 2019: Association for Computing Machinery; 1-8. <https://doi.org/10.1145/3311823.3311864>
45. Cameron CR, DiValentin LW, Manaktala R, et al.: Hand tracking and visualization in a virtual reality simulation. In: 2011 IEEE systems and information engineering design symposium. Charlottesville 2011: IEEE; 127-132. <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2011.5876867>
46. Lasaponara S, Marson F, Doricchi F, Cavallo M: A scoping review of cognitive training in neurodegenerative diseases via computerized and virtual reality tools: what we know so far. *Brain Sci* 2021; 11(5): 528. <https://doi.org/10.3390/brainsci11050528>
47. Davidsdóttir S, Wagenaar R, Young D, Cronin-Golomb A: Impact of optic flow perception and egocentric coordinates on veering in Parkinson's disease. *Brain* 2008; 131(11): 2882-2893. <https://doi.org/10.1093/brain/awn237>
48. Bowen FP, Hoehn MM, Yahr MD: Parkinsonism: alterations in spatial orientation as determined by a route-walking test. *Neuropsychologia* 1972; 10(3): 355-361. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(72\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(72)90027-9)
49. Regan D, Maxner C: Orientation-selective visual loss in patients with Parkinson's disease. *Brain* 1987; 110(2): 415-432. <https://doi.org/10.1093/brain/110.2.415>
50. Parsons TD, Rizzo AA, Rogers S, York P: Virtual reality in paediatric rehabilitation: a review. *Dev Neurorehabil* 2009; 12(4): 224-238. <https://doi.org/10.1080/17518420902991719>
51. Ravi D, Kumar N, Singhi P: Effectiveness of virtual reality rehabilitation for children and adolescents with cerebral palsy: an updated evidence-based systematic review. *Physiotherapy* 2017; 103(3): 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2016.08.004>
52. Bashiri A, Ghazisaeedi M, Shahmoradi L: The opportunities of virtual reality in the rehabilitation of children with attention deficit hyperactivity disorder: a literature review. *Korean J Pediatr* 2017; 60(11): 337-343. <https://doi.org/10.3345/kjp.2017.60.11.337>
53. Krizmanič T, Vozel M, Dolinšek I, et al.: Učinki vadbe na koordinacijo in spretnost roke v navideznem okolju pri bolnikih s Parkinsonovo boleznijo. *Rehabilitacija* 2017; 16(2), 38-42.
54. Puh U: Učinkovitost vadbe z navidežno resničnostjo pri pacientih po možganski kapi: pregled sistematičnih pregledov literature. *Rehabilitacija* 2022; 21(1): 14-20.
55. Divjak M, Zelič S, Holobar A: Video-based quantification of patient's compliance during post-stroke virtual reality rehabilitation. *J Altern Med Res* 2017; 9(2): 147-152.
56. Krpič A, Cikajlo I, Savanović A, Matjačić Z: A haptic floor for interaction and diagnostics with goal based tasks during virtual reality supported balance training. *Slov Med J* 2014; 83(2): 127-136.