

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH VĚD

Ústav klinické rehabilitace

Martin Tyl

**Robotická rehabilitace v terapii poruch
hybnosti horní končetiny**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: PhDr. Barbora Kolářová, Ph.D.

Olomouc 2024

Anotace

Název práce: Robotická rehabilitace v terapii poruch hybnosti horní končetiny

Název práce v anglickém jazyce: Robotic rehabilitation in the therapy of mobility disorders of the upper limb

Datum zadání: 30.11.2023

Datum odevzdání: 10.5.2024

Vysoká škola: Univerzita Palackého v Olomouci, Fakulta zdravotnických věd

Autor práce: Martin Tyl

Vedoucí práce: PhDr. Barbora Kolářová Ph.D.

Oponent práce: Mgr. Miroslav Haltmar

Abstrakt v českém jazyce:

Robotická rehabilitace se v posledních letech objevuje jako nová možnost v poskytování rehabilitační péče pacientům s nejrůznějšími deficity, nejčastěji motorickými. Cílem této práce je přinést přehled o možnostech robotické rehabilitace, jednotlivých robotických zařízeních a také zhodnotit, jak tyto zařízení mohou přispět v rehabilitačním procesu.

K vyhledávání informací byly použity zejména zahraniční studie vyhledávané na Google Scholar, PubMed, Springer, Nature. Klíčovými slovy použitými k vyhledávání byly: rehabilitation, robot, stroke, upper limb, efectivity, meta analysis, randomize studies, assisted, efficacy, disorders, brain, injury, trauma.

Výsledky naznačují, že robotická rehabilitace je podstatná především v možnosti poskytovat vysoce intenzivní rehabilitaci s velkým počtem opakování a možností kvantitativního měření výsledků. Podstatný je také vliv na neuroplasticitu, avšak studie naznačují, že roboticky asistovaná rehabilitace je nejefektivnější v kombinaci s klasickou fyzioterapií.

Abstrakt v anglickém jazyce:

In recent years, robotic rehabilitation has emerged as a new option for providing rehabilitative care to patients with various deficits, most commonly motor deficits. The aim of this work is to provide an overview of the possibilities of robotic rehabilitation, the individual robotic rehabilitation devices, and also to evaluate how these devices can contribute to the rehabilitation process.

For searching information, I primarily used international studies found on Google Scholar, PubMed, Springer, and Nature. The key search terms used were: rehabilitation, robot,

stroke, upper limb, effectiveness, meta-analysis, randomized studies, assisted, efficacy, disorders, brain, injury, trauma.

The results suggest that robotic rehabilitation is particularly significant for its ability to provide highly intensive rehabilitation with a large number of repetitions and the possibility of quantitative measurement of outcomes. Its impact on neuroplasticity is also substantial, however, studies indicate that robot-assisted rehabilitation is most effective when combined with traditional physiotherapy.

Klíčová slova: Robot, rehabilitation, upper limb, stroke

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou bakalářskou práci zpracoval samostatně a v referenčním seznamu jsem uvedl všechny literární a odborné zdroje, které jsem použil pro zpracování této bakalářské práce.

V Olomouci dne 9.5.2023

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí své práce paní PhDr. Barboře Kolářové Ph.D. za odborné rady, trpělivost, rady a za čas strávený při opravování mé bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	6
1 ROBOTICKÁ REHABILITACE	9
1.1 ROBOTICKÉ REHABILITAČNÍ TECHNOLOGIE	10
1.2 SPECIFIKA ROBOTICKÝCH SYSTÉMŮ PRO HORNÍ KONČETINY	11
1.3 KLASIFIKACE ROBOTICKÉ REHABILITACE A TYPY ROBOTŮ	11
1.3.1 Zařízení s koncovým efektozem	12
1.3.2 Exoskeletony	13
1.3.3 Zařízení kombinující více technologií	13
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE TYPU ASISTENCE	14
1.4.1 Pasivní terapie	14
1.4.2 Aktivně asistovaná robotická terapie	14
1.5 PŘÍKLADY ROBOTICKÝCH ZAŘÍZENÍ	15
1.5.1 Robotická zařízení pro horní končetiny	15
2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ROBOTICKÉ REHABILITACE V KLINICKÉ PRAXI	17
2.1 CÉVNÍ MOZKOVÁ PŘÍHODA	18
2.1.1 Etiologie	18
2.1.2 Ischemická cévní mozková příhoda	19
2.1.3 Klinické příznaky	19
2.1.4 Hemoragická cévní mozková příhoda	19
2.1.5 Deficity a cíle rehabilitace	20
2.2 KRANIOCEREBRÁLNÍ TRAUMATA	20
2.2.1 Etiologie	20
2.2.2 Komoce mozku	21
2.2.3 Kontuze mozku	21
2.2.4 Deficity a cíle rehabilitace	21
2.3 PORANĚNÍ MÍCHY	22
2.3.1 Transverzální léze míšní	22
2.3.2 Kontuze a poranění míchy	23
2.3.3 Deficity a cíle rehabilitace	24
2.4 PARKINSONOVA CHOROBA	24
2.4.1 Etiologie	25
3 NEUROPLASTICITA	25
3.1 NEUROREHABILITACE	28
4 ROBOTICKÁ REHABILITACE U CÉVNÍ MOZKOVÉ PŘÍHODY	28
4.1 ÚČINNOST ROBOTICKÉ TERAPIE HORNÍ KONČETINY Z POHLEDU EBM	29
4.2 PŘÍKLADY ÚČINNOSTI KONKRÉTNÍCH ROBOTICKÝCH TECHNOLOGIÍ	30
4.2.1 Exoskeletony-účinnost	32
4.3 MOŽNÉ LIMITY ROBOTICKY ASISTOVANÉ REHABILITACE	33
4.4 KLINICKÝ PŘÍNOS ROBOTICKÉ REHABILITACE	34
ZÁVĚR	35
REFERENČNÍ SEZNAM	36
SEZNAM ZKRATEK	41
SEZNAM PŘÍLOH	42
PŘÍLOHY	43

Úvod

Léčebná rehabilitace je už od svého začátku používána jako nástroj, který nemocným nebo pacientům s různým typem pohybového postižení, pomáhá v nabytí jejich ztracených pohybových schopností, urychlení regeneračních procesů, zmírnění nepříznivých dopadů nemoci a mnoho dalšího za použití nejrůznějších technik, přístupů či nástrojů.

S vývojem technologií a rozvojem robotických zařízení, začaly tyto technologie pronikat i do zdravotnictví s cílem poskytovat pacientům vysoce intenzivní terapii s velkým počtem opakování a zajistit tak pacientovi, co možná nejlepší péči.

Dysfunkce horní končetiny může významně ovlivnit schopnost jedince vykonávat denní činnosti, což má značný dopad na jeho nezávislost a kvalitu života. Funkční omezení horní končetiny, ať už v důsledku úrazu nebo onemocnění, může vést k neschopnosti provádět základní životní aktivity jako je oblékání, stravování nebo osobní hygiena. Tato omezení mohou vést k potřebě pomoci od třetích osob, což zvyšuje závislost na rodinných příslušnících nebo pečovatelských službách.

Sociálně může dysfunkce horní končetiny způsobit izolaci, protože jedinci mohou mít potíže se zapojením do společenských aktivit, což snižuje jejich sociální interakce. Může dojít k pocitu ztráty identity a role v rodině nebo společnosti. Tato sociální izolace a stigmatizace může zhoršit psychický stav jedince a snížit motivaci k rehabilitaci a dalším terapeutickým intervencím.

Vzhledem k těmto dopadům je klíčová rychlá a efektivní rehabilitace, která může pomoci minimalizovat negativní důsledky dysfunkce horní končetiny a zlepšit celkovou kvalitu života postižených osob. Tato rehabilitace by měla být komplexní a multidisciplinární, zaměřená na obnovení funkce, zvýšení nezávislosti a podporu psychosociálního zdraví jedince.

V aktuálních studiích se autoři zabývají využitím a efektivitou robotické rehabilitace zejména u pacientů, kteří prodělali cévní mozkovou příhodu za použití nejrůznějších typů robotických zařízení a pomůcek.

Cílem práce je zhodnotit, jaký vliv má robotická rehabilitace horní končetiny v terapii poruch hybnosti zejména po prodělání cévní mozkové příhody a jaký dopad může mít použití různých typů robotických zařízení.

Klíčová slova, která byla použita při vyhledávání zdrojů k mé bakalářské práci byly především: rehabilitation, robot, stroke, upper limb, efectivity, meta analysis, randomize studies, assisted, efficacy, disorders, brain, injury, trauma.

Studie byly vyhledávány v těchto internetových databázích: Cochrane, Pubmed, Nature, Springer, Google Scholar.

K psaní této práce bylo prostudováno 163 zdrojů, z nichž bylo ke psaní této práce vybráno 35. Při výběru studií bylo čerpáno především ze zahraničních zdrojů v anglickém jazyce a v menší míře z české odborné literatury. Jako časové období publikací studií, ve kterých bylo vyhledáváno bylo zvoleno rozpětí let 2018-2023, s tím že nějaké studie byly psány dříve a vyhledávání zdrojů bylo uskutečněno v rozmezí 18.4.2023 – 3.5.2024.

1 Robotická rehabilitace

Technologický pokrok a řada inovací, které přichází s rozvojem technologií pronikají do všech oblastí života s cílem zlepšit jeho kvalitu a usnadnit běžné denní činnosti, mimojiné zde můžeme zařadit poskytování služeb včetně těch ve zdravotnictví (Navrátil, Příhoda et al., 2022).

Stále častěji se v oblasti rehabilitační medicíny využívají robotické technologie. Jedním z přístupů je využití roboticky řízeného exoskeletu (Kolářová et al., 2019).

Pojem exoskelet (z řeckého *exō* „vnější“ a *skeletós* „skelet“) znamená vnější kostra, která tvoří oporu a ochranu pro tělo zvířete. U živočichů jsou exoskelety tvořeny z odolných částí a plní mnoho rozdílných funkcí mezi které můžeme zařadit ochranu před predátory, podporu, krmení, vylučování nebo slouží jako opora pro úpony svalů.

Nejrůznější živočichové inspirovali konstruktéry exoskeletů. O exoskelety má zájem vedle zdravotníků a složek integrovaného záchranného systému také armáda.

Ve zdravotnictví slouží exoskelety k podpoře aktivní hybnosti a asistují pacientovi při provádění specifických pohybů. Exoskelety jsou využívány v terapii, která je zaměřena zejména na rehabilitaci chůze a manipulativní funkce horní končetiny.

Původní robotické systémy byly vyvinuty pro pacienty se spinálním poškozením, u kterých se předpokládalo, že intenzivním cvičením lokomoce dojde automaticky k opětovnému naučení stereotypu chůze. Původní očekávání se však nenaplnila a bylo u těchto pacientů využíváno robotiky k prevenci sekundárních změn. Později se začalo robotických technologií využívat u pacientů s poškozením mozku (Navrátil, Příhoda et al., 2022).

Vzhledem k poznatkům o neuroplasticitě a motorickém učení je využívání robotických rehabilitačních technologií stále více aktuální. Tyto technologie jsou navrženy s ohledem na neurologické mechanismy, a proto jsou často aplikovány u pacientů s pohybovými poruchami způsobenými neurologickými onemocněními.

Základ terapie pomocí robotických technologií je podobný jako u tradiční fyzioterapie – cvičení funkčních pohybů s akcentací na variabilitu a aktivity denního života.

Robotické rehabilitační technologie umožňují pacientovi provádět specifické pohyby buď samostatně nebo s asistencí, která je přizpůsobena míře jeho vlastní aktivity, avšak bez pacientovy aktivní participace na prováděné terapii a bez pacientova pochopení smyslu terapie, není využití robotických rehabilitačních technologií účinné.

Realizace rehabilitace prostřednictvím robotických rehabilitačních technologií označujeme jako roboticky asistovanou rehabilitaci, jejímž cílem je obnova nebo zlepšení

pohybových schopností pacientů, s důrazem na plynulost a koordinaci s cílem předcházet sekundárním změnám z inaktivity (Kolářová et al., 2019).

Exoskeletonová robotika zahájila novou éru moderního inženýrství neuromuskulární rehabilitace a výzkumu asistenčních technologií. Technologie exoskeletu se rychle vyvíjí, ale stále potřebuje interdisciplinární výzkum k vyřešení technických problémů, např. kinematické kompatibility a efektivní interakce člověk-robot (Bonanno et al., 2023).

1.1 Robotické rehabilitační technologie

Stavba těchto robotických zařízení vychází z poznatků biomechaniky, antropometrie a umožňuje jejich uživatelům je nosit a aktivně s nimi spolupracovat (Navrátil, Příhoda et al., 2022).

Robotické rehabilitační technologie se skládají z exoskeletu, bezpečnostních prvků a řídicích prvků pohybujičích exoskeletem (Kolářová et al., 2019).

Exoskelety obsahují senzory, servomotory a jsou schopny podporovat celé tělo nebo jen jeho určité části. Mají schopnost zvyšovat sílu lidských svalů tam, kde je to nezbytné a stávají se tak kompenzačními pomůckami pro jedince s omezenou pohyblivostí (Navrátil, Příhoda et al., 2022).

Účelem exoskeletu je replikovat kinematiku a dynamiku lidské muskuloskeletální struktury a tím podporovat pohyb končetiny, což je náročné se stávajícími mechanismy a způsobem ovládní. Kvůli složité anatomické struktuře není v literatuře o biomechanice k dispozici jednotný kinematický model pro horní končetinu člověka, který by mohl sloužit pro návrhy exoskeletů. Navíc konstrukční parametry exoskeletu silně závisí na cílené aplikaci. Je tedy nutné analyzovat anatomii lidské horní končetiny, aby bylo možné navrhnout exoskelet s ohledem na koncového uživatele (Bonanno et al., 2023).

Pro použití v klinické praxi bylo schváleno mnoho typů robotických zařízení. Díky tomu mají zdravotníci a pacienti na výběr ze široké škály možností, avšak existuje jen málo indicií ke správnému zvolení roboticky asistované terapie (Lee et al., 2020). Protože složitost horních končetin, které se skládají z několika kloubů a množství svalů, které navíc umožňují pohyby v několika rovinách s několika stupni volnosti, značně komplikuje adaptaci pacientů na zařízení. Aplikaci robotické terapie navíc ztěžují muskuloskeletální problémy spojené s postižením končetiny, jako jsou spasticita, kontraktury či deformace (Park et al., 2020).

1.2 Specifika robotických systémů pro horní končetiny

Lidská horní končetina se skládá ze složité kosterní struktury, která zahrnuje složitý komplex struktur ramenního kloubu, loketního kloubu, zápěstního kloubu a kloubů ruky.

Rameno se skládá ze čtyř kloubů (nazývaných glenohumerální skloubení, akromioklavikulární, sternoklavikulární a scapulotorakální) vytvořených mezi třemi kostmi zahrnující klíční kost, lopatku a pažní kost. Glenohumerální kloub je označován jako kulový kloub, vytvořený mezi proximální kloubní hlavicí humeru a glenoidální dutinou. Většina studií používá pouze glenohumerální kloub jako model ramenního mechanismu se třemi stupni volnosti. Glenohumerální kloub má však okamžitý střed rotace, který se mění s pohybem horních končetin člověka. Je tedy velmi nutné přizpůsobit se účinku dynamického středu rotace při modelování mechanismu ramen exoskeletu.

Primárními pohyby pro systém ramenních kloubů jsou abdukce a addukce ramene, vnitřní a vnější rotace a flexe a extenze ramene.

Loketní kloub je synoviální složený kloub tvořený z humeroradiálního kloubu a humeroulnárního kloubu. Humeroradiální kloub je také označován jako kulový kloub tvořený humerem (v distální části paže) a radiální kostí (v proximální části předloktí). Jeho blízká podobnost s humeroulnárním kloubem a proximální radioulnárním kloubem však omezuje kloubní pohyby ze tří stupňů volnosti na dva stupně volnosti. Obecně platí, že loketní kloub umožňuje extenzi a flexi předloktí a supinaci a pronaci. Většina exoskeletů nalezených v literatuře navrhuje loketní kloub pouze pro flexi a extenzi (jeden stupeň volnosti).

Zápěstí je kloub, který spojuje předloktí a ruku. Skládá se z osmi zápěstních kostí a měkkých tkání pro zesílení kloubu. Má dva stupně volnosti, kterými jsou flexe a extenze zápěstí a radiální a ulnární dukce. Pohyby zápěstí jsou vytvářeny kolem okamžitého středu rotace. Rozsah pohybu pro okamžitý střed rotace je však příliš malý tudíž jej lze ignorovat a předpokládá se, že osy rotace pro flexi a extenzi a ulnární a radiální dukci jsou shodné. Pro podporu zápěstního kloubu bylo vyvinuto několik exoskeletů na základě předpokladu, že pohyb zápěstí je generován kolem pevného středu rotace (Gull, Bai a Bak 2020).

1.3 Klasifikace robotické rehabilitace a typy robotů

Lékaři mají ve zvyku u léků předepisovat konkrétní přípravky, ale u roboticky asistované terapie tomu tak není a většinou spíše předepisují obecně robotickou terapii než nějaký konkrétní typ. Je to dáno i tím, že dosud byla robotická rehabilitace považována za robotickou

rehabilitaci jako takovou, i když mezi jednotlivými typy robotické terapie byly určité známky odlišností (Lee et al., 2020).

Jakmile je motorická kontrola končetiny narušena, terapeut musí hledat optimální postup pro terapii poškozené končetiny. Volba správného terapeutického postupu je zásadním rozhodnutím, které v konečném důsledku ovlivňuje efektivitu terapie (Qassim a Hasan, 2020).

Robotické rehabilitační technologie můžeme obecně rozdělit podle jejich mechanické struktury na roboty s koncovým efektozem a na exoskelety (Gull, Bai a Bak 2020).

Rozdíl mezi těmito dvěma kategoriemi spočívá ve způsobu přenosu pohybu ze zařízení na horní končetinu pacienta. Zařízení založená na koncovém efektozu přicházejí do kontaktu s končetinou pacienta pouze ve své nejbližší části, která je připojena k horní končetině pacienta (koncový efektoz). Pohyby koncového efektozu mění polohu horní končetiny, ke které je připojen, avšak segmenty horní končetiny tvoří mechanický řetězec. Pohyby koncového efektozu tedy nepřímo mění polohu i ostatních segmentů pacientova těla. Ve srovnání s koncovými efektozy mají zařízení založená na exoskeletu mechanickou strukturu, která odráží strukturu kostry končetiny pacienta. Proto pohyb v konkrétním kloubu zařízení přímo vyvolává pohyb konkrétního kloubu končetiny (Macijasz et al., 2014).

1.3.1 Zařízení s koncovým efektozem

Zařízení s koncovým efektozem se k pacientům připojují v jednom distálním bodě a jejich klouby se neshodují s klouby pacientů. Síla, která se generuje v místě připojení zároveň mění polohu ostatních kloubů, takže provádět izolovaný pohyb pouze v jednom kloubu je obtížné. Lidská horní končetina se skládá ze složité kosterní struktury, která zahrnuje složitý komplex struktur ramenního kloubu, loketního kloubu, zápěstního kloubu a kloubů ruky.

Exoskelety se běžně používají u pacientů se závažnějším deficitem, včetně pacientů s kompletní hemiplegií, zatímco jedinci s mírným až středním deficitem mohou lépe těžit z funkčních problémů, které nabízejí koncové efektozy (Bonanno et al., 2023).

Výhodou systémů na bázi koncových efektozů je jejich jednodušší struktura a v důsledku toho méně komplikované řídicí algoritmy. Je však obtížné izolovat specifické pohyby konkrétního kloubu, protože tyto systémy produkují složité pohyby. Manipulátor umožňuje až šest jedinečných pohybů (3 rotace a 3 posuny). Ovládání pohybů horní končetiny pacienta je možné pouze tehdy, je-li součet možných anatomických pohybů paží pacienta ve všech asistovaných kloubech omezen na šest. Zvýšení počtu definovaných pohybů pro stejnou polohu

koncového bodu manipulátoru vede k nadbytečným konfiguracím pacientovy paže a tím k riziku zranění a komplikovaným řídicím algoritmům (Macijasz et al., 2014).

1.3.2 Exoskeletony

Exoskeletony horní končetiny jsou elektromechanické systémy, které jsou navrženy tak, aby interagovaly s uživatelem za účelem zesílení výkonu, podpory nebo náhrady motorické funkce. Tato zařízení jsou obvykle antropomorfní povahy, protože mechanicky interagují s muskuloskeletální strukturou horní končetiny člověka. Nabízejí široké možnosti použití, například zesílení síly, kompenzaci neuromuskulárního postižení nebo rehabilitaci po cévní mozkové příhodě a podporu zdravotně postižených osob v jejich každodenních činnostech (Gull, Bai a Bak 2020). Exoskeletony se k pacientům připojují v několika bodech a jejich osy se shodují s osami lidských kloubů. Při použití tohoto typu robotických zařízení lze trénovat konkrétní svaly (Lee et al., 2020).

Použití systémů založených na exoskeletu umožňuje nezávislé a souběžné řízení jednotlivých pohybů pacientovy ruky v mnoha kloubech, i když celkový počet asistovaných pohybů je vyšší než šest. Aby však nedošlo ke zranění pacienta, je nutné přizpůsobit délky jednotlivých segmentů manipulátoru délkám segmentů pacientovy paže. Proto může nastavení takového zařízení pro konkrétního pacienta, zejména pokud má zařízení mnoho segmentů, zabrat značnou dobu. Kromě toho se poloha středu rotace mnoha kloubů lidského těla, zejména ramenního komplexu, může během pohybu výrazně měnit. Když zařízení na bázi exoskeletu asistuje při pohybech těchto kloubů, jsou zapotřebí speciální mechanismy pro zajištění bezpečnosti a pohodlí pacienta. Z tohoto důvodu je složitost mechanických a řídicích algoritmů takových zařízení obvykle výrazně vyšší než u zařízení založených na koncovém efektoru. Složitost se stupňuje s rostoucím počtem stupňů volnosti (Bonanno et al., 2023).

1.3.3 Zařízení kombinující více technologií

Například u systému Armeo Spring je jako exoskelet navržena pouze distální část – zahrnující loket, předloktí a zápěstí. Postavení končetiny je tedy staticky určeno, ale ramenní kloub není omezen, což umožňuje snadné individuální přizpůsobení systému různým pacientům. Podobná koncepce byla použita v systému BONES. V tomto případě zajišťuje pohyby ramene paralelní robot složený z pasivních posuvných tyčí otáčejících se vzhledem k pevnému rámu. Takové použití posuvných tyčí umožňuje vnitřní nebo vnější rotaci ramene bez jakéhokoli kruhového nosného prvku. Distální část umožňující flexi a extenzi lokte se podobá konstrukci exoskeletu (Macijasz et al., 2014).

1.4 Rozdělení podle typu asistence

Robotická zařízení mají schopnost poskytovat opakované pohyby pro postižené končetiny. Podle toho, jak velkou asistenci poskytují postižené končetině můžeme dále dělit robotickou terapii na tři typy (Qassim, Hasan, 2020).

1.4.1 Pasivní terapie

Nevyžaduje od pacienta žádné úsilí a je obvykle aplikována v případě, kdy postižená končetina nereaguje na inervační stimuly. Pasivní terapie je obvykle předepisována u pacientů s hemiplegií. Zahrnuje pohyb postižené končetiny po určité trajektorii během terapie, který obvykle provádí robotické zařízení. Trajektorie pohybu je předem pečlivě naplánována, aby se zabránilo jakémukoli poškození, které by mohlo ovlivnit pacienta. Tento druh terapie se zaměřuje na protažení a kontrakci postižené horní končetiny. Používá se také k posouzení rozsahu pohybu končetiny. Exoskeletony se v této léčbě používají k poskytování opakujících se pohybů podle rozsahu pohybu a pasivní terapie prokázala účinnost při snižování křečí a ztuhlosti postižených končetin (Qassim, Hasan, 2020).

1.4.2 Aktivně asistovaná robotická terapie

Zařízení jsou považována za vhodná pro uživatele, kteří nejsou schopni svévolně vykonávat pohyb, protože s nimi lze trénovat pohyby podle ideální dráhy nebo rychlosti (Park et al., 2020). Aktivní terapie může být klasifikována jako aktivně-asistovaná terapie, aktivně-odporová terapie nebo bilaterální terapie.

Aktivně-asistovaná terapie spočívá v aplikaci vnější síly terapeutem nebo zařízením, která pacientovi pomůže splnit stanovený úkol. Používá se také ke zlepšení rozsahu pohybu. Například, aktivně asistovaná terapie byla aplikována u pacienta s poškozeným ramenem a loktem, kdy byl pacient požádán, aby dosáhl stanoveného cíle. Připojené zařízení zasáhlo, když pacient nebyl schopen provést celý úkol správně a efektivně.

Aktivně-odporová léčba však zahrnuje aplikaci opačné síly na poškozené končetiny. Odporovou sílu může aplikovat terapeut nebo robot. Studie ukázaly, že výkony pacientů se postupně zlepšují tam, kde lze postupně zvyšovat odporovou sílu. Odporová síla je určena algoritmem podle schopností pacienta.

Bilaterální terapie se týká principu zrcadlení při provádění rehabilitace. Postižená končetina kopíruje pohyb druhé končetiny a dává uživateli plnou kontrolu nad postiženou

končetinou. O bilaterální terapii byly provedeny klinické studie a výsledky ukázaly výrazné zlepšení postižené hemisféry a motorických funkcí pacienta (Qassim, Hasan M., 2020).

1.5 Příklady robotických zařízení

1.5.1 Robotická zařízení pro horní končetiny

Robotická zařízení můžeme dělit na systémy více orientované na rehabilitaci akra nebo ramenního pletence. V této kapitole je zmíněna i technologie využívající k řízení pohybu robotického zařízení eeg (elektroencegrafické) akční potenciály (Brain computer interface) a robotické systémy pro terapii horní končetiny. Příklady nejčastěji uváděných rehabilitačních technologií citovaných v dohledaných studiích.

- Systém MIT MANUS

Je jedním z prvních robotických zařízení určených pro rehabilitaci. Příloha 1 (str. 43) ukazuje jeho komerční verzi, Inmotion2, který je modulární a umožňuje provoz jednotlivých modulů buď samostatně nebo dohromady. Tato vlastnost je důležitá při specifickém zaměření na jednotlivé části postižené horní končetiny.

Robotické zařízení se skládá z několika modulů: planární aktivní modul s dvěma stupni volnosti pro horizontální pohyby, vertikální aktivní modul s jedním stupněm volnosti pro pohyby nahoru a dolů, aktivní modul zápěstí s třemi stupni volnosti a pasivní uchopovací modul. Planární modul využívá manipulátor SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) a je navržen pro nízkou impedanci na vertikální ose, což umožňuje lehké zvládnutí váhy paže pacienta. Robot je také vybaven senzory pro měření polohy a rychlosti.

Ovládání a zobrazení úkolů pro terapeuta i pacienta zajišťuje osobní počítač s monitory. Modul pro zápěstí, který byl přidán po úspěšných klinických výsledcích rehabilitace lokte a ramene, poskytuje efektivní rehabilitaci zápěstí a je rychle připojitelný díky magnetickému zámku.

Robot také nabízí senzomotorický trénink pomocí videoher, kde pacienti ovládají koncový efektor robota v rámci herních cílů. Pokud provedení úkolu pacientem není možné, robot poskytne asistenci. Díky svým vlastnostem je MIT-MANUS ideální pro klinickou rehabilitaci, je bezpečný, stabilní a speciálně navržený pro interakci s lidmi (Babaiasl et al., 2016).

- Systém Armeo Spring (Příloha 2, str. 43)

Jedná se o systém s exoskeletem a pružinovým mechanismem, který umožňuje nadlehčovat končetinu proti tíhové síle. Díky odlehčení můžou pacienti s různě velkým poškozením horní

končetiny provádět cílené a koordinované pohyby. Konstrukci tvoří exoskelet s pružinami pro předloktí a paži. Díky tomu je možno provádět pohyb s pěti stupni volnosti. Zařízení obsahuje senzor pro snímání síly úchopu, který lze vyřadit a pacient může trénovat uchopování reálných předmětů. Indikací pro terapii na Armeo Spring jsou nejčastěji neurologické nebo muskuloskeletní onemocnění mezi které řadíme například cévní mozkovou příhodu, trauma mozku nebo míchy. Benefity, které nabízí tento typ robotické terapie využívají i pacienti s roztroušenou sklerózou, pacienti po operacích kloubů na horní končetině nebo pacienti s atrofiemi svalstva v důsledku inaktivity. Cvičení ve virtuálním prostoru je individualizované pro každého pacienta a umožňuje cvičení lehkých i komplikovaných trojrozměrných cvičení (Kolářová et al., 2019).

- **Systém Gloreha** (Příloha 3, str. 44)

Využívá terapeutickou rukavici připevněnou k ruce i zápěstí pomocí pásů upnutých kolem dlaňové strany prstů a palce. Pneumatický pohon díky táhlům, která se připojují k prstům, umožňuje pohyb rukavice a tím i prstů. Zpětnou vazbu zajišťuje počítač s terapeutickými programy a 3D animací prováděného pohybu. Systém umožňuje provádět pasivní, aktivně- asistovanou i aktivně-odporovou terapii.

Gloreha typ Workstation je určen pro neurorehabilitaci horní končetiny u pacientů s parézou nebo plegií po centrální nebo periferní lézi nervového systému nebo míchy. Systém umožňuje pasivní a aktivně asistované cvičení pro zlepšení a zkvalitnění koordinace, rychlosti a obratnosti.

Gloreha typ Sinfonia (Příloha 4, str. 44) je pokročilejší systém pro terapii horní končetiny ve všech fázích neurorehabilitace. Obsahuje senzomotorickou rehabilitační rukavici schopnou detekovat volní pohyby prstů a ruky. Systém řadíme mezi bilaterální terapii a umožňuje za využití terapeutických videoher pasivní, aktivní i aktivně asistované cvičení. Použití je hlavně ke zlepšení úchopových funkcí, propriocepce a zachování aferentace.

Gloreha typ Aria je senzorické zařízení indikované pro pacienty s lehkým pohybovým deficitem horní končetiny. Sensory detekující jakýkoliv pohyb horní končetiny dokážou díky speciálnímu softwaru pohyb zpracovat a převést ho na obrazovku, kde pacient pomocí interaktivních her plní úkoly (Kolářová et al., 2019).

- **HWARD** (Hand-wrist assistive rehabilitation device) (Příloha 5, str. 45)

Toto pneumaticky ovládané zařízení poskytuje možnost cvičit se třemi stupni volnosti s možností cvičit úchopovou funkcí ruky. Tři stupně volnosti jsou flexe a extenze zápěstí, flexe a extenze palce v metacarpophalangovém kloubu a čtyři prsty dohromady kolem metacarpophalangového kloubu. Pacient při terapii sedí a dívá se na obrazovku počítače. Tři

jemné popruhy přidrží ruku na mechanismu zařízení, zatímco polstrovaná dlaha drží předloktí na místě. Dlaňová plocha není omezena, což umožňuje vkládání reálných věcí do dlaně. Pohyb kloubů robotického zařízení a následně i pohyb končetin pacienta jsou měřeny senzory snímajícími úhel pohybu kloubu zařízení. Tato funkce umožňuje ovládání virtuální ruky na obrazovce počítače pomocí ruky pacienta ve virtuální realitě v reálném čase (Bonanno et al., 2023).

- **Robotický exoskeleton BCI** (Brain computer interface) (Příloha 6, str.45)

Tréninkový systém BCI-robotické zařízení je založený na motorickém zobrazování. Celý systém se skládá ze systému sběru eeg signálů v reálném čase, řídicího algoritmu a zpětné vazby poskytované robotickým zařízením Manus. Eeg je zaznamenáváno pomocí 16 aktivních elektrod. Signály eeg jsou v reálném čase zesíleny a zpracovány řídicím algoritmem.

Na obrazovce počítače jsou přehrávány videoklipy, aby navedly pacienty k provádění úkolů. Exoskeletonové robotické rameno pomáhá paretické ruce vykonávat reálný pohyb při plnění úkolů (Liu et al., 2022). Dále se systém skládá se platformy a několika prstových dílů, které se k ní připojují. Každá prstová sestava má motor pro metakarpophalangeální kloub a funkční spojení prostřednictvím kolejničové sestavy s proximálním interphalangovým kloubem. Speciální senzory hlídají, aby se prst pohyboval správně a plynule. Tyto senzory sledují rotační osy prstu a zajišťují, aby se otáčely kolem správných bodů. Pohyb prstů je řízen počítačem, který na základě informací ze senzorů a nastavených programů ovládá prstové díly (Bonanno et al., 2023).

2 Možnosti využití robotické rehabilitace v klinické praxi

Hlavní skupiny pacientů, kterým je poskytována rehabilitační péče tvoří ze 70 % neurologičtí pacienti (Oña et al., 2018). V důsledku těchto poruch, mezi které řadíme cévní mozkovou příhodu, traumatické poranění mozku a míchy a neuromuskulární poruchy, dochází k omezení motorické kontroly a jsou klinickou výzvou pro oblast rehabilitační robotiky (Nizamis et al., 2021).

Při postižení horních končetin se u pacientů mohou rozvinout muskuloskeletální problémy, jako jsou paréza, bolest, ztráta citlivosti a spasticita v různých částech horní končetiny, které mohou mít velké dopady v každodenním životě postižených. Mezi oblastmi, které tyto problémy ovlivňují patří snížená schopnost provádět primární úkoly v péči o sebe a plnění životních rolí, což může ovlivnit emocionální, duševní a psychologickou pohodu pacienta.

Pacienti s postižením horních končetin potřebují rehabilitaci ke zlepšení jejich muskuloskeletálního stavu. Rehabilitační robotická zařízení splňují následující principy rehabilitace horních končetin: počty opakování, vysoká intenzita a specifické zaměření jednotlivých úkolů. Fyzikální faktory a údaje o léčbě mohou být ukládány a analyzovány snímacím systémem, což může poskytnout kvantifikovaný podklad pro optimalizaci terapie a urychlit proces zotavení.

Rehabilitační programy jsou navrženy tak, aby stimulovaly plasticitu postižených drah a podporovaly obnovu motorických funkcí. Toho se využívá, když jsou oblasti motorického kortexu narušeny zejména cévní mozkovou příhodou, ale také u neurodegenerativních onemocnění (pacienti s parkinsonismem nebo amyotrofickou laterální sklerózou) (Zoltán et al., 2020).

Proto lze u rehabilitačních robotických zařízení uvažovat o mnoha výhodách: mohou produkovat vysoce kvalitní opakující se pohyby a zvyšovat sílu a intenzitu rehabilitace. Zároveň nabízí terapeutům širokou škálu programů, ze kterých si mohou vybrat a díky interakci člověk-stroj můžeme objektivně měřit progres pacientů a na základě toho upravovat jednotlivé parametry k dosažení cíle terapie. Úkolově orientovaný trénink je jednou z dalších schopností rehabilitačních robotických zařízení, která je považována za hlavní a nejúčinnější metodu pro motorickou rehabilitaci při poruše funkce horních končetin (Moulaei et al., 2023).

2.1 Cévní mozková příhoda

Cévní mozkovou příhodou se rozumí přerušení přívodu a odtoku krve do mozku nebo přerušení kontinuity cévní stěny mozku a extravazace krve, která vede k poškození mozkové tkáně. V roce 2017 z důvodu těchto příčin došlo k úmrtí 6,2 milionu lidí na celém světě a očekává se, že předpokládané zrychlení stárnutí populace tato čísla ještě zvýší (Nizamis et al., 2021).

2.1.1 Etiologie

Cévní onemocnění jsou často hlavní příčinou akutních problémů v nervovém systému. Tyto problémy mohou vznikat kvůli narušení průtoku krve, ale také jako důsledek krvácení do nervových struktur. Mohou být také častou příčinou chronických stavů, způsobených celkovým zúžením mozkových cév v důsledku aterosklerózy nebo dlouhodobého selhávání srdečního a cévního systému, neboť ovlivňují i stav krevního oběhu.

Rozlišujeme ischemii mozkovou aterosklerotickou trombotickou mozkovou, embolickou, kardiálního původu, hematologického původu nebo ischemii celkovou.

Největší množství embolií do mozkových tepen a hypertenzních stavů je spojeno s poruchami kardiovaskulárního systému, včetně aterosklerózy a arteriální embolizace. Embolie mohou vést k ischemickým mrtvicím, ačkoli místní trombóza také může uzavřít mozkové cévy. Avšak kompenzační obvody, kterými jsou myšleny anastomózy, mohou zmírnit následky uzávěru u místní trombózy. Dalšími příčinami jsou onemocnění malých nebo perforujících arterií, arteriální hypertenze, fibrinoidní nekróza a z toho vyplývající lakunární infarkty mozku. Embolie ze srdce mají často špatnou prognózu.

Další příčinou mrtvic jsou hemodynamicky podmíněné mrtvice způsobené nízkým krevním tlakem, v důsledku kterého nedochází k dostatečnému zásobení mozku. Arteriopatie a hyperkoagulační stavy také přispívají k riziku mrtvice. Zástava srdeční činnosti, jako je akutní infarkt myokardu, může způsobit rozsáhlé poškození mozku a trvalé neurologické následky, včetně demence (Pfeiffer, 2007).

2.1.2 Ischemická cévní mozková příhoda

Ischemická cévní mozková příhoda představuje 70 % všech náhlých mozkových příhod. Dochází při ní k poruše perfuze krve uzávěrem některé mozkové tepny nebo snížením průsvitu embolem. Mozková tkáň je nejnáročnější na spotřebu kyslíku, kdy mozková kůra potřebuje 100 mililitrů krve na 100 gramů tkáně za minutu a bílá hmota 50-60 mililitrů na 100 gramů tkáně za minutu. Při poklesu perfuze dochází k zástavě syntézy bílkovin v buňkách a změně činnosti v postižené oblasti. Při poklesu pod 22 mililitrů dochází k zástavě funkce a pod 12 mililitrů dochází k nekrotickým změnám (Pfeiffer, 2007).

2.1.3 Klinické příznaky

Projevy, mezi které řadíme prchavé parézy, parestezie, poruchy vizu odeznívají během minut až hodin nebo přetrvávají déle podle závažnosti poškození. Projevují se neobratností horní končetiny, expresivní nebo percepční afázií. Tyto signály by vždy měly být důvodem vyšetření.

Po těžké ischemické cévní mozkové příhodě jsou příznaky závažné. Většinou začátek provází bezvědomí a vzniká hemiplegie (Pfeiffer, 2007).

2.1.4 Hemoragická cévní mozková příhoda

Mozková krvácení jsou závažnou komplikací, často spojena s vysokým krevním tlakem a aterosklerózou. Tento typ mrtvice často začíná náhle a většinou bývá doprovázen bezvědomím. V porovnání s cévní mozkovou příhodou způsobenou trombotickým embolem, mozková krvácení mohou mít některé podobné příznaky, ale zpočátku jsou obvykle

intenzivnější. Nejčastějším místem krvácení je oblast kapsuly interny a putamenu. Krvácení do mozkového kmene je velmi nebezpečné a je doprovázeno vysokou úmrtností (Pfeiffer, 2007).

2.1.5 Deficity a cíle rehabilitace

Většina pacientů, kteří přežijí cévní mozkovou příhodu trpí nějakou formou postižení nebo handicapu. Cévní mozková příhoda může způsobit řadu různých deficitů, ale nejčastější poruchou je především dopad na motoriku pacienta. Obvykle je omezena motorická kontrola svalů obličeje, paže a nohy na jedné straně těla, která se vyskytuje v různé míře asi u 80 % pacientů.

Cílem rehabilitace po cévní mozkové příhodě je především obnova pohybu a funkce s cílem snížit postižení a podpořit účast v každodenních aktivitách. Kromě motorických poruch se po cévní mozkové příhodě vyskytují i nemotorické poruchy, které také mohou vést k významnému postižení a ovlivňují různou mírou rychlost a rozsah zotavení. Často se setkáváme s kognitivní deficitem (včetně paměti, exekutivních funkcí, pozornosti, koncentrace a bdělosti), špatnou náladou a poruchou komunikačních schopností, které mohou ovlivnit motivaci a interakci, jak s rehabilitačním personálem, tak průběh terapie. Přítomnost smyslových poruch a pruch vnímání (včetně agnosie, apraxie a neglektu), může také ovlivnit účast na rehabilitaci. Tyto deficity často ovlivňují mobilitu, čtení a schopnost řízení pohybu, což může vést k špatné kvalitě života, nízké náladě a sociální izolaci (Brewer et al., 2012).

2.2 Kranocerebrální traumata

Poruchy senzomotorických, kognitivních a psychosociálních funkcí, buď dočasné nebo trvale, jsou běžnými dlouhodobými důsledky akutního poškození mozku způsobeného vnějšími mechanickými silami. Tento stav a jeho následky jsou označovány jako traumatické poranění mozku. Dlouhodobé nebo doživotní postižení a potřeba neurorehabilitace z důvodu středně těžkého až těžkého traumatického poranění mozku postihuje každoročně téměř 10 milionů lidí po celém světě (Nizamis et al., 2021).

2.2.1 Etiologie

Zranění hlavy může mít různé následky v závislosti na jeho intenzitě, které mohou sahát od malých otřesů bez žádných trvalých následků až po vážné otřesy mozku spojené se zlomeninou lebeční kosti. Dokonce i nepatrný úder může způsobit krátkodobou ztrátu vědomí, přičemž délka této ztráty je úměrná závažnosti poškození mozku. Častou komplikací jsou nitrolební krvácení, otok mozku a zlomeniny lebečních kostí, zejména báze lebky. Mezi další komplikace

řadíme rizika rozsáhlých neurologických příznaků, které mohou buď ustoupit, zůstat trvalé nebo se zhoršovat až do stavu ohrožujícího život pacienta (Pfeiffer, 2007).

2.2.2 Komoce mozku

Otřes mozku není spojen s viditelnou anatomickou poruchou mozku a neprojevují se v něm známky zánikových jevů. Při zranění lebky je přítomna komoce vždy, ale důležitější a rozhodující je rozsah poruchy vědomí, které může naznačovat poškození mozku. Pokud příznaky přetrvávají, jedná se pravděpodobně o kontuzi mozku. Bolesti hlavy, závratě a nejistá chůze jsou dalšími symptomy, a mohou být zhoršeny stresovými situacemi nebo fyzickou námahou. Postižení mohou být dezorientovaní a unavení, což může ovlivnit rozhodování a pracovní výkon. Důležitá je adekvátní léčba a rehabilitace (Pfeiffer, 2007).

2.2.3 Kontuze mozku

Zhmoždění mozku je zranění, při kterém je poškozena mozkomíšní tkáň na základě morfologických změn. Bezvědomí a obnubilace mohou trvat déle než u otřesu mozku, někdy i po celé měsíce a délka bezvědomí je klíčová při určování dlouhodobé prognózy a rehabilitace, přičemž může být prodloužena za účelem terapie, udržováním pacienta v umělém spánku.

Zhmoždění mozku může nastat i při malých ohraničených zraněních, například střelnými poraněními. Nejčastěji jsou postiženy frontální laloky, spánkové laloky, mozkový kmen, okcipitální laloky a méně často parietální laloky. Nicméně situace při akutní a dlouhodobé rehabilitaci bývá méně příznivá, zejména u polytraumat, kdy je obtížné získat informace o způsobu zranění. Diagnóza je složitá a vyžaduje vyšetření několika orgánů a jejich funkcí, přičemž prioritou jsou vitální funkce a neurologické vyšetření. Hodnocení stavu vědomí se obvykle provádí pomocí Glasgow Coma Scale, zatímco neurologické vyšetření se zaměřuje na různé aspekty funkce mozku a mozkového kmene (Pfeiffer, 2007).

2.2.4 Deficity a cíle rehabilitace

V oblasti rané rehabilitace po traumatickém poranění mozku je kladen stále větší důraz na význam časného rehabilitačních zásahů a péče. Cíle rané rehabilitace zahrnují stanovení prognózy a snížení komplikací spojených s imobilitou, kontrakturami, dysfunkcí střev a močového měchýře, poraněním kůže a poruchami spánku.

Obnova motorických funkcí u pacientů s traumatickým poraněním mozku je proměnlivá. Ve srovnání s jinými neurologickými poruchami, jako je cévní mozková příhoda, mají pacienti s traumatickým poraněním mozku nižší incidenci, menší závažnost deficitů a lepší prognózu

pro zotavení motorických funkcí. Většina motorického zotavení nastává v prvních 6 měsících po traumatickém poranění.

Běžnou komplikací u mírného až těžkého traumatického poranění mozku je spasticita. Je definována jako rychlostně závislé zvýšení odporu svalu proti natažení svalu. U zranění nad úrovní alfa motorického neuronu dochází ke ztrátě inhibičních signálů a ke spinálnímu strečovému reflexu, což vede k mimovolným kontrakcím antagonistických svalů při pokusu o pohyb.

Další komplikace, které mohou postihnout pacienty po traumatickém poranění mozku mohou být období hypertenze, tachykardie, hypertermie, pocení a zvýšeného svalového tonusu. Přesný mechanismus není přesně znám, ale předpokládá se, že tyto symptomy jsou důsledkem přímého poškození nebo dysfunkce autoregulačních center v mozku, které řídí sympatické reakce a uvolňování katecholaminů (Iaccarino, Bhatnagar a Zafonte 2015).

2.3 Poranění míchy

Téměř 8 z 10 případů poranění míchy je způsobeno dopravními nehodami a pády. Tento stav postihuje převážně mladé dospělé muže a očekávaná délka života po úrazu se pohybuje přibližně od 9 do 35 let u pacientů, kteří utrpěli úraz ve věku 40 let a od 20 až do 53 let u pacientů, kteří utrpěli úraz ve věku 20 let. Délka dožití závisí na velikosti úrazu a rozsahu neurologického poškození. To vede k mnohaleté invaliditě při zhoršeném celkovém zdravotním stavu, zvýšené zátěži pro rodiny postižených pacientů, sociální prostředí a výrazně zvýšeným soukromým i veřejným nákladům na zdravotní péči a také zvýšené životní náklady (Nizamis et al., 2021).

2.3.1 Transverzální léze míšní

Stala se závažným onemocněním až s objevem antibiotik za druhé světové války, jelikož pacienti s transverzální lézí míšní do té doby umírali na sekundární onemocnění, zejména ascendentní infekci močových cest nebo infekce vzniklé z proleženin.

Ve vyspělých zemích je míra přežití, kvůli mladému věku postižených poměrně velká, a toto zranění se objevuje s incidencí 20 případů ročně na milion obyvatel. Mezi postiženými převažují muži v poměru 4-5:1.

Na rozdíl od mozku má mícha omezenou schopnost plasticity. Jedná se o tenký svazek mnoha dlouhých nervových vláken, z nichž některé jsou obalené bílým myelinem, ale většina vláken je nemyelinizovaných. Středem míchy prochází šedá hmota, která obsahuje těla neuronů

zajišťujících lokální spojení mezi segmenty, jako jsou fasciculi propriospinales, a přenos signálů mezi centrálním nervovým systémem a periferními nervy.

Po porušení míchy není možné obnovit spojení ani regenerovat nervové struktury, jako je to možné v případě periferních nervů. Obnova funkce je možná, když dojde pouze k otoku, po úrazu, který postupně ustupuje. Poškození míchy může vést k různým klinickým obrazům, které dále zmíníme.

Během ontogenetického vývoje vytváří mícha různé pohybové vzory z naší fylogenetické minulosti, které jsou po narození reflexně vyvolávány, avšak jsou postupně potlačovány mozkovou kůrou, která je ovlivňuje. Poškozením nadřazených center dochází ke změně autonomní aktivity těchto pohybových vzorů, z nichž některé jsou důležité pro léčebnou rehabilitaci, jako je například reflexní vyprazdňování moči a stolice.

Transverzální léze míchy, pokud je hranice léze ostrá, může vést k jasně vymezenému rozdílu mezi neporušenou a poškozenou částí, což se projevuje příznaky centrální míšní parézy v dolní části těla. Pokud je mezi přerušením a dolní částí míchy poškození, dochází k poruše míšních kořenů, což může způsobit periferní plegii. Výrazným znakem transverzální léze míchy je ostrá hranice poruchy citlivosti, avšak segment poškození míchy neodpovídá dané etáži obratlových trnů, protože z důvodu rychlejšího růstu páteře a pomalejšího růstu míchy dochází k posunutí jednotlivých segmentů. Po narození mícha sahá až do dolních částí páteřního kanálu, ale s postupem času se zkracuje a v dospělosti končí u prvního bederního obratlového těla. Proto pokud je citlivost postižena v určitém segmentu páteře, ve skutečnosti je poškozen nižší míšní segment. Obratlové trny odpovídají míšním segmentům pouze v kranální části krční páteře, pak dochází k posunutí a v kaudální části hrudní páteře přičítáme k číslu hrudního obratle číslo 3 abychom zjistili segment míchy.

Stejně jako u mozku i u míchy může dojít ke komoci. Jedná se o reverzibilní stav, který trvá krátkou dobu a je způsoben otřesem míchy při nárazu nebo při subluxačním posunu ploténky s následnou repozicí. Nedá se klinicky rozeznat kontuze od komoce, avšak rychle dochází k ústupu příznaků s tím, že některé mohou přetrvávat déle (Pfeiffer, 2007).

2.3.2 Kontuze a poranění míchy

Při zlomenině obratle nebo při luxaci, kdy se tvrdé hmoty obratlů hýbou vůči sobě dochází k přerušení míchy a následné kontuzi. Pokud mícha není protržena do páteřního kanálu, jako je tomu například při zlomenině obratlového těla, je šance na úspěšnou reparaci vysoká. Kompresi míchy nebo caudy equiny je důležité operativně uvolnit do několika hodin, aby se zabránilo vzniku otoku, který může způsobit vážné poškození.

Bránice má zvlášť důležitou úlohu, protože sestupuje do břišní oblasti během vývoje a je inervována nervy, které přispívají k plicní ventilaci. I při ochrnutí ostatních dýchacích svalů je bránice schopna udržet adekvátní ventilaci. V minulosti se vysoká míšní poranění považovala za fatální, především kvůli ztrátě inervace bránice (Pfeiffer, 2007).

2.3.3 Deficity a cíle rehabilitace

Existuje silný vztah mezi funkčním stavem a úrovní poškození míchy. Úplné přerušení míchy zahrnuje úplnou ztrátu motorických a senzorických funkcí pod úrovní léze. Inkompletní léze označuje částečné zachování senzorických a motorických funkcí pod úrovní poranění. Stav léze může být nejasný až do konce období spinálního šoku. Přestože přesné stanovení pro konec tohoto období mohou být sporná, zvýšená reflexní aktivita je považována za pozitivní indikátor, kvůli předpokladu zachování motorické aktivity.

Termín tetraplegie se vztahuje k poškození nebo úplné ztrátě motorické a/nebo senzorické funkce v cervikálních segmentech míchy. Tetraplegie způsobuje poruchu funkce paží a také typicky trupu, nohou a pánevních orgánů, tedy všech čtyř končetin.

Termín paraplegie pak označuje poškození nebo ztrátu motorické a/nebo senzorické funkce v hrudním, bederním nebo sakrálním segmentu míchy, přičemž funkce paží zůstává zachována. Paraplegie může zahrnovat poruchy trupu, nohou a pánevních orgánů v závislosti na úrovni poškození.

Traumatické poranění míchy může mít širokou škálu následků, včetně neurogenního poškození močového měchýře a střev, infekci močových cest, dekubitů, ortostatické hypotenze, zlomenin, hluboké žilní trombózy, spasticity, kontraktur, autonomní dysreflexie, plicních a kardiovaskulárních problémů a depresivních poruch. Tyto komplikace mají významný dopad na život pacientů, zejména na jejich nezávislost a kvalitu života (Nas et al., 2015).

2.4 Parkinsonova choroba

Parkinsonova nemoc je progresivní neurologická porucha charakterizovaná pomalým nástupem. Navzdory farmakologickým a chirurgickým zákrokům čelí lidé s Parkinsonovou chorobou neustálému zhoršování mobility a mají problémy provádět aktivity každodenního života. Mezi klinické příznaky onemocnění patří rigidita, bradykineze, třes a ztráta posturální kontroly. Tato poškození vedou k poklesu funkčního stavu, takže lidé s Parkinsonovou chorobou mají potíže se soběstačností a prováděním úkolů, jako je chůze nebo vstávání. Toto snížení funkčního stavu často vede ke ztrátě nezávislosti a poklesu kvality života (Ellis et al., 2008).

2.4.1 Etiologie

Příčina onemocnění není známa. Patofyziologie byla vysvětlena degenerací nigrostriatální dráhy spojenou s nadměrnou akumulací alfa-synukleinu ve specifických oblastech mozku. Mezi zasažené oblasti patří hypotalamus, motorická jádra hlavových nervů a autonomní nervový systém (Moroz et al., 2009).

3 Neuroplasticita

Efektivnost robotických systémů pro motorickou obnovu je do významné míry podmíněna neuroplasticitou.

Neuroplasticita je schopnost nervového systému reagovat na vnitřní nebo vnější podněty reorganizací své struktury, funkce a spojení (Khan et al., 2017). Základní vlastností neuronů je jejich schopnost modifikovat sílu a účinnost synaptického přenosu prostřednictvím rozmanitého množství mechanismů závislých na aktivitě. Tuto schopnost běžně označujeme jako synaptická plasticita. Výzkum v minulém století ukázal, že neurální plasticita je základní vlastností nervových systémů u druhů od hmyzu po člověka. Studie synaptické plasticity byly nejen důležitou hnací silou v neurovědeckém výzkumu, ale také přispívají k blahobytu naší společnosti, protože tento fenomén se podílí na učení a paměti, vývoji mozku, sensorickém tréninku a regeneraci z mozkových lézí (Mateos-Aparicio a Rodríguez-Moreno 2019).

Mozek je samoorganizující se systém, který se přizpůsobuje specifickému prostředí v průběhu prenatálního i postnatálního života. Pochopení adaptivního chování v reakci na poškození nervového systému vyžaduje porozumění interakcí mezi tělem a jeho částmi, vnějším prostředím a nepřetržitou zpětnou vazbou mezi nervovým systémem, tělem a prostředím.

Vzhledem k tomu, že nervový systém a periferie se během života organismu vyvíjejí společně, existuje rozsáhlá shoda mezi jejich vlastnostmi, například motorickými neurony a svaly, které inervují. Poranění části těla tedy může vést ke změnám v nervovém systému. Bylo prokázáno, že imobilizace končetiny po zlomenině bérce u potkanů vyvolává abnormální neuropeptidovou reakci a zánětlivé změny v míše. Samotné poranění nervového systému, například léze brachiálního plexu nebo poranění míchy, vede k významné reorganizaci nejen korových oblastí postižených a nepostižených částí těla, ale také míšních drah a okruhů. Lokální poškození nervového systému může skutečně vést k podstatnému narušení nervových sítí, které jsou základem motorických, sensorických a kognitivních funkcí. Poranění části těla tedy může

vést ke změnám v nervovém systému. Ačkoli je plasticita mozku často vnímána jako pozitivní jev, může mít i negativní důsledky (Khan at al., 2017).

Rozmanitost anatomie a fyziologie mozku mu umožňuje být, jak efektivní, tak flexibilní, maximalizuje celkovou funkci a umožňuje učení a adaptaci na prostředí. Anatomickými stavebními kameny této plasticity jsou synapse a dendrity. Systémově je plasticita založena na složitém vzájemném působení mezi funkční lokalizací, funkční specializací a neuromodulací, což umožňuje mozku využívat svou vnitřní redundanci a adaptabilitu, aby byl formován zkušenostmi a potenciálně se zotavoval z poranění.

Pro správné konceptualizování vztahů mezi jednotlivými složkami je užitečné využít systémově založený síťový přístup k propojenosti mozku. Konkrétní oblasti jsou primárně zodpovědné za jednotlivé funkce (např. Brodmanovy oblasti), ale i další různé oblasti jsou vzájemně propojeny "funkční integrací" časově i prostorově. To vysvětluje, jak jsou různé oblasti spojeny pro udržení a modulaci vnímání motorických procesů. Existuje několik teorií o tom, jak síťové funkce ovlivňují jedna druhou, ale všechny podporují ideu propojené sítě. Síťové modely popisují organizaci mozku na třech úrovních. Na úrovni jednotlivých neuronů a synapsí, na úrovni neuronálních skupin a populací a na úrovni anatomicky odlišných oblastí a odpovídajících mezioblastních drah. Základním předpokladem tohoto přístupu je, že neuronální sítě jsou optimalizovány pro maximální efektivitu a pro vysoký lokální i globální přenos informací. Tento design umožňuje mozku být flexibilní, efektivní a přizpůsobivý různým podmínkám (Jasey a Ward 2019).

Mezi syndromy poškození lidského centrálního nervového systému, v nichž byla neuroplasticita intenzivně studována, patří obnova motoriky po cévní mozkové příhodě. Motorický deficit je přítomen u většiny pacientů s cévní mozkovou příhodou a stupeň motorické obnovy může výrazně ovlivnit, zda se cévní mozková příhoda ukáže jako invalidizující, či nikoli. Jedná se o závažný problém – podle některých odhadů má 55-75 % osob, které přežily cévní mozkovou příhodu, ještě několik měsíců po jejím prodělání funkční omezení a sníženou kvalitu života (Cramer et al., 2011).

Studie na zvířatech ukázaly, že trénink zaměřený na konkrétní úkol a opakované cvičení jsou klíčovými faktory při podpoře synaptogeneze a jsou ústředními prvky rehabilitace po cévní mozkové příhodě. Ukázalo se, že získávání a přenos dovedností do dalších činností lze účinněji dosáhnout zařazením kontextově relevantních a smysluplných aktivit zaměřených na konkrétní úkoly ve srovnání s cvičením v paměti nebo různými pasivními způsoby. Důležité je načasování i dávka terapie, přičemž časnější intervence po úrazu je účinnější než opožděná intervence a rozhodujícími faktory jsou množství a možnosti k nácviku.

Pochopení vzájemné závislosti mezi tělem, nervovým systémem a mnoha faktory, které se podílejí na motorických, senzorických a kognitivních funkcích, je zásadní pro poskytování vhodné rehabilitace osobám s neurologickou dysfunkcí (Khan et al., 2017).

Studie zaměřené na obnovu motoricky po cévní mozkové příhodě uvádí, že souběžně může probíhat mnoho forem neuroplasticity. Poranění oblasti motorické sítě může vést ke spontánním intrahemisférickým změnám. Například oblast ruky se může posunout dorzálně a zasáhnout oblast ramene nebo oblast obličeje. Současně může dojít k posunu mezihemisférové rovnováhy tak, že nepostižená hemisféra má supranormální aktivitu ve vztahu k motorice. Rehabilitace po cévní mozkové příhodě vyvolává řadu mozkových dějů, které se v mnoha případech podobají dějům, jež vznikají při spontánním zotavení po cévní mozkové příhodě. Řadíme mezi ně například návrat k normálnímu stupni laterality. Jiné změny mohou být jedinečné pro terapii, například nové projekce z neuronů na nepoškozené straně mozku do denervovaných oblastí středního mozku a míchy. Míra plasticity mozku po cévní mozkové příhodě může mít v různých časových bodech nebo po různých terapiích velmi odlišný význam.

Podobné formy adaptivní neuroplasticity byly popsány i po jiných formách akutního poškození centrální nervové soustavy, jako je traumatické poškození mozku a poškození míchy. Podobnost mechanismů plasticity napříč různými formami poškození centrální nervové soustavy naznačuje, že plasticita, stejně jako vývoj, využívá pouze omezený repertoár možností (Cramer et al., 2011).

Po poranění nebo poškození mozku dochází k nervově plastickým změnám. Ke změnám může docházet ve dnech, týdnech, měsících i letech po cévní mozkové příhodě. Tyto změny, které probíhají mohou být adaptivní, ale mohou se vyskytnout i změny maladaptivní (Carey et al., 2019). Například nově vzniklá epilepsie je častou komplikací mozkového traumatu, která často vzniká měsíce až roky po úrazu. Tento opožděný nástup naznačuje, že postupné změny v mozku, jako je axonální klíčení a tvorba nových spojení, způsobují změny v neuronální signalizaci a disinhibici, které vedou k vyvolání záchvatů. Mezi další příklady naznačující maladaptivní plasticitu patří chronická bolest a alodynie po poranění končetiny (např. amputace) nebo centrálního nervového systému (dorzální míchy nebo thalamu), dystonie po různých poraněních centrálního nervového systému a autonomní dysreflexie po poranění míchy. Zotavení po traumatu nebo nemoci tak může odrážet jak adaptivní, tak maladaptivní neuroplasticitu, která může probíhat současně (Cramer et al., 2011).

3.1 Neurorehabilitace

Po poškození mozku, jako je například cévní mozková příhoda, je pro člověka výzvou vnímat, pohybovat se, komunikovat a zapojit se do každodenních činností s mozkiem a tělem, které jsou ovlivněny cévní mozkovou příhodou.

Neurorehabilitaci lze definovat jako "usnadnění adaptivního učení". Rehabilitace po cévní mozkové příhodě založená na poznatcích neurovědy je nyní uznávána pro svou schopnost dosahovat dobrých výsledků v oblasti obnovy ztracených funkcí. Základem jsou především zkušenosti a plasticita závislá na učení. Existují různé podmínky, za kterých může být tato plasticita posílena, usnadněna a upevněna. Tyto podmínky pravděpodobně ovlivňují typ neuroplasticity a jejich pochopení pomůže při vývoji intervencí založených na neurovědách (Carey et al., 2019).

Slibné terapie, jako je hloubková mozková stimulace, neinvazivní mozková stimulace, neurofarmakologie, cvičení, kognitivní trénink nebo zpětná vazba pomocí funkční magnetické rezonance v reálném čase, jsou všechny založeny na našem současném chápání plasticity mozku a jsou předmětem intenzivního výzkumu různých patologií. Lepší pochopení mechanismů, jimiž se řídí neuroplasticita po poškození mozku nebo nervových lézích, by pomohlo zlepšit kvalitu života pacientů, a nakonec by ušetřilo náklady národním zdravotnickým institucím po celém světě.

Ve světle výše uvedeného je pravděpodobné, že snahy o lepší porozumění a pochopení neuroplasticity přinese výhody nejen v oblasti zdravotnictví, ale i v dalších aspektech každodenního života (Mateos-Aparicio a Rodríguez- Moreno 2019).

4 Robotická rehabilitace u cévní mozkové příhody

Cévní mozková příhoda patří celosvětově mezi nejčastější příčiny disability v dospělosti, která vyžaduje akutní lékařskou a sociální péči. Mezi nejvíce invalidizující postižení po mrtvici patří ta, která postihují horní končetinu ležící na kontralaterální straně léze, jež zahrnují ztrátu pohybu, koordinace, citlivosti a obratnosti (Lencioni et al., 2021). Podle studií bývá cévní mozková příhoda jednou z hlavních diagnóz, po které člověk trpí poruchou hybnosti a citlivosti horní končetiny, což má především sociální dopad. U 85 % pacientů dochází k částečnému uzdravení, ale u 35 % z nich zůstává dlouhodobě přetrvávající vážné postižení (Aprile et al., 2019). Aspoň nějaký dopad na omezení hybnosti horní končetiny a s tím spojené komplikace v každodenním životě se vyskytuje u 60-80 % jedinců po cévní mozkové příhodě (Hsieh et al., 2018).

Pacienti po cévní mozkové příhodě mohou trpět na jedné straně parézou, hemiplegií nebo pociťují oslabení svalové síly. Po prodělání cévní mozkové příhody se pacientům výrazně doporučuje, aby podstoupili rehabilitační terapii, za účelem snížení dopadu poškození a obnovení funkčních schopností (Rehmat et al., 2018).

Z tohoto důvodu je nejvyšší prioritou vývoj rehabilitačních intervencí zaměřených na zlepšení pohyblivosti horní končetiny a zvýšení soběstačnosti jedinců po cévní mozkové příhodě (Hsieh et al., 2018). I když bylo věnováno značné výzkumné úsilí zlepšení funkční obnově končetiny, motorická rehabilitace na horních končetinách je stále velkým problémem kvůli omezenému pochopení neurofyziologických mechanismů podporujících motorické zotavení a nedostatku intervencí s prokázanou dlouhodobou účinností.

Vzhledem k tomu, že jedním z primárních cílů rehabilitace je osamostatnění pacientů, je velmi často trénink prováděný bezprostředně po prodělání cévní mozkové příhody zaměřen na obnovu chůze. Dovednosti paží jsou však také zásadní nejen pro činnosti, které vyžadují jemné pohyby, jako je uchopování, manipulace, funkční využívání nejrůznějších předmětů, ale také pro komplexní činnosti, jako jsou chůze a rovnovážné reakce. Kromě toho porucha funkce horní končetiny, která je často přetrvávající, způsobuje invalidizující stavy a významně přispívá ke snížení kvality života.

Zotavení po cévní mozkové příhodě závisí na široké škále funkčních a strukturálních procesů v centrálním nervovém systému, nazývaných neuroplasticita, které se mohou objevit spontánně, ale mohou být také vyvolány opakováním pohybů v různých funkčních aktivitách (Lencioni et al., 2021).

4.1 Účinnost robotické terapie horní končetiny z pohledu EBM

Stále probíhá diskuse o účinnosti terapeutických přístupů zaměřených na obnovu motorických funkcí. Mezi tradiční a etablované přístupy patří Bobath koncept a propioceptivní neuromuskulární facilitace, které řadíme do terapie založené na neurologickém podkladě. Tyto přístupy představují běžnou praxi v poskytování rehabilitační péče. Avšak ve srovnání s robotickou rehabilitací nedovolují dosáhnout objektivních výstupů, jako je například rychlost, moment síly, poloha jednotlivých segmentů a další parametry, které by umožnily objektivní hodnocení a monitorování pokroku pacienta a přizpůsobení terapeutických intervencí jeho aktuálnímu stavu. Další výhodou robotické rehabilitace je snížená náročnost na zručnost a dovednosti terapeuta ve srovnání s propioceptivní neuromuskulární facilitací či Bobath konceptem, což umožňuje širší uplatnění této formy terapie (Zhang et al., 2022).

Roboticky asistovaná terapie se v posledních letech objevuje jako nový rehabilitační přístup u pacientů po cévní mozkové příhodě. Byly zaznamenány přínosy roboticky asistované terapie na motorickou aktivitu pacientů, ale existují různé odlišnosti v závislosti na typu robotických zařízení, protokolech, dávkách a problémech pacientů (Hsieh et al., 2018).

Robotické rehabilitační zařízení pomáhají splnit hlavní předpoklady úspěšné rehabilitace, mezi které řadíme hlavně počty opakování, vysokou intenzitu a specifitu jednotlivých úkolů. Z tohoto důvodu můžeme považovat roboticky asistovanou rehabilitaci za slibnou terapii. V nedávných studiích ale nebylo prokázáno, že je terapie za využití robotických zařízení významně lepší oproti běžné terapii. Tento výsledek může naznačovat, že nemusí být nutně lepší alternativou v rehabilitaci po cévní mozkové příhodě (Lee et al., 2020).

Kromě toho nedávné přezkoumání roboticky asistované terapie ukázalo nevýznamné zlepšení nebo malé účinky na denní aktivity po robotické rehabilitaci horní končetiny u pacientů po cévní mozkové příhodě. Hlavním cílem rehabilitace po cévní mozkové příhodě je zlepšit nejen motorickou funkci, ale přenášet tuto zlepšenou funkci do běžných denních aktivit, což mnoho pacientů nebylo schopno provést (Hsieh et al., 2018).

Je ale potřeba zmínit, že existují záznamy analýz pohybů horní končetiny po robotické terapii, které dokazují, že se u těchto jedinců zlepšila koordinace rameno-loket a zároveň se redukovaly kompenzační mechanismy víc než u jedinců, kteří podstoupili běžnou terapii. Dá se tedy říct, že pokud je terapie intenzivní, opakující se a obsahuje funkční motorická cvičení, tak velmi napomáhá zotavení a nabytí ztracených funkcí. I z tohoto důvodu se zavádí v rehabilitační oblasti robotická zařízení, které mají za úkol usnadnit opakování nácviku pohybu horní končetiny. Za přidanou hodnotu lze brát, že robotická zařízení pomáhají obnovovat porušené neurofyziologické dráhy, které by měly být co nejvíce podobné těm u zdravých jedinců. Avšak existuje i spatně pochopené robotickými zařízeními podporované učení v centrální nervové soustavě (Lencioni et al., 2021).

4.2 Příklady účinnosti konkrétních robotických technologií

Ve skupině aktivně asistované robotické terapie byla provedena intervence pomocí Armeo Power, což je exoskeletální robotické zařízení poskytující aktivně asistovanou terapii, používané k rehabilitaci horních končetin a jednotlivé robotické části aktivně napomáhají pohybu postižené paže v určeném rozsahu. Účastníci studie byli proškoleni s herním prostředím virtuální reality se zaměřením na pohyb proximálních částí horních končetin.

Ve skupině pasivní robotické asistence s kompenzací pouze gravitace bylo použito pasivní robotické zařízení Armeo Spring, které je schopné provádět rehabilitaci horní končetiny

ve třech rovinách. Poskytuje kompenzaci gravitace, vyvažuje zařízení a horní končetinu uživatele pomocí pružiny, ale ne pomocí robotických aktuátorů (lineární pohon převádějící rotační pohyb na přímočarý). Účastníci této skupiny trénovali hybnost horní končetiny ve stejném prostředí virtuální reality jako skupina využívající aktivní asistenci.

Někteří pacienti se domnívali, že aktivní robotická asistence je pro jejich terapii přínosná, protože jim umožňuje lepší koordinaci a žádaný pohybový vzorec bez nežádoucích kompenzačních pohybů. Aktivní pomoc však někdy nebyla v souladu se zamýšlenými pohyby pacientů, jelikož robotické aktuátory jsou mechanicky složité a mají značnou setrvačnost, což v důsledku může komplikovat terapii.

Naopak účastníci ve skupině s pasivní asistencí se snažili investovat více úsilí do pohybu končetiny ve srovnání s účastníky ve skupině aktivní asistencí, což vedlo k pocitu úspěchu, naplnění a motivace mezi účastníky, protože mohli plnit zadané úkoly bez vnější dopomoci.

Pasivní rehabilitační zařízení vykazovalo ve srovnání s aktivním asistenčním rehabilitačním zařízením příznivější účinky na funkci SIS (stroke impact scale) a sociální participaci. Kinematická analýza prokázala, že trénování za pomoci aktivně asistenčních robotických zařízení zlepšuje plynulost, ale ne rozsah pohybu a přímočarost, což ukazuje na jemné účinky aktivně asistujícího robotického zařízení.

Pasivní rehabilitační robotické zařízení vykazovalo zejména příznivější účinky s ohledem na funkci SIS a sociální účast SIS ve srovnání se zařízením s aktivní asistencí.

Aktivní asistence by totiž mohla vyvolat snížení participace účastníků, což je tendence minimalizovat metabolické a pohybové nároky, čímž dojde ke snížení aktivní účasti pacientů na terapii a současně se vytvoří závislost na robotickém zařízení. Motorická slabost také může ovlivňovat motivaci, pozornost, úsilí a aktivní zapojení, což souvisí s excitabilitou motorické kůry a motorickou plasticitou. Robotická asistence ve skupině s aktivní asistencí snížila nároky na motorické systémy účastníků, což komplikuje učení se nezbytným základům pro provedení úkolu. Naopak skupina s pasivní asistencí může zaznamenat více úspěchů, což povede ke zlepšení participace.

Z našich zjištění vyplynulo, že aktivní asistenční robotické zařízení neposkytují výrazně vyšší výhodu ve srovnání s pasivními roboty, pokud jde o zlepšení postižení a aktivity. Aktivně asistující robotická zařízení by mohly mít spíše horší vliv na participaci. Navíc s ohledem na složitost a vysokou cenu aktivních asistenčních robotických zařízení by pasivní robotické zařízení mohly poskytovat dostatečnou robotickou rehabilitaci pacientům s cévní mozkovou příhodou (Park et al., 2020).

Pozoruhodné je, že nedávná práce prokázala, že exoskeleton ARMEO indukoval klinické a kinematické zlepšení (tj. synergie flexorů, koordinace a rychlost, pasivní pohyb kloubů, propiocepce ramene, paže a předloktí) prostřednictvím potenciace kortikální plasticity v postižené hemisféře. K potvrzení nálezů a lepšímu pochopení patofyziologie motorické a funkční obnovy po mozkové příhodě jsou tedy zapotřebí další studie (Calabrò et al., 2016).

Klinické výsledky za využití zařízení MIT-MANUS a Inmotion2 jsou slibné. Bylo provedeno několik randomizovaných kontrolovaných studií, které statisticky prokázaly značné snížení postižení pohybů v ramenním a loketním kloubu od začátku robotické rehabilitace až do jejího konce. Toto snížení poškození se projevovalo u akutních, subakutních i chronických pacientů. Na druhou stranu není statisticky prokázán žádný výrazný nárůst funkčního výkonu. Rehabilitace pomocí MIT-MANUS vykazovala značný nárůst ve srovnání se skupinovou terapií a intenzivní tradiční rehabilitací. Multicentrická randomizovaná kontrolní studie ukázala, že MIT-MANUS nevykázal po 12 týdnech výrazně rozdílné výsledky ve srovnání s obvyklou intenzivní terapií, ale ve srovnání s neintenzivní obvyklou terapií vykázal značně lepší výsledky (Babaiasl et al., 2016).

Rehabilitace založená na BCI se nejvíce využívá k řešení motorických poruch po cévní mozkové příhodě a ukázalo se, že překonává většinu konvenčních forem léčby. Kognitivní trénink po mozkové příhodě pomocí BCI také ukázal povzbudivé výsledky. Klinická zlepšení po rehabilitaci založené na BCI naznačují, že intervence založená na BCI podporuje také neuroplasticitu mozku. Ještě důležitější je, že vliv funkčního zotavení byl pozorován napříč motorickými a kognitivními oblastmi. Proto na základě nashromážděných důkazů by měl být způsob léčby mrtvice holistický, komplexní a zaměřený na motorické a kognitivní funkce.

Vzhledem k tomu, že všechna postižení způsobená mrtvicí pocházejí z mozku, rehabilitační přístup založený na BCI může být tím nejvhodnějším způsobem k provádění takového holistického rehabilitačního programu (Mane, Chouhan a Guan 2020).

4.2.1 Exoskeletony-účinnost

Současná literatura naznačuje, že robotická neurorehabilitace může být účinná pouze tehdy, kdy se tyto pokročilé nástroje přidají ke standardní rehabilitaci pacientů s cévní mozkovou příhodou u nejvážněji postižených pacientů, a také během prvních 3 měsíců po cévní mozkové příhodě. V publikovaném systematickém přehledu autorů (Bertani et al., 2017) analyzovali 17 randomizovaných kontrolovaných studií, které zkoumaly efektivitu roboticky asistovaného tréninku horních končetin u pacientů s cévní mozkovou příhodou. Zjistili, že robotická terapie zlepšila funkci horních končetin ve srovnání se samotnou konvenční terapií a že přínosy

přetrvávaly až 6 měsíců po léčbě. Navíc se zdá, že chronickým pacientům nejvíce prospívá intenzivní trénink. Data byla poté potvrzena systematickým přehledem a metaanalýzou analyzující 41 randomizovaných kontrolovaných studií, které zkoumaly účinnost roboticky asistovaného tréninku horních končetin u mírného až středně těžkého postižení paže. Autoři zjistili, že robotická terapie byla ve zlepšení funkce horních končetin účinnější než konvenční terapie a že přínosy přetrvávaly až 12 měsíců po léčbě. Zjistili také, že robotická terapie s vyšší intenzitou vedla k většímu zlepšení funkce horních končetin než terapie s nižší intenzitou. K určení optimálního typu a trvání robotické terapie je však potřeba více kvalitních výzkumů.

Účinnost robotické neurorehabilitace se obecně měří, jako každý druh léčby, pomocí dobře známých a standardizovaných klinických škál, jako je Fugl-Meyerovo hodnocení, 10 metrů a 6 minut chůze. Fugl-Meyerovo hodnocení je nejrozšířenějším hodnotícím nástrojem pro hodnocení motorického postižení a zotavení u pacientů s cévní mozkovou příhodou. Měří postižení horních a dolních končetin i trupu a hodnotí kvalitu pohybu, koordinaci a reflexní aktivitu. Toto hodnocení se často používá k hodnocení dopadu roboticky asistované terapie na motorické funkce u pacientů s mrtvicí pro výzkumné účely.

Na druhé straně klinické škály mají nízkou citlivost k posouzení skutečných neurobiologických účinků pokročilé neuroléčby (Bonanno et al., 2023).

4.3 Možné limity roboticky asistované rehabilitace

Roboticky asistovaná terapie má mnoho výhod, ale stále existují výzvy, které musí takovéto systémy překonat.

Uživatelé těchto systémů mohou mít očekávání, která jsou nerealistická. To může mít na pacienta negativní dopad, který ho může v terapii demotivovat. Proto aby byla robotická rehabilitace účinná, by měli pacienti pohlížet na svou terapii jako na dlouhodobý závazek ke zlepšení jejich celkového stavu.

Vzhledem k tomu, že takovéto systémy jsou obecně vyráběny ve velkém, může jejich přizpůsobení jednotlivcům také představovat problém, který také představuje výzvu, se kterou se robotika musí vypořádat (Suppiah et al., 2023).

Důležité jsou také otázky ohledně bezpečnosti. Existuje mnoho faktorů, které se podílejí na bezpečnosti zařízení. Pasivní zařízení jsou obecně bezpečnější než aktivní zařízení, která jsou náchylnější k selhání.

Zařízení založená na koncových efektech mají nadměrnou volnost pro ramenní kloub a nemohou detekovat nepřirozené pohyby. Zařízení na bázi exoskeletonu naopak dokážou

ovládat každý kloub snadno a nezávisle. Přesto i při použití exoskeletonů, pokud dojde k nesouladu mezi pacientem a zařízením, bude paže umístěna v nepřírodném postavení.

Dalším bezpečnostním problémem je velikost síly, kterou může zařízení vyvinout. Je důležité, aby robotické zařízení vyvíjelo požadované množství síly a ne větší.

Dalším problémem jsou náklady na robotické zařízení. Náklady na robotická zařízení nezahrnují pouze počáteční vývoj zařízení, ale také údržbu zařízení, školení a čas personálu strávený při terapii. Zařízení s více stupni volnosti mají vysoké počáteční náklady i náklady na údržbu, které zahrnují údržbu motorů a senzorů (Babaiasl et al., 2016).

4.4 Klinický přínos robotické rehabilitace

U rehabilitačních robotických zařízení můžeme uvažovat o mnoha výhodách: mohou produkovat vysoce kvalitní opakující se pohyby a zvyšovat sílu a intenzitu rehabilitace. Zároveň nabízí terapeutům širokou škálu programů ze kterých si mohou vybírat a díky interakci člověk-stroj můžeme objektivně měřit progres pacientů a na základě toho upravovat jednotlivé parametry k dosažení cíle terapie. Úkolově orientovaný trénink je jednou z dalších schopností rehabilitačních robotických zařízení, která je považována za hlavní a nejúčinnější metodu pro motorickou rehabilitaci při poruše funkce horních končetin (Moulaei et al., 2023). Avšak současná literatura naznačuje, že robotická neurorehabilitace může být účinná pouze tehdy, když se tyto pokročilé nástroje přidají ke standardní rehabilitaci pacientů (Bonanno et al., 2023).

Závěr

Robotická rehabilitace není pouze doplňkovou terapeutickou metodou, ale nabízí unikátní výhody, které ji činí neocenitelnou součástí léčebného procesu. Jednou z klíčových výhod je schopnost poskytnout pacientům intenzivní rehabilitaci s vysokým počtem opakování, což je klíčový faktor pro stimulaci neuroplasticity a obnovení motorických funkcí.

Robotická rehabilitace umožňuje opakování pohybů v přesně definovaných trajektoriích a rychlostech, což je často obtížné dosáhnout v rámci tradiční fyzioterapie. Tato opakování jsou důležitá pro vytváření nových spojení v mozku a zlepšení motorických dovedností. Díky kontrolovanému prostředí robotických zařízení je možné monitorovat a měřit pokrok pacientů s větší přesností a objektivitou.

Dále je nutné zdůraznit, že robotická rehabilitace poskytuje možnost individualizace terapie a přizpůsobení specifickým potřebám každého pacienta. Tímto způsobem lze lépe cílit na konkrétní deficity a pracovat na jejich zlepšení. Kombinace intenzivní rehabilitace s možností sledování a vyhodnocování pokroku pacientů představuje klíčový nástroj pro optimalizaci terapeutického procesu za účelem dosažení co nejlepších výsledků.

Celkově lze tedy konstatovat, že robotická rehabilitace přináší nejen možnost intenzivního tréninku s vysokým počtem opakování, ale také umožňuje objektivní měření pokroku pacientů. Tato kombinace faktorů přispívá k efektivitě a úspěšnosti terapie a potvrzuje význam robotické rehabilitace v terapii poruch hybnosti horní končetiny.

Klinické studie naznačují, že i přes pokrok v oblasti robotických technologií není robotická rehabilitace samotná dostatečná pro dosažení optimálních terapeutických výsledků. Mnohé studie totiž ukazují, že synergický efekt mezi robotickou rehabilitací a fyzioterapií přináší nejlepší výsledky.

Přidání robotické rehabilitace k obvyklé fyzioterapii může zvýšit efektivitu terapie tím, že umožní pacientům dostat intenzivnější a specifičtější trénink, který je klíčový pro zlepšení motorických funkcí. Tato kombinace umožňuje individuální přizpůsobení terapie potřebám a schopnostem jednotlivých pacientů, což má za následek lepší a trvalejší terapeutické výsledky.

Robotická rehabilitace není pouze izolovanou terapeutickou metodou, ale spíše součástí komplexního terapeutického režimu, který zahrnuje multidisciplinární přístup a komunikaci mezi odborníky z oblasti fyzioterapie, neurologie a biomechaniky, aby byly stanoveny optimální strategie léčby a dosaženo co nejlepších výsledků pro pacienty.

Referenční seznam

APRILE, Irene; CRUCIANI, Arianna; GERMANOTTA, Marco; GOWER, Valerio; PECCHIOLI, Cristiano et al. *Upper Limb Robotics in Rehabilitation: An Approach to Select the Devices, Based on Rehabilitation Aims, and Their Evaluation in a Feasibility Study*. Online. Applied Sciences. 2019, roč. 9, č. 18. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9183920>. [cit. 2024-05-04].

BABAIASL, Mahdiah; MAHDIOUN, Seyyed Hamed; JARYANI, Poorya a YAZDANI, Mojtaba. *A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke*. Online. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. 2016, s. 1-18. ISSN 1748-3107. Dostupné z: <https://doi.org/10.3109/17483107.2014.1002539>. [cit. 2024-04-26].

BERTANI, Rachele; MELEGARI, Corrado; DE COLA, Maria C.; BRAMANTI, Alessia; BRAMANTI, Placido et al. *Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis*. Online. Neurological Sciences. 2017, roč. 38, č. 9, s. 1561-1569. ISSN 1590-1874. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10072-017-2995-5>. [cit. 2024-05-03].

BONANNO, Lilla; CANNULI, Antonio; PIGNOLO, Loris; MARINO, Silvia; QUARTARONE, Angelo et al. *Neural Plasticity Changes Induced by Motor Robotic Rehabilitation in Stroke Patients: The Contribution of Functional Neuroimaging*. Online. Bioengineering. 2023, roč. 10, č. 8. ISSN 2306-5354. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/bioengineering10080990>. [cit. 2023-10-14].

BRESSI, Federica; CRICENTI, Laura; BRAVI, Marco; PANNUNZIO, Fabiana; CORDELLA, Francesca et al. *Treatment of the Paretic Hand with a Robotic Glove Combined with Physiotherapy in a Patient Suffering from Traumatic Tetraparesis: A Case Report*. Online. Sensors. 2023, roč. 23, č. 7. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23073484>. [cit. 2024-04-27].

BREWER, L.; HORGAN, F.; HICKEY, A. a WILLIAMS, D. *Stroke rehabilitation: recent advances and future therapies*. Online. QJM. 2012, roč. 106, č. 1, s. 11-25. ISSN 1460-2725. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/qjmed/hcs174>. [cit. 2024-04-23].

CALABRÒ, Rocco Salvatore; RUSSO, Margherita; NARO, Antonino; MILARDI, Demetrio; BALLETTA, Tina et al. *Who May Benefit From Armeo Power Treatment? A Neurophysiological Approach to Predict Neurorehabilitation Outcomes*. Online. PM&R. 2016,

roč.8, č. 10, s. 971-978. ISSN 1934-1482. Dostupné

z: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.02.004>. [cit. 2024-04-09].

CAREY, LEEANNE; WALSH, ALISTAIR; ADIKARI, ACHINI; GOODIN, PETER; ALAHAKOON, DAMMINDA et al. *Finding the Intersection of Neuroplasticity, Stroke Recovery, and Learning: Scope and Contributions to Stroke Rehabilitation*. Online. *Neural Plasticity*. 2019, roč. 2019, s. 1-15. ISSN 2090-5904. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2019/5232374>. [cit. 2024-02-05].

CRAMER, STEVEN. C.; SUR, MRIGANKA.; DOBKIN, BRUCE. H.; O'BRIEN, CHARLES.; SANGER, TERENCE. D. et al. *Harnessing neuroplasticity for clinical applications*. Online. *Brain*. 2011, roč. 134, č. 6, s. 1591-1609. ISSN 0006-8950. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/brain/awr039>. [cit. 2024-02-05].

ELLIS, TERRY; KATZ, DOUGLAS I; WHITE, DANIEL K; DEPIERO, T JOY; HOHLER, ANNA D et al. *Effectiveness of an Inpatient Multidisciplinary Rehabilitation Program for People With Parkinson Disease*. Online. *Physical Therapy*. 2008, roč. 88, č. 7, s. 812-819. ISSN 0031-9023. Dostupné z: <https://doi.org/10.2522/ptj.20070265>. [cit. 2024-05-03].

GULL, MUHAMMAD AHSAN; BAI, SHAOPING A BAK, THOMAS. *A Review on Design of Upper Limb Exoskeletons*. Online. *Robotics*. 2020, roč. 9, č. 1. ISSN 2218-6581. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/robotics9010016>. [cit. 2023-09-07].

HSIEH, YU-WEI; LIN, KEH-CHUNG; WU, CHING-YI; SHIH, TSAI-YU; LI, MING-WEI et al. *Comparison of proximal versus distal upper-limb robotic rehabilitation on motor performance after stroke: a cluster controlled trial*. Online. *Scientific Reports*. 2018, roč. 8, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20330-3>. [cit. 2023-05-08].

IACCARINO, MARY ALEXIS; BHATNAGAR, SAURABHA A ZAFONTE, ROSS. *Rehabilitation after traumatic brain injury*. Online. In: *Traumatic Brain Injury, Part I. Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier, 2015, s. 411-422. ISBN 9780444528926. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52892-6.00026-X>. [cit. 2024-04-25].

JASEY, NEIL A WARD, IRENE. *Neuroplasticity in Brain Injury: Maximizing Recovery*. Online. *Brain Injury Medicine and Rehabilitation*. 2019, č. 7, s. 333-340. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40141-019-00242-7>. [cit. 2024-04-04].

KHAN, FARY; AMATYA, BHASKER; GALEA, MARY P.; GONZENBACH, ROMAN A KESSELRING, JÜRIG. *Neurorehabilitation: applied neuroplasticity*. Online. *Journal of Neurology*. 2017, s. 603-615. ISSN 0340-5354. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00415-016-8307-9>. [cit. 2024-02-05].

KOLÁŘOVÁ, Barbora; STACHO, Jiří; JIRÁČKOVÁ, Martina; KONEČNÝ, Petr a NAVRÁTILOVÁ, Lucie. *Počítačové a robotické technologie v klinické rehabilitaci*. 2., přepracované a doplněné vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2019. ISBN 978-80-244-4266-2.

LEE, Stephanie Hyeyoung; PARK, Gyulee; CHO, Duk Youn; KIM, Ha Yeon; LEE, Ji-Yeong 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*. Online. Scientific Reports. 2020, roč. 10, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58630-2>. [cit. 2023-05-08].

LENCIONI, T.; FORNIA, L.; BOWMAN, T.; MARZEGAN, A.; CARONNI, A. et al. *A randomized controlled trial on the effects induced by robot-assisted and usual-care rehabilitation on upper limb muscle synergies in post-stroke subjects*. Online. Scientific Reports. 2021, roč. 11, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84536-8>. [cit. 2023-05-08].

LIU, Lingyu; JIN, Minxia; ZHANG, Linguo; ZHANG, Qiuzhen; HU, Dunrong et al. *Brain-Computer Interface-Robot Training Enhances Upper Extremity Performance and Changes the Cortical Activation in Stroke Patients: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study*. Online. Frontiers in Neuroscience. 2022, roč. 16. ISSN 1662-453X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.809657>. [cit. 2024-04-26].

MACIEJASZ, Paweł; JÖRG ESCHWEILER Jörg; GERLACH-HAHN Kurt; JANSEN-TROY, Arne Steffen Leonhardt JANSEN-TROY a Steffen LEONHARDT Steffen. *A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation*. Online. BioMed Central [online]. 2014. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-0003-11-3>. [cit. 2024-03-11].

MANE, Ravikiran; CHOUHAN, Tushar a GUAN, Cuntai. *BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond*. Online. Journal of Neural Engineering. 2020, roč. 17, č. 4. ISSN 1741-2560. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aba162>. [cit. 2024-05-03].

MATEOS-APARICIO, Pedro a RODRÍGUEZ-MORENO, Antonio. *The Impact of Studying Brain Plasticity*. Online. Frontiers in Cellular Neuroscience. 2019, roč. 13. ISSN 1662-5102. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00066>. [cit. 2024-04-05].

MOROZ, Alex; EDGLEY, Steven R.; LEW, Henry L.; CHAE, John; LOMBARD, Lisa A. et al. *Rehabilitation Interventions in Parkinson Disease*. Online. PM&R. 2009, roč. 1, č. 3S. ISSN 1934-1482. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2009.01.018>. [cit. 2024-05-03].

MOULAEI, Khadijeh; BAHAADINBEIGY, Kambiz; HAGHDOOSTD, Ali Akbar; NEZHAD, Mansour Shahabi a SHEIKHTAHERI, Abbas. *Overview of the role of robots in upper limb disabilities rehabilitation: a scoping review*. Online. Archives of Public Health. 2023, roč. 81, č. 1. ISSN 2049-3258. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s13690-023-01100-8>. [cit. 2024-04-27].

NAS, Kemal; YAZMALAR, Levent; ŞAH, Volkan; AYDIN KADRIYE ÖNEŞ, Abdulkadir a , Kadriye. *Rehabilitation of spinal cord injuries*. Online. World Journal of Orthopedics. 2015, roč. 6, č. 1. ISSN 2218-5836. Dostupné z: <https://doi.org/10.5312/wjo.v6.i1.8>. [cit. 2024-04-25].

NAVRÁTIL, Leoš a PŘÍHODA, Aleš et al. *Robotická rehabilitace*. Praha: Grada, 2022. ISBN 978-80-271-0665-3.

NIZAMIS, Kostas; ATHANASIOU, Alkinoos; ALMPANI, Sofia; DIMITROUSIS, Christos a ASTARAS, Alexander. *Converging Robotic Technologies in Targeted Neural Rehabilitation: A Review of Emerging Solutions and Challenges*. Online. Sensors. 2021, roč. 21, č. 6. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21062084>. [cit. 2024-03-13].

OÑA, E. D.; CANO-DE LA CUERDA, R.; SÁNCHEZ-HERRERA, P.; BALAGUER, C. a JARDÓN, A. *A Review of Robotics in Neurorehabilitation: Towards an Automated Process for Upper Limb*. Online. Journal of Healthcare Engineering. 2018, roč. 2018, s. 1-19. ISSN 2040-2295. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2018/9758939>. [cit. 2024-04-23].

PARK, Jin Ho; PARK, Gyulee; KIM, Ha Yeon; LEE, Ji-Yeong; HAM, Yeajin et al. *A comparison of the effects and usability of two exoskeletal robots with and without robotic actuation for upper extremity rehabilitation among patients with stroke: a single-blinded randomised controlled pilot study*. Online. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2020, roč. 17, č. 1. ISSN 1743-0003. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00763-6>. [cit. 2023-08-13].

PFEIFFER, Jan. *Neurologie v Rehabilitaci*. Praha: Grada Publishing, 2007. ISBN 978-80-247-1135-5.

QASSIM, Hassan M. a WAN HASAN, W. Z. *A Review on Upper Limb Rehabilitation Robots*. Online. Applied Sciences. 2020, roč. 10, č. 19. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10196976>. [cit. 2023-09-06].

REHMAT, Naqash; ZUO, Jie; MENG, Wei; LIU, Quan; XIE, Sheng Q. et al. *Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review*. Online. International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2018, roč. 2, č. 3, s. 283-295. ISSN 2366-5971. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s41315-018-0064-8>. [cit. 2023-05-08].

SUPPIAH, Ravi; KIM, Noori; ABIDI, Khalid a SHARMA, Anurag. *A comprehensive review of motor movement challenges and rehabilitative robotics*. Online. Smart Health. 2023, roč. 29. ISSN 23526483. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2023.100402>. [cit. 2024-05-02].

TAKAHASHI, C. D.; DER-YEGHIAIAN, L.; LE, V.; MOTIWALA, R. R. a CRAMER, S. C. *Robot-based hand motor therapy after stroke*. Online. Brain. 2008, roč. 131, č. 2, s. 425-437. ISSN 0006-8950. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/brain/awm311>. [cit. 2024-04-27].

ZHANG, Liping; JIA, Gongwei; MA, Jingxi; WANG, Sanrong a CHENG, Li. *Short and long-term effects of robot-assisted therapy on upper limb motor function and activity of daily living in patients post-stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials*. Online. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2022, roč. 19, č. 1. ISSN 1743-0003. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01058-8>. [cit. 2023-05-08].

ZOLTÁN, Zsigmond; VAIDA, Calin; KINGA, Andrea; TUCAN, Paul; SIMORI, Gábor et al. *The Impact of Robotic Rehabilitation on the Motor System in Neurological Diseases. A Multimodal Neurophysiological Approach*. Online. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020, roč. 17, č. 18. ISSN 1660-4601. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186557>. [cit. 2024-05-02].

Seznam zkratek

BCI	brain computer interface
HWARD	hand wrist assistive robotic device
SIS	stroke impact scale
Str.	strana
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
EEG	elektroencefalografické
tj.	to je
např.	například

Seznam Příloh

Příloha 1 MIT-MANUS

Příloha 2 Armeo Spring

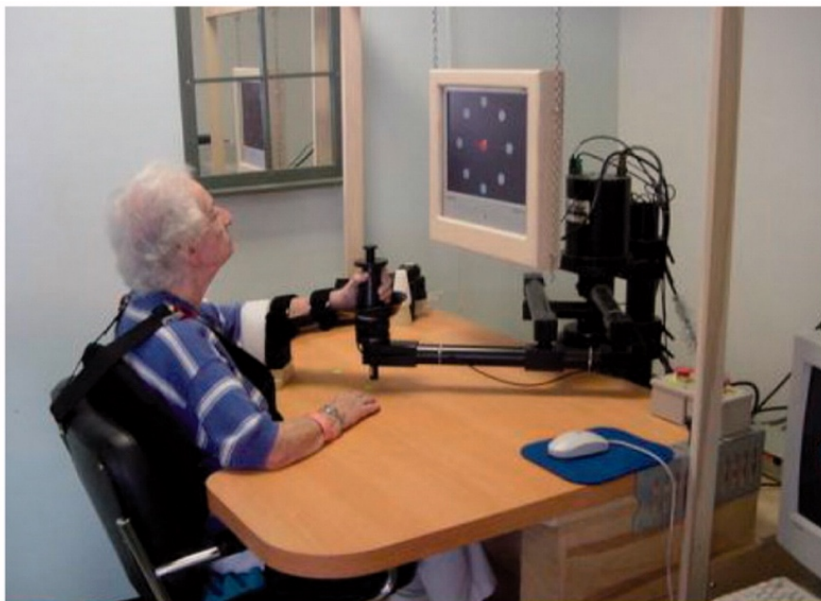
Příloha 3 Robotický systém Gloreha

Příloha 4 Gloreha Sinfonia

Příloha 5 HWARD robotické zařízení

Příloha 6 BCI robotické zařízení

Přílohy



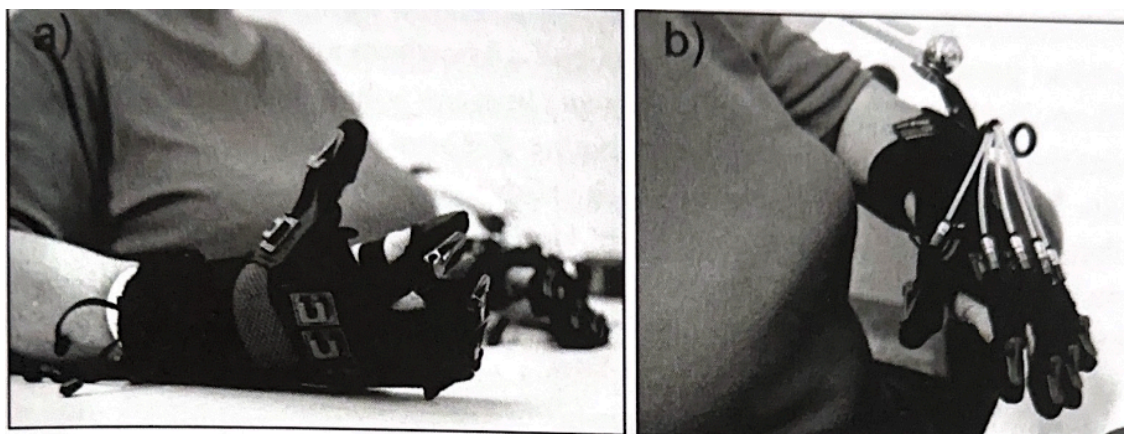
Příloha 1 MIT-MANUS a jeho komerční verze Inmotion2 (Babaiasl et al., 2016)



Příloha 2 Armeo Spring (Kolářová et al., 2019)



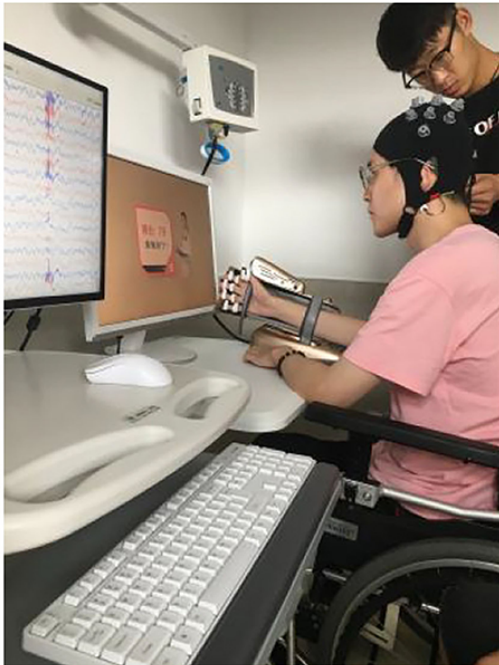
Příloha 3 Robotický systém Gloreha (Bressi et al., 2023)



Příloha 4 Gloreha Sinfonia (Kolářová et al., 2019)



Příloha 5 HWARD robotické zařízení (Takahashi et al., 2008)



Příloha 6 BCI robotické zařízení (Liu et al., 2022)