

UPORABA ROBOTSKIH NAPRAV V REHABILITACIJSKI OBRAVNAVI PACIENTOV PO MOŽGANSKI KAPI: KDO, KDAJ IN KAKO INTENZIVNO?

USE OF ROBOTIC DEVICES IN REHABILITATION TREATMENT OF PATIENTS AFTER A STROKE: WHO, WHEN AND HOW INTENSIVE?

doc. dr. Nataša Bizovičar^{1, 2}, dr. med., doc. dr. Nika Goljar Kregar, dr. med.¹

¹Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

²Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta

Povzetek

Rehabilitacijska robotika se v zadnjih dveh desetletjih hitro razvija. Pregledni članek opisuje trenutno dostopne robotske sisteme za rehabilitacijsko obravnavo zgornjega in spodnjega uda pri pacientih po možganski kapi. Pri izbiri primerne robotske naprave za nekega pacienta je pomembno poznati glavne lastnosti naprave, pacientovo raven funkcioniranja in terapevtske cilje. Vadba na robotskih napravah ugodno vpliva na motorično okrevanje funkcije zgornjega uda, hoje in ravnotežja po možganski kapi ter hkrati tudi zmanjša obremenitve terapevtov. Čeprav so prednosti tovrstnih tehnologij v primerjavi z enako količino običajne terapevtske obravnave večinoma majhne, jih je smiselno uporabiti kot del širšega rehabilitacijskega programa, pri katerem lahko pomagajo pri povečanju intenzivnosti in količine terapevtskih ukrepov. Zato se robotske naprave še vedno večinoma uporabljajo le kot del multidisciplinarnega rehabilitacijskega programa in ne morejo nadomestiti dela terapevtov.

Ključne besede:

možganska kap; nevrorehabilitacija; rehabilitacijska robotika; motorično okrevanje

Abstract

The field of rehabilitation robotics has been developing rapidly over the last two decades. This review article summarises current robotic systems for lower and upper limb rehabilitation in patients after stroke. When choosing a suitable robotic device for a particular patient, it is important to know the main features of the device, the patient's level of functioning and therapeutic goals. Robotic training has a beneficial effect on the motor recovery of upper limb, walking and balance function after stroke, while also reducing the workload of therapists. Whilst the benefit of these technologies over dose-controlled conventional rehabilitation are usually small, there is a role for them as part of a broader rehabilitation programme, where they may help to increase the intensity and amount of therapy delivered. Therefore, robotic devices are still mostly used only as part of a multidisciplinary rehabilitation program and cannot replace the work of therapists.

Key words:

stroke; neurorehabilitation; rehabilitation robotics; motor recovery

UVOD

Sodobni rehabilitacijski terapevtski postopki po možganski kapi naj bi vsebovali ponavljajočo se in intenzivno vadbo novih spretnosti, ki za pacienta predstavljajo izziv ter jih potrebuje za izvajanje funkcionalnih nalog in dejavnosti. Trenutni dokazi predvidevajo, da je potrebno veliko praktičnih izkušenj, da se doseže z izkušnjami povezana plastičnost možganov (1, 2). Nastajajo novi terapevtski postopki, s katerimi bi lahko povečali količino terapije v smislu ponovitev in intenzivnosti (3).

Področje rehabilitacijske robotike se v zadnjih dveh desetletjih hitro razvija. Razvoj delovanja robotskih naprav poteka pod vplivom rehabilitacijskih paradigem, ki omogočajo uporabo načel motoričnega učenja (4). Dosedanje raziskave so pokazale, da ima robotsko asistirana vadba podoben učinek ali zmerno korist glede na običajno terapevtsko obravnavo. Uporabo robotskih naprav pri pacientih po možganski kapi v literaturi najpogosteje opisujejo v okviru rehabilitacijske obravnave za izboljšanje funkcije zgornjega in spodnjega uda, hoje, ravnotežja, trupa ter spoznavnih sposobnosti. Vključevanje robotskih naprav v rehabilitacijsko obravnavo pacientov po možganski kapi ima dva temeljna namena:

- a) omogočanje večje količine rehabilitacijske terapije z manjšim naporom terapevta ali brez dodatne potrebe po osebju in/ali
- b) terapijo, ki je učinkovitejša v primerjavi z običajno vadbo, za izboljšanje motoričnega okrevanja (5).

Robotske naprave imajo morebitno prednost pred običajno terapevtsko obravnavo, saj lahko omogočajo bolj konsistentno vadbo, večje število ponovitev, natančnejši nadzor parametrov vadbe, vključno z vzorci gibanja in sil na pacientovo telo. Hesse in sodelavci so na primer primerjali robotsko vadbo na napravi Bi-Manu-Track z elektromiografsko (EMG) vodenim električnim draženjem paretičnega zgornjega uda pri pacientih v kroničnem obdobju po možganski kapi. Pacienti, ki so prejeli robotsko vadbo, so imeli pomembno izboljšano funkcijo zgornjega uda na motoričnem delu lestvice Fugl-Meyer. Avtorji so menili, da je vzrok za različen izid pri obeh načinih vadbe, ker so pacienti v času robotske vadbe prejeli desetkrat večje število ponovitev kot EMG skupina (6). V nekaterih primerih lahko robotske naprave zagotovijo tudi varnejše vadbene okolje. Tako bi robotska vadba morda nadomestila del terapevtskih ukrepov, ki so trenutno pod neposrednim nadzorom terapevta, kar bi lahko vplivalo tudi na nižje stroške terapij (7). Zaradi vgrajenih senzorjev različnih vrst robotske naprave omogočajo tudi povratne informacije, ki vključujejo meritve časa, hitrosti, zakasnitve odziva, natančnosti in dolžine giba, obsega in gladkosti giba ter sile, ki nastanejo med vadbo (8). To omogoča objektivno ovrednotenje izboljšanja motoričnih funkcij v času rehabilitacijske obravnave, saj pacienti in terapevti med vadbo prejmejo povratne informacije glede doseženih rezultatov v obliki grafov ali sprememb navideznega okolja. Tako se izboljšata motivacija in sodelovanje pacientov pri vadbenih programih, hkrati tovrstna vadba predstavlja tudi kognitivni izziv (9).

Morebitni negativni vidiki robotske terapije so, da so potrebne izkušnje terapevta glede upravljanja naprave; naprave so navedno drage in manj prilagodljive, kot je delo terapevta; še vedno ni na voljo dovolj kliničnih raziskav, ki bi primerjale učinke različnih vrst robotskih naprav; pacient pri robotski vadbi lahko manj aktivno sodeluje kot pri običajni terapevtski obravnavi; potrebne so tudi različne robotske naprave v različnih obdobjih kliničnega okrevanja pacienta. Trenutne robotske naprave lahko premikajo le določen segment uda in ne celega telesa, hkrati omogočajo omejeno povratno informacijo o občutljivosti in izvedbo razmeroma preprostih nalog. Za hkratno vadbo na proksimalnih in distalnih delih telesa sta trenutno potrebni dve robotski napravi z (10). Zelo malo robotskih naprav omogoča vadbo z uporabo realnih predmetov v realnem okolju, ena takih je na primer sistem Reharob (11). Zato se robotske naprave pri pacientih po možganski kapi še vedno uporabljajo le kot del multidisciplinarnega rehabilitacijskega programa in ne morejo nadomestiti dela terapevta. Rezultate raziskav je treba pazljivo interpretirati, saj je med njimi prisotna velika variabilnost glede intenzivnosti, trajanja in količine robotske vadbe, vrste terapij, značilnosti preiskovancev ter opravljenih meritev (9).

Načini vključevanja vadbe na robotskih napravah v rehabilitacijsko obravnavo pacientov po možganski kapi omogočajo več možnosti:

- a) posamezen terapevt v času vadbe na robotskih napravah hkrati nadzoruje več pacientov,
- b) neodvisna vadba pacienta na robotski napravi z občasnim nadzorom in prilagajanjem vadbe s strani terapevta in
- c) vadba na robotski napravi v domačem okolju z nadzorom terapevta na daljavo (12).

Vadba na robotskih napravah se lahko kombinira z uporabo tekočega traku, podpore telesne teže, funkcionalne električne stimulacije in navidezne resničnosti (13).

Količina, čas in načini robotske vadbe

Rehabilitacijski pristopi bi morali upoštevati, kateri načini robotske vadbe so najučinkovitejši za stimulacijo plastičnosti možganov. Dosedanje raziskave dokazujejo, da je okrevanje po možganski kapi najhitreje v prvih desetih tednih in doseže plato od tri do šest mesecev po nastopu dogodka (14). Po drugi strani obstajajo tudi dokazi na živalskih in človeških študijah, da lahko zelo intenzivna vadba v prvih nekaj dneh po možganski kapi poslabša možgansko okvaro (15). Še vedno ostajajo nepojasnjena vprašanja, na primer katera oblika robotske vadbe je najučinkovitejša, v katerem obdobju, kako pogosto ter koliko časa je treba vaditi, da dosežemo optimalne rezultate (10). V okviru raziskav so izvajali robotsko vadbo v akutnem, subakutnem in kroničnem obdobju po možganski kapi. Večina podatkov je pokazala korist robotske vadbe v vseh treh obdobjih, učinki so bili primerljivi z običajno terapijo. Čeprav je bilo v klinične raziskave do zdaj vključenih več kot tisoč pacientov po možganski kapi, je rezultate posameznih raziskav težko primerjati med seboj. Še vedno ni poenotene metodologije glede orodij za merjenje izida zdravljenja (16).

Vrste robotskih naprav

Pri izbiri primerne robotske naprave za nekega pacienta je pomembno poznati glavne lastnosti naprave, pacientovo raven funkcioniranja in terapevtske cilje. Veliko vrst različnih robotskih naprav je, ki se med seboj zelo razlikujejo glede na način mehanske zasnove, števila in stopenj prostosti gibanja ter načina upravljanja (17). Robotske naprave glede na njihovo mehansko strukturo delimo v dve skupini:

- eksoskeletne naprave**, ki omogočajo natančno določitev kinematične konfiguracije človeka in s tem neodvisen nadzor vsakega posameznega človeškega sklepa ter fiziološke gibe,
- končne efektorske sisteme**, pri katerih robotska naprava razvije silo le na najbolj distalni točki, prek katere je robot pritrjen (npr. stopalo je pritrjeno na podnožni plošči) in se njeni sklepi ne skladajo s človeškimi sklepi (18) (Tabela 1).

Naprave je mogoče sproti programirati glede na pacientove potrebe, ko se pojavi motorično okrevanje. Odvisno od vrste naprave, so te lahko namenjene pacientom v vseh obdobjih rehabilitacijske obravnave, od akutnega do kroničnega obdobja, in z različno stopnjo motorične okvare (19). Gandolfi in sodelavci so po pregledu literature glede uporabe robotskih naprav v nevrorehabilitacijski obravnavi ugotovili, da so za zgornji ud najpogosteje uporabljeni končni efektorski sistemi, za spodnji ud pa eksoskeletne naprave. Številne naprave so še vedno v obliki prototipa in tudi nimajo CE certifikata (20).

Zgornji ud

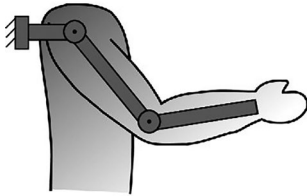
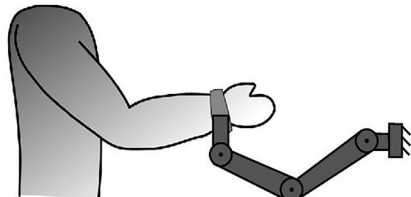
Robotske naprave za rehabilitacijsko obravnavo zgornjega uda lahko vplivajo na izboljšanje motoričnih funkcij zgornjega uda, pasivnega obsega gibljivosti in prehodno zniževanje mišičnega tonusa ter lahko zagotavljajo tudi upor med izvedbo giba (21).

Največkrat se uporabljajo pri pacientih z zmerno do hudo parezo zgornjega uda, čeprav so uporabne tudi pri pacientih z boljšo funkcijo zgornjega uda, in sicer za izboljšanje mišične moči in spretnosti gibanja. Za vadbo **gibov v ramenskem obroču in komolcu** se uporabljajo MIT-Manus (Interactive Motion Technologies, Cambridge, MA), MIME (Staubli Unimation Inc., Duncan, South Carolina), NeReBot (Mechatronics, Padova, Italy), InMotion Arm® (Bionik Laboratories, Watertown, MA), ReoGoTM (Motorika Medical Ltd, Israel). Za **gibanje prstov** se uporabljajo Reha-Digit (HASOMED GmbH, Magdeburg, Germany), Amadeo® (Tyromotion, Graz, Austria), Hand MentorTM (Columbia Scientific LLC, Columbia, USA), Gloreha (Idrogenet, Brescia, Italy) itn. Prednost tovrstnih naprav je, da lahko omogočajo ponavljajočo se vadbo aktivnih gibov tudi pri težji parezi zgornjega uda, saj lahko pasivno izvajajo gibanje ali pa le delno pomagajo pri izvedbi giba (22).

V literaturi so za zdaj mešani dokazi o učinkovitosti robotske vadbe za izboljšanje funkcije zgornjega uda v primerjavi s klasično terapijo. Duret in sodelavci v preglednem članku opisujejo, da številne raziskave dokazujejo pozitivne učinke na izboljšanje motorične funkcije okvarjenega zgornjega uda, manj jasni pa so učinki na funkcionalne omejitve. Prisotni so jasni dokazi, da je robotska vadba za zgornji ud, ki traja od 30 do 60 minut, varna kljub velikemu številu ponovitev gibanja (23). Pacienti v subakutnem obdobju po možganski kapi s težjo stopnjo okvare, ko gibanje uda brez pomoči terapevta še ni mogoče, verjetno največ pridobijo z robotsko asistirano vadbo za zgornji ud. Hkratni dejavniki, kot so starost, afazija in neglekt, niso imeli negativnega učinka na količino izvedenih ponovitev giba in niso predstavljali kontraindikacije za vadbo (24). V sistematičnem preglednem članku, ki je vseboval metaanalizo 38 raziskav, so dokazali, da je prisoten majhen pozitiven učinek robotske vadbe na motorično funkcijo in mišično moč paretičnega zgornjega uda in negativen

Tabela 1: Eksoskeletni in končni efektorski sistemi za zgornji in spodnji ud (18).

Table 1. Exoskeletal and terminal effector systems for the upper and lower limbs (18).

	ZGORNJI UD / UPPER LIMB	SPODNJI UD IN HOJA / LOWER LIMB AND GAIT
EKSOSKELETNE NAPRAVE/ EXOSKELETONS 	ARMin, Pneu-WREX, Armeo®Spring, Armeo®Power, Myomo®, Music Glove, Gloreha, RAPAEEL Smart Glove, FINGER Robot, Modified Hand Exoskeleton Robot, Hand Mentor	Lokomat®, Walkbot, LOPES, ALEX, Hybrid Assistive Limb, AutoAmbulator, ReoAmbulatorTM, nosilne eksoskeletne naprave (Stride Management Assist, Anklebot, Ekso Bionics, ReWalk, AlterG Bionic Leg, Fremont)
KONČNI EFEKTORSKI SISTEMI/ TERMINAL EFFECTOR SYSTEMS 	MIT-Manus, GENTLE/S, MIME, Neuro-X, Arm Assist, Bi-Manu-Track, Arm Guide, NeReBot, Armeo®Boom, Burt®, KINARIMTM, REAplan®, Amadeo®	G-EO SystemTM, Gait Trainer I in II, HapticWalker, LokoHelp Pedago

učinek na mišični tonus. Robotske naprave so izboljšale funkcijo zgornjega uda v rami in komolcu, ni pa bilo večjega učinka na zapestje in roko. Prav tako niso ugotovili pomembnega učinka na izboljšanje izvedbe vsakodnevnih aktivnosti z zgornjim udom (21). Tudi ko so z robotskim sistemom Haptic Master izvajali v funkcijo usmerjeno vadbo za zgornji ud, pri visoko funkcionalnih pacientih po možganski kapi niso ugotovili statistično pomembne večje učinkovitosti v primerjavi z vadbo, usmerjeno v funkcijo in brez uporabe robotske naprave (25). Učinek robotske vadbe za zgornji ud v prvih tednih po možganski kapi še ni pojasnjen, po podatkih nekaterih raziskav naj bi bil učinek robotske vadbe v akutnem obdobju večji zaradi intenzivnega spontanega okrevanja (26). Daunoraviciene in sodelavci so v randomizirani kontrolirani raziskavi pri 34 pacientih po možganski kapi (v večini v subakutnem obdobju) po vadbi z robotsko napravo Armeo®Spring (Hocoma, Volketswil, Switzerland) ugotovili pozitivne učinke v funkcijo usmerjene robotske vadbe za zgornji ud na motorično funkcijo zgornjega uda ter na kognitivne sposobnosti pacientov (27). Nasprotno s tem so v nedavni multicentrični randomizirani kontrolirani raziskavi RATULS, ki je vključevala 770 pacientov z zmerno do težko okvaro funkcije zgornjega uda, v vseh obdobjih po možganski kapi (od 1 teden do 5 let), ugotovili, da robotska vadba na napravi MIT-Manus (Interactive Motion Technologies, Cambridge, MA) ni pomembneje izboljšala funkcije zgornjega uda v primerjavi z običajno terapijo. Poudarili so tudi, da mora biti terapevt med vadbo pozoren na položaj ramenskega sklepa, da se prepreči bolečina v rami (28). Obojestranska vadba na robotski napravi za zgornji ud se v literaturi ni izkazala za učinkovitejšo v primerjavi z enostransko vadbo (29). Raziskave opisujejo tudi pozitivne učinke uporabe robotskih naprav za zgornji ud na zniževanje mišičnega tonusa v zgornjem udu po aplikaciji toksina botulina, učinki so bili primerljivi s klasično terapijo (30). V Cochranovem preglednem članku, v katerem je bilo vključenih 45 raziskav (terapija je navadno potekala petkrat na teden, trajala je od 20 do 105 minut, večinoma od dva do šest tednov), so Mehrholz in sodelavci ugotovili, da so bili izidi po robotski vadbi za zgornji ud primerljivi z običajnimi terapevtskimi postopki. Robotsko asistirana vadba za zgornji ud je izboljšala izvajanje vsakodnevnih aktivnosti, funkcijo zgornjega uda in mišično moč, predvsem pri pacientih v akutnem in subakutnem obdobju, v kroničnem obdobju so bili učinki nejasni. Stranski učinki vadbe, kot je bolečina ali poškodbe, so bili redki. Primerjava podskupine pacientov, ki so prejeli predvsem robotsko vadbo za distalni del zgornjega uda (prsti, dlan in radioulnarni sklep), in podskupine, ki je prejela robotsko vadbo predvsem v proksimalnem delu zgornjega uda (rama in komolec), ni pokazala pomembnih razlik med skupinama glede izboljšanja funkcije zgornjega uda ali izvajanja vsakodnevnih aktivnosti po koncu obravnave. Primerjava med različnimi robotskimi napravami prav tako ni pokazala, da bi bila katera od njih bolj oziroma manj učinkovita kot druga (31).

Škotske klinične smernice za rehabilitacijsko obravnavo pacientov po možganski kapi navajajo visoko raven priporočil A, da elektromehanske/robotske naprave lahko izboljšajo motorično funkcijo in mišično moč zgornjega uda pri izbranih pacientih, kjer je že na voljo ustrezna oprema in so zdravstveni strokovnjaki že usposobljeni za uporabo opreme (32). Visoko raven priporočil A

navajajo tudi ameriške smernice, ki priporočajo, da je robotska terapija smiselna pri zmerni do težki parezi zgornjega uda, saj omogoča intenzivnejšo vadbo (33). Po drugi strani avstralske smernice navajajo le šibko raven priporočil glede uporabe robotske vadbe za izboljšanje funkcije zgornjega uda pri blagi do hudi parezi (34). Prav tako je prisotna šibka raven priporočil D pri angleških smernicah, da se ponudi robotsko asistirano vadbo za zgornji ud le kot dodatek k običajni terapevtski obravnavi v kontekstu kliničnih raziskav (35). Najnovejše kanadske smernice priporočil glede vadbe na robotskih napravah za zgornji ud po možganski kapi sploh ne navajajo (36).

Spodnji ud

Robotske naprave za spodnji ud se navadno uporabljajo za izboljšanje funkcije hoje in ravnotežja po možganski kapi. Večina teh naprav omogoča podporo telesne teže s hkratno vadbo na tekočem traku ali na podnožnih ploščah. Končni efektorski sistemi za spodnja uda delujejo po načelu, da so pacienti prek stopal pritrjeni na podnožni plošči, ki s premikanjem stimulirata fazo opore in zamaha pri hoji, dodatno imajo vgrajeno podporo telesne teže. V literaturi najpogosteje opisana robotska naprava, izdelana kot končni efektorski sistem, je Gait Trainer (Community Products, LLC dba Rifton Equipment, Rifton, NY). Eksoskeletne naprave s pomočjo ortoz premikajo kolka in kolena med cikli hoje, najpogosteje proučevana tovrstna naprava je Lokomat® (Hocoma, Volketswil, Switzerland) (Tabela 1). Tako lahko zmanjšajo napor terapevta med vadbo, ki mu ni treba dodatno usmerjati gibanje paretičnega spodnjega uda ali trupa med hojo, in omogočijo tudi še nehodečim pacientom intenzivno in visoko ponavljajočo se vadbo kompleksnega cikla hoje (18, 20). Glede na funkcijsko stanje pacienta v času okrevanja se uporabljajo različne vrste robotskih naprav. V literaturi opisujejo štiri osnovne vrste robotskih naprav za vadbo hoje:

- a) **naprave, ki omogočajo vadbo hoje na tekočem traku:** ALEX (Columbia Engineering's Robotics and Rehabilitation Laboratory, New York, USA), LokoHelp (LokoHelp Group, Weil am Rhein, Germany), Lokomat® (Hocoma, Volketswil, Switzerland), LOPES (University of Twente, Enschede, The Netherlands), ReoAmbulator™ (Motorika Medical Ltd., Mount Laurel, NY, USA), WALKBOT (P&S Mechanics, Seoul, Korea);
- b) **naprave, pri katerih je stopalo pritrjeno na podnožni plošči:** Gait Master 5 (Mulholland Positioning Systems Inc., Burley, USA), Gait trainer (Community Products, LLC dba Rifton Equipment, Rifton, NY), Gait trainer GT1 (Reha-Stim, Berlin, Germany), G-EO system™ (Reha Technology, Blue Bell, PA, USA), Hapticwalker (Fraunhofer IPK, Berlin, Germany);
- c) **naprave, ki omogočajo vadbo hoje in ravnotežja po tleh:** THERA-Trainer e-go (Medica Medizintechnik GmbH, Hochdorf, Germany), HAL® (CYBERDYNE Inc., Ibaraki, Japan), KineAssist® (HDT Global Inc., Solon, OH, USA), ReWalk (Argo Medical Technologies Ltd., Yokneam Illit, Israel), Ekso GT™ (Ekso Bionics, California, USA), Walk

trainerTM (Swortec SA, Monthey, Switzerland), Andago[®] (Hocoma, Volketswil, Switzerland);

- d) **stacionarne naprave za vadbo hoje:** Motion MakerTM (Swortec SA, Monthey, Switzerland), Lambda (Lambda health system, Yverdon-les-Bains, Switzerland), Erigo[®] (Hocoma, Volketswil, Switzerland) (Clinical Use of Robots as a Part of Rehabilitation Medicine Chun). Novejše naprave omogočajo prilagodljivost številnih parametrov vadbe hoje (npr. hitrost hoje, kadenco, dolžino koraka) (37).

Za zdaj je prisotna zrna raven dokazov glede izboljšanja funkcije hoje in motoričnega okrevalja spodnjega uda pri uporabi robotskih naprav v primerjavi z običajno terapevtsko obravnavo. Nekateri dosedanje klinične raziskave so ugotovile prednosti robotske vadbe hoje v primerjavi z običajno terapevtsko obravnavo, druge ravno obratno. Dokazali so, da je največji učinek robotske vadbe hoje v zgodnjem obdobju po nastopu možganske kapi (38). V tem obdobju pacienti s težjo stopnjo pareze potrebujejo visoko stopnjo pomoči terapevta (pri običajni vadbi hoje so pri takem pacientu potrebni dva ali trije terapevti) (39). Na začetku obravnave so pri pacientih s težjo stopnjo okvare predvsem uporabne nagibne mize, ki vključujejo mehanizem korakanja (npr. Erigo, Hocoma, Volketswil, Switzerland) in povzročijo podobno aktivacijo možganov kot pri aktivnosti hoje po tleh (40). Vadba na tovrstnih napravah je imela pozitiven učinek tudi na izboljšanje motenj zavesti in kognitivnih funkcij (41). V primerjavi z običajno terapevtsko obravnavo sodobne robotske naprave za vadbo hoje omogočajo od dva- do desetkratno povečanje števila korakov ali prehojene razdalje v času ene terapevtske obravnave (39). Cochranov pregledni članek, ki je vključeval 62 raziskav, je ugotovil, da je robotska vadba hoje v kombinaciji z običajno vadbo učinkovitejša kot le običajna fizioterapevtska obravnavo. Največ koristi od robotske vadbe hoje imajo pacienti v prvih treh mesecih po možganski kapi, ki še ne zmorejo hoditi. Robotska vadba hoje v kombinaciji s fizioterapevtsko obravnavo poveča obete, da pacienti postanejo neodvisni pri hoji, nima pa pomembnega učinka na hitrost hoje in vzdržljivost. V zaključku so poudarili, da je treba zdraviti osem pacientov, da se prepreči odvisnost pri hoji za enega pacienta. Največji učinek robotske vadbe hoje se je pokazal pri pacientih s težjo motorično okvaro in nizko zmožnostjo hoje (hitrost hoje < 0,3 m/s), ki potrebujejo veliko pomoči terapevta. Pozitivni učinki robotske vadbe na funkcijo hoje (Razvrstitev funkcijske premičnosti, Rivermeadski indeks premičnosti) so bili pri pacientih s težjo stopnjo okvare prisotni tudi po dveh letih od konca vadbe (42). V sistematičnem preglednem članku so Mehrholz in sodelavci (42) primerjali učinke končnih efektorskih in eksoskeletnih naprav za vadbo hoje po možganski kapi. Ugotovili so, da so pacienti po uporabi končnih efektorskih robotskih naprav pogosteje postali samostojni pri hoji v primerjavi z uporabo eksoskeletnih naprav (43). V literaturi navajajo, da imata najverjetneje obe vrsti naprav prednosti in pomanjkljivosti, zato bi bilo smiselno definirati značilnosti obeh vrst naprav, ki bi bile najbolj koristne za posameznega pacienta (44). Zheng in sodelavci so ugotovili tudi pozitivne učinke robotske vadbe na izboljšanje ravnotežja po možganski kapi (45). Hoja s pomočjo robotskih naprav naj se ne bi izvajala, kadar je cilj izboljšati hitrost hoje ali prehojeno razdaljo pri pacientih v kronični fazi po možganski kapi, ki že hodijo samostojno (46).

G-EO System (Reha Technology, Blue Bell, PA, USA) omogoča poleg vadbe celotnega cikla hoje tudi izvajanje le posameznih faz cikla hoje (npr. faza opore, zamaha, odriva). Tovrsten pristop je bolj podoben tradicionalni terapevtski obravnavi. Za zdaj še ni bilo narejenih raziskav o učinkovitosti tovrstne vadbe hoje (47). Kot pomanjkljivost vadbe v eksoskeletnih robotskih napravah navajajo premajhno variabilnost vadbe hoje. Za posameznike, ki že zmorejo narediti preproste korake, so razvili naprave, ki omogočajo bolj raznoliko gibanje pri hoji, ki se prilagaja zahtevam okolja (npr. C-Mill, Motek, The Netherlands) (48). V poznejšem obdobju okrevanja po možganski kapi pridejo v okviru vadbe hoje po tleh v poštev tudi bolj sofisticirane nadzorne strategije, navidezno okolje in možnosti za vadbo specifičnih parametrov hoje in nalog, ki jih bo oseba potrebovala tudi pri hoji v domačem in družbenem okolju (npr. vstajanje/vsedanje). Nosilne eksoskeletne naprave (Tabela 1) kompenzirajo oslabeledost in slabšo koordinacijo spodnjega uda ter omogočajo vadbo hoje po tleh. V zadnjem času se razvijajo tudi eksoskeletne naprave v obliki aktivnih ortoz za uporabo na posameznem sklepu, kot je na primer gleženj. Druge vrste naprav za vadbo hoje in ravnotežja po tleh omogočajo tudi aktivno podporo telesne teže, s čimer izboljšajo posturalno stabilnost. Primeri takih naprav so KineAssist[®] (HDT Global Inc., Solon, OH, USA), Andago[®] (Hocoma, Volketswil, Switzerland), THERA-Trainer e-go (Medica Medizintechnik GmbH, Hochdorf, Germany). Louie in sodelavci so ugotovili, da ima v kroničnem obdobju po možganski kapi vadba hoje z nosilnimi eksoskeletnimi robotskimi napravami primerljive učinke kot običajna vadba, pri pacientih v subakutnem obdobju pa še dodatne pozitivne učinke (49). Tudi pri teh napravah so pacienti večinoma omejeni na hojo po ravni gladki podlagi. Pri že samostojno hodečih pacientih pa je bila po podatkih raziskav običajna vadba v primerjavi z vadbo na napravi Lokomat učinkovitejša v smislu izboljšanja hitrosti hoje (50).

V ameriških smernicah za rehabilitacijsko obravnavo pacientov po možganski kapi je prisotna visoka raven priporočil A, da je mehansko asistirano vadbo hoje s podporo telesne teže smiselno uporabiti pri nehodečih pacientih ali tistih s slabšo zmožnostjo za hojo v zgodnjem obdobju po možganski kapi (33). Kanadske smernice navajajo visoko raven priporočil A, da se vadba na tekočem traku s podporo telesne teže ali brez nje uporabi za izboljšanje hitrosti hoje in prehojene razdalje, kot dodatek pri hoji po tleh ali ko hoja po tleh ni mogoča. Uporabo robotskih naprav za vadbo hoje priporočajo za bolnike, ki sicer drugače ne bi mogli vaditi hoje, vendar ne namesto običajne vadbe hoje (36). Podobno navajajo tudi avstralske smernice visoko raven priporočil, da je po možganski kapi treba zagotoviti možnost za ponavljajočo se vadbo hoje (ali komponent hoje) po meri pacienta tudi v obliki vadbe na tekočem traku s podporo telesne teže ali brez nje, vendar šibko raven priporočil, da se za preživele po možganski kapi, ki imajo težave pri hoji, lahko dodatno uporabi tudi elektromehanska asistirana vadba hoje (34). Škotske klinične smernice navajajo zmerno raven priporočil B, da se elektromehanska asistirana vadba hoje lahko ponudi izbranim pacientom, kjer je že na voljo ustrezna oprema in so zdravstveni strokovnjaki usposobljeni za uporabo opreme (32).

Uporaba robotskih naprav v domačem okolju

Po možganski kapi so težave na področju okvare funkcije zgornjega uda ter funkcije hoje in ravnotežja prisotne tudi v kroničnem obdobju, ko so pacienti večinoma že v domačem okolju in zaradi omejenih možnosti niso več vključeni v rehabilitacijsko obravnavo (51). Robotske naprave bi lahko omogočile vadbo pacienta v domačem okolju brez fizične prisotnosti terapevta. Telerehabilitacijska robotika je razmeroma nova disciplina, ki povezuje značilnosti robotsko asistiranje rehabilitacije in teledzdravja, da bi omogočili učinkovite storitve na daljavo z uporabo informacijskih in komunikacijskih tehnologij. Prvo je razvoj tovrstnih naprav začelo Ministrstvo za veterane v ZDA, da bi omogočili rehabilitacijske storitve na daljavo in tako zmanjšali geografske ovire, ki so nastale pri vračanju vojnih veteranov v ruralno domače okolje (52). Vključevanje robotskih naprav v domače okolje je za zdaj še zelo počasno (53). Večina naprav za telerehabilitacijsko robotsko obravnavo je še v razvoju in so zelo heterogene glede konstrukcije, protokolov nadzora naprave v realnem času in povezave z uporabnikom. Vsem napravam je skupno, da omogočajo spremljanje gibanja (npr. položaj, hitrost, navori itn.) in dajejo podporo, ki jo posameznik potrebuje pri izvedbi giba. Številne naprave, ki jih razvijajo, se osredotočajo bodisi na oddaljeno spremljanje pacienta ali pa na prilagoditve, ki so potrebne za domačo uporabo, ne pa na oboje hkrati (54). Uporabo telerehabilitacijske robotske naprave je smiselno predstaviti tako pacientu kot svojcem v času, ko je pacient še vključen v ambulantno ali hospitalno rehabilitacijsko obravnavo (55). Odsotnost terapevta v domačem okolju lahko vodi do pomanjkanja strukturiranih načinov vadbe in zato zmanjša pacientovo sodelovanje pri rehabilitacijski obravnavi. Pri načrtovanju vadbenih programov robotske vadbe v domačem okolju je treba upoštevati tudi socialne dejavnike pacientovega domačega okolja, praktične izzive vsakodnevnega življenja in njihovo spretnost pri uporabi različnih tehnologij (56).

Nekatere raziskave so pokazale, da je robotsko asistirana terapija za zgornji ud lahko učinkovita in zanesljiva tudi v domačem okolju, brez potrebe po fizični prisotnosti terapevta (57, 58). Do zdaj sta bili za uporabo v domačem okolju v celoti razviti le dve napravi (Hand and Foot mentor (Motus Nova LLC, Atlanta, Georgia) in SCRIPT (Faculty of Engineering Technology, University of Twente, Enschede, The Netherlands) (59, 60). Naprava Hand and Foot mentor (Motus Nova LLC, Atlanta, Georgia) se uporablja pri pacientih z delno ohranjeno funkcijo zgornjega in spodnjega uda za izboljšanje obsega aktivnega giba in mišične moči v distalnih mišičnih skupinah. Pacienti izvajajo gibe ekstenzije v zapestju ali dorzalne fleksije v gležnju, pri čemer izvajajo igran podobne vadbene programe. Računalniški algoritem stalno spremlja izvedbo nalog in prilagaja stopnjo zahtevnosti vadbe ter omogoča vidno in slušno povratno informacijo glede izvedbe nalog. Terapevt lahko napravo upravlja na daljavo. Vadbo na napravi so pacienti izvajali po navodilih eno uro na dan, 12 tednov, enkrat na teden je bil prisoten klic terapevta za oceno sodelovanja in napredka. Po koncu terapevtskega programa je prišlo do pomembnega izboljšanja na Funkcijskem testu zgornjega uda (ARAT). Pacienti so bili z vadbo zelo zadovoljni, imeli so občutek nadzora nad terapijo, zmanjšali sta se tesnoba in depresija ter izboljšala kako-

vost življenja (59, 61). Naprava SCRIPT (Faculty of Engineering Technology, University of Twente, Enschede, The Netherlands), ki je bila razvita v okviru raziskovalnega projekta, omogoča pasivno ali aktivno ortozo, ki pomaga pri ekstenziji zapestja in prstov. Poleg tega naprava omogoča tudi interaktivno okolje za vadbo v obliki iger. Po šestih tednih vadbe so poročali o pomembnih spremembah na Fugl-Meyerjevi lestvici in ARAT. Čeprav so spodbujali posameznike k uporabi naprave eno uro vsak dan, so jo v povprečju uporabljali le 15 minut (62, 63).

Pri statičnih robotskih napravah za vadbo hoje je za uporabo v domačem okolju v večini težava, ker so naprave velike in omejene za uporabo v bolnišničnem okolju, hkrati imajo tudi visoko ceno, so zahtevne za uporabo in povzročajo breme za svojce ter pogosto potrebujejo tehnično podporo (64). Pri mobilnih sistemih za vadbo hoje (npr. nosilne eksoskeletne naprave) je še vedno prisotna težava zaradi prekratkega trajanja baterij (65). V nedavni raziskavi so med desettedenskim vadbenim programom v domačem okolju primerjali skupino 34 hodečih pacientov v kroničnem obdobju po možganski kapi, pri čemer je testna skupina izvajala poleg običajne vadbe še robotsko vadbo hoje z nameščeno ortozo AlterG Bionic LegTM (AlterG, California, USA) (30 min na dan), kontrolna skupina pa le običajno fizioterapevtsko obravnavo v enakem časovnem obdobju. Skupina, ki je izvajala robotsko asistirano vadbo, je dosegla pomembno izboljšanje v prehojeni razdalji in ravnotežju, izvedla je večje število korakov in več prehodov iz sedečega v stoječi položaj. Izboljšanje je vztrajalo 22 tednov po koncu vadbe (66).

ZAKLJUČEK

Vadba na robotskih napravah in v okolju navidezne resničnosti je učinkovita dopolnitev običajne rehabilitacijske obravnave, saj lahko pacientu predstavlja izziv in ga dodatno motivira za sodelovanje. Vse robotske naprave imajo določene prednosti in pomanjkljivosti. Terapevt mora poznati lastnosti posamezne naprave in jo vključiti v terapevtsko obravnavo tako, da optimizira koristi vadbe na napravi pri nekem pacientu v različnih obdobjih okrevanja. Vadba na robotskih napravah za zgornji in spodnji ud je v večini primerov primerljiva z običajno rehabilitacijsko obravnavo. Največ koristi od robotske vadbe hoje imajo predvsem nehodeči pacienti v zgodnjem obdobju po možganski kapi. Še vedno je prisotnih precej nejasnosti glede optimalnih vadbenih protokolov (npr. pogostost in trajanje obravnav), izbire ustreznih pacientov, učinkovitosti vadbe na določeni napravi ter ustreznih ocenjevalnih orodij. Treba bo tudi najti tudi načine za dovajanje senzornih dražljajev med robotsko vadbo ter za vadbo realnih aktivnosti vsakodnevnega življenja. Sodobne rehabilitacijske tehnologije v prihodnje najverjetneje ne bodo nadomestile običajnih rehabilitacijskih postopkov s strani terapevtov, bodo pa vedno pogosteje del kompleksne rehabilitacijske obravnave.

Literatura:

1. Krakauer JW, Carmichael ST, Corbett D, Wittenberg GF. Getting neurorehabilitation right: what can be learned from animal models? *Neurorehabil Neural Repair*. 2012;26(8):923–31.
2. Pollock A, Farmer SE, Brady MC, Langhorne P, Mead GE, Mehrholz J, et al. Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2014;2014(11):CD010820.
3. Clark WE, Sivan M, O'Connor RJ. Evaluating the use of robotic and virtual reality rehabilitation technologies to improve function in stroke survivors: a narrative review. *J Rehabil Assist Technol Eng*. 2019;6:2055668319863557.
4. Maier M, Ballester BR, Verschure PFMJ. Principles of neurorehabilitation after stroke based on motor learning and brain plasticity mechanisms. *Front Syst Neurosci*. 2019;13:74.
5. Chang WH, Kim YH. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation. *J Stroke*. 2013;15(3):174–81.
6. Hesse S, Werner C, Pohl M, Rueckriem S, Mehrholz J, Lingnau ML. Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stroke: a single-blinded randomized trial in two centers. *Stroke*. 2005;36(9):1960–6.
7. Wagner TH, Lo AC, Peduzzi P, Bravata DM, Huang GD, Krebs HI, et al. An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *Stroke*. 2011;42(9):2630–2.
8. Carpinella I, Lencioni T, Bowman T, Bertoni R, Turolla A, Ferrarin M, et al. Effects of robot therapy on upper body kinematics and arm function in persons post stroke: a pilot randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):10.
9. Dietz V, Nef T, Zev Rymer W, eds. *Neurorehabilitation technology*. London: Springer; 2012.
10. Fazekas G, Tavaszi I. The future role of robots in neuro-rehabilitation. *Expert Rev Neurother*. 2019;19(6):471–3.
11. Peter O, Tavaszi I, Toth A, Fazekas G. Exercising daily living activities in robot-mediated therapy. *J Phys Ther Sci*. 2017;29(5):854–8.
12. Weber LM, Stein J. The use of robots in stroke rehabilitation: a narrative review. *NeuroRehabilitation*. 2018;43(1):99–110.
13. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;11(11):CD008349.
14. Grefkes C, Fink GR. Recovery from stroke: current concepts and future perspectives. *Neurol Res Pract*. 2020;2:17.
15. Okabe N, Himi N, Nakamura-Maruyama E, Hayashi N, Sakamoto I, Hasegawa T, et al. Very early initiation reduces benefits of poststroke rehabilitation despite increased corticospinal projections. *Neurorehabil Neural Repair*. 2019;33(7):538–52.
16. Péter O, Fazekas G, Zsiga K, Dénes Z. Robot-mediated upper limb physiotherapy: review and recommendations for future clinical trials. *Int J Rehabil Res*. 2011;34(3):196–202.
17. Krebs HI, Hogan N. Robotic therapy: the tipping point. *Am J Phys Med Rehabil*. 2012;91(3):S290–7.
18. Bertomeu-Motos A, Blanco A, Badesa FJ, Barios JA, Zollo L, Garcia-Aracil N. Human arm joints reconstruction algorithm in rehabilitation therapies assisted by end-effector robotic devices. *J Neuroeng Rehabil*. 2018;15(1):10.
19. Lee SH, Park G, Cho DY, Kim HY, Lee JY, Kim S, et al. Comparisons between end-effector and exoskeleton rehabilitation robots regarding upper extremity function among chronic stroke patients with moderate-to-severe upper limb impairment. *Sci Rep*. 2020;10(1):1806.
20. Gandolfi M, Valè N, Posteraro F, Morone G, Dell'orco A, Botticelli A, et al. State of the art and challenges for the classification of studies on electromechanical and robotic devices in neurorehabilitation: a scoping review. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2021;57(5):831–40.
21. Veerbeek JM, Langbroek-Amersfoort AC, van Wegen EE, Meskers CG, Kwakkel G. Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke. *Neurorehabil Neural Repair*. 2017;31(2):107–21.
22. Hee Do K, Chun Min Ho. Clinical use of robots as a part of rehabilitation medicine. *Brain Neurorehabil*. 2017;10(1):e7.
23. Duret C, Grosmaire AG, Krebs HI. Robot-assisted therapy in upper extremity hemiparesis: overview of an evidence-based approach. *Front Neurol*. 2019;10:412.
24. Duret C, Hutin E, Lehenaff L, Gracies JM. Do all sub acute stroke patients benefit from robot-assisted therapy? A retrospective study. *Restor Neurol Neurosci*. 2015;33(1):57–65.
25. Timmermans AA, Lemmens RJ, Monfrance M, Geers RP, Bakx W, Smeets RJ, et al. Effects of task-oriented robot training on arm function, activity, and quality of life in chronic stroke patients: a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:45.
26. Lum P, Reinkensmeyer D, Mahoney R, Rymer WZ, Burgar C. Robotic devices for movement therapy after stroke: current status and challenges to clinical acceptance. *Top Stroke Rehabil*. 2002;8(4):40–53.
27. Daunoraviciene K, Adomaviciene A, Grigonyte A, Griškevičius J, Juocevicius A. Effects of robot-assisted training on upper limb functional recovery during the rehabilitation of poststroke patients. *Technol Health Care*. 2018;26(S2):533–42.
28. Rodgers H, Bosomworth H, Krebs HI, van Wijck F, Howel D, Wilson N, et al. Robot-assisted training compared with an enhanced upper limb therapy programme and with usual care for upper limb functional limitation after stroke: the RATULS three-group RCT. *Health Technol Assess*. 2020;24(54):1–232.
29. Wu CY, Yang CL, Chen MD, Lin KC, Wu LL. Unilateral versus bilateral robot-assisted rehabilitation on arm-trunk control and functions post stroke: a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2013;10:35.
30. Paolucci T, Agostini F, Mangone M, Bernetti A, Pezzi L, Liotti V, et al. Robotic rehabilitation for end-effector device and botulinum toxin in upper limb rehabilitation in chronic post-stroke patients: an integrated rehabilitative approach. *Neurol Sci*. 2021;42(12):5219–29.
31. Mehrholz J, Pohl M, Platz T, Kugler J, Elsner B. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018;9(9):CD006876.
32. Management of patients with stroke: rehabilitation, prevention and management of complications, and discharge planning. Edinburgh: Scottish Intercollegiate Guideline Network; 2010. Dostopno na: <https://www.sign.ac.uk/media/1056/sign118.pdf> (citirano 10. 2. 2022).
33. Winstein CJ, Stein J, Arena R, Bates B, Cherney LR, Cramer SC, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. 2016;47(6):e98–e169.
34. Clinical guidelines for stroke management. Stroke Foundation; 2017. Dostopno na: <https://informme.org.au/en/Guidelines/Clinical-Guidelines-for-Stroke-Management> (citirano 10. 2. 2022).
35. National clinical guideline for stroke. 5th ed. Royal College of Physicians; 2016. Dostopno na: https://pearl.plymouth.ac.uk/bitstream/handle/10026.1/10488/2016-National-Clinical-Guideline-for-Stroke-5th-edition_24-11-16.pdf?sequence=1&isAllowed=y (citirano 10. 2. 2022).

36. Teasell R, Salbach NM, Foley N, Mountain A, Cameron JJ, Jong A, et al. Canadian stroke best practice recommendations: rehabilitation, recovery, and community participation following stroke. Part one: rehabilitation and recovery following stroke; 6th edition update 2019. *Int J Stroke*. 2020;15(7):763–88.
37. Díaz I, Gil JJ, Sánchez E. Lower-limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. *J Robot*. 2011;759764:1–11.
38. Mehrholz J, Thomas S, Werner C, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;5(5):CD006185.
39. Esquenazi A, Talaty M. Robotics for lower limb rehabilitation. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2019;30(2):385–97.
40. Wieser M, Haefeli J, Büttler L, Jäncke L, Riener R, Koeneke S. Temporal and spatial patterns of cortical activation during assisted lower limb movement. *Exp Brain Res*. 2010;203(1):181–91.
41. Frazzitta G, Zivi I, Valsecchi R, Bonini S, Maffia S, Molatore K, et al. Effectiveness of a very early stepping verticalization protocol in severe acquired brain injured patients: a randomized pilot study in ICU. *PLoS One*. 2016;11(7):e0158030.
42. Mehrholz J, Thomas S, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2020;10(10):CD006185.
43. Mehrholz J, Thomas S, Werner C, Kugler J, Pohl M, Elsner B. Electromechanical-assisted training for walking after stroke: a major update of the evidence. *Stroke*. 2017;16:STROKEAHA.117.018018.
44. Mehrholz J, Pohl M. Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices. *J Rehabil Med*. 2012;44(3):193–9.
45. Zheng QX, Ge L, Wang CC, Ma QS, Liao YT, Huang PP, et al. Robot-assisted therapy for balance function rehabilitation after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Int J Nurs Stud*. 2019;95:7–18.
46. Hornby TG, Reisman DS, Ward IG, Scheets PL, Miller A, Haddad D, et al. Clinical practice guideline to improve locomotor function following chronic stroke, incomplete spinal cord injury, and brain injury. *J Neurol Phys Ther*. 2020;44(1):49–100.
47. Esquenazi A, Lee S, Wikoff A, Packel A, Toczyłowski T, Feeley J. A Comparison of locomotor therapy interventions: partial-body weight-supported treadmill, lokomat, and G-EO training in people with traumatic brain injury. *PM R*. 2017;9(9):839–46.
48. Heeren A, van Ooijen M, Geurts AC, Day BL, Janssen TW, Beek PJ, et al. Step by step: a proof of concept study of C-Mill gait adaptability training in the chronic phase after stroke. *J Rehabil Med*. 2013;45(7):616–22.
49. Louie DR, Eng JJ. Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review. *J Neuroeng Rehabil*. 2016;13(1):53.
50. Zhang X, Yue Z, Wang J. Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke. *Behav Neurol*. 2017;2017:3731802.
51. Eng JJ, Tang PF. Gait training strategies to optimize walking ability in people with stroke: a synthesis of the evidence. *Expert Rev Neurother*. 2007;7(10):1417–36.
52. Piron L, Turolla A, Agostini M, Zucconi C, Cortese F, Zampolini M, et al. Exercises for paretic upper limb after stroke: a combined virtual-reality and telemedicine approach. *J Rehabil Med*. 2009;41(12):1016–102.
53. Housley SN, Fitzgerald K, Butler AJ. Telerehabilitation robotics: overview of approaches and clinical outcomes. *Rehabil Robotics*. 2018;24:333–46.
54. Song A, Wu C, Ni D, Li H, Qin H. One-therapist to three-patient telerehabilitation robot system for the upper limb after stroke. *Int J Soc Robot*. 2016;8(2):319–29.
55. Sivan M, Gallagher J, Makower S, Keeling D, Bhakta B, O'Connor RJ, et al. Home-based Computer Assisted Arm Rehabilitation (hCAAR) robotic device for upper limb exercise after stroke: results of a feasibility study in home setting. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:163.
56. Chen Y, Abel KT, Janecek JT, Chen Y, Zheng K, Cramer SC. Home-based technologies for stroke rehabilitation: a systematic review. *Int J Med Inform*. 2019;123:11–22.
57. Lo AC, Guarino PD, Richards LG, Haselkorn JK, Wittenberg GF, Federman DG, et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *N Engl J Med*. 2010;362(19):1772–83.
58. Wolf SL, Sahu K, Bay RC, Buchanan S, Reiss A, Linder S, et al. The HAAPI (Home Arm Assistance Progression Initiative) trial: a novel robotics delivery approach in stroke rehabilitation. *Neurorehabil Neural Repair*. 2015;29(10):958–68.
59. Butler A, Bay C, Wu D, Richards K, Buchanan S. Expanding tele-rehabilitation of stroke through in-home robot-assisted therapy. *Int J Phys Med Rehabil*. 2014;2(184):2.
60. Ates S, Haarman CJW, Stienen AHA. SCRIPT passive orthosis: design of interactive hand and wrist exoskeleton for rehabilitation at home after stroke. *Auton Robot*. 2017;41:711–23.
61. Housley S, Garlow A, Ducote K, Howard A, Thomas T, Wu D, et al. Increasing access to cost effective home-based rehabilitation for rural veteran stroke survivors. *Austin J Cerebrovasc Dis Stroke*. 2016;3(2):1–11.
62. Ates S, Lobo-Prat J, Lammertse P, van der Kooij H, Stienen AH. SCRIPT passive orthosis: design and technical evaluation of the wrist and hand orthosis for rehabilitation training at home. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013:6650401.
63. Prange GB, Nijenhuis SM, Sale P, Cesario A, Nasr N, Mountain G, et al. Preliminary findings of feasibility and compliance of technology-supported distal arm training at home after stroke. In: Jensen W, Andersen OK, Akay M, eds. *Replace, repair, restore, relieve—bridging clinical and engineering solutions in neurorehabilitation*. Cham: Springer; 2014:665–73.
64. Housley SN, Fitzgerald K, Butler AJ. Telerehabilitation robotics: overview of approaches and clinical outcomes. *Rehabil Robotics*. 2018;24:333–46.
65. Hillier S, Inglis-Jassiem G. Rehabilitation for community-dwelling people with stroke: home or centre based? A systematic review. *Int J Stroke*. 2010;5(3):178–86.
66. Wright A, Stone K, Martinelli L, Fryer S, Smith G, Lambrick D, et al. Effect of combined home-based, overground robotic-assisted gait training and usual physiotherapy on clinical functional outcomes in people with chronic stroke: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil*. 2021;35(6):882–93.